

PORTOVESME S.R.L.

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DISCARICA DI GENNA LUAS

PREVISIONE DEL MASSIMO LIVELLO RAGGIUNGIBILE DALLA FALDA NELL'AREA DELLA NUOVA DISCARICA DI GENNA LUAS

Rev. n°	Descrizione	Data	Prof. Ing. Battista Grosso Dott. Ing. Marco Cigagna Dott. Ing. Cristina Levanti
1	Emissione	Dicembre 2017	



CONSORZIO INTERUNIVERSITARIO NAZIONALE
PER L'INGEGNERIA DELLE GEORISORSE
Palazzo Balbo, Corso Vittorio Emanuele II, 244 - 00186 Roma ISO 9001:2008 N.3105914/S



PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DISCARICA DI GENNA LUAS	Revisione:	0
	Data:	dicembre 2017
PREVISIONE DEL MASSIMO LIVELLO RAGGIUNGIBILE DALLA FALDA	Pagina:	1 di 22

INDICE

INDICE DELLE FIGURE	2
INDICE DELLE TABELLE	2
1 Premessa	3
2 Metodologia e Modello concettuale di riferimento	5
3 Modello numerico	6
4 Procedura di calibrazione della permeabilità	9
5 Analisi del comportamento della falda nel periodo 2001-2017	14
6 Previsione del livello massimo raggiungibile dalla falda	17
7 Considerazioni conclusive.....	20

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DISCARICA DI GENNA LUAS	Revisione:	0
	Data:	dicembre 2017
PREVISIONE DEL MASSIMO LIVELLO RAGGIUNGIBILE DALLA FALDA	Pagina:	2 di 22

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Individuazione planimetrica del modello di calcolo	7
Figura 2. Modello numerico tridimensionale.....	8
Figura 3. Ricostruzione stratigrafica. Planimetria (a sinistra la superficie topografica Slice 1 e a destra la Slice 2) e sezioni di riferimento	9
Figura 4. Aree di infiltrazione.....	10
Figura 5. Procedura di calibrazione del modello di calcolo: punti dell'area di discarica in cui il livello di falda è noto (misure del luglio 2017) (mappa centrale della figura), diagramma di confronto fra le misure calcolate e quelle misurate (a sinistra in basso), andamento della funzione obiettivo (funzione che minimizza la differenza fra le misure calcolate e quelle osservate)	11
Figura 6. Distribuzione della conducibilità idraulica ottenuta con la calibrazione del modello. A sinistra il primo layer e a destra il secondo layer	11
Figura 7. Piezometriche e campo di velocità allo stato stazionario	12
Figura 8. Confronto tra l'interpolazione dei dati piezometrici del 2017 (a sinistra) e le isopiezometriche calcolate (a destra)	13
Figura 9. Confronto tra la piezometrica misurata e calcolata nei piezometri di riferimento	14
Figura 10. Infiltrazione efficace utilizzata in input al modello	16
Figura 11. Confronto tra i risultati del modello e le misure effettuate nel periodo 2001-2017 nei piezometri PZ7A e PZ8.....	17
Figura 12. Oscillazione della falda nei piezometri a monte idraulico	18
Figura 13. Oscillazione della falda nei piezometri centrali.....	19
Figura 14. Oscillazione della falda nei piezometri di valle	19

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Livelli piezometrici simulati dal modello di calcolo in regime transitorio	20
---	----

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DISCARICA DI GENNA LUAS	Revisione:	0
	Data:	dicembre 2017
PREVISIONE DEL MASSIMO LIVELLO RAGGIUNGIBILE DALLA FALDA	Pagina:	3 di 22

1 Premessa

Il presente documento descrive l'analisi sviluppata al fine di prevedere la massima quota che la falda superficiale può raggiungere nell'area di costruzione della nuova discarica di Genna Luas e di verificare la sussistenza del franco idraulico previsto dal D.Lgs 36/2003 per le discariche di rifiuti non pericolosi.

Il regime della falda è stato monitorato nel periodo 2001 -2017 mediante i piezometri PZ7A e PZ8; a partire dal 2015, al fine di avere informazioni su tutta l'area dell'ampliamento in progetto, sono stati realizzati ulteriori piezometri e i dati della serie 2001 -2017 sono stati integrati con le nuove misure. Dato, però, che il livello della falda ha raggiunto il valore massimo nel 2011 (vedi serie di misure nei piezometri PZ7A e PZ8) si è posto il problema di calcolare il livello della falda in quel periodo su tutta l'area e, in particolare, nei punti in cui successivamente sono stati ubicati i nuovi piezometri.

Il problema è stato affrontato simulando, mediante un modello numerico, il regime della falda superficiale in regime non stazionario con l'obiettivo specifico di riprodurre l'andamento del livello della falda nell'area della discarica in funzione dell'infiltrazione superficiale e quindi della piovosità. L'affidabilità dei risultati della simulazione è legata sia al livello di conoscenza delle caratteristiche proprie dell'acquifero sia all'accuratezza con cui il modello numerico descrive i fenomeni reali. A questo proposito sono doverose le seguenti considerazioni preliminari:

- come si vedrà l'acquifero è costituito da una arenaria fratturata ossia, concettualmente, da un mezzo discontinuo costituito da blocchi di materiale integro e impermeabile a contatto fra loro attraverso un sistema di giunti permeabili nei quali si sviluppa il moto dell'acqua; la descrizione di dettaglio del moto dei fluidi nei mezzi fratturati è molto complessa e richiede una conoscenza molto approfondita delle famiglie di discontinuità che caratterizzano l'ammasso, sia in termini geometrici sia in termini idraulici. In particolare è necessario ricostruire il sistema di discontinuità in termini di famiglie e, per ogni famiglia, definire le grandezze che hanno rilevanza ai fini del moto dei fluidi, ossia: la giacitura, la persistenza, l'apertura e la permeabilità. Bisognerebbe inoltre definire i rapporti gerarchici fra le famiglie, relativamente alle mutue intersezioni. Si tenga conto che i parametri geomeccanici dovrebbero essere rilevati su affioramenti della massa rocciosa relativamente estesi ed aventi varie giaciture spaziali; non sono a questo scopo adatti i dati rilevabili lungo le carote dei

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DISCARICA DI GENNA LUAS	Revisione:	0
	Data:	dicembre 2017
PREVISIONE DEL MASSIMO LIVELLO RAGGIUNGIBILE DALLA FALDA	Pagina:	4 di 22

sondaggi. Infine, si consideri che, in ogni caso, il modello risultante sarebbe affetto da elementi di incertezza rispetto all'obiettivo di riprodurre l'andamento del livello della falda nei particolari punti in cui sono ubicati i piezometri. Infatti la ricostruzione della massa rocciosa sede del moto di falda sarebbe aderente alla realtà solo in termini statistici (stesse famiglie di discontinuità con stessa spaziatura, persistenza etc.. ma non stesse singole discontinuità ubicate nei punti in cui sono realmente posizionate) per cui non sarebbe in ogni caso possibile riprodurre, in un particolare punto (i.e. in un piezometro) lo stesso regime osservato del livello di falda.

- alla luce delle considerazioni precedenti, posto che la costruzione di un modello di mezzo discontinuo richiederebbe tempo e risorse importanti per acquisire i dati e costruire il modello e che, comunque, anche con un tale modello, non sarebbe possibile riprodurre con il dettaglio e la precisione richiesta i fenomeni in studio, l'acquifero è stato descritto in modo semplificato, mediante un mezzo continuo equivalente, permeabile per porosità; la distribuzione spaziale della permeabilità è stata calibrata in modo da restituire una piezometrica aderente a quella misurata. L'obiettivo di questa modellazione è quello di riprodurre, nel modo migliore possibile, i fenomeni che interessano l'acquifero e, in particolare, l'andamento temporale del livello della falda; a seguito dell'analisi dei risultati della simulazione e del livello di precisione con cui il modello simula i fenomeni osservati, si potrà valutare la possibilità di adottare o meno il modello ai fini della riproduzione del regime temporale della falda e, quindi, della determinazione del massimo livello raggiunto nel periodo 2001 -2017, nell'area di costruzione della discarica. Lo studio è stato affrontato con la consapevolezza che, probabilmente, mentre i caratteri generali dell'acquifero potranno essere simulati in modo aderente alla realtà, i valori numerici potranno non avere la precisione necessaria a sviluppare un ragionamento affidabile sul valore del franco idraulico. Si tenga conto infatti che:
 - o l'adozione di un modello continuo non consente di riprodurre condizioni che possono, invece, verificarsi in un acquifero fratturato; si pensi alla possibilità che in due piezometri vicini di un mezzo fratturato si abbiano livelli completamente diversi se uno dei due piezometri interseca una o più discontinuità permeabili e l'altro non ne interseca alcuna.

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DISCARICA DI GENNA LUAS	Revisione:	0
	Data:	dicembre 2017
PREVISIONE DEL MASSIMO LIVELLO RAGGIUNGIBILE DALLA FALDA	Pagina:	5 di 22

- i parametri dell'acquifero fratturato (in particolare la permeabilità e il coefficiente di immagazzinamento) variano in modo non continuo nello spazio. In particolare, la capacità di immagazzinamento dell'acquifero è riferibile quasi completamente al volume del sistema delle fratture ed è dunque molto ridotta; conseguentemente, eventi di pioggia anche relativamente modesti determinano elevati e veloci incrementi del livello idrico nelle discontinuità, in particolare, molto maggiori di quelli che si avrebbero in un mezzo poroso di permeabilità complessiva equivalente.

2 Metodologia e Modello concettuale di riferimento

Come anticipato in premessa l'analisi del regime della falda è effettuata con un modello numerico previsionale che, sulla base delle caratteristiche stratigrafiche e idrogeologiche della zona, riproduce l'andamento della falda in funzione degli apporti idrici.

Il modello numerico traduce il modello concettuale idrogeologico del sito che è stato costruito sulla base delle seguenti informazioni riportate negli elaborati di progetto:

- assetto geologico in riferimento alla formazione geologica sede della falda ed ai suoi rapporti con lo strato carbonatico che ne costituisce il contatto impermeabile di monte;
- stratigrafia;
- caratteristiche e valori dei parametri dell'acquifero superficiale;
- piezometria;
- alimentazione idrica.

In sintesi, il modello concettuale è caratterizzato dai seguenti elementi:

- l'acquifero, costituito dalla successione stratigrafica rappresentata da: materiali di riporto, alluvioni di età Quaternaria, Arenarie Cambriche, è di tipo freatico ed è delimitato a W dal contatto con lo strato carbonatico mineralizzato a giacitura sub verticale su cui è impostata la miniera di Genna Luas (Fig. 11 del documento Studio Idrologico e Idrogeologico dell'area di Genna Luas allegato allo SIA);
- il valore della conducibilità idraulica è caratteristico delle tre formazioni ($10^{-2} > K > 10^{-3}$ m/s, per i materiali di riporto, $10^{-3} > K > 10^{-5}$ m/s per le alluvioni di età Quaternaria, $K < 10^{-8}$ m/s per le

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DISCARICA DI GENNA LUAS	Revisione:	0
	Data:	dicembre 2017
PREVISIONE DEL MASSIMO LIVELLO RAGGIUNGIBILE DALLA FALDA	Pagina:	6 di 22

Arenarie Cambriche); nelle arenarie, è legato al grado di fratturazione ed è decrescente con la profondità fino a diventare molto basso ed a delineare, dunque, la base dell'acquifero;

- la piezometria è caratterizzata da una direzione generale E - W del gradiente che assume valori elevati a monte (22.7%) e più bassi a valle (7.97%). La forma della superficie evidenzia due assi di drenaggio di cui uno in posizione centrale rispetto al sito della nuova discarica e l'altro spostato a nord (Figura 4.9.2.2.3/I – Carta delle isofreatiche della falda e del deflusso sotterraneo dell'Allegato 1 allo SIA);
- l'alimentazione della falda è rappresentata dalla sola infiltrazione superficiale.

L'arenaria costituente l'acquifero è permeabile principalmente per fratturazione (si vedano a questo proposito le foto delle cassette dei sondaggi riportate nell'Allegato 1 dello Studio di impatto ambientale); il moto dell'acqua di falda si sviluppa attraverso la fitta rete di fratture che caratterizzano la massa rocciosa ed è dunque intrinsecamente discontinuo. Questo significa che le quote piezometriche e il flusso idrico variano in modo discontinuo da punto a punto potendo assumere valori molto differenti fra punti anche vicini. D'altra parte il reticolo di fratture, in virtù della sua diffusione e intensità, determina, a grande scala, un moto complessivamente continuo che può essere descritto da un reticolo di filtrazione (curve isopiezometriche e linee di flusso). Il modello numerico assume che l'acquifero sia costituito da un mezzo poroso continuo di permeabilità equivalente a quella del mezzo fratturato reale; esso, dunque, non è in grado di riprodurre i "salti" locali di piezometria tipici degli acquiferi fratturati ma restituisce una superficie piezometrica che, solo complessivamente, approssima a quella reale.

3 Modello numerico

L'acquifero è stato modellato con un mezzo continuo assimilabile, sotto il profilo idraulico, a quello reale. Il modello descrive un'area quadrilatera di circa 38.4 ha, con dimensioni 750 m in direzione NNW – SSE e di 650 m in direzione perpendicolare. Il limite W è rappresentato dalla faglia di contatto fra la formazione delle arenarie cambriche e il banco calcareo in cui è impostata la miniera di Genna Luas; il limite Est è modellato mediante una frontiera permeabile in corrispondenza della quale è stato fissato il carico piezometrico. I limiti N e S sono costituiti da frontiere impermeabili coincidenti con la direzione delle linee di flusso.

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DISCARICA DI GENNA LUAS	Revisione:	0
	Data:	dicembre 2017
PREVISIONE DEL MASSIMO LIVELLO RAGGIUNGIBILE DALLA FALDA	Pagina:	7 di 22

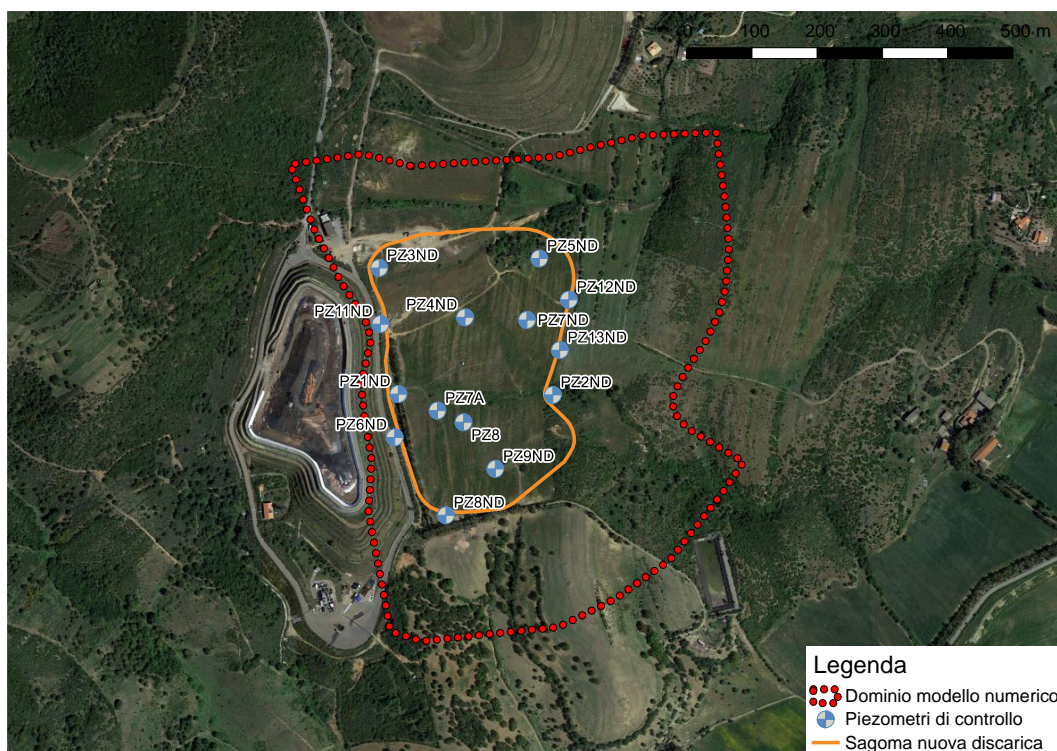


Figura 1. Individuazione planimetrica del modello di calcolo

La base del modello è costituita da una superficie impermeabile a profondità di circa 170 m slm che rappresenta la parte impermeabile delle arenarie; la superficie superiore riproduce la superficie topografica.

La stratigrafia del sottosuolo è stata ricostruita sulla base delle stratigrafie dei sondaggi realizzati nell'area (Allegato 1 allo SIA - Indagini geognostiche e caratterizzazione geotecnica – idrogeologica del sito - e documento Sondaggi geognostici e piezometri integrativi del LUGLIO-AGOSTO 2017 redatto da DR. ANTONELLO ANGIUS) e comprende, dall'alto in basso, le seguenti formazioni:

1. materiali di riporto costituiti prevalentemente da terreni di natura argillosa con inclusi clasti eterogenei di dimensioni variabili dal cm a pochi decimetri, con potenza compresa fra 1 e 2 metri e alluvioni di età Quaternaria presumibilmente riconducibili all'Olocene costituite da terreni di natura argilloso-limoso-sabbiosa a cui si intercalano lenti ciottolose, con potenza variabile fra 3 e 5 m;
2. Arenarie Cambriche in facies puramente arenaceo terrigena che si presentano estremamente fratturate nella parte immediatamente sottostante le alluvioni e

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DISCARICA DI GENNA LUAS	Revisione:	0
	Data:	dicembre 2017
PREVISIONE DEL MASSIMO LIVELLO RAGGIUNGIBILE DALLA FALDA	Pagina:	8 di 22

progressivamente più compatte all'aumentare della profondità ed hanno potenza variabile fra 34 e 40 metri.

Il dominio di calcolo è stato suddiviso in due layers, ciascuno dei quali discretizzato in 3836 elementi finiti prismatici a base triangolare, connessi mediante 2008 nodi. La maglia di calcolo a base triangolare, di tipo Delaunay, viene generata in modo casuale nel rispetto del criterio di Delaunay (angoli interni simili).

I parametri idrogeologici sono stati desunti dalla documentazione di progetto; in particolare la permeabilità è stata misurata mediante prove Lugeon nei sondaggi PZ1ND e PZ2ND ed estesa all'intero dominio di calcolo mediante la procedura di calibrazione descritta al paragrafo successivo.

L'alimentazione è rappresentata dall'infiltrazione superficiale.

Nella Figura 1 e Figura 2 sono rappresentate rispettivamente la geometria del modello e la stratigrafia.

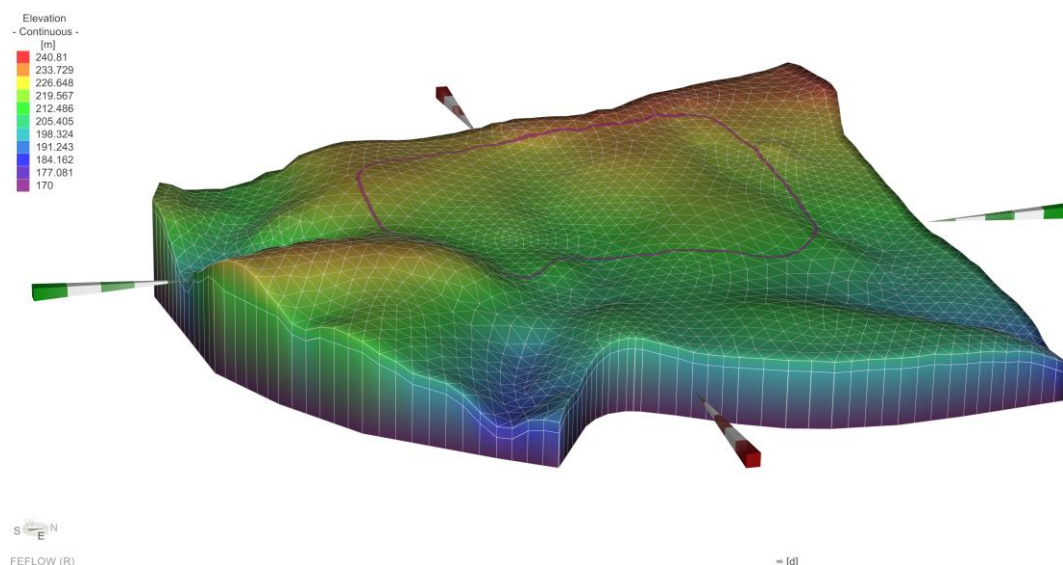


Figura 2. Modello numerico tridimensionale

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DISCARICA DI GENNA LUAS	Revisione:	0
	Data:	dicembre 2017
PREVISIONE DEL MASSIMO LIVELLO RAGGIUNGIBILE DALLA FALDA	Pagina:	9 di 22

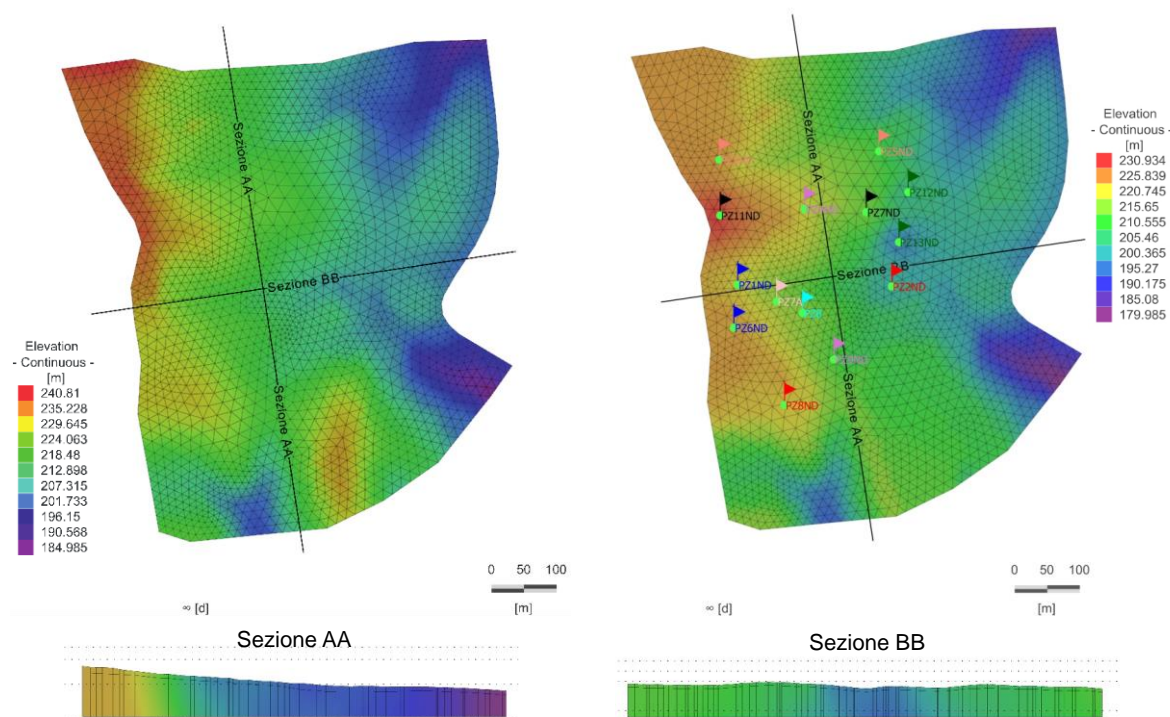


Figura 3. Ricostruzione stratigrafica. Planimetria (a sinistra la superficie topografica Slice 1 e a destra la Slice 2) e sezioni di riferimento

4 Procedura di calibrazione della permeabilità

La distribuzione spaziale della conducibilità idraulica è stata ottenuta mediante una procedura iterativa che, partendo dai valori misurati della permeabilità, confronta, ad ogni step di calcolo, i valori della piezometrica riprodotta dal modello con quella reale e modifica conseguentemente la distribuzione di permeabilità per ridurre la differenza. A questo fine è stato simulato il regime stazionario della falda del luglio 2017, in cui è massimo il numero di punti in cui è stato misurato il livello (Tabella 1 del documento: Integrazioni al punto 12. a. della nota del 05/06/2017 della Direzione Generale dell'Ambiente Servizio delle Valutazioni Ambientali (SVA)).

Il valore di infiltrazione superficiale è stato determinato a partire dalla pluviometria mensile del 2017, utilizzando la procedura riportata negli elaborati progettuali in funzione del tipo di litologia affiorante. Sono state distinte 3 zone:

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DISCARICA DI GENNA LUAS	Revisione:	0
	Data:	dicembre 2017
PREVISIONE DEL MASSIMO LIVELLO RAGGIUNGIBILE DALLA FALDA	Pagina:	10 di 22

- le superfici impermeabili al di sotto dell'attuale discarica a cui è stata assegnata infiltrazione nulla;
- gli affioramenti di arenarie e le aree in cui la copertura di questa formazione è molto ridotta, a cui è stato assegnato il valore di 118.4 mm/anno (18% della piovosità totale);
- le superfici semi permeabili costituite da suolo di natura limosa-sabbiosa a cui è stato assegnato il valore di 59.3 mm/anno (7.5% della piovosità totale).

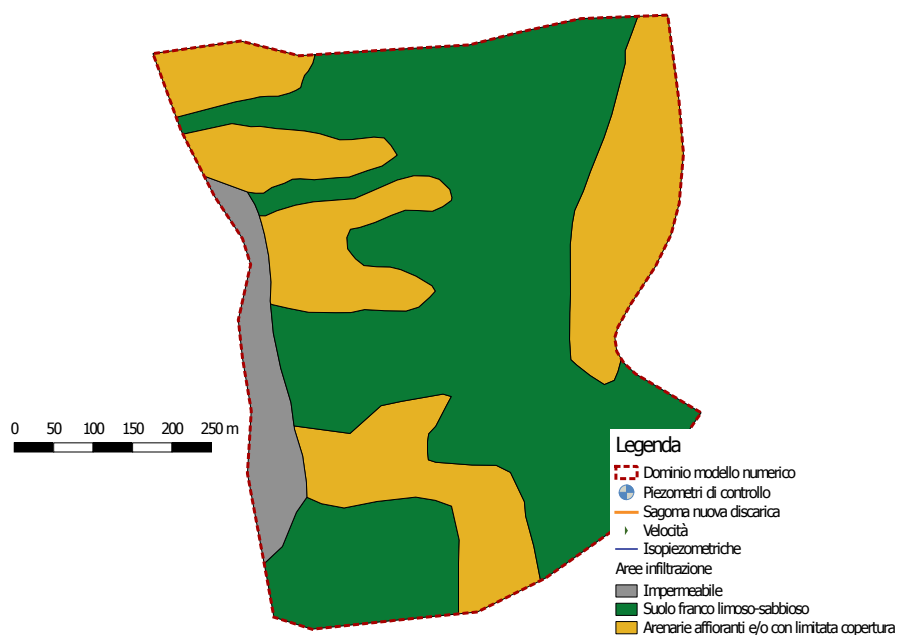


Figura 4. Aree di infiltrazione

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DISCARICA DI GENNA LUAS	Revisione:	0
	Data:	dicembre 2017
PREVISIONE DEL MASSIMO LIVELLO RAGGIUNGIBILE DALLA FALDA	Pagina:	11 di 22

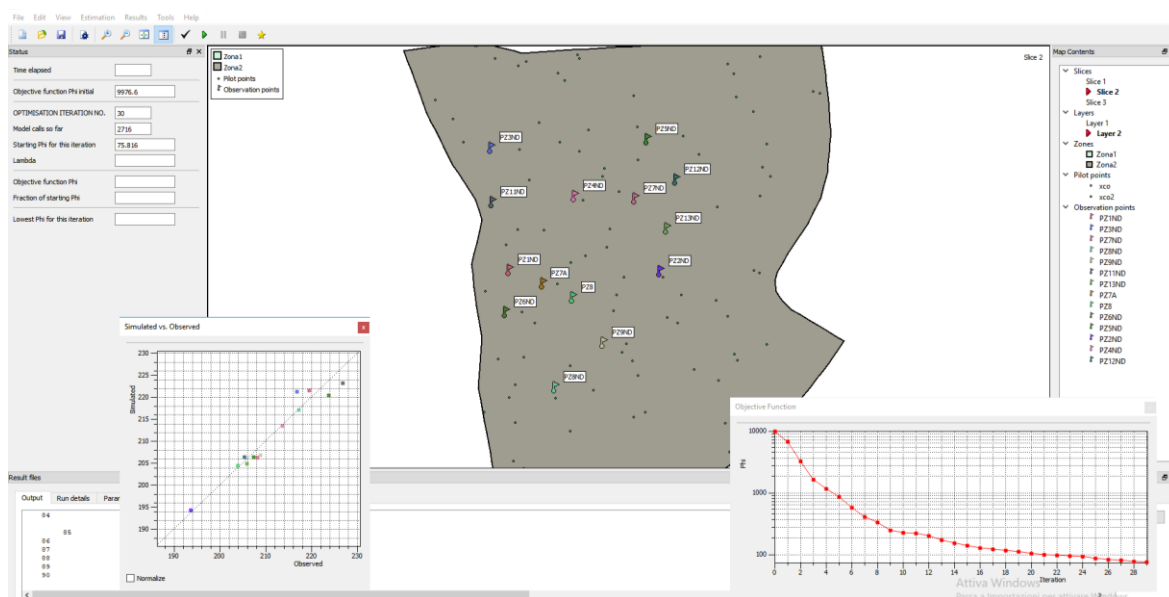


Figura 5. Procedura di calibrazione del modello di calcolo: punti dell'area di discarica in cui il livello di falda è noto (misure del luglio 2017) (mappa centrale della figura), diagramma di confronto fra le misure calcolate e quelle misurate (a sinistra in basso), andamento della funzione obiettivo (funzione che minimizza la differenza fra le misure calcolate e quelle osservate)

Il risultato finale della procedura di calibrazione è rappresentato dalla mappa di permeabilità riportata nella Figura 6.

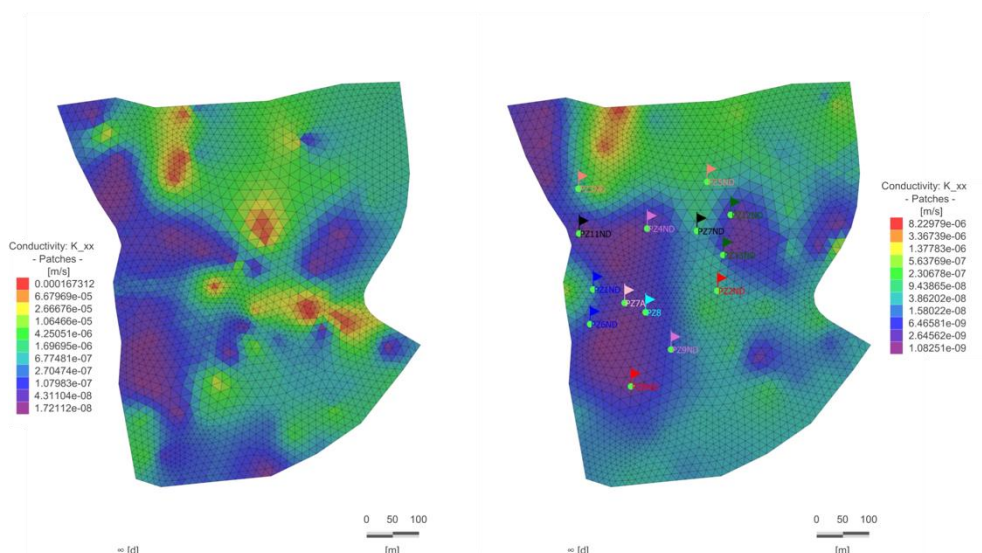


Figura 6. Distribuzione della conducibilità idraulica ottenuta con la calibrazione del modello. A sinistra il primo layer e a destra il secondo layer

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DISCARICA DI GENNA LUAS	Revisione:	0
	Data:	dicembre 2017
PREVISIONE DEL MASSIMO LIVELLO RAGGIUNGIBILE DALLA FALDA	Pagina:	12 di 22

In Figura 7 sono riportati i risultati del calcolo in termini di mappa di isopiezometrica e di campo di velocità. In Figura 8 viene invece presentato il confronto tra i risultati del modello e l'interpolazione dei dati osservati nei piezometri di riferimento nel luglio del 2017.

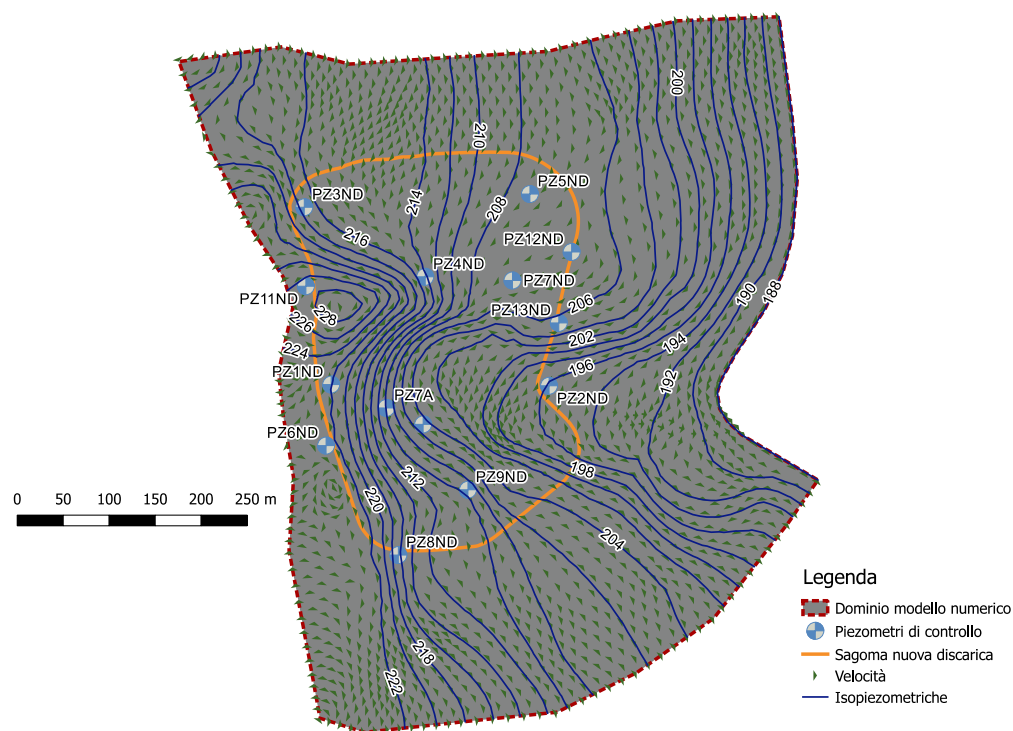


Figura 7. Piezometriche e campo di velocità allo stato stazionario

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DISCARICA DI GENNA LUAS	Revisione:	0
	Data:	dicembre 2017
PREVISIONE DEL MASSIMO LIVELLO RAGGIUNGIBILE DALLA FALDA	Pagina:	13 di 22

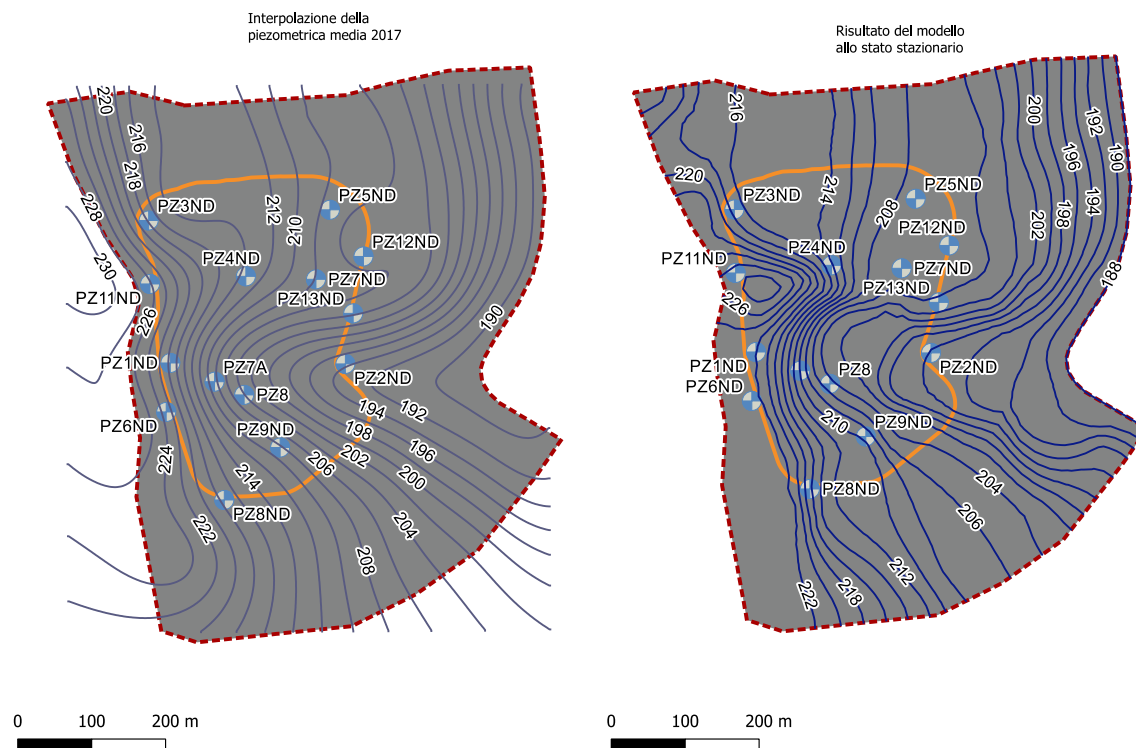


Figura 8. Confronto tra l'interpolazione dei dati piezometrici del 2017 (a sinistra) e le isopiezometriche calcolate (a destra)

Il risultato della calibrazione è misurata dal valore del coefficiente di variabilità CV:

$$CV = \frac{\sigma}{H}$$

in cui σ è lo scarto quadratico medio e H è la media delle piezometriche misurate calcolate come segue:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_c - h_m)_i^2}{n}}$$

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n h_{m,i}}{n}$$

Dove h_c ed h_m sono le altezze piezometriche rispettivamente “calcolate” e “misurate” ed n è il numero di misure (Figura 9).

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DISCARICA DI GENNA LUAS	Revisione:	0
	Data:	dicembre 2017
PREVISIONE DEL MASSIMO LIVELLO RAGGIUNGIBILE DALLA FALDA	Pagina:	14 di 22

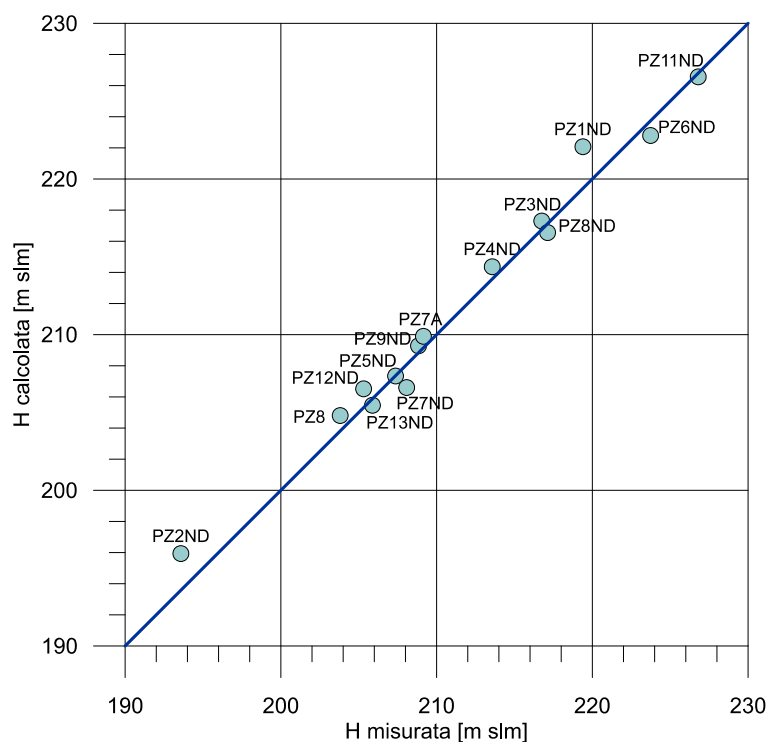


Figura 9. Confronto tra la piezometrica misurata e calcolata nei piezometri di riferimento

L'approssimazione con cui la superficie piezometrica generata dal modello riproduce quella misurata viene giudicata accettabile se il valore di CV non supera il 5÷15% (Anderson & Woessner). Nel caso in esame il valore di CV è risultato pari a 0.57%, per cui il modello è da considerarsi correttamente calibrato.

5 Analisi del comportamento della falda nel periodo 2001-2017

Il modello, calibrato in regime stazionario nel luglio 2017, è stato utilizzato per simulare il regime variabile dell'acquifero nel periodo 2001 - 2017 in cui sono stati misurati i livelli nei piezometri di riferimento (in modo discontinuo nel periodo 2001 – 2017)¹. L'obiettivo, dichiarato in premessa, è quello di verificare se e in quale misura il modello riproduce le variazioni di livello osservate in

¹ Per i piezometri PZ7A e PZ8 risultano disponibili i dati dal 2002 al 2006, dal 2011 al 2012 e dal 2015 al 2017; per i piezometri dal PZ1ND al PZ10ND risultano disponibili i dati dal 2015 al 2017; per i piezometri dal PZ11ND al PZ14ND risultano disponibili i dati del 2017.

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DISCARICA DI GENNA LUAS	Revisione:	0
	Data:	dicembre 2017
PREVISIONE DEL MASSIMO LIVELLO RAGGIUNGIBILE DALLA FALDA	Pagina:	15 di 22

corrispondenza delle variazioni dell'infiltrazione efficace mensile determinate dalle piogge del periodo.

In Figura 10 è riportato il regime dell'infiltrazione efficace nel periodo di simulazione 2001-2017, utilizzato come input per il modello. L'infiltrazione è stata calcolata a partire dalle precipitazioni mensili misurate nella stazione pluviometrica di Iglesias con lo stesso metodo utilizzato dai progettisti.

I risultati della simulazione sono riportati in Figura 11 in riferimento ai piezometri PZ7A e PZ8, per i quali sono disponibili le misure piezometriche nel periodo di interesse. Nella figura si nota che:

- il livello piezometrico calcolato oscilla con frequenza annuale seguendo la variazione dell'infiltrazione efficace durante i mesi dell'anno;
- Le oscillazioni annuali calcolate hanno ampiezza leggermente inferiore a quelle misurate (2 – 3 metri contro 3 – 4 metri);
- le variazioni del livello calcolato nell'intero periodo di misura (2001 – 2017) sono pari a 6.34 per PZ7A e 7.43 per PZ8; quelle calcolate, nello stesso periodo sono rispettivamente 6.34 m e 10.1 m;
- i valori calcolati nel periodo 2001 – 2006 sono sensibilmente superiori a quelli misurati nei piezometri;
- i livelli calcolati sono quasi sempre superiori a quelli misurati.

In sintesi, il confronto fra gli andamenti, calcolato e misurato, del livello di falda evidenzia che il modello riproduce approssimativamente il comportamento generale dell'acquifero che, sinteticamente è assimilabile a quello di un serbatoio di capacità proporzionale alla porosità efficace, alimentato dall'infiltrazione superficiale e dotato di uno scarico la cui resistenza rappresenta l'inverso della conducibilità idraulica. Lo scostamento fra le misure e i valori calcolati è una misura dall'approssimazione con cui il modello continuo equivalente descrive l'acquifero fratturato.

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DISCARICA DI GENNA LUAS	Revisione:	0
	Data:	dicembre 2017
PREVISIONE DEL MASSIMO LIVELLO RAGGIUNGIBILE DALLA FALDA	Pagina:	16 di 22

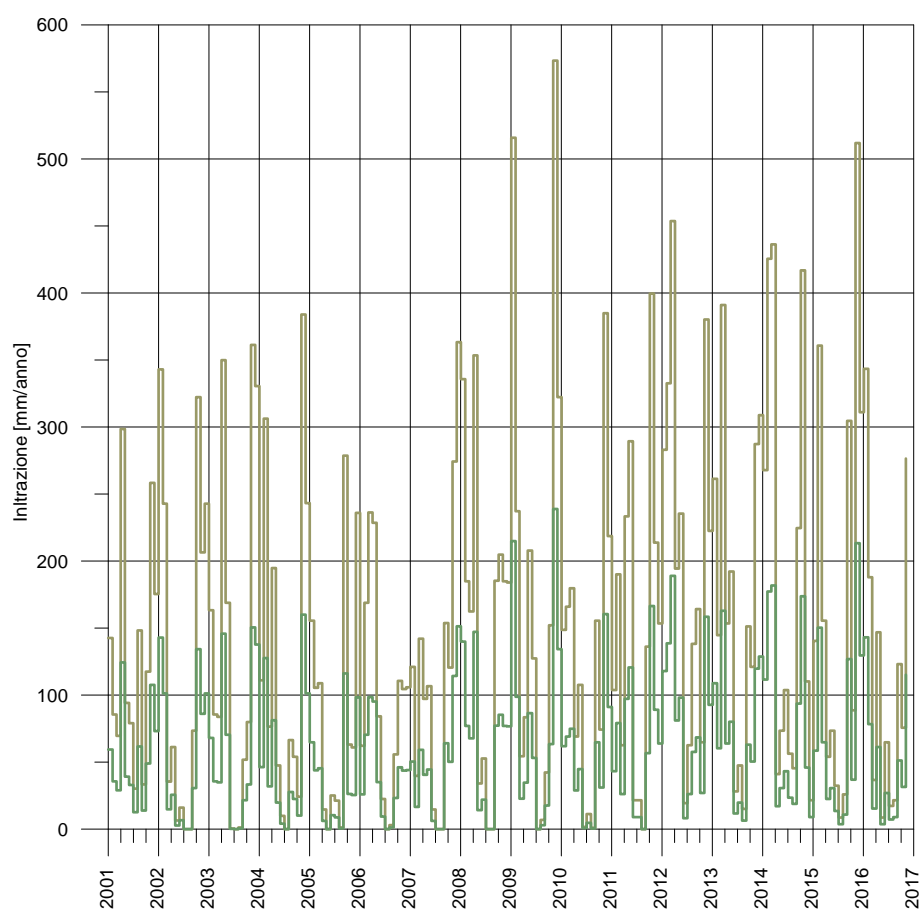


Figura 10. Infiltrazione efficace utilizzata in input al modello

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DISCARICA DI GENNA LUAS	Revisione:	0
	Data:	dicembre 2017
PREVISIONE DEL MASSIMO LIVELLO RAGGIUNGIBILE DALLA FALDA	Pagina:	17 di 22

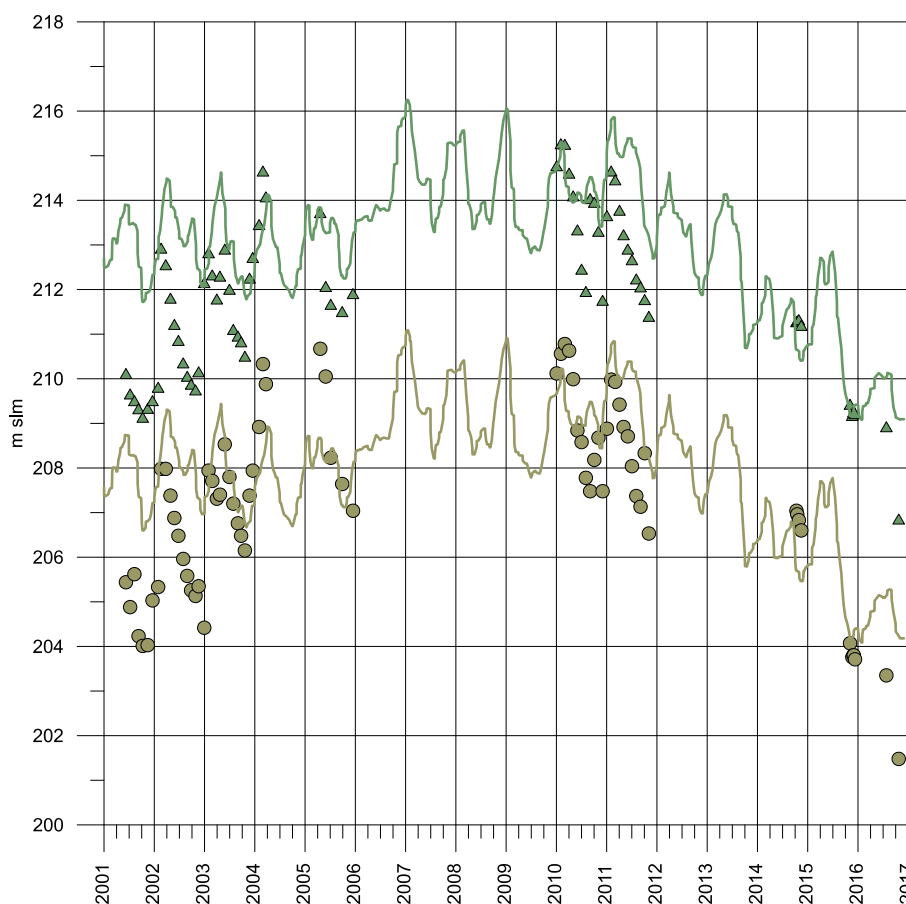


Figura 11. Confronto tra i risultati del modello e le misure effettuate nel periodo 2001-2017 nei piezometri PZ7A e PZ8

6 Previsione del livello massimo raggiungibile dalla falda

La domanda a cui si cerca di dare risposta in questo capitolo è: quali sarebbero stati i livelli massimi misurati nei piezometri interni (PZ1ND, PZ4ND, PZ7ND, PZ9ND e PZ27A) nel periodo 2001 – 2016, in cui erano attivi i piezometri PZ7A e PZ8?

Nei diagrammi delle Figura 12, Figura 13 e Figura 14, in riferimento rispettivamente a piezometri dell'area di monte, della zona centrale e dell'area di valle, sono state riportate le misure registrate e gli andamenti riprodotti dal modello nella simulazione di lungo periodo (2001 – 2017). I diagrammi evidenziano che:

- durante le oscillazioni periodiche, la distanza fra le curve non rimane costante per cui la superficie della falda non trasla parallelamente a se stessa ma, durante le oscillazioni, subisce anche modifiche di forma;

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DISCARICA DI GENNA LUAS	Revisione:	0
	Data:	dicembre 2017
PREVISIONE DEL MASSIMO LIVELLO RAGGIUNGIBILE DALLA FALDA	Pagina:	18 di 22

- relativamente ai piezometri ubicati nella fascia di monte, si nota che, nei PZ11ND, PZ6ND, PZ3 ND e PZ8ND, la quota misurata nel periodo 2016 – 2017 è superiore a quella calcolata mentre nel PZ1ND avviene il contrario ossia la quota misurata è inferiore a quella calcolata; Le differenze fra i due livelli raggiungono valori anche di 3 metri;
- nei piezometri della fascia centrale, in particolare in PZ4ND e PZ8ND, si ha che i livelli misurati sono superiori a quelli calcolati anche di 5 metri (PZ4ND).
- I livelli misurati nei piezometri di valle sono anch'essi, in generale, maggiori (fino a 3 metri) di quelli calcolati (PZ5ND, PZ7ND e PZ13ND) fatta eccezione per il PZ2ND in cui si hanno oscillazioni importanti (di circa 8 metri) che non sono descritte dal modello.

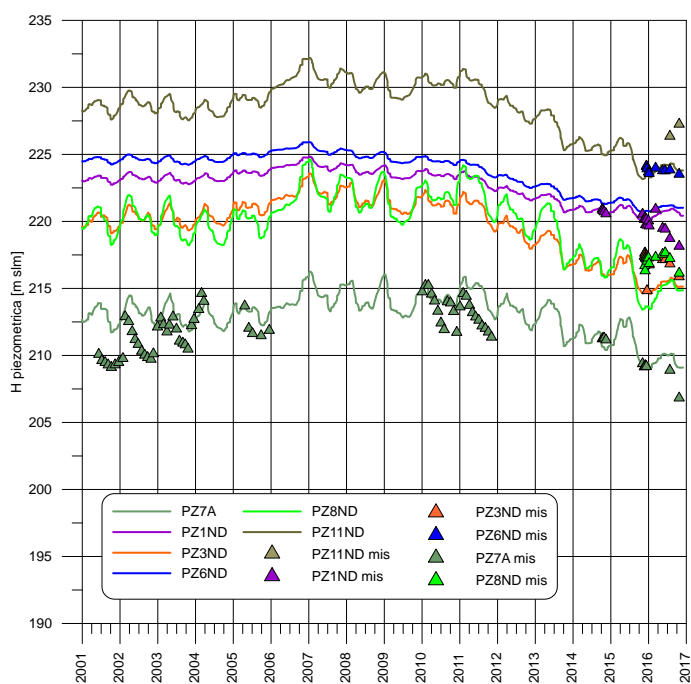


Figura 12. Oscillazione della falda nei piezometri a monte idraulico

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DISCARICA DI GENNA LUAS	Revisione:	0
	Data:	dicembre 2017
PREVISIONE DEL MASSIMO LIVELLO RAGGIUNGIBILE DALLA FALDA	Pagina:	19 di 22

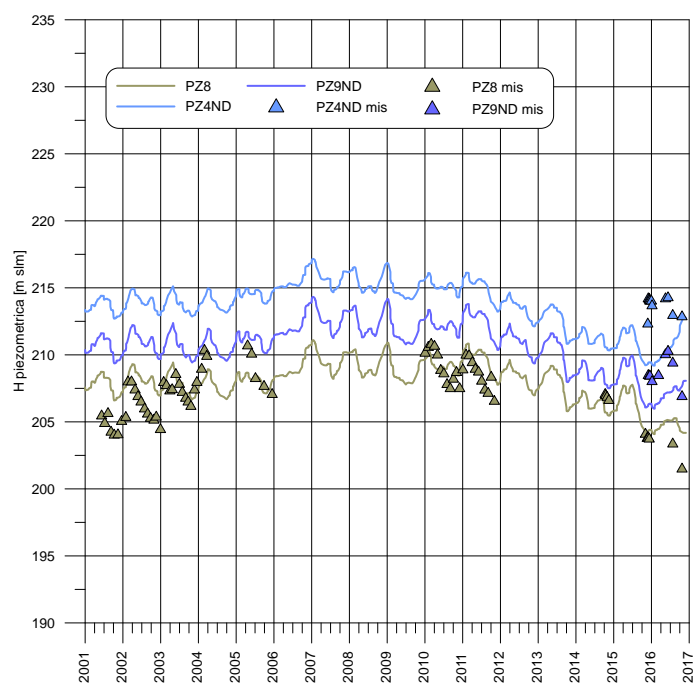


Figura 13. Oscillazione della falda nei piezometri centrali

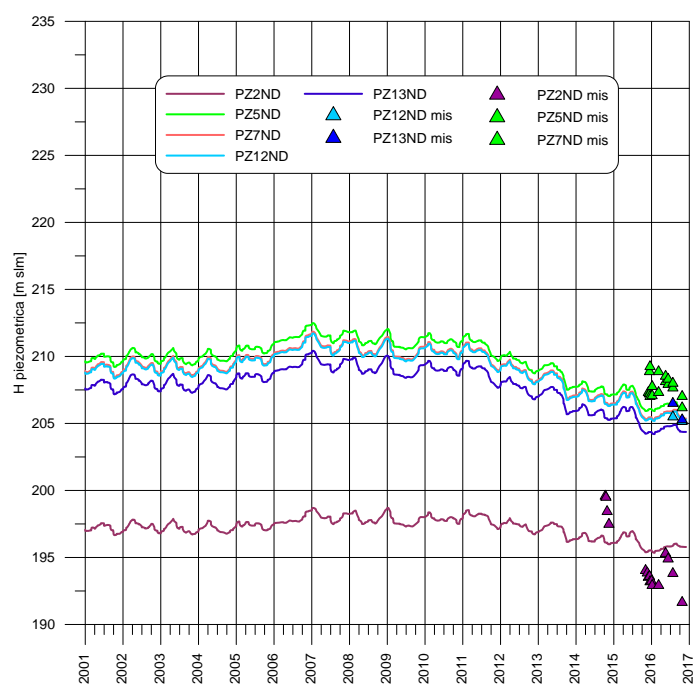


Figura 14. Oscillazione della falda nei piezometri di valle

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DISCARICA DI GENNA LUAS	Revisione:	0
	Data:	dicembre 2017
PREVISIONE DEL MASSIMO LIVELLO RAGGIUNGIBILE DALLA FALDA	Pagina:	20 di 22

I valori massimi e minimi dei livelli calcolati mediante il modello nel periodo 2001 – 2017, sono riportati nella Tabella 1.

Tabella 1. Livelli piezometrici simulati dal modello di calcolo in regime transitorio

ID	z dtm [m slm]	Max [m slm]	Min [m slm]	Delta (Max – Min) [m]	Prof minima da pc [m]
PZ1ND	226.84	224.83	220.06	4.77	2.01
PZ2ND	208.52	198.69	195.36	3.34	9.83
PZ3ND	229.74	223.58	214.62	8.96	6.17
PZ4ND	225.40	217.16	209.20	7.96	8.24
PZ5ND	215.23	212.49	205.92	6.56	2.75
PZ6ND	231.22	225.92	220.71	5.21	5.30
PZ7ND	219.05	211.84	205.29	6.55	7.21
PZ8ND	228.77	224.64	213.44	11.20	4.13
PZ9ND	216.25	214.32	205.99	8.34	1.93
PZ10ND					
PZ11ND	235.78	232.20	223.17	9.04	3.57
PZ12ND	213.86	211.71	205.19	6.52	2.15
PZ13ND	212.23	210.41	204.21	6.20	1.81
PZ14ND	210.29				
PZ7A	222.59	216.25	209.09	7.16	6.34
PZ8	221.10	211.09	204.09	7.00	10.01

7 Considerazioni conclusive

Il monitoraggio del livello della falda nell'area di ampliamento della discarica di Genna Luas è stato effettuato nel periodo 2001 – 2017 nei due piezometri PZ7A e PZ8. A partire dal 2015 il numero di piezometri di monitoraggio è stato incrementato ma il periodo di osservazione (2 anni circa) non è stato ritenuto sufficientemente lungo per esprimere valutazioni circa il massimo livello raggiungibile dalla falda nell'intera area. E' stato dunque sviluppato un modello finalizzato a riprodurre il regime variabile della falda in funzione degli apporti meteorici nel periodo 2001 - 2017. Già in premessa sono state evidenziate le problematiche connesse alla simulazione del regime variabile della falda in un mezzo fratturato quale quello in questione, soprattutto in riferimento all'obiettivo specifico di prevedere, con sufficiente grado di affidabilità, la variazione dei livelli freatici nel tempo. E' stato, in particolare, sottolineato che i caratteri locali di un acquifero

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DISCARICA DI GENNA LUAS	Revisione:	0
	Data:	dicembre 2017
PREVISIONE DEL MASSIMO LIVELLO RAGGIUNGIBILE DALLA FALDA	Pagina:	21 di 22

fratturato variano in modo discontinuo in funzione dell'intensità di fratturazione e della permeabilità delle singole fratture e che il modello adottato, costituito da un mezzo continuo idraulicamente equivalente, mentre descrive con buona approssimazione il comportamento complessivo, difficilmente riesce a riprodurre i dettagli, soprattutto in regime transitorio.

Nonostante le difficoltà e perplessità evidenziate, il modello è stato costruito e calibrato con la riserva di utilizzarlo come strumento previsionale solo a seguito della verifica dell'aderenza dei risultati del calcolo ai valori misurati.

La calibrazione del modello, basata sulla minimizzazione della differenza fra i valori calcolati della quota della falda e quelli misurati nel luglio 2017, è stata effettuata con successo e ha fornito la distribuzione della permeabilità e una superficie piezometrica statica molto prossima a quella misurata.

La simulazione del regime variabile della falda ha prodotto un andamento generale del livello freatico non aderente a quello evidenziato dalle misure; infatti, i due andamenti si discostano, in certi periodi, per diversi metri sia in un senso (valori calcolati maggiori di quelli misurati), sia nell'altro (valori calcolati minori di quelli misurati). In particolare, nei piezometri PZ7A e PZ8, nel periodo 2001 – 2006, si hanno valori misurati molto più bassi (fino a 4 metri) di quelli calcolati; viceversa, in molti altri piezometri, nel periodo in cui sono state fatte le misure (2015 – 2017), si hanno valori misurati più alti di quelli calcolati (fino a 4 m in PZ4ND).

In sintesi, dunque, considerando, da un lato la precisione con cui deve essere determinato il massimo livello raggiungibile dalla falda ai fini della verifica del franco idraulico della discarica e, d'altro lato, gli scostamenti fra i valori calcolati dal modello e quelli accertati nei periodi di disponibilità delle misure, i risultati ottenuti dimostrano che il modello non può essere utilizzato ai fini della valutazione del massimo livello raggiungibile dalla superficie della falda.

Rimane dunque il problema, enunciato in premessa quale obiettivo dell'analisi, di valutare il livello che la falda avrebbe raggiunto, durante il periodo 2001 – 2017, nei piezometri realizzati solo dopo il 2015.

Richiamate le valutazioni esposte in premessa circa la variazione spazialmente non continua dei livelli di falda e l'estrema difficoltà, accertata a seguito della realizzazione del modello, di costruire sistemi capaci di simulare il funzionamento dell'acquifero riproducendone le leggi fisiche, non resta che affrontare il problema con un approccio empirico o, se si vuole sperimentale o induttivo, basato cioè sull'osservazione diretta dei fenomeni e sull'estrapolazione dei dati mediante relazioni

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DISCARICA DI GENNA LUAS	Revisione:	0
	Data:	dicembre 2017
PREVISIONE DEL MASSIMO LIVELLO RAGGIUNGIBILE DALLA FALDA	Pagina:	22 di 22

che non necessariamente scaturiscono dalla modellizzazione del comportamento fisico dell'acquifero. Un tale approccio prende le mosse dalla domanda: è possibile costruire una funzione che metta in relazione le quote della falda misurate nei piezometri recenti a quelle misurate nei piezometri di riferimento PZ7A o PZ8? Se esiste questa relazione è allora possibile, sulla base del valore massimo assunto dal livello di falda nel piezometro PZ7A/PZ8, stimare il valore massimo del livello della falda nei piezometri recenti.

Per verificare se esista tale relazione è sufficiente confrontare i dati misurati nei piezometri generici (quelli costruiti dopo il 2015 nell'area della discarica) con quelli misurati nei piezometri di riferimento (PZ7A o PZ8 per i quali la serie di misure è estesa al periodo 2001 – 2017). Tale confronto può essere fatto semplicemente partendo dalle coppie di misure fatte nei due piezometri nello stesso periodo e verificando che l'insieme delle coppie sia coerente con una legge di interpolazione. Il coefficiente di correlazione fornirà una misura della bontà della relazione estrapolata.