Servin Soc. Coop. p. A.
Stampato in proprio a Ravenna
2 dicembre 2013

ISBN 9788890947407

MAGI GALLUZZI L. (*), MORANDI F. (**), MARZIALETTI V. (*), PARLANI S. (*), PATRIZI G. (**)

STUDIO IDROGEOLOGICO E MODELLAZIONE DELLA FALDA DELLA BASSA VALLE DEL FIUME POTENZA (MC)

(*) REGIONE MARCHE, SERVIZIO INFRASTRUTTURE, TRASPORTI ED ENERGIA, ANCONA

HYDROcare

INTERREG IIIB CADSES

REGIONE MARCHE
GIUNTA REGIONALE
SERVIZIO INFRA STRUTTURE, TRA SPORTI ED ENERGIA

(**) SERVIN, RAVENNA

Servin

Servin Soc. Coop. p. A.
Stampato in proprio a Ravenna
2 dicembre 2013

ISBN 9788890947407

INDICE

Abstract 4
Premessa e scopo del lavoro 4
Inquadramento del sito 4
Attività di campo 10
Fondamenti di Sutra 11
Obiettivi e schematizzazione del modello 14
Condizioni al limite 14
Regionalizzazioni 16
Alimentazione zenitale 17
Taratura del modello 17
Simulazione dell'effetto dell'aumento del livello del mare 25
Simulazione della perforazione di un nuovo pozzo per acqua 28
Conclusioni 30
Bibliografia 31

Abstract

Lo studio ha riguardato un'area in prossimità della foce del Potenza a sud di Porto Recanati, nei dintorni di due campi pozzi ad uso idropotabile, dove in passato si sono evidenziati fenomeni di intrusione salina nell'acquifero. Nel campo pozzi più vicino al mare, messo in funzione a metà degli anni '80, il fenomeno ha portato al progressivo abbandono dei pozzi a cominciare da quelli più vicino alla linea costa nel 1991, fino alla chiusura definitiva del campo nel 1994. Anche in un successivo campo pozzi più distante dal mare sono stati dismessi i pozzi più ad est e attualmente sono in funzione solo i tre pozzi più ad ovest del campo.

Scopo del lavoro è stata la realizzazione di un modello matematico tridimensionale della falda, attraverso il quale evidenziare l'intrusione salina in relazione alle portate emunte nel campo pozzi nuovo e di verificare gli eventuali effetti sul fenomeno indotti della forzante meteo-marina.

Premessa e scopo del lavoro

Lo studio ha riguardato un'area in prossimità della foce del Potenza a sud di Porto Recanati (fig 1), nei dintorni di due campi pozzi di proprietà della società ASTEA S.p.A., dove in passato si sono evidenziati fenomeni di intrusione salina nell'acquifero. Nel campo pozzi più vicino al mare denominato "campo pozzi vecchio", messo in funzione a metà degli anni '80, il fenomeno ha portato al progressivo abbandono dei pozzi a cominciare da quelli più vicino alla linea costa nel 1991, fino alla chiusura definitiva del campo nel 1994. Anche nel campo pozzi più distante detto "campo pozzi nuovo" sono stati dismessi i pozzi più ad est e attualmente sono in funzione i tre pozzi più ad ovest del campo.

Scopo del lavoro è stata la realizzazione di un modello matematico tridimensionale della falda, attraverso il quale evidenziare l'intrusione salina in relazione alle portate emunte nel campo pozzi nuovo e di verificare gli eventuali effetti sul fenomeno indotti della forzante meteo-marina.

Inquadramento del sito

Per la caratterizzazione litostratigrafia e idrogeologica dell'area da modellare è stato preso come riferimento il rapporto tecnico emesso da ASTEA (2001).

La successione litostratigrafia dei terreni è stata ricostruita utilizzando i dati di alcuni sondaggi geognostici dai quali è stata derivata la sezione litostratigrafica riportata in fig. 2. La stratigrafia schematica, ricostruita dal basso verso l'alto, è la seguente:

- depositi marini costituiti da argille, argille-marnose azzurre plioceniche;
- depositi alluvionali costituiti da ghiaie di dimensioni variabili in matrice limosa sabbiosa;
- depositi alluvionali costituiti da limi argillosi, argille limose e limi sabbiosi
- depositi alluvionali costituiti da ghiaie di dimensioni medie e medio fini in matrice mediamente abbondante;
- depositi alluvionali costituiti da limi argillosi e limo sabbiosi.

La profondità del tetto dei depositi marini argillosi e argilloso-marnosi pliocenici è variabile da circa 60 a circa 30 m dal p.c. e si presenta come un piano ondulato degradante verso mare con pendenza media di circa l'1%.

I depositi alluvionali prevalentemente ghiaiosi sovrastanti formano un corpo a spessore variabile compreso tra un valore massimo di circa 15 e minimo di circa 2 m. A seguire verso l'alto i depositi a tessitura prevalentemente fine hanno spessore compreso tra circa 10 e 40 m, al loro interno sono intercalate lenti di depositi più grossolani, più frequenti e spesse in prossimità della linea di riva.

Seguono altri depositi grossolani lentiformi di estensione e spessore variabile spesso ma non ovunque ricoperti da depositi fini limo argillosi e limo sabbiosi.

L'elemento idrografico principale dell'area è il fiume Potenza. Il suo bacino ha un'area di circa 770 km^2, l'alveo è orientato in direzione prevalente SO – NE ed ha una lunghezza di circa 95 km. Nel tratto terminale del corso il bacino è caratterizzato dall'affioramento di formazioni plio-pleistoceniche e in epoca storica in corrispondenza proprio del tratto prossimo alla foce ha subito alcune deviazioni che sono mostrate in fig. 4.

Per quanto riguarda le precipitazioni della zona di studio sono stati analizzati i dati rilevati nella stazione meccanica di Recanati (Gadi 2020) nel periodo 1951-2006. La media delle precipitazioni totali annue in questo periodo è pari a circa 700 mm. La distribuzione delle precipitazioni medie mensili, calcolate per il medesimo periodo è riportata in fig. 6.

FIG. 1 – INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

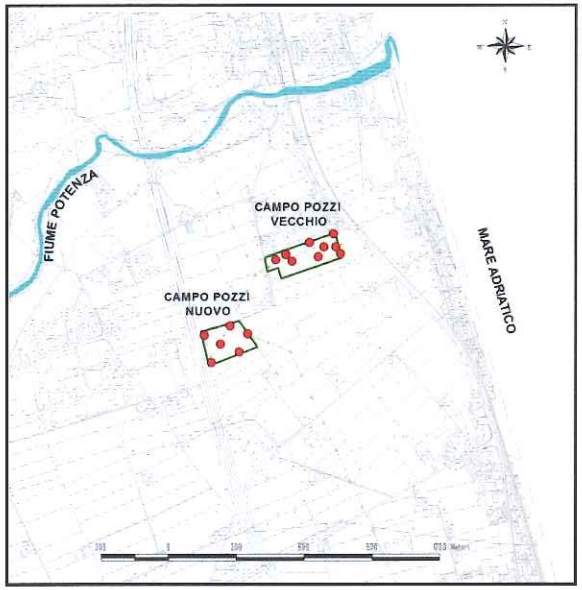

FIG. 2 – UBICAZIONE DEI CAMPI POZZI

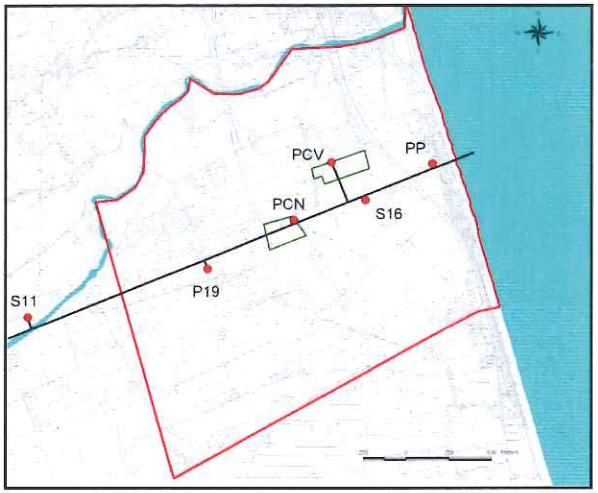

FIG. 3 – UBICAZIONE DEI SONDAGGI E TRACCIA DI SEZIONE

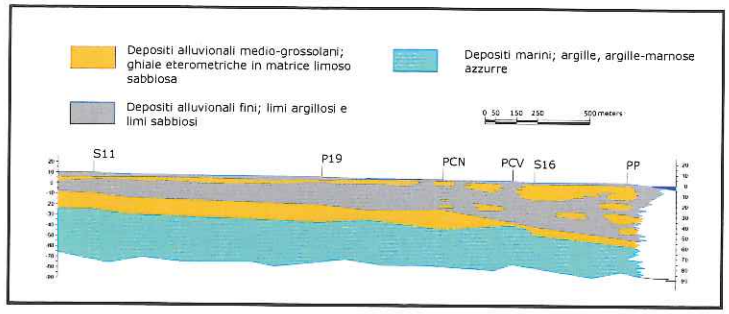

FIG. 4 – SEZIONE LITOSTRATIGRAFICA

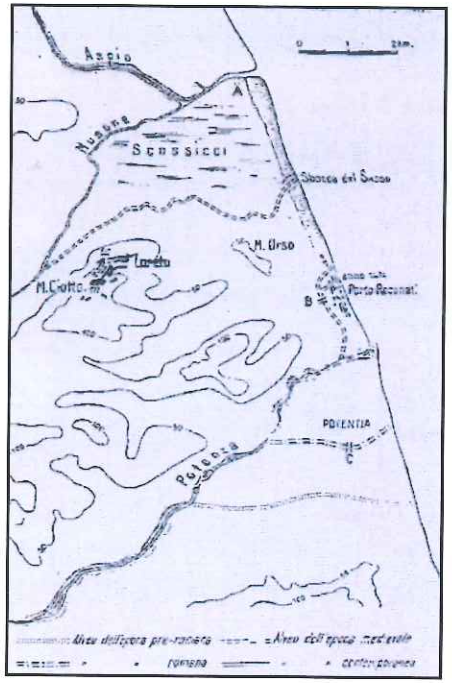

FIG. 5 – VARIAZIONE DELL'ALVEO DEL FIUME POTENZA (TRATTO DA REGIONE MARCHE - AUTORITA' DI BACINO)

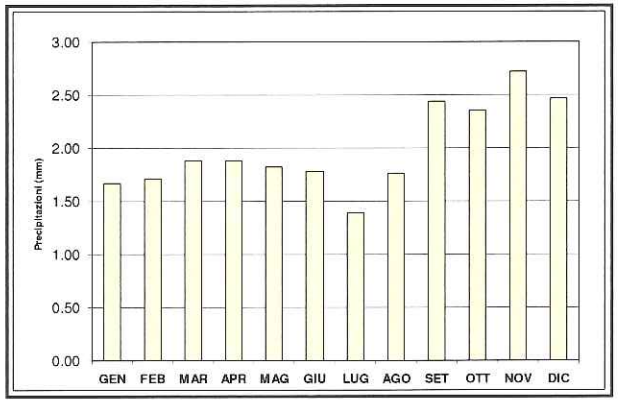

FIG. 6 – PRECIPITAZIONI MEDIE MENSILI

La struttura idrogeologica che schematicamente è stata individuata è caratterizzata da un corpo acquifero costituito dai depositi alluvionali grossolani, poggiante sui depositi argillosi pliocenici impermeabili che fungono da acquicludo. La continuità laterale dell'acquifero, da quel che è possibile dedurre è estesa anche a sud e a ovest dell'area di studio, mentre verso nord non sono disponibili informazioni per ricostruire in dettaglio la geometria della struttura. Al di sopra del corpo acquifero sono presenti depositi che hanno assetto geometrico e tessitura tali da non renderne facilmente ipotizzabile il comportamento idraulico. Si tratta infatti di depositi a geometria lenticolare che sono costituiti complessivamente da materiale prevalentemente fine ma che presentano al loro interno e a seconda delle zone, sia una frazione sabbiosa importante, sia delle vere e proprie intercalazioni di strati che sono invece prevalentemente a tessitura grossolana. Schematicamente, ad ovest dell'area di studio l'unità è formata da limo sabbioso, nella zona centrale sono più abbondanti e spesse le lenti di argille limose ma spostandosi verso sud e verso est continuano ad essere presenti strati di limo sabbioso e soprattutto verso riva divengono frequenti e spesse le intercalazioni di depositi grossolani anche ghiaiosi.

La circolazione idrica all'interno di questa unità è quindi difficilmente schematizzabile in parte siamo in presenza di depositi scarsamente permeabili con caratteristiche da acquicludo, in parte sono presenti depositi a permeabilità medio-bassa e lenti anche abbastanza permeabili che non determinano il confinamento dell'acquifero sottostante ma che probabilmente possono consentire in parte anche scambi idrici

verticali. All'unita descritta sono sovrapposti con una certa continuità depositi ghiaioso sabbiosi con caratteristiche idrauliche da corpo acquifero che sono generalmente ricoperti da terreno vegetale e terreni a tessitura limosa argillosa e limoso sabbiosa. Nel contesto sopradescritto è possibile ipotizzare che l'alimentazione maggiore del corpo acquifero principale avvenga dalle acque provenienti da monte, ma non è del tutto escludibile una ricarica verticale proveniente da infiltrazione efficace delle acque meteoriche e in parte dal fiume Potenza.

Attività di campo

I dati ulteriori acquisiti, necessari alla realizzazione del modello, hanno riguardato:

- livelli piezometrici della falda;
- caratteristiche chimico fisiche della falda;
- livelli idrometrici del Potenza e livello del mare;
- portate emunte dai pozzi attivi nel "campo pozzi nuovo".

L'acquisizione dei dati piezometrici e delle caratteristiche chimico fisiche della falda è avvenuta attraverso due campagne di misura. La prima effettuata nei mesi di giugno e luglio 2007 e la seconda in novembre. Durante le campagne è stata rilevata la profondità della falda in corrispondenza dei pozzi accessibili all'interno del campo pozzi nuovo e del campo pozzi vecchio e in alcuni pozzi di proprietà privata distribuiti nei dintorni dell'area di indagine (fig. 7). Dei pozzi è stata anche rilevata la profondità e dove possibile prelevato un campione d'acqua, del quale si è misurata; la conducibilità elettrica, la temperatura e il pH. Sono stati inoltre acquisiti i dati rilevati nella sonda di monitoraggio in continuo installata all'interno di un pozzo del campo pozzi nuovo (pozzo B in fig. 7) che a partire da gennaio 2007 viene rilevata ogni 30 minuti; il livello della falda, la temperatura, la conducibilità elettrica, il pH e l'ossigeno disciolto. I punti di riferimento per le misure di livello nei pozzi sono stati quotati altimetricamente con un rilievo dedicato, mediante GPS, mentre per i pozzi dei due campi ASTEA erano disponibili anche dati altimetrici da rilievo topografico.

La Regione Marche ha reso disponibili le registrazioni idrometriche effettuate nella stazione idrometrica in telemisura 406-Porto Recanati (Punto "Ponte Secante" in fig. 7).

Per il livello marino sono stati utilizzati i dati rilevati da una sonda di monitoraggio installata su di un palo infisso ad alcune centinaia di metri dalla costa di fronte alla foce del Potenza.

ASTEA S.p.A. ha fornito i valori delle portate emunte dai pozzi in funzione nel campo pozzi nuovo (pozzi D-E-F in Fig. 7 – Ubicazione e

tipologia dei punti di misura e i risultati di alcune analisi chimiche delle acque degli stessi pozzi. Il valore medio di acqua emunta fornito per il periodo luglio/ottobre è 2070 m^3/giorno.

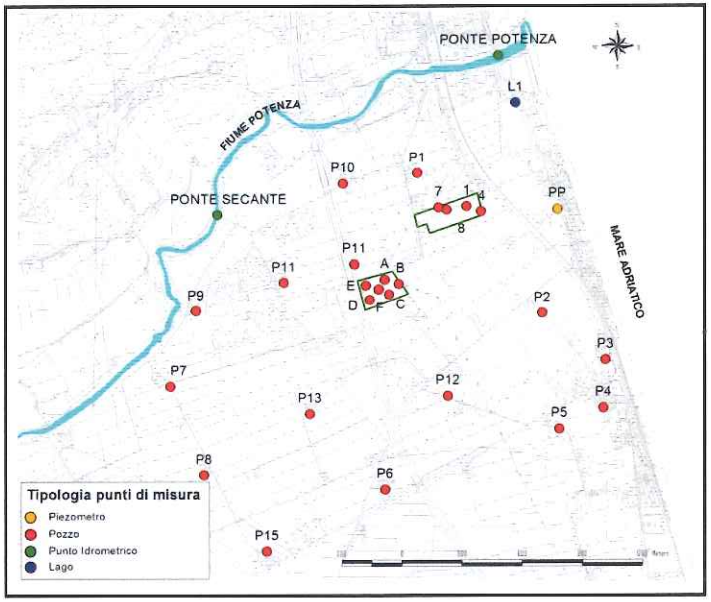

FIG. 7 – UBICAZIONE E TIPOLOGIA DEI PUNTI DI MISURA

Fondamenti di Sutra

L'applicazione è realizzata con Sutra3d (Voss & Provost, 2003), noto simulatore agli elementi finiti per acque sotterranee, posto all'interno di un sistema in ambiente Windows realizzato presso Servin. Tale sistema (SutraWin) svolge tutte le funzioni di interfaccia e contiene, oltre a Sutra, tutti gli strumenti necessari per operare in un ambiente complesso (grafica 3d, interazione grafica con il sistema di dati ecc.); inoltre, nel sistema è stata integrata la parte principale di GSLIB (Deutsch & Journel, 1992) per fornire il necessario supporto di geostatistica lineare e non lineare, stazionaria e non stazionaria.

Sutra è basato sull'equazione generalizzata di Darcy, espressa quindi nei termini del grado di saturazione, della viscosità e della densità

del fluido oltre che evidentemente del gradiente idraulico e del tensore delle permeabilità:

$$\underline{v} = -\left(\frac{\underline{\underline{k}}k_r}{\varepsilon S_w \mu}\right)\cdot\left(\underline{\nabla} p - \rho g\right)$$

in cui $\underline{v}$ è la velocità, $\underline{\underline{k}}$ è la permeabilità della matrice solida, k_r la permeabilità relativa al flusso di fluido, ε la porosità del mezzo, μ la viscosità, S_w la saturazione, p la pressione, ρ la densità del fluido, g la gravità. La permeabilità, come pure la dispersione sono definite nelle tre dimensioni dello spazio e in funzione della rotazione rispetto alla direzione del flusso, quindi in condizioni di completa anisotropia.

La stima della permeabilità relativa avviene con l'espressione di Van Genuchten in Voss & Provost (2003):

$$k_r = S_w^{*1/2}\left\{1-\left[1-S_w^{*\left(\frac{n}{n-1}\right)}\right]^{\left(\frac{n}{n-1}\right)}\right\}^2$$

Su questa base, Sutra è sempre in grado di simulare un ammasso poroso ed è quindi indipendente dalla necessità di fornire a priori un assetto strutturale ideale coerente con schemi di calcolo del tipo acquifero freatico - acquifero confinato, dato che l'equazione fondamentale prescinde completamente da questo aspetto. Per lo stesso motivo, l'approccio al calcolo delle condizioni di saturazione diviene relativamente semplice e, in generale, è più vantaggioso schematizzare le applicazioni come ammassi porosi caratterizzati da condizioni variabili di saturazione e pressione.

Metodologicamente, Sutra applica l'equazione di Darcy generalizzata in termini di bilancio di massa, come somma delle masse dell'acqua e del soluto in una matrice solida per la quale sia trascurabile il movimento dovuto alla variazione del volume della matrice stessa, (diversamente da come avviene nel caso di un processo di compattazione del suolo):

$$\frac{\partial(\varepsilon S_w \rho)}{\partial t} = -\underline{\nabla}\cdot(\varepsilon S_w \rho \underline{v}) + Q_p + \mathrm{Y}$$

in cui Q_p è la sorgente di massa fluida e Y la sorgente di massa in soluzione.

L'altra equazione è quella generale del bilancio di una massa associata al bilancio idraulico, che può essere impiegata sia per il trasporto

in soluzione di una sostanza generica, come pure per il trasporto termico (modelli geotermici):

$$\left(S_w \rho S_{op} + \varepsilon\rho\frac{\partial S_w}{\partial p}\right)\frac{\partial p}{\partial t} + \left(\varepsilon S_w \frac{\partial \rho}{\partial C}\right)\frac{\partial C}{\partial t} - \underline{\nabla}\cdot\left[\left(\frac{\underline{\underline{k}}k_r\rho}{\mu}\right)\cdot\left(\underline{\nabla} p - \rho\underline{g}\right)\right] = Q_p$$

essendo C la concentrazione di soluto e t il tempo.

L'equazione precedente viene poi sviluppata per tenere conto della dispersione nel mezzo e del bilancio soluto-adsorbimento (specie singola):

$$\frac{\partial(\varepsilon S_w \rho C}{\partial t} + \frac{\partial[(1-\varepsilon)\rho_s C_s]}{\partial t} = -\underline{\nabla}\cdot(\varepsilon S_w \rho \underline{v} C) + \underline{\nabla}\left[\varepsilon S_w \rho (D_m \underline{\underline{I}} + \underline{\underline{D}})\cdot\underline{\nabla} C\right] + \varepsilon S_w \rho \Gamma_w + (1-\varepsilon)\rho_s \Gamma_s + Q_p C'$$

in cui Dm è la diffusione molecolare, $\underline{\underline{D}}$ è il tensore della dispersione, $\underline{\underline{I}}$ il tensore identità, Γw è la massa di soluto nel fluido, C* la concentrazione nelle sorgenti di soluto, Cs la concentrazione dell'adsorbimento, ρ_s la densità dei granuli della matrice solida. Le dispersioni sono rispettivamente:

$$\alpha_L = \frac{\alpha_{L\max}\alpha_{L\mathrm{mid}}\alpha_{L\min}}{\alpha_{L\min}(\alpha_{L\mathrm{mid}}\cos^2\theta_{kv1} + \alpha_{L\max}\sin^2\theta_{kv1})\cos^2\theta_{kv2} + \alpha_{L\max}\alpha_{L\mathrm{mid}}\sin^2\theta_{kv2}}$$

$$\frac{1}{\alpha_{T1}} = \frac{\hat{U}_x^2}{\alpha_{T\max}} + \frac{\hat{U}_y^2}{\alpha_{T\mathrm{mid}}} + \frac{\hat{U}_z^2}{\alpha_{T\min}}$$

$$\frac{1}{\alpha_{T2}} = \frac{\hat{W}_x^2}{\alpha_{T\max}} + \frac{\hat{W}_y^2}{\alpha_{T\mathrm{mid}}} + \frac{\hat{W}_z^2}{\alpha_{T\min}}$$

Le α_L e α_T sono rispettivamente le dispersioni longitudinale e trasversale, espresse in funzione dell'ellissoide di dispersione. I pedici $_{max}$, $_{mid}$, $_{min}$ sono riferiti alle direzioni degli assi dell'ellissoide (a sua volta riferito alla direzione del flusso secondo θ_{kv1} e θ_{kv2}, per cui α_{Lmax} è il raggio dell'ellissoide nella direzione di permeabilità massima ecc.). U e W sono gli autovettori delle matrici di trasformazione secondo Biot-Fresnel.

Obiettivi e schematizzazione del modello

Lo scopo principale di un modello di questo tipo è la rappresentazione del flusso per convezione che deriva dalla presenza di un fluido più denso sul lato a mare. L'acqua dolce fluisce da monte verso mare e la velocità di deflusso tende a decrescere con la profondità, perché il corpo idrico più denso resiste all'arrivo dell'acqua dolce. Sul lato a mare il gradiente di pressione è maggiore (sempre a causa della maggiore densità dell'acqua) e favorisce la risalita di acqua salata. Nel fenomeno occorre considerare anche l'effetto della diffusività molecolare.

Per quanto riguarda la geometria del campo di lavoro, occorre definire l'area di studio in modo coerente alla necessità di esprimere numericamente i limiti sotto forma di condizioni al contorno adatte e coerenti col modello concettuale individuato per l'area. Seguendo questi aspetti i limiti scelti sono:

- ad est l'Adriatico;
- a nord il Potenza;
- alla base le argille Plioceniche.

Ad ovest e sud non essendo presenti limiti particolari ci si è estesi sino a comprendere un intorno ritenuto sufficiente alle finalità del modello. Ne è risultata un area da modellare di estensione pari a circa 3,6 km^2 (figg. 8 e 9) che è stata discretizzata con poco più di 8000 elementi distribuiti su 10 piani suborizzontali. L'assetto dei piani è stato condizionato alla morfologia della superficie del suolo e del basamento pliocenico, in entrambi i casi mediante la regionalizzazione dei dati disponibili nei due casi.

Condizioni al limite

Il sistema di calcolo è stato schematizzato imponendo su tutti i bordi dell'area condizioni di carico idraulico imposto. Tali condizioni sono state dedotte dalla regionalizzazione dei dati piezometrici e idrometrici rilevati nelle campagne di misura.

Per quanto riguarda il trasporto di soluto le condizioni schematizzate sono di concentrazione imposta nel fluido entrante o sul bordo a mare. Anche in questo caso le concentrazioni imposte sono state derivate delle regionalizzazzioni della salinità.

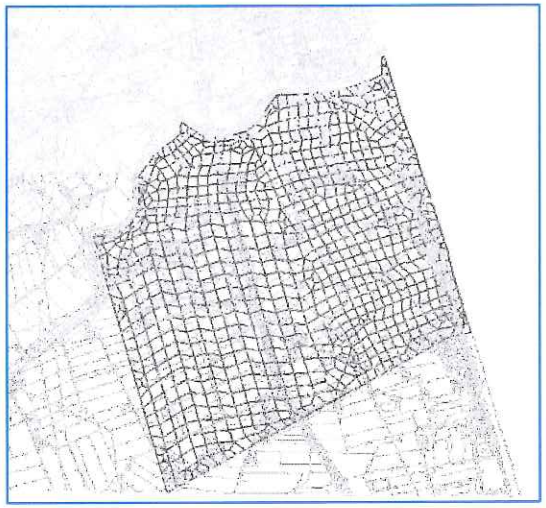

FIG. 8 – DISCRETIZZAZIONE IN PIANTA DEL DOMINIO DI CALCOLO

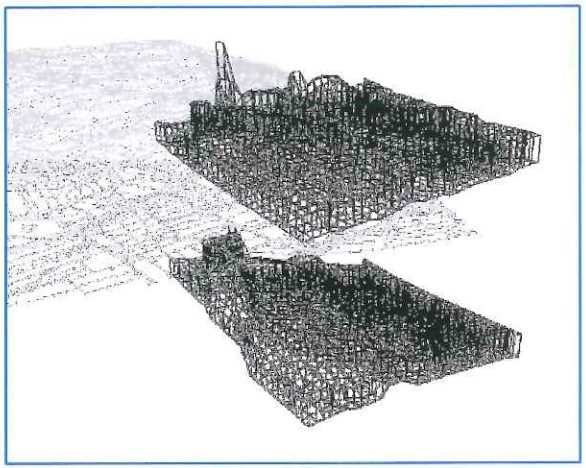

FIG. 9 – DISCRETIZZAZIONE TRIDIMENSIONALE (VISUALIZZATI SOLO IL PRIMO E L'ULTIMO LAYER)

Regionalizzazioni

L'impianto modellistico applicato prevede il ricorso ad un approccio di tipo probabilistico per la stima delle variabili di interesse partendo dai dati sperimentali rilevati. Il primo passo è l'analisi strutturale della variabile attraverso il calcolo del semivariogramma sperimentale e l'assunzione di un modello teorico di variabilità spaziale (semivariogramma teorico). Il modello viene poi utilizzato nel processo di regionalizzazione ovvero di stima della variabile in un punto definito dello spazio, selezionando lo stimatore in modo adeguato a ciascuna variabile (krigaggio ordinario o krigaggio in condizioni non stazionarie, a seconda dei casi). Le variabili che sono state analizzate sono:

- l'altimetria della superficie del suolo;
- l'altimetria del basamento argilloso dell'acquifero;
- carico idraulico;
- salinità.

Le prime due variabili sono rappresentate dai valori disponibili delle quote del terreno e del basamento, queste ultime dedotte dalle stratigrafie.

Il carico idraulico è l'altezza sul livello del mare del pelo libero dell'acqua di falda e le osservazioni sperimentali utilizzate sono le misure piezometriche ed idrometriche eseguite. Per l'interpolazione sono stati utilizzati anche una serie di punti posti lungo la riva ai quali è stato attribuito il valore di 0 m slm.

La salinità, oltre che dalle analisi di laboratorio disponibili, è stata derivata dalla formula che lega la concentrazione alla conducibilità elettrica specifica misurata nei campioni d'acqua prelevati dai pozzi:

$$c = \alpha \times C$$

Dove:

c = salinità in mg/l

C = conducibilità elettrica specifica µS/cm a 20 °C

α = coefficiente funzione di C

Come per il carico idraulico, sono stati utilizzati anche una serie di punti imposti lungo la riva ai quali è stata attribuito un valore di salinità corrispondente alla conducibilità misurata nell'acqua di mare, che è pari a 51600 µS/cm a 20 °C.

Le stime sono state utilizzate:

- per quanto riguarda la morfologia della superficie e del basamento per deformare la griglia, in modo da avere una geometria coerente con l'acquifero;
- per quanto riguarda carico idraulico e salinità, per assegnare le condizioni al bordo e le condizioni iniziali.

Nelle seguenti figure sono riportati i risultati della regionalizzazione del carico idraulico e della salinità; a proposito di quest'ultima, si deve notare che l'angolo nord dell'acquifero appare decisamente più salato e questo, presumibilmente per l'effetto di una maggiore ingressione attraverso la foce fluviale ed il relativo cuneo salino.

Le regionalizzazioni, come pure i risultati ottenuti con il modello, sono riportate per comodità solo per i layer 2 e 8, che corrispondono a profondità che variano rispettivamente da -23 m a -46 m (layer 2) e da 0 m a -9 m (layer 8).

Alimentazione zenitale

Nel modello come termine di sorgente è stata considerata la ricarica zenitale per infiltrazione efficace (I_{eff}), ottenuta applicando la seguente formula (APAT, 2006 "Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati").

$$I_{eff} = 0.0009 * P^2 (2)$$

dove:

P = Precipitazione media annuale ricavata dai dati rilevati nella stazione meccanica di Porto Recanati (cfr. par.2.1) .

Taratura del modello

Il metodo di taratura consiste nel confrontare per il sistema acquifero i risultati in termini di carico idraulico ottenuti dalla regionalizzazione dei dati sperimentali con quelli ottenuti dall'applicazione delle leggi deterministiche della meccanica dei fluidi.

Il sistema di equazioni che descrivono il moto del fluido nel mezzo poroso utilizza, come incognita, il carico idraulico in ogni nodo del discreto, tuttavia per poter risolvere tali equazioni è necessario conoscere anche la conducibilità idraulica che in prima approssimazione non è invece disponibile. Il metodo adottato si basa nell'utilizzare il modello per ricavare direttamente per tentativi i valori di conducibilità idraulica partendo in questo caso da una distribuzione iniziale dei valori ricavata dalla ricostruzione idrostratigrafica. Dato che il modello deve simulare anche il

trasporto di sostanze in soluzione, lo stesso approccio è stato utilizzato per la taratura i coefficienti di dispersione longitudinale e trasversale che controllano l'equazione relativa.

La taratura è stata portata avanti fino a raggiungere una precisione di circa ± 3 cm e ± 0.5 g/l per ciascun nodo della griglia, rispettivamente per il carico idraulico e la concentrazione. Il risultato, in termini di P_{max}, è riportato nel diagramma di Fig. 14 sotto forma di classi; le classi iniziano da $P_{max}=1.0*10^{-7}$ m/s (classe 1) e terminano con $P_{max}=5.0*10^{-2}$ m/s, con intervalli pari a mezzo ordine di grandezza; la classe con maggiore frequenza corrisponde a $P_{max}=5*10^{-4}$ m/s. Analogamente, in Fig. 15 è riportata la distribuzione in classi di L_{max}, essendo il limite superiore delle classi rispettivamente 50, 100, 500, 1000, 5000 e oltre 5000 m e la classe maggiormente presente è $L_{max}=500$ m.

Nelle Fig. 16 e Fig. 17 è invece riportata un'immagine con la distribuzione tridimensionale di P_{max} e P_{min}. Infine, in Tab. 1 è riportato lo schema dei rapporti di scala utilizzato per la definizione delle componenti delle dispersioni. Per quello che riguarda il carico idraulico e la concentrazione, sono state estratte le immagini riferite ai layer 2 e 8, come già visto nei paragrafi che precedono. Le Fig. 19-Fig. 20 per il carico idraulico, e le Fig. 21-Fig. 22 per la concentrazione mostrano i risultati ottenuti.

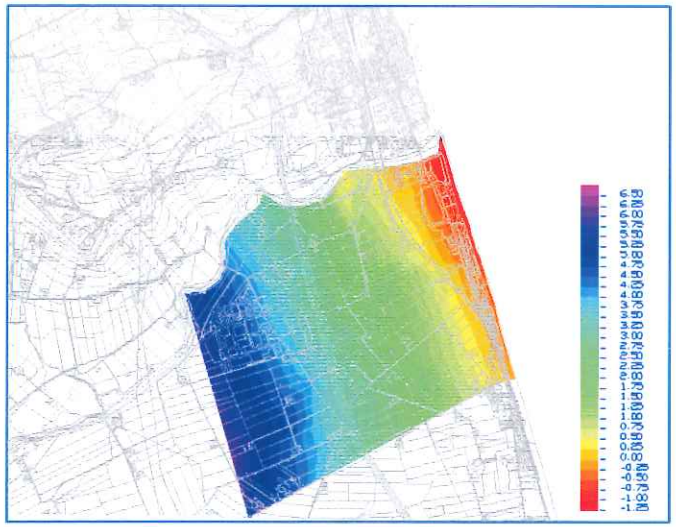

FIG. 10 – CARICO IDRAULICO DI RIFERIMENTO (LAYER 2)

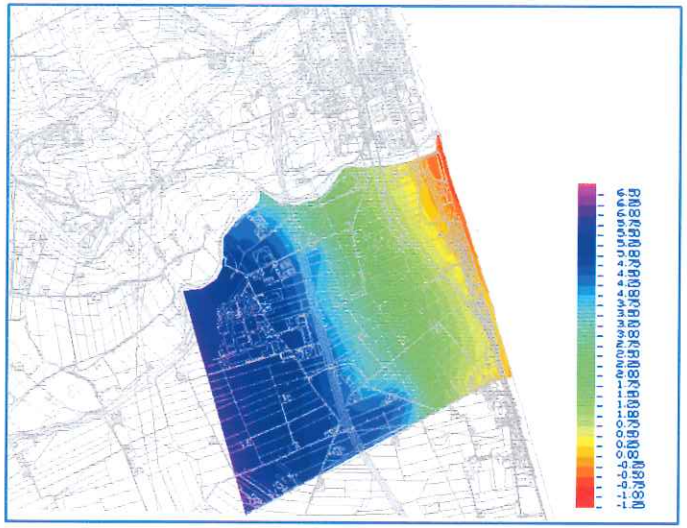

FIG. 11 – CARICO IDRAULICO DI RIFERIMENTO (LAYER 8)

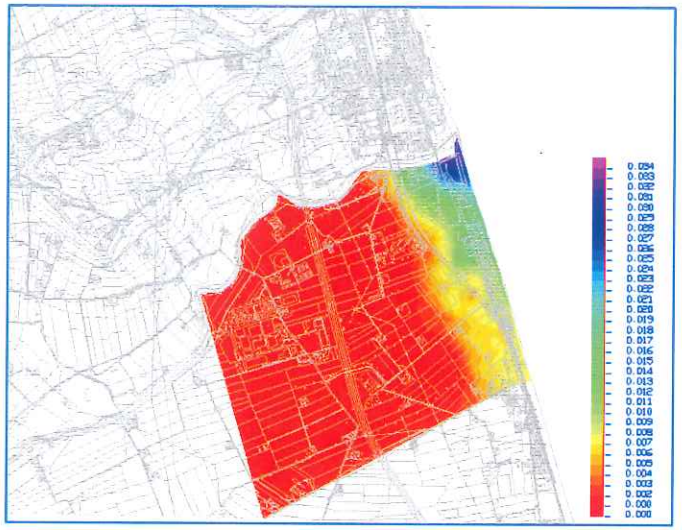

FIG. 12 - SALINITA' DI RIFERIMENTO (LAYER 2)

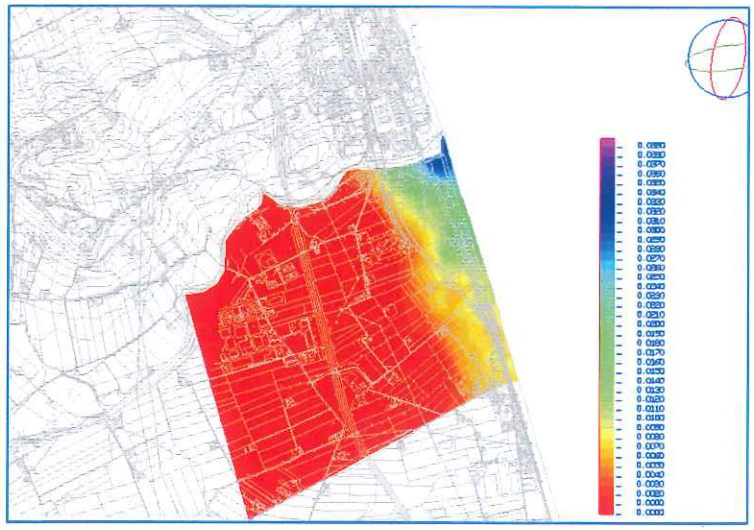

FIG. 13 - SALINITA' DI RIFERIMENTO (LAYER 8)

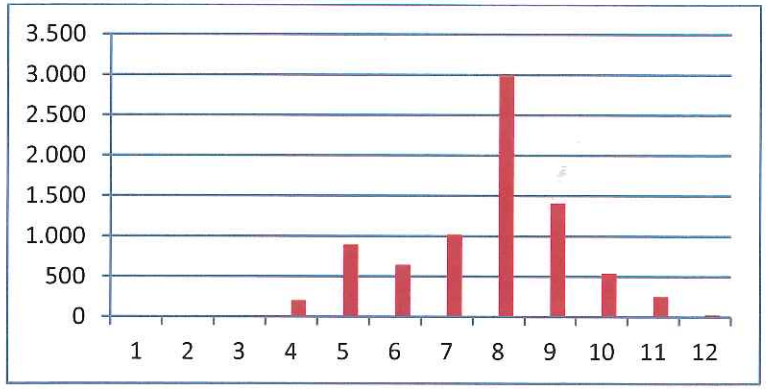

FIG. 14 - P_{MAX} IN CLASSI DOPO LA TARATURA

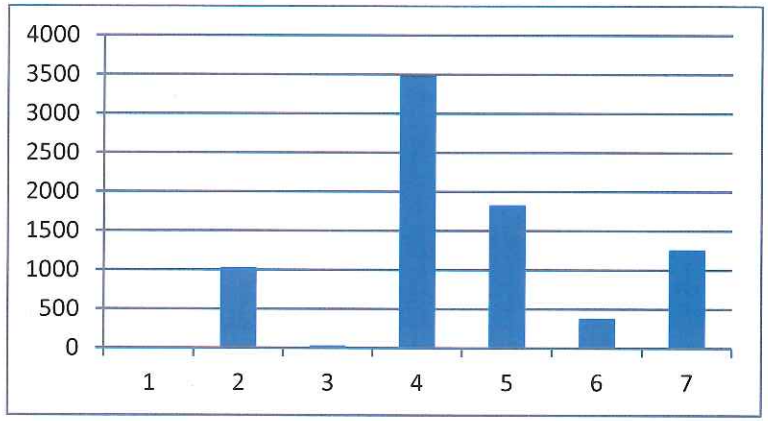

FIG. 15 - L_{MAX} IN CLASSI DOPO LA TARATURA

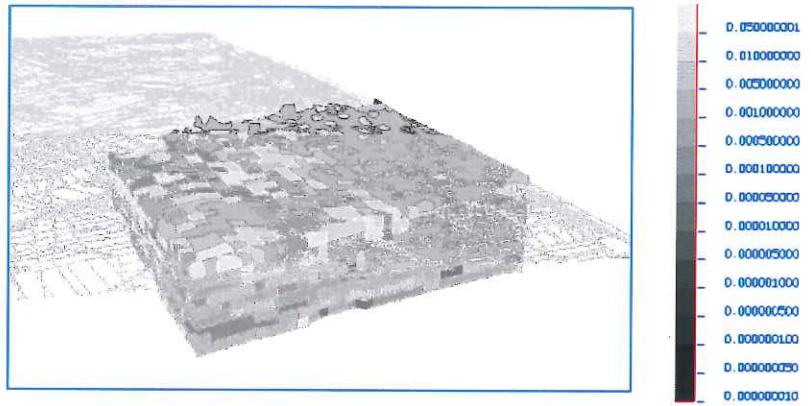

FIG. 16 - DISTRIBUZIONE DI P_{MAX} DOPO LA TARATURA (VALORI IN M/S)

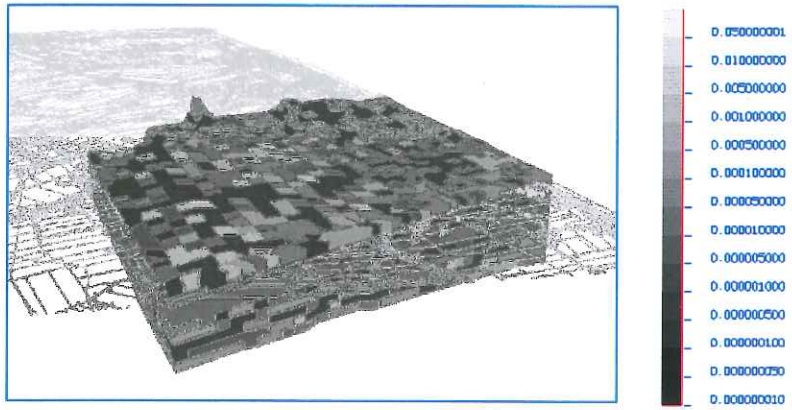

FIG. 17 - DISTRIBUZIONE DI P_{MIN} DOPO LA TARATURA (VALORI IN M/S)

Componente	Fattori di scala
L_{max}	1
L_{mid}	0.4
L_{min}	0.8
T_{max}	0.8
T_{mid}	0.5
T_{min}	0.8

TAB. 1 – RAPPORTI TRA LE COMPONENTI DELLA DISPERSIONE

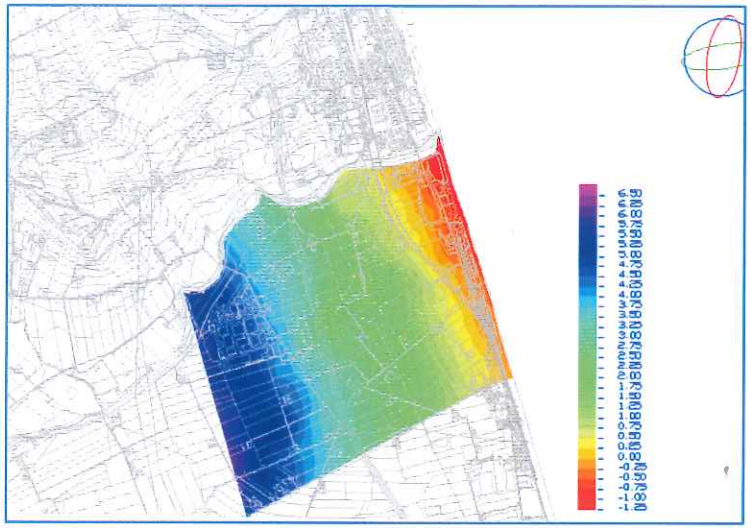

FIG. 18 – CARICO IDRAULICO DOPO LA TARATURA (LAYER 2)

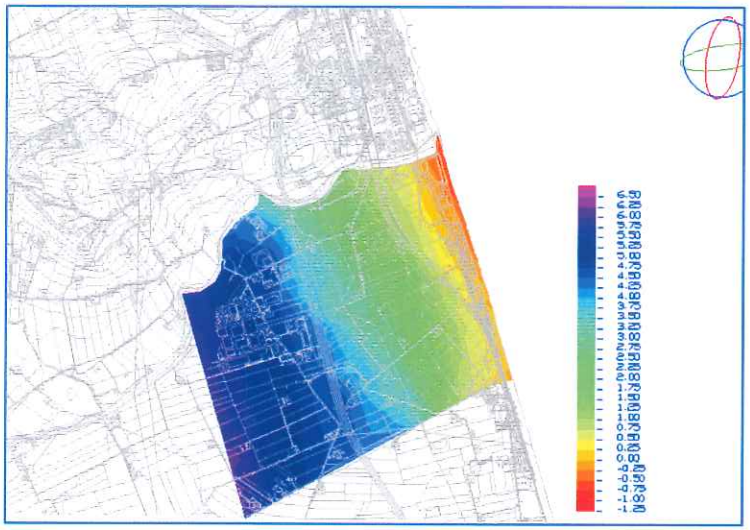

FIG. 19 – CARICO IDRAULICO DOPO LA TARATURA (LAYER 8)

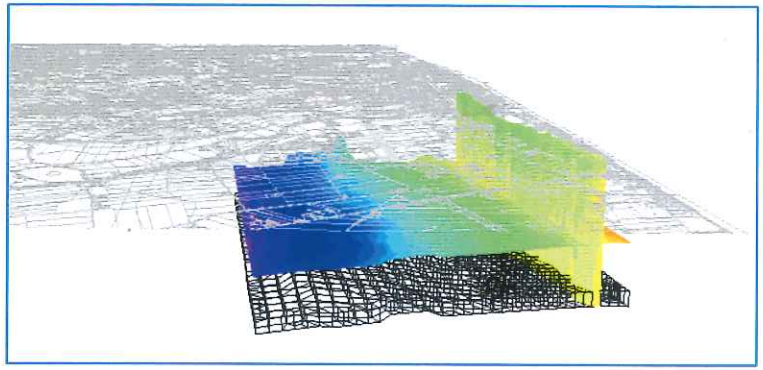

FIG. 20 – CARICO IDRAULICO DOPO LA TARATURA IN 3 D

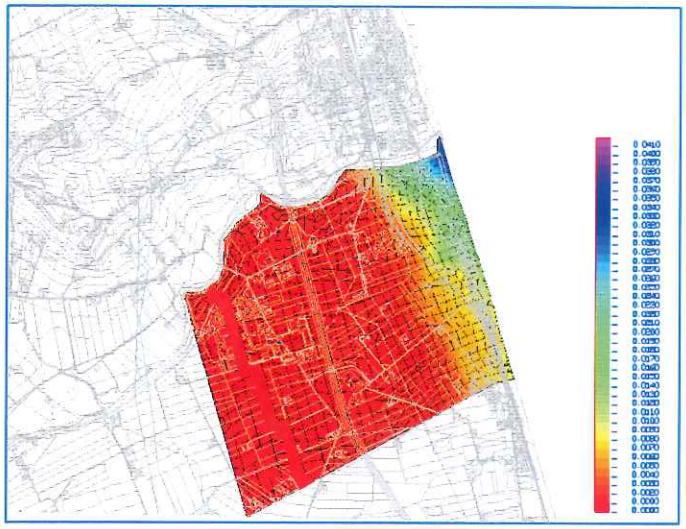

FIG. 21 – SALINITÀ DOPO LA TARATURA (LAYER 2)

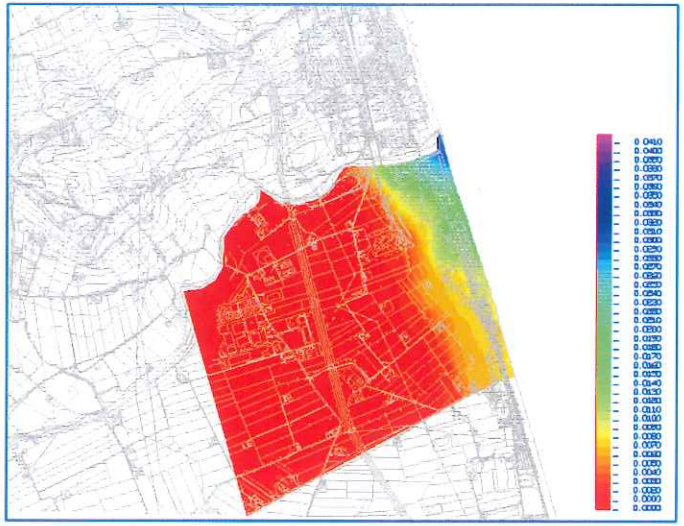

FIG. 22 – SALINITÀ DOPO LA TARATURA (LAYER 8)

Simulazione dell'effetto dell'aumento del livello del mare

Lo scopo del modello è quello di simulare gli effetti che si possono avere variando le condizione del sistema idraulico e, in particolare, si è cercato di valutare gli effetti prodotti dalla forzante meteo marina sulla zona di diffusione. In pratica, per ottenere questo risultato è stata imposta una nuova condizione di carico idraulico nel bordo sul lato a mare corrispondente ad un innalzamento del livello marino di 1,5 m. La simulazione è stata protratta per 72 ore ed ha prodotto i risultati riportati in Fig. 23 e Fig. 24.

I diagrammi delle due figure successive invece (figg. 25 e 26) si riferiscono rispettivamente all'evoluzione di carico idraulico e salinità in corrispondenza di un nodo posto circa al centro del lato orientale del modello (sulla linea di riva) e in corrispondenza del layer più elevato, in modo da dare un'idea dell'andamento della simulazione nel tempo.

Dalla fig. 23 si vede comunque che l'ampiezza della fascia interessata idraulicamente nel corso della simulazione è nell'ordine dei 100 m dalla linea di riva.

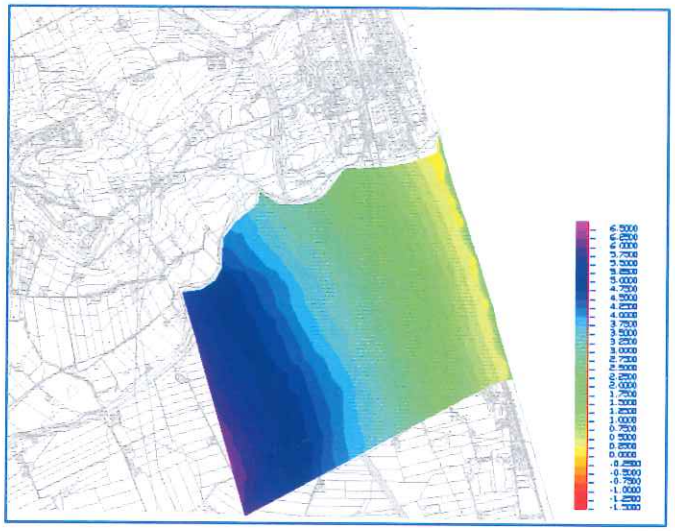

FIG. 23 – CARICO IDRAULICO DOPO 2 ORE DI SIMULAZIONE (LAYER 10, VALORI IN M SLM)

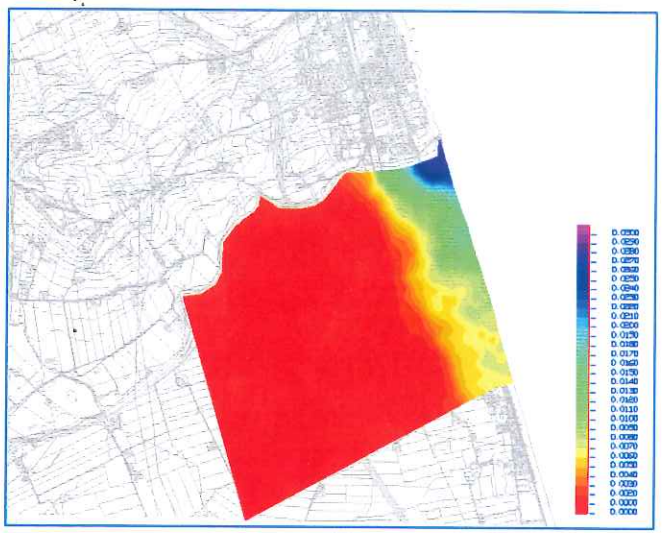

FIG. 24 – ZONA DI DIFFUSIONE DOPO 2 ORE DI SIMULAZIONE (LAYER 10, VALORI IN KG_S/KG)

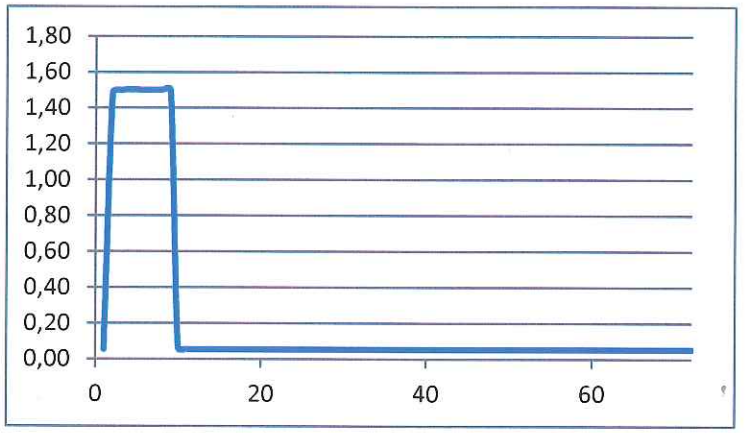

FIG. 25 – EVOLUZIONE DEL CARICO IDRAULICO (TEMPO IN ORE, CARICO IN M SLM)

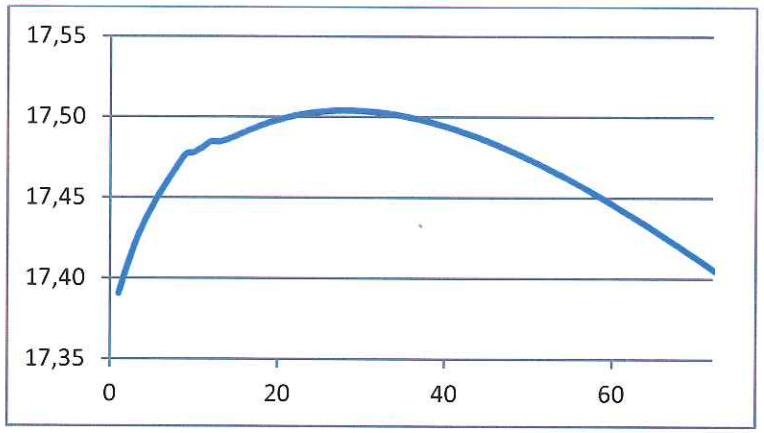

FIG. 26 – EVOLUZIONE DELLA CONCENTRAZIONE (TEMPO IN ORE, CONCENTRAZIONE IN G/L)

Simulazione della perforazione di un nuovo pozzo per acqua

Questa simulazione ha riguardato l'ipotesi della perforazione di un nuovo pozzo per acqua nella posizione indicata in rosso in Fig. 27. La simulazione è stata realizzata con portate in estrazione rispettivamente di 2.5, 5, 10 e 20 l/s.

Il fondo pozzo è stato ipotizzato a circa -40 m sul livello del mare ed il calcolo è stato realizzato in regime transitorio per un periodo di tempo sufficiente a garantire il raggiungimento dell'equilibrio, che, in questo caso, è stato nell'ordine dei 2 anni.

Va ricordato, a questo proposito, che si tratta di un equilibrio del tutto teorico a partire dalla condizione iniziale che, nel caso specifico, si riferisce ad un periodo di inizio estate. I risultati quindi, vanno considerati abbastanza a favore della sicurezza, dato che l'alimentazione da monte non è più al massimo del ciclo idrologico. Infine, e sempre per mettersi in condizioni di sicurezza, ai pozzi dell'acquedotto è stata assegnata una portata costante abbastanza elevata, pari a 40 l/s.

I risultati devono quindi essere valutati considerando che le piene autunnali e primaverili producono lo spostamento a valle della zona di diffusione e viceversa e che la portata dei pozzi dell'acquedotto può subire variazioni significative.

FIG. 27 – POSIZIONE DEL POZZO IPOTIZZATO NELLA SIMULAZIONE (IN ROSSO)

I risultati sono esposti sotto forma di diagrammi del carico idraulico e della concentrazione sia nell'ipotetico pozzo, sia in corrispondenza dei pozzi dell'acquedotto.

Nei diagrammi, la simbologia adottata è la seguente. I codici "p_" e "a_" si riferiscono ai nodi della griglia corrispondenti rispettivamente alla nuova perforazione e al pozzo dell'acquedotto più vicino (circa 680 m), che sono stati utilizzati per ricostruire le serie. I numeri che seguono il codice indicano la portata simulata:

a) 0: solo portata acquedotto (40 l/s)
b) 2.5: nuovo pozzo con 2.5 l/s + acquedotto
c) 5: nuovo pozzo con 5 l/s + acquedotto
d) 10: nuovo pozzo con 10 l/s + acquedotto
e) 20: nuovo pozzo con 20 l/s + acquedotto

I risultati si possono sintetizzare come segue:

a) la concentrazione, nei pressi dell'acquedotto resta stabile fino all'estrazione di 5 l/s; con 10 l/s e oltre denuncia un leggero aumento, dell'ordine di 10-20 mg/l;
b) presso il nuovo pozzo, invece, la simulazione mostra una leggera diminuzione alle portate più basse, poi il riequilibrio allo stesso valore iniziale con la portata di 20 l/s. Questo aspetto si spiega con la maggiore vicinanza del pozzo alla zona di diffusione rispetto a quella dell'acquedotto; infatti, a portate modeste prevale la maggiore alimentazione da monte, che quindi favorisce l'afflusso di acqua dolce, mentre il richiamo d'acqua salata da valle diventa consistente solo a portate più elevate.

Questi aspetti sono documentati nella tabella 1 seguente, che riporta i valori della concentrazione all'equilibrio in funzione della portata. I diagrammi successivi, invece, riportano l'evoluzione del carico idraulico e della concentrazione nel tempo per tutta la durata della simulazione. Come si vede, per quello che riguarda l'acquedotto sia il carico che la concentrazione restano pressoché invariati (in entrambi i casi le curve sono praticamente sovrapposte), mentre quelle relative al pozzo sono disposte a quote maggiori o minori in funzione della portata ipotizzata. Le concentrazioni rispecchiano, nella loro evoluzione, quanto già espresso qui sopra.

Q (l/s)	0	2.5	5	10	20
Pozzo	2.41	2.30	2.28	2.31	2.41
Acquedotto	1.60	1.60	1.60	1.61	1.63

TAB. 2 - CONCENTRAZIONI ALL'EQUILIBRIO (VALORI IN G/L)

Conclusioni

Gli sviluppi del modello, svolti sino a questo punto, hanno reso evidente la necessità di individuare meglio la condizione sul lato a mare. In particolare gli approfondimenti che si ritengono utili riguardano sia la struttura dell'acquifero che la distribuzione della salinità delle acque. Proprio in questa posizione infatti le informazioni disponibili mostrano una non facile schematizzazione della struttura idrogeologica presente, così come la definizione dell'interfaccia tra le acque dolci e salate.

Le simulazioni condotte riguardo gli effetti prodotti dalla forzante meteo-marina, basate sul modello definito ad oggi, mostrano che gli effetti idraulici sono limitati ad una fascia di circa 200 m dalla linea di riva. Allo stesso modo gli effetti sulla distribuzione della salinità sono limitati sia nello spazio che nel tempo, e comunque appaiono dovuti più all'ingresso di acqua di mare dalla superficie che dalla quota d'acqua di mare.

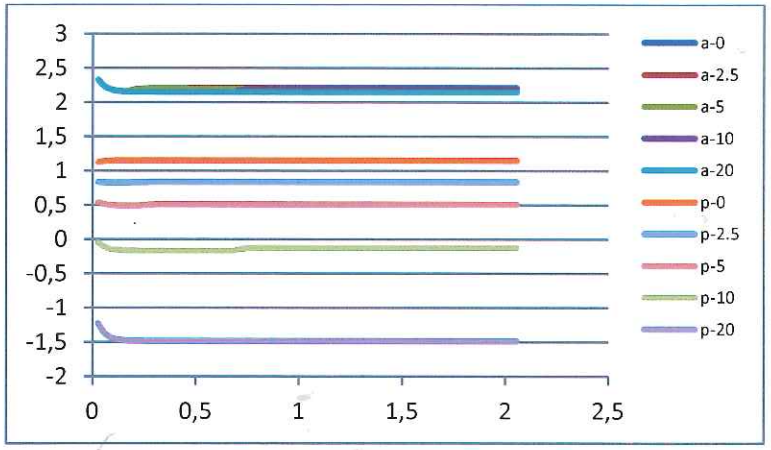

FIG. 28 - EVOLUZIONE DEL CARICO IDRAULICO (TEMPO IN ANNI, CARICO IN M SLM)

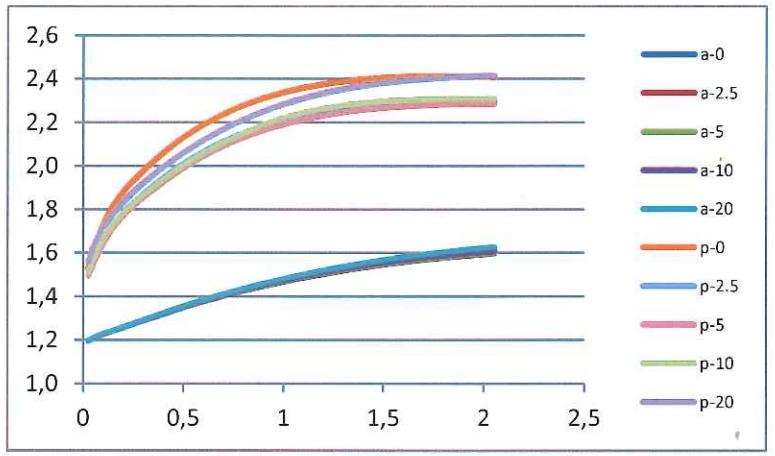

FIG. 29 - EVOLUZIONE DELLA CONCENTRAZIONE (TEMPO IN ANNI, CONCENTRAZIONE IN G/L)

Bibliografia

ASTEA, Studio idrogeologico della falda subalvea del F. Potenza da Sambucheto alla foce, rapporto tecnico, 2001

VOSS C. I. & PROVOST A. M., *SUTRA - A Model for Saturated-Unsaturated, Variable-Density Ground-Water Flow with Solute or Energy Transport*. U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 02-4231. Version of September 22, 2010 (SUTRA Version 2.2), Reston, Virginia (USA) 2010