

# RISULTATI DI UNO SCENARIO MODELLISTICO PER LO STUDIO DELL'INTERAZIONE FRA FIUME E FALDA

A cura di D. Rigamonti & M. Consonni

[dario.rigamonti@tethys-geco.it](mailto:dario.rigamonti@tethys-geco.it), [mauro.consonni@tethys-geco.it](mailto:mauro.consonni@tethys-geco.it)

## 1 INTRODUZIONE

Lo studio propone un esempio di applicazione del package (o modulo) STR1 (Stream Routing Package) del codice numerico di flusso sotterraneo, MODFLOW 2000<sup>1</sup>. Il modulo STR1 rappresenta un'estensione di MODFLOW che permette di rappresentare in modo più preciso ed accurato i rapporti fra flussi superficiali e flussi sotterranei. Il presente lavoro tratta l'applicazione del modulo STR2 per la valutazione preliminare dell'effetto della potenziale ricarica della falda freatica in seguito alla realizzazione di due rampe stabilizzatrici (soglie) lungo un'asta fluviale. Tali opere, essendo disposte trasversalmente all'alveo del fiume, rivestono una funzione di ricarica della falda freatica, attraverso un aumento delle superfici bagnate dal deflusso permanente, e del conseguente incremento della capacità disperdente dell'alveo.

### 1.1 PRINCIPALI CARATTERISTICHE DEL MODULO STREAM ROUTE (MODFLOW)

La sostenibilità dello sfruttamento delle risorse idriche riceve un forte impulso dalla gestione integrata fra acque superficiali e sotterranee. La tematica della disponibilità idrica è sempre più attuale ed anche nell'ambito scientifico si sono moltiplicati gli studi e le ricerche in questo senso. Nel settore della modellistica numerica delle acque sotterranee si menziona, ad esempio, il documento dell'USGS *"Groundwater and Surface Water – A Single Resource"* che ha aperto un nuovo ambito di ricerca e lo sviluppo dei moduli di MODFLOW, *"Stream flow-Routing (STR), New Streamflow-Routing (SFR1 ed SFR2) package to simulate Stream- Interaction"*.

Nel caso in oggetto è stato impiegato il modulo STR per valutare dell'effetto della potenziale ricarica della falda freatica in seguito alla realizzazione di due rampe stabilizzatrici (soglie) lungo un'asta fluviale. Il modulo Stream Routing Package STR1 (Prudic, 1989) permette di determinare la portata nel corso d'acqua in conseguenza degli scambi con la falda limitando la ricarica della falda alla portata effettivamente disponibile. Il fiume è implementato nel modello attraverso segments e reaches (Figura 1). Un recapito (reach) identifica una singola cella del modello di flusso, mentre n segment consiste di una serie di reach connessi in direzione della corrente. Un segment può avere anche altri segment tributari. Il modulo costituisce un'evoluzione del modulo River (RIV); infatti con lo STR package, il flusso transitante nel fiume viene specificato dall'utente nella prima cella che rappresenta il fiume stesso nel dominio.

Gli scambi tra l'acquifero ed il corso d'acqua e di conseguenza la portata transitante per ogni cella del dominio di calcolo sono mutuati dalla differenza di livello tra le quote piezometriche fiume – falda tramite il parametro della Conductance CSTR tenendo in considerazione eventuali input / output dovuti alla presenza di affluenti o emissari.

Il programma provvede inoltre, a seguito delle variazioni di portata nel corso d'acqua, a ricalcolare le quote piezometriche nel fiume<sup>2</sup>, in dipendenza degli scambi fiume falda (Figura 2), utilizzando

---

<sup>1</sup> Harbaugh, 2000

<sup>2</sup> opzione disponibile nei packages SFR1 e SFR2

anche, come variabili di input, le caratteristiche idrauliche e geometriche della sezione (quota, pendenza, larghezza, scabrezza).

$$Q = CSTR \cdot (H_s - H_a)$$

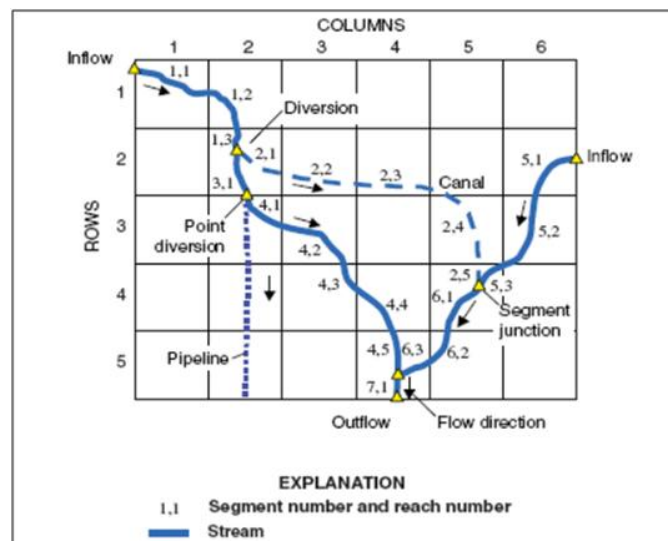
in cui:

$H_s$  livello dell'acqua nel fiume [L];

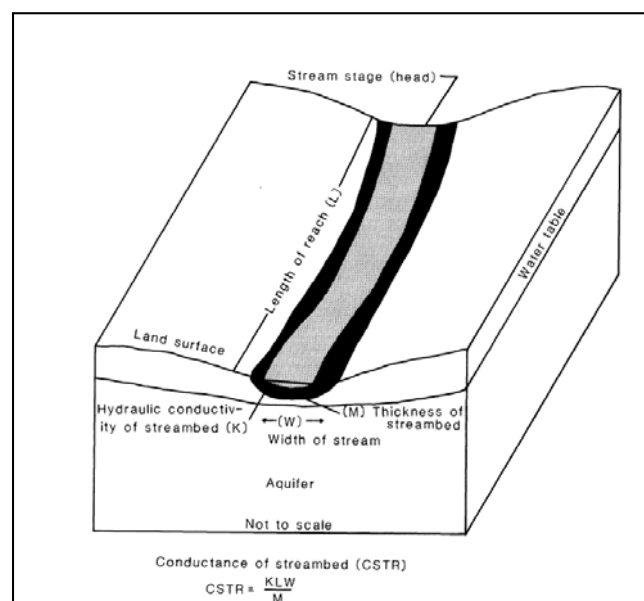
$H_a$  livello dell'acqua nella cella dell'acquifero adiacente al fiume [L];

$CSTR$  [L<sup>3</sup>/T] conduttanza.

Negli ultimi anni, per far fronte alle sempre più ricorrenti problematiche e necessità di approfondire i rapporti fra i corpi idrici sotterranei e superficiali sono stati implementati due nuovi moduli SFR1 ed SFR2. Nel caso di studio, per gli scopi del lavoro ed i dati disponibili è stato utilizzato il modulo STR.



**Figura 1:** Esempio della modalità di numerazione dei corpi idrici nello schema segment-reach rispetto alla direzione di flusso nella griglia di discretizzazione del modello numerico



**Figura 2:** Schematizzazione del sistema fiume falda ed esemplificazione della modalità di calcolo della conduttanza

## 2 APPLICAZIONE DEL MODELLO NUMERICO E DEL MODULO STREAM AL CASO DI STUDIO

Il modulo Stream è stato applicato nell'ambito dell'implementazione di un modello numero di flusso di una porzione di acquifero in un settore dell'alta pianura bresciana .

### 2.1 CARATTERIZZAZIONE DELL'AREA

La struttura geologica del sottosuolo nell'area in esame è costituita da un substrato roccioso a bassa permeabilità rinvenuto a circa 50 m da p.c. nel settore NW, mentre verso SE si approfondisce rapidamente fino ad oltre 200 m da p.c.. Al di sopra del substrato è presente una potente successione alluvionale costituita in prevalenza da ghiaie con sabbia e ciottoli, con subordinate intercalazioni sabbioso limose. All'interno dell'area scelta come dominio per la modellazione l'acquifero presenta caratteristiche di monostrato. L'elemento idrografico di superficie più rilevante è rappresentato da un corso d'acqua le cui portate variano mediamente tra circa 10 e 100 mc/s, con picchi in corrispondenza di eventi di piena che possono raggiungere i 600 mc/s. Le portate presentano oscillazioni stagionali connesse con le variazioni del regime termopluviometrico e le captazioni ad uso irriguo. Nell'area sono stati realizzati alcuni piezometri in prossimità dell'alveo del fiume in sinistra e destra idraulica in prossimità delle zone dove è prevista l'installazione delle briglie. Sulla base dei dati misurati delle fonti bibliografiche a disposizione è stata ricostruita la superficie piezometrica che presenta una direzione di deflusso prevalente da NW a SE con un gradiente variabile tra 0.05% (settore NW) 0.3% (settore SW). I livelli piezometrici variano tra circa 69 e 51 m s.l.m, con una soggiacenza mediamente compresa tra 9 e 20 m da p.c. Il fiume evidenzia un effetto alimentante sulla falda nel tratto compreso tra le stazioni di misura P1 e P2 mentre più a valle pare esercitare un'azione drenante.

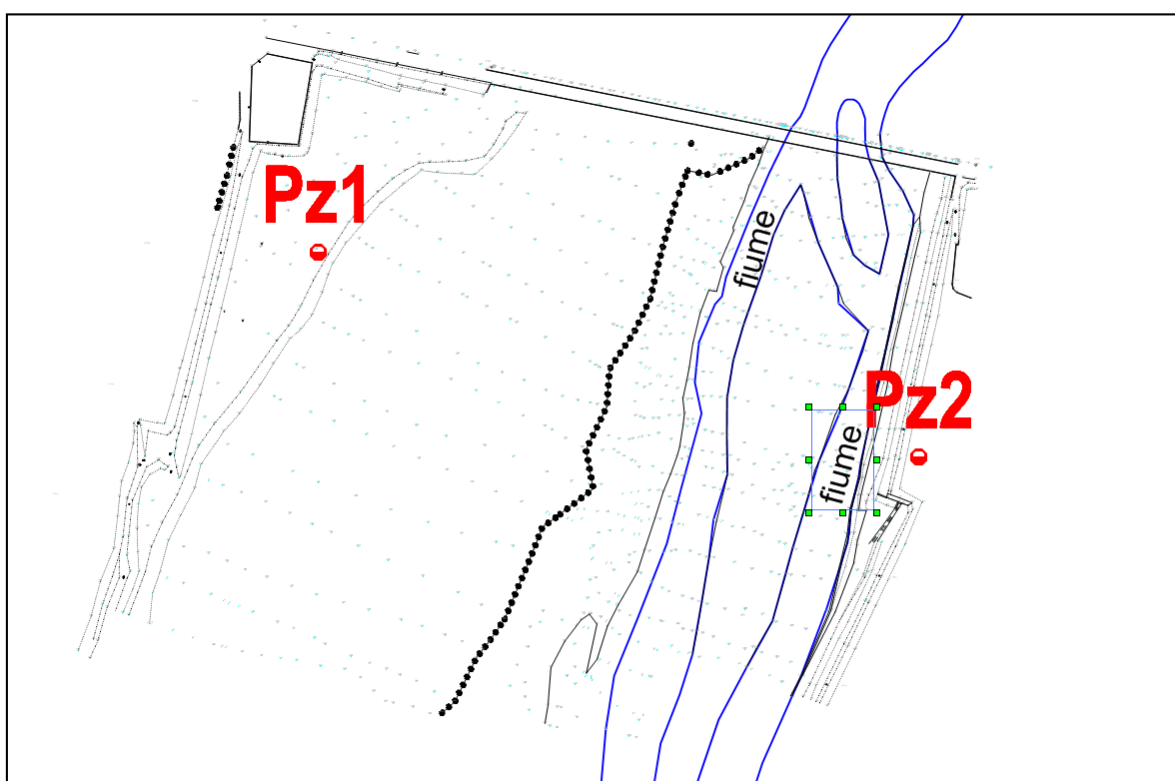
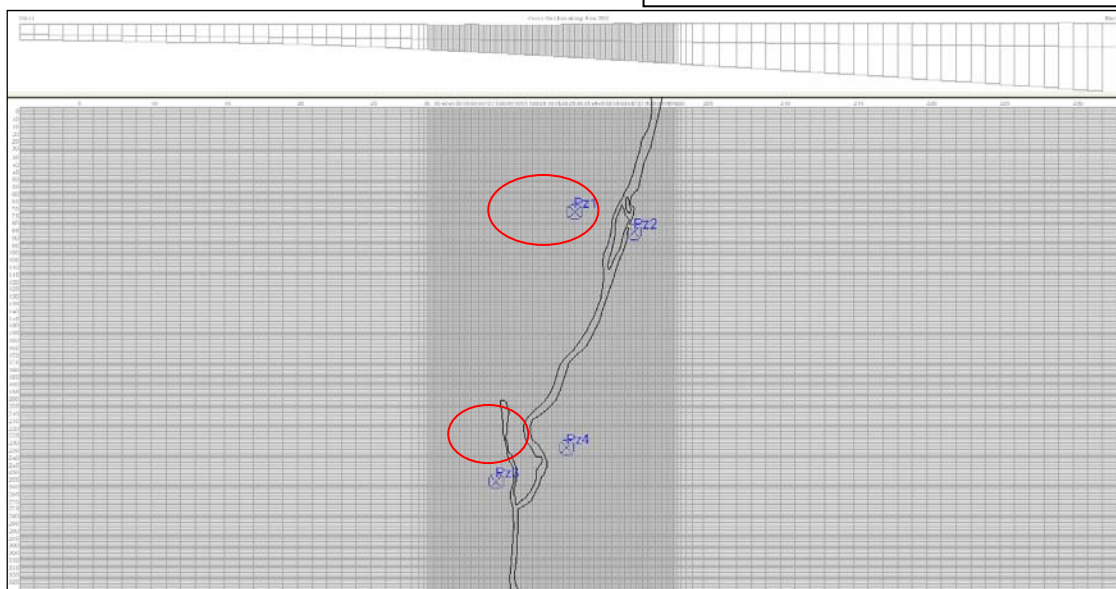
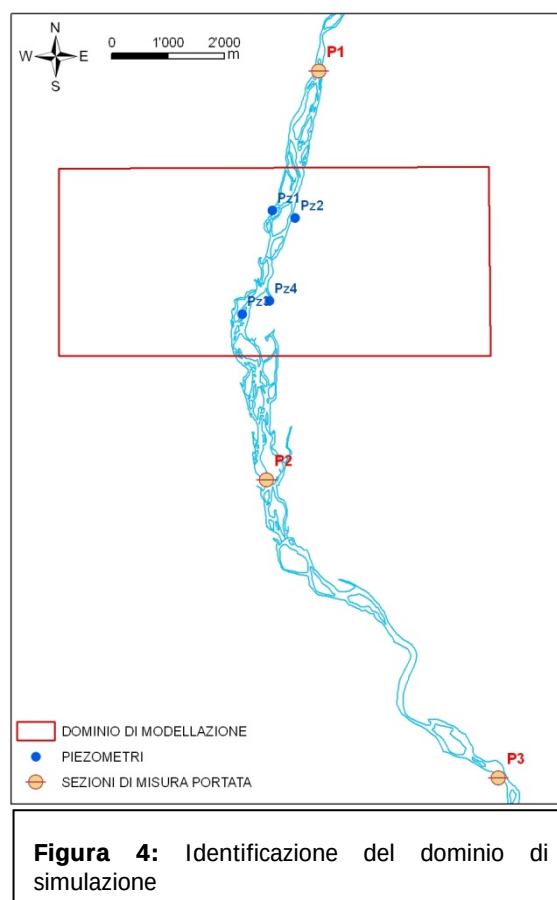


Figura 3: Inquadramento dell'area di studio

## 2.2 IMPOSTAZIONE DEL MODELLO DI FLUSSO

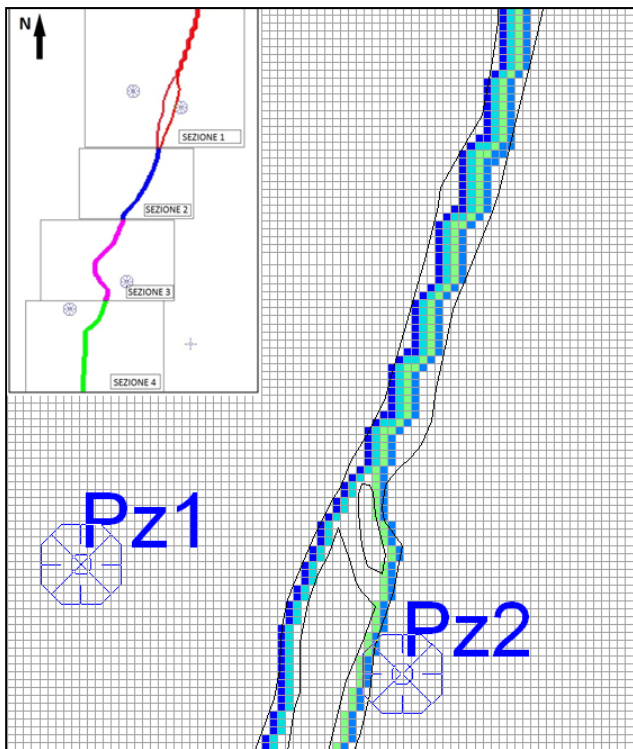
Il codice applicato, MODFLOW, è un modello numerico di flusso tridimensionale alle differenze finite. Sviluppato dal Servizio Geologico Americano (USGS), è costituito da una serie di moduli, detti pacchetti, ciascuno capace di modellare i diversi aspetti idrogeologici sia naturali che antropici. Nel caso in esame il codice di calcolo è stato impiegato con il GUI GroundWater Vistas v. 5.0.

Nell'impostazione del modello di flusso sono state definite le geometrie tridimensionali, le condizioni al contorno e le proprietà idrogeologiche. Il dominio spaziale dell'area (circa 24 km<sup>2</sup> e 70 m di profondità) è stato discretizzato con una griglia tridimensionale formata da 328 righe, 232 colonne e 2 layer (strati) per un totale di 152192 celle attive, con spaziatura variabile fra 100 m ai limiti del modello e 10 m nell'area nel settore d'interesse in corrispondenza delle soglie, in modo tale da garantire stabilità al processo di convergenza e sufficiente dettaglio nella riproduzione dell'assetto piezometrico nelle aree di maggiore interesse (Figura 5).



**Figura 5:** Discretizzazione orizzontale e verticale del dominio di simulazione ed identificazione delle aree di realizzazione degli soglie S1 ed S2

Le condizioni al contorno sono state impostate utilizzando limiti del primo e del terzo tipo (Anderson & Woessner, 1992). Sono stati inseriti sia limiti di tipo idrologico reale, per modellizzare i corpi idrici superficiali presenti, sia limiti di tipo idraulico artificiale, ai limiti esterni del dominio. I valori di carico idraulico assegnati alle condizioni sono stati determinati in base alle piezometrie



**Figura 6:** rappresentazione delle condizioni *stream* assegnate al modello, è stato inserito un segmet diverso per ognuna delle quattro celle che rappresenta la l'alveo del fiume

regionali interpolate a partire dai dati osservati di agosto 2008 e settembre 2009, presi come riferimento per gli scenari modellistici implementati (cfr. cap. 3).

Come detto in premessa il fiume è stato simulato attraverso condizioni di carico idraulico dipendente da flusso (condizione di Cauchy) utilizzando lo *Stream Routing Package STR1* (Prudic, 1989) di Modflow. Nell'area occupata dal fiume, la dimensione delle celle costituenti la griglia (10x10 m) risulta inferiore alla larghezza media dell'alveo (circa 50 m), pertanto il fiume è stato rappresentato tramite l'inserimento di 4 file di condizioni *Stream* adiacenti (Figura 5). Ciascuna fila è stata a sua volta suddivisa, in direzione dell'asse fluviale in 4 sezioni, costituendo un totale di 16 segmenti (Figura 6); tale suddivisione è stata operata per rappresentare le variazioni dei parametri della

condizione (in particolare delle permeabilità dei sedimenti del riverbed e del livello idrometrico) lungo l'asta fluviale. Allo spessore dei sedimenti dello *Stream bed* è stato assegnato un valore costante di 5 m e una permeabilità variabile tra

$9e-06$  m/s e  $2e-05$  m/s a seconda dei tratti fluviali. I diversi valori di permeabilità sono stati determinati a valle del processo di calibrazione in condizioni indisturbate (prima della realizzazione delle opere, cfr. par. 2.1).

Il livelli idrometrici (Figura 7) del fiume attribuiti alle condizioni (*Stream stage*) sono stati dedotti dalle misure eseguite in corrispondenza dell'idrometro nei pressi della prima soglia e sulla base dell'altimetria della superficie topografica lungo l'asta fluviale. La portata del fiume in ingresso al dominio (*flow entering segment*) è stata calcolata a partire dai dati rilevati presso la sezione P1, in occasione delle misure eseguite il 19 febbraio 2008. I dati utilizzati per il calcolo sono riportati nella tabella successiva; le portate misurate nella stazione P1 nel febbraio 2008 sono simili a quelle osservate nei mesi di agosto 2008 e settembre 2009, le assunzioni fatte sopra sono quindi valide anche per questi 2 mesi.

Figura 7: impostazioni della condizione Stream attraverso l'interfaccia GroundWater Vistas

| 19 febbraio 2008 - ore 16 |                   |                           |
|---------------------------|-------------------|---------------------------|
| Stazione di misura        |                   | portata m <sup>3</sup> /s |
| P1                        |                   | 35.67                     |
|                           | dispersione P1-P2 | 12.82                     |
| P2                        |                   | 22.85                     |
|                           | dispersione P2-P3 | -6.89                     |
| P3                        |                   | 29.74                     |

Tabella 1: portate rilevate nel febbraio 2008 nelle diverse stazioni di misura sul fiume (fig. 1)

Per quanto riguarda le proprietà idrogeologiche del sistema, è stata definita la distribuzione della conducibilità idraulica, in base alle informazioni disponibili, assegnandole un valore 2.5e-03 m/s, compatibile con i dati di letteratura per l'area in esame (in prevalenza depositi alluvionali ghiaiosi).

### 3 SIMULAZIONI

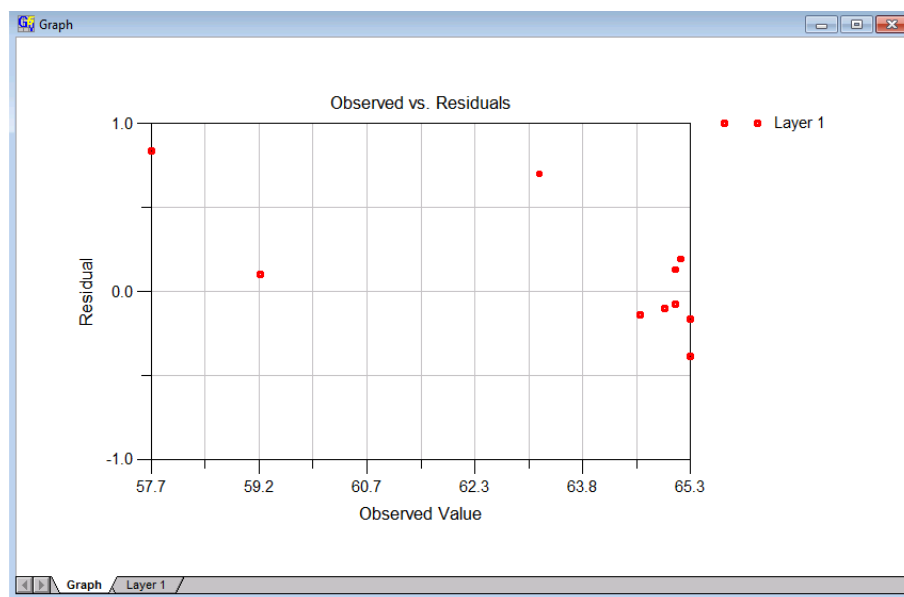
Allo scopo effettuare una stima degli effetti delle opere trasversali sulla dispersione in alveo sono stati eseguiti due diversi scenari modellistici, entrambi in condizioni stazionarie. Il primo scenario ha previsto la simulazione della situazione precedente alla realizzazione delle soglie.

Per il primo scenario, le condizioni piezometriche e idrometriche di riferimento utilizzate per la simulazione corrispondono a quelle del mese di agosto 2008. Nel secondo scenario è stata riprodotta la situazione del settembre 2009, ovvero successiva alla messa in opera delle soglie fluviali, S1 e S2.

#### 3.1 SCENARIO 1

Oltre ai dati di input già illustrati nel paragrafo precedente per l'implementazione dello scenario è stata impostata, quale portata in ingresso al fiume (condizione stream) la portata (*flow entering segment*<sup>3</sup>) di 35.67 mc/s (misurata nel mese di Agosto 2008 nei pressi della stazione di misura P1). I valori piezometrici osservati (*observation targets*) nello stesso periodo variano da monte a valle fra 82.8 e 68 m s.l.m. L'output del modello in termini di piezometria simulata (Figura 9) mostra una buona capacità di riprodurre i livelli piezometrici osservati in campo. Gli scarti tra valore osservato e simulato negli *observation targets* posti nei pressi delle soglie (Pz1-2-3-4) risultano infatti compresi tra 0.15 e -0.38 m (Figura 8).

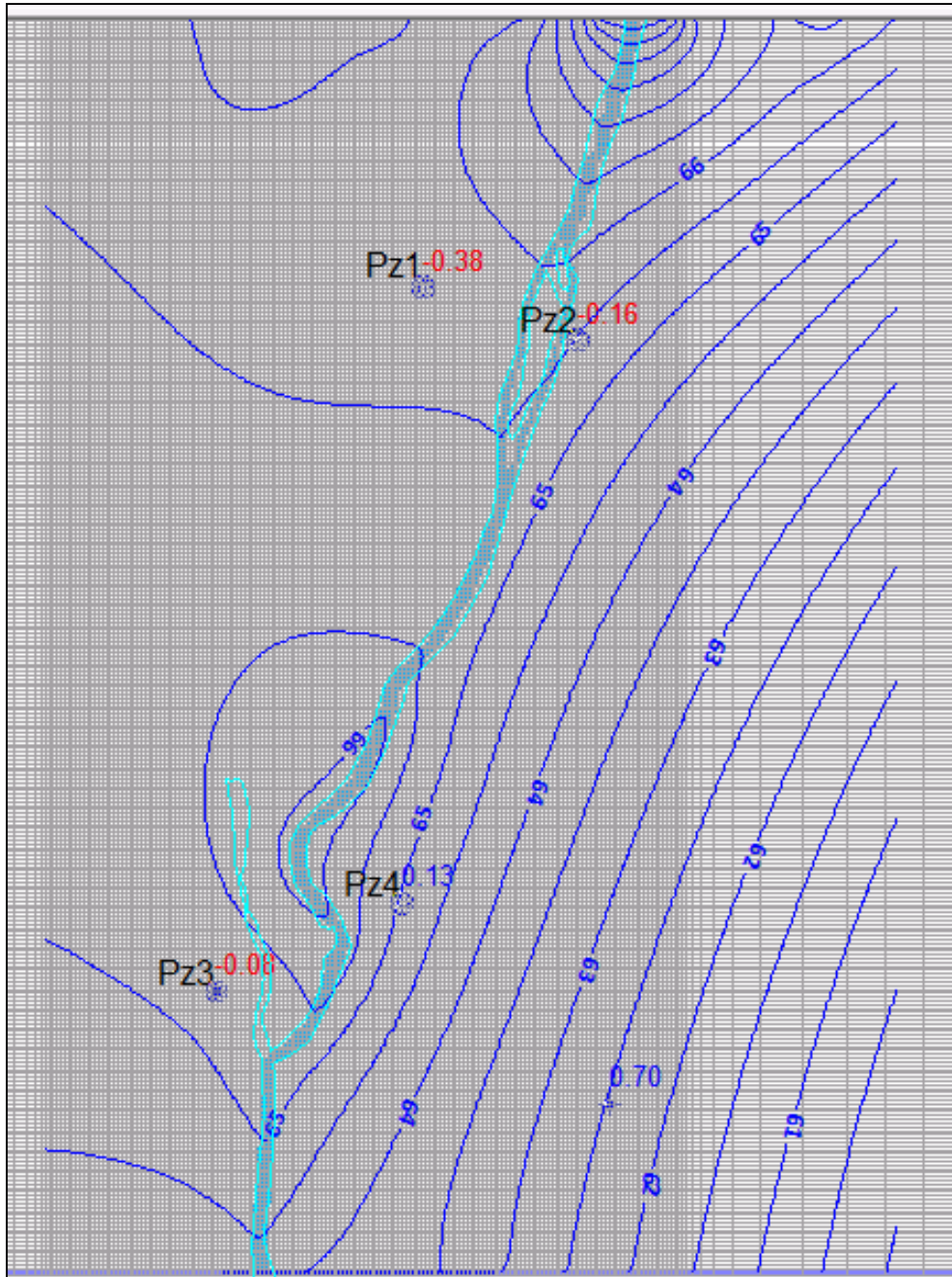
Il bilancio di massa mostra che la portata complessiva dispersa in falda dal fiume ammonta a 3.38 mc/s, corrispondenti a poco più di 1 mc/s/km. Tale valore appare dello stesso ordine di grandezza di quello stimato durante la campagna di misura di febbraio 2008, compresa tra 0.79 e 1.90 mc/s/km nel tratto tra le sezioni P1 e P2, in condizioni di portata fluente paragonabile con quella utilizzata nella simulazione.



**Figura 8:** Diagramma generale di calibrazione dello scenario 1 riferito alla situazione antecedente la realizzazione delle briglie

<sup>3</sup> Distribuita equamente sulle 4 celle che rappresentano il fiume





**Figura 9:** piezometria simulata nello scenario 1 (isopiezometriche in m s.l.m.)

### 3.2 SCENARIO 2

Questo scenario è stato utilizzato per riprodurre la piezometria osservata nel mese di settembre 2009, ad un anno di distanza dalla messa in opera delle soglie, in condizioni meteorologiche (piogge, temperature) simili, e quindi confrontabili, a quelle utilizzate per lo scenario precedentemente descritto. Gli *observation target* utilizzati per la verifica della calibrazione corrispondono ai livelli piezometrici rilevati nei giorni 4-11 settembre 2009. La costruzione del modello idrogeologico concettuale è stata completata, rispetto alle impostazioni utilizzate nell'agosto 2008, con le condizioni al contorno date da:

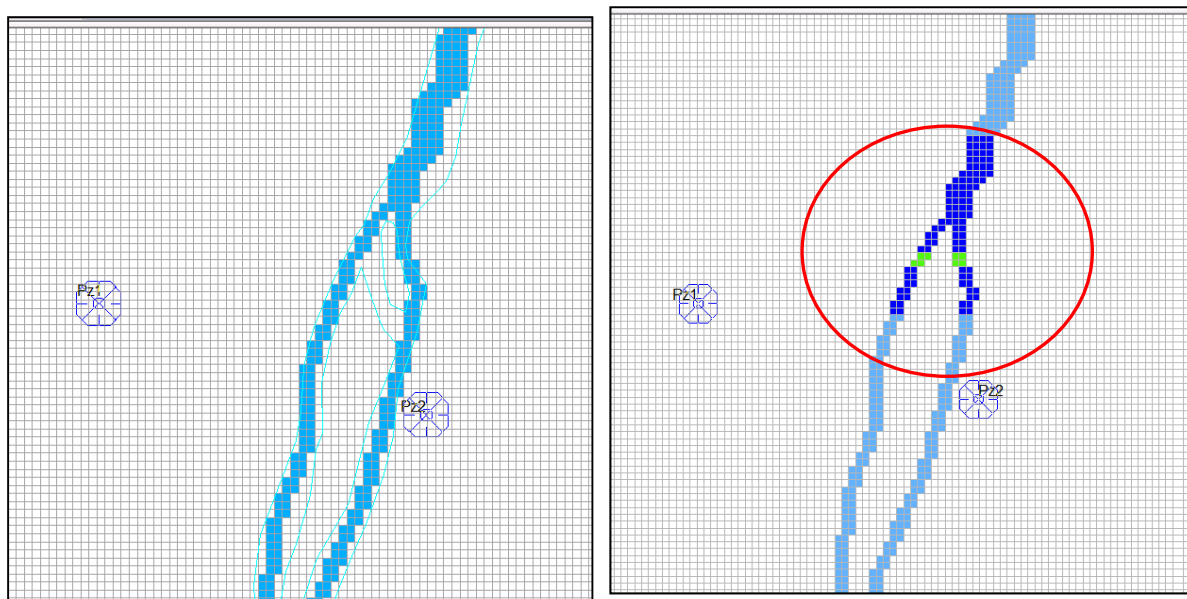
- condizioni di carico costante ai limiti del modello sono state ridefinite sulla base della piezometria regionale di settembre 2009; la morfologia della superficie piezometrica a



livello regionale è confrontabile con quella di agosto 2008, mentre i livelli nell'area del dominio risultano leggermente inferiori (circa 0.5 m)

- portata del fiume in ingresso da monte è stata incrementata fino a 62 mc/h in accordo con il valore medio relativo al mese di settembre 2009. I livelli idrometrici del fiume sono del tutto paragonabili a quelli di agosto 2008.

Infine, per simulare l'effetto della realizzazione briglie la larghezza della superficie bagnata dell'alveo fluviale<sup>4</sup> è stata incrementata da 50 m fino a circa 120 m (corrispondente alla lunghezza della soglia) in un tratto esteso per circa 150-200 m a monte e per 50-70 m a valle delle soglie. Inoltre in corrispondenza delle soglie è stata aumentata la permeabilità dello Stream bed fino a  $3e-04$  m/s in modo da simulare la presenza del sottofondo delle opere costituito da massi e ghiaie grossolane (Figura 10).



**Figura 10:** identificazione delle celle del dominio di simulazione oggetto di modifica fra lo scenario 1 (ante realizzazione delle briglie) e scenario 2 (post realizzazione delle briglie). Colore azzurro: tratti fluviali indisturbati (larghezza 50 m), colore blu: tratti che risentono dell'effetto delle briglie (larghezza 120, m); colore verde: tratti corrispondenti alle soglie

<sup>4</sup> Il modulo STR permette di simulare una sezione di flusso del corpo idrico superficiale rettangolare

La Tabella 2 riassume le impostazioni utilizzate per l'implementazione dei due scenari. Per quanto attiene alla valutazione degli scambi fra fiume ed acquifero in seguito alla realizzazione delle briglie, la dispersione complessiva del fiume ammonta a 5.66 mc/s, e risulta 2.28 mc/s maggiore rispetto allo scenario di agosto 2008.

Il confronto delle portate fluenti nelle condizioni Stream, a monte e a valle dei tratti di fiume che risentono dell'effetto delle soglie permette di quantificare l'entità della dispersione legata alla presenza delle opere trasversali. I risultati del bilancio di massa per entrambi gli scenari è riassunto nella Tabella 3.

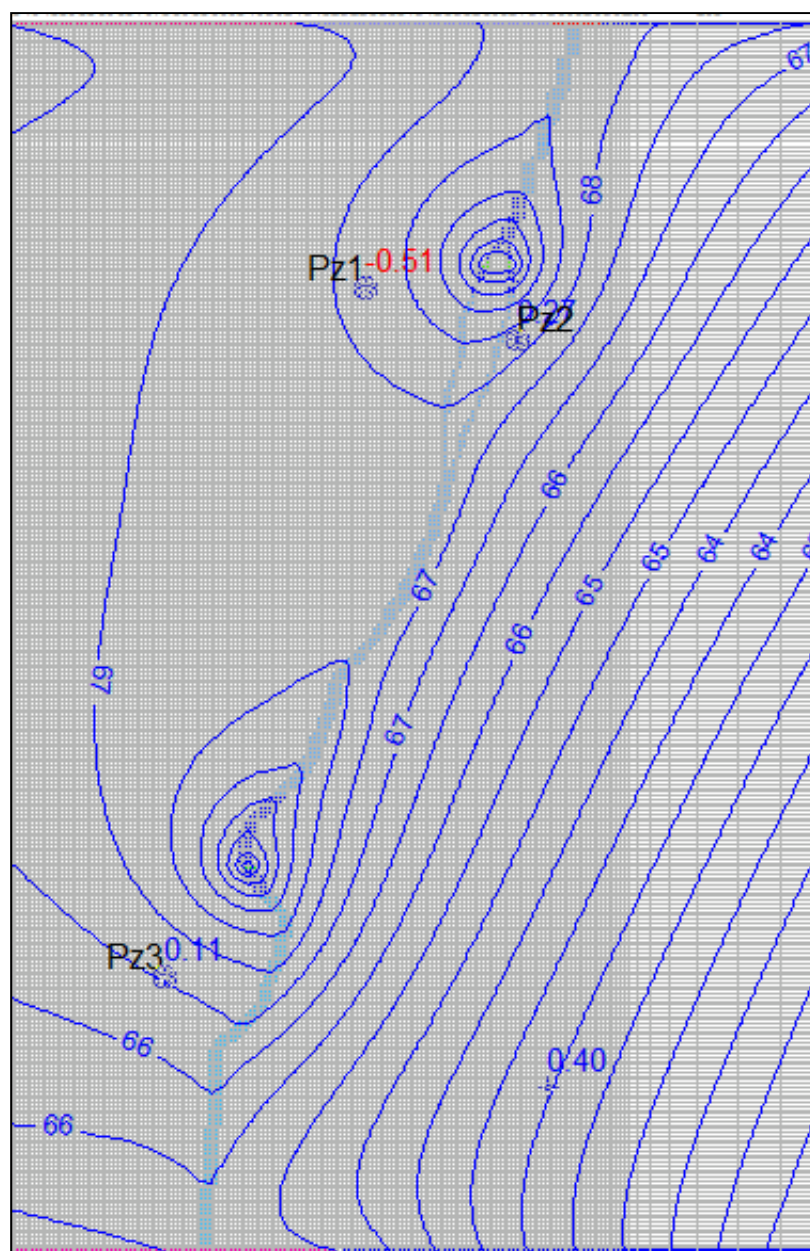
L'assetto piezometrico interpretato simula correttamente i livelli piezometrici osservati anche in presenza delle briglie, evidenziando l'effetto di dispersione in corrispondenza delle zone di intervento. Gli scarti tra valori simulati ed osservati nei piezometri di osservazione Pz1-2-3 (non sono disponibili le misure del piezometro Pz4), sono inferiori a 0.5 m (Figura 11).

|                                                    | <b>Scenario 1: Agosto 2008</b> | <b>Scenario 2: Settembre 2009</b> |
|----------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Portata (mc/s)</b>                              | 36                             | 62                                |
| <b>Livelli idrometrici fiume (m)</b>               | 82.8 - 68                      | 82.8 - 68                         |
| <b>Larghezza Stream (m)</b>                        | 50                             | 120                               |
| <b>Permeabilità <i>Stream bed</i> (m/s)</b>        | 9e-06 – 2.5e-05                | 9e-06 – 2.5e-05                   |
| <b>Permeabilità <i>Stream bed</i> Soglie (m/s)</b> | -                              | 3e-04                             |
| <b>Spessore sedimenti <i>Stream bed</i> (m)</b>    | 5                              | 5                                 |

**Tabella 2:** parametri delle condizioni Stream utilizzati nei 2 scenari (isopiezometriche in m s.l.m.)

|                                                                      | <b>Dispersione soglia S1 (mc/s)</b> | <b>Dispersione soglia S2 (mc/s)</b> |
|----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Agosto 2008 (precedentemente alla realizzazione delle soglie)</b> | 0.168                               | 0.505                               |
| <b>Settembre 2009 (un anno dopo la messa in opera delle soglie)</b>  | 1.409                               | 1.46                                |

**Tabella 3:** dispersione in falda del fiume nei pressi delle soglie



**Figura 11:** piezometria simulata nello scenario 2

In seguito alla realizzazione delle soglie si registra un incremento della dispersione di circa 1.24 mc/s in corrispondenza della soglia S1 e di circa 0.95 mc/s in corrispondenza della soglia S2. In totale la dispersione legata alle soglie è pari a 2.19 mc/s, a fronte di un incremento della dispersione totale di 2.28 mc/s nel dominio di simulazione tra i due scenari; questo indica che le maggiori portate fluenti nel mese di settembre 2009 incidono in maniera minima all'incremento di dispersione che appare pertanto essenzialmente dovuto alla messa in opera delle soglie, come evidenziato anche dall'elaborazione riportata in

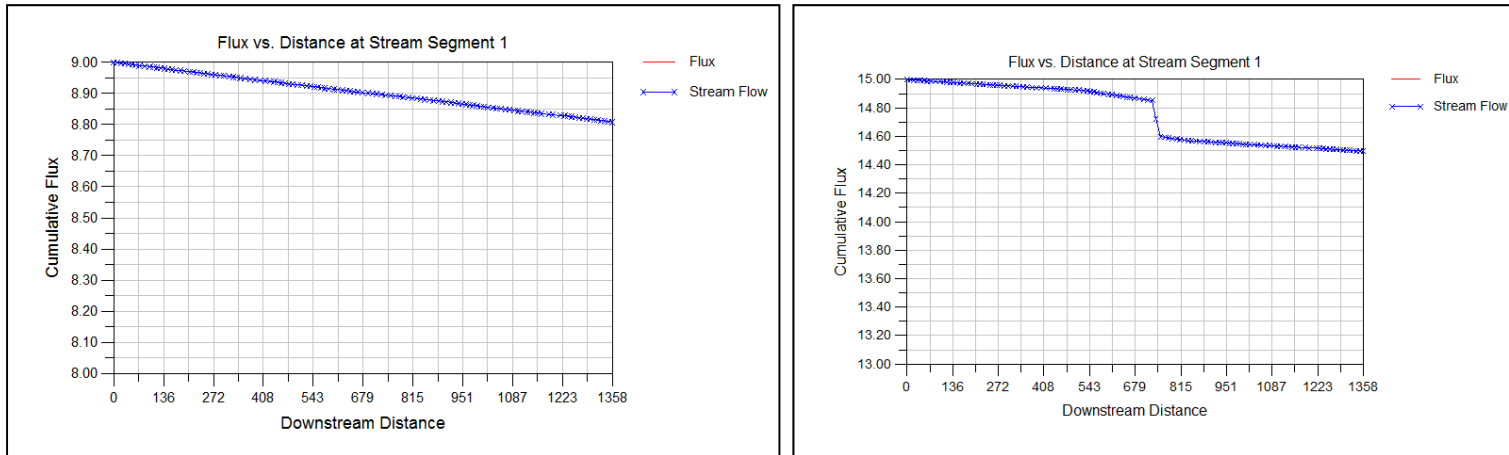


Figura 12.

**Figura 12:** sommatoria del flusso (mc/s)calcolato sul segment 1 nella zona di intervento della briglia S1 prima dell'intervento (sx) e successivamente (dx): si evidenzia l'effetto disperdente della briglia che determina una diminuzione del flusso all'interno del fiume (si ricorda che il grafico è riferito ad una porzione della sezione di deflusso riferita al segmet 1 cfr. Figura 6).

#### **4 CONCLUSIONI**

In questo studio è stato impiegato il modulo STR per valutare dell'effetto della potenziale ricarica della falda freatica in seguito alla realizzazione di due rampe stabilizzatrici (soglie) lungo un'asta fluviale. I risultati delle simulazioni hanno evidenziato una buona capacità da parte del modello di riprodurre i livelli piezometrici e la portata dispersa in falda dal fiume misurati in campo, permettendo di riprodurre in maniera soddisfacente gli scambi idrici tra fiume e falda. Il modello potrà pertanto essere utilizzato come un efficace strumento per l'implementazione di simulazioni predittive volte alla stima dell'entità della dispersione determinata dalla messa in opera delle soglie realizzate lungo il corso fluviale.

L'implementazione degli scenari modellistici ha permesso inoltre di identificare gli approfondimenti necessari al fine di ottenere un livello di conoscenza dei parametri, in grado di influenzare i rapporti fiume-falda, tale da poter ritenere i risultati della modellazione numerica come effettivamente rappresentativi delle condizioni reali e da poter ipotizzare scenari previsionali con margini di errore minimi. In particolare:

- nel modello è stata utilizzata in via preliminare una permeabilità uniforme, data l'assenza di un numero di valori puntuali sufficienti a determinare una distribuzione areale dettagliata. E' però probabile che vi siano variazioni laterali e verticali di permeabilità all'interno del dominio, in particolare nei pressi del fiume per la presenza di paleo alvei sepolti. In particolare i piezometri Pz1 e Pz2 mostrano sempre una differenza di livello piezometrico, particolarmente accentuata nel mese di settembre 2009, che suggerisce la presenza di un'anisotropia nell'effetto disperdente del fiume, legata verosimilmente a una variazione locale della permeabilità dell'acquifero. L'acquisizione di un maggior numero di dati e una più accurata definizione della distribuzione dei valori di permeabilità dell'acquifero, permetterebbero di simulare in modo più corretto la piezometria osservata e conseguentemente di effettuare una stima più accurata della dispersione in falda ad opera del fiume.
- dal momento che l'aumento della dispersione in falda è legato all'incremento della superficie bagnata dal corso d'acqua, per una corretta quantificazione della portata dispersa in alveo è necessario conoscere con la massima precisione possibile la configurazione assunta dal corso d'acqua in seguito alla messa in opera delle soglie.
- Nel corso dell'elaborazione del modello, è emersa l'importanza della conoscenza dettagliata delle caratteristiche costruttive delle briglie e dei materiali utilizzati per l'inghiaimento e il livellamento del fondo fluviale.

#### **RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI**

- Anderson M. P. and Woessner W. W. (1992) - *Applied Groundwater Modeling* - Academic Press, San Diego
- Prudic D.E. (1989) - *Documentation of a computer program to simulate stream-aquifer relations using a modular, finite-difference, ground-water flow model* - U.S. Geological Survey Open-File Report 88-729, 113 p.
- T.C. Winter, J.W. Harvey, O.L. Franke, and W.M. Alley (1998) - *Ground Water and Surface Water A Single Resource*. - U.S. Geological Survey Circular 1139