



GRUPPO NAZIONALE
DI GEOFISICA DELLA TERRA SOLIDA

33° CONVEGNO NAZIONALE GNGTS

BOLOGNA 25-27 NOVEMBRE 2014



MISURE TERMICHE DI PRECISIONE: UNO STRUMENTO PER LA VALUTAZIONE DEL FLUSSO D'ACQUA SOTTERRANEA

D. BARBERO¹, P. CHIOZZI², A.D. DE LUCA¹, M.G. FORNO¹,

M. LASAGNA¹, L. MAGNEA³, M. VERDOYA²

¹DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLA TERRA, UNIVERSITA' DI TORINO

²DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLA TERRA, DELL'AMBIENTE E DELLA VITA, UNIVERSITA' DI GENOVA

³DIPARTIMENTO DI FISICA, UNIVERSITA' DI TORINO

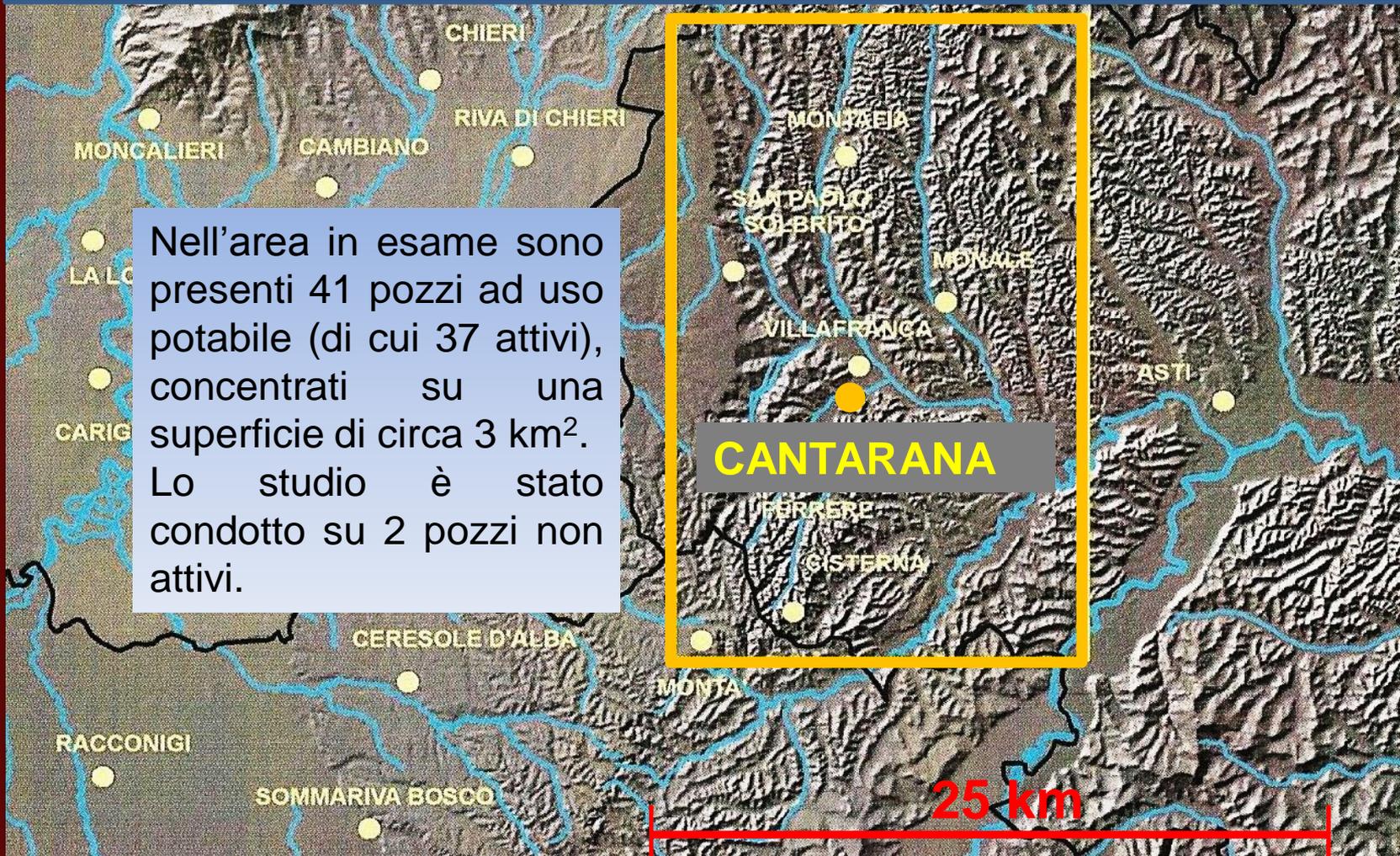


Proporre una metodologia geotermica per lo studio delle caratteristiche del flusso d'acqua sotterranea.

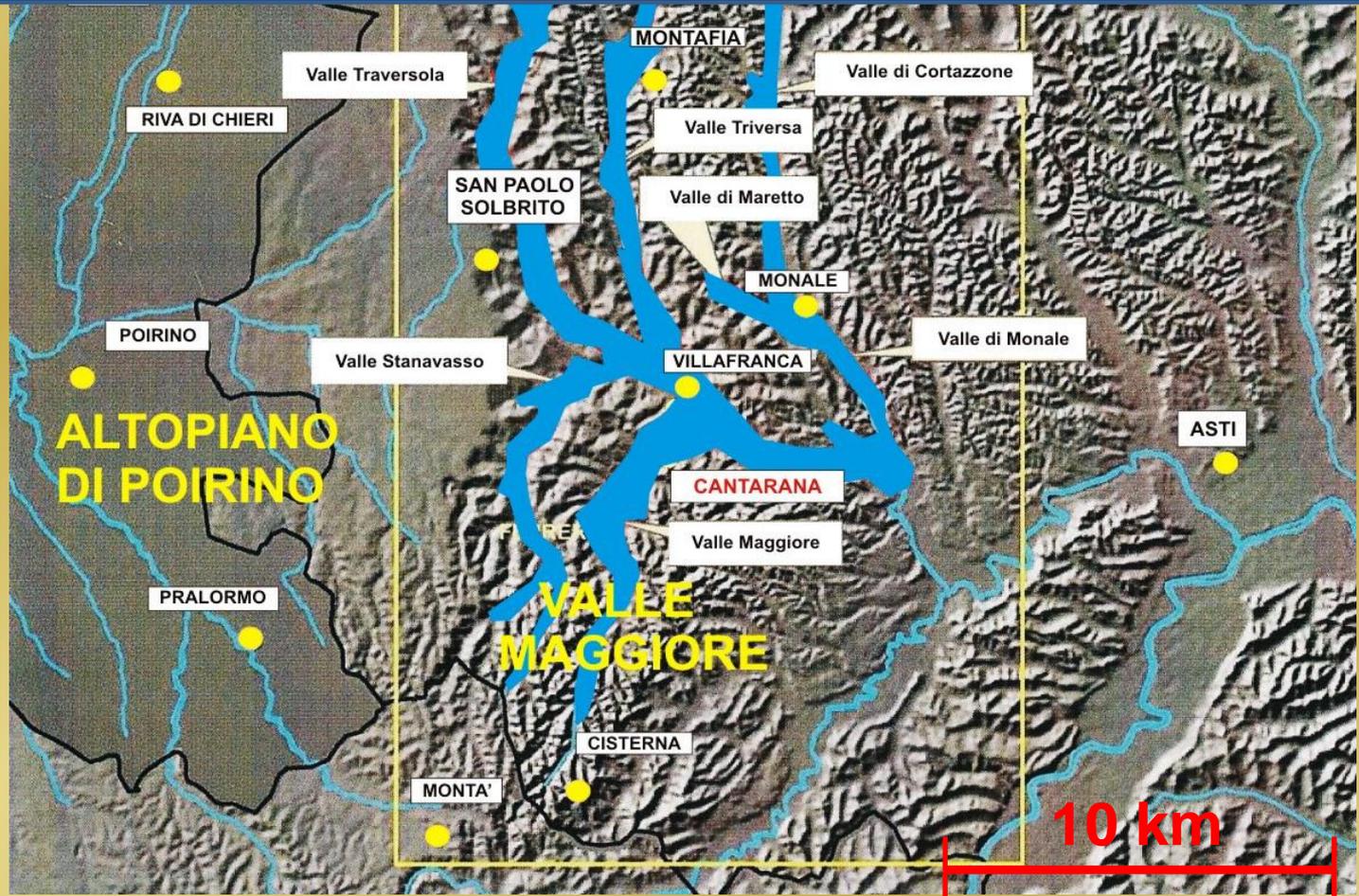
La metodologia si basa sullo studio della temperatura registrata in foro e utilizza modelli analitici interpretativi di trasporto di calore per avvezione in orizzonti permeabili.

Lo studio dei profili termici rappresenta un valido strumento per la stima quali-quantitativa della velocità di flusso della falda, parametro di notevole interesse per studi idrogeologici e per la valutazione di risorse geotermiche a bassa entalpia.

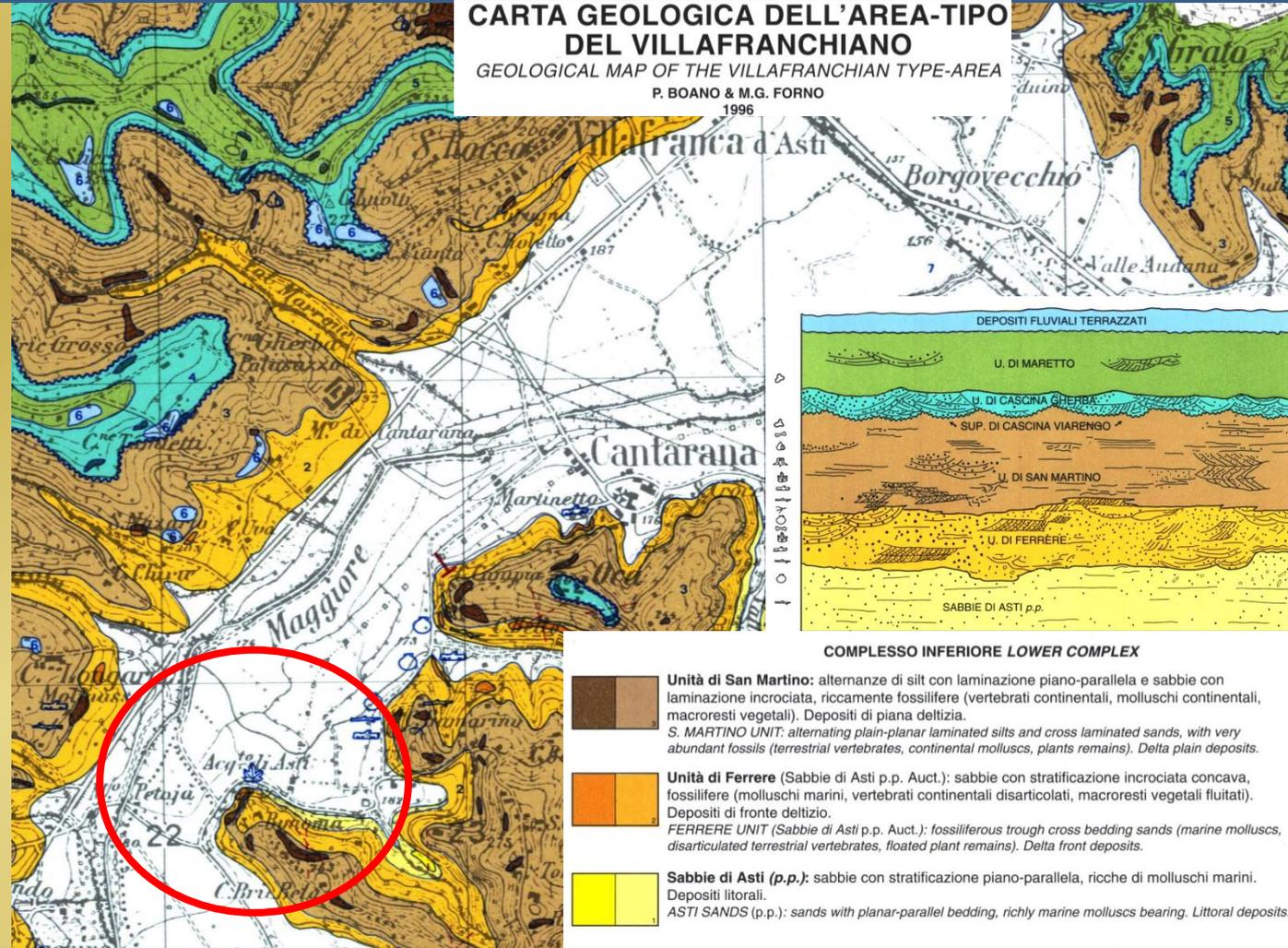
Si colloca lungo la Valle Maggiore, nell'area collinare Piemontese (Rilievi dell'Astigiano), in Provincia di Asti e in particolare presso il campo pozzi acquedottistico del Comune di Cantarana.



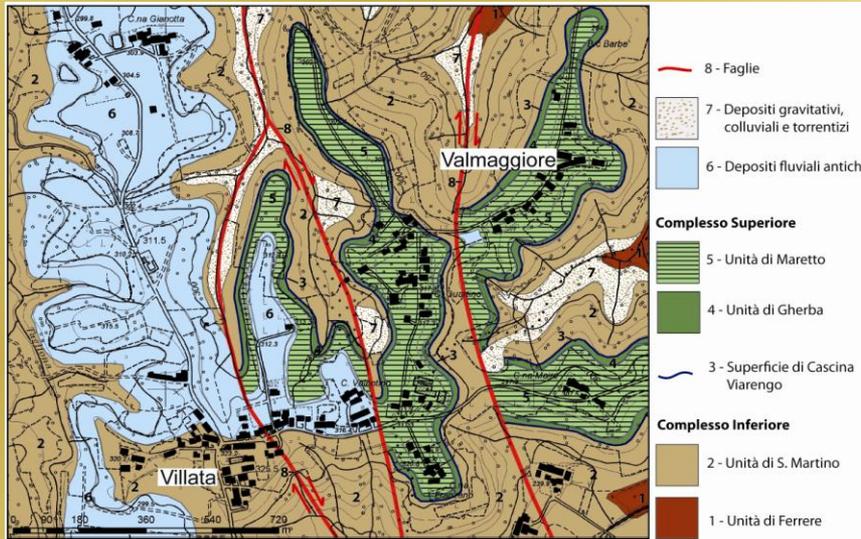
La Valle Maggiore è situata in prossimità del limite morfologico tra un'area collinare a Est (Rilievi dell'Astigiano) con sviluppo altimetrico compreso tra 130 e 320 m e un settore di pianura a Ovest (Altopiano di Poirino) con elevazione tra 240 e 325 m.



Il sottosuolo dei Rilievi dell'Astigiano appare costituito da una potente successione di sedimenti prevalentemente incoerenti, connessi ad un ambiente deposizionale marino, deltizio e fluviale.



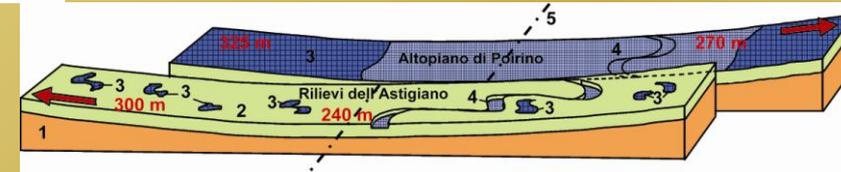
Recenti indagini hanno messo in evidenza la presenza di una **struttura di tipo fragile a carattere regionale**, con andamento rettilineo in pianta e direzione N-S, caratterizzata da **trascorrenza destra**, denominata **Zona di deformazione del T. Traversola**. Tale struttura, ha come **espressione morfologica una evidente scarpata**, con altezza fino a un centinaio di metri e lunghezza di circa 30 km, e separa nettamente l'Altopiano di Poirino dai Rilievi dell'Astigiano.



Carta geologica di dettaglio lungo il tratto meridionale della Zona di deformazione del T. Traversola.



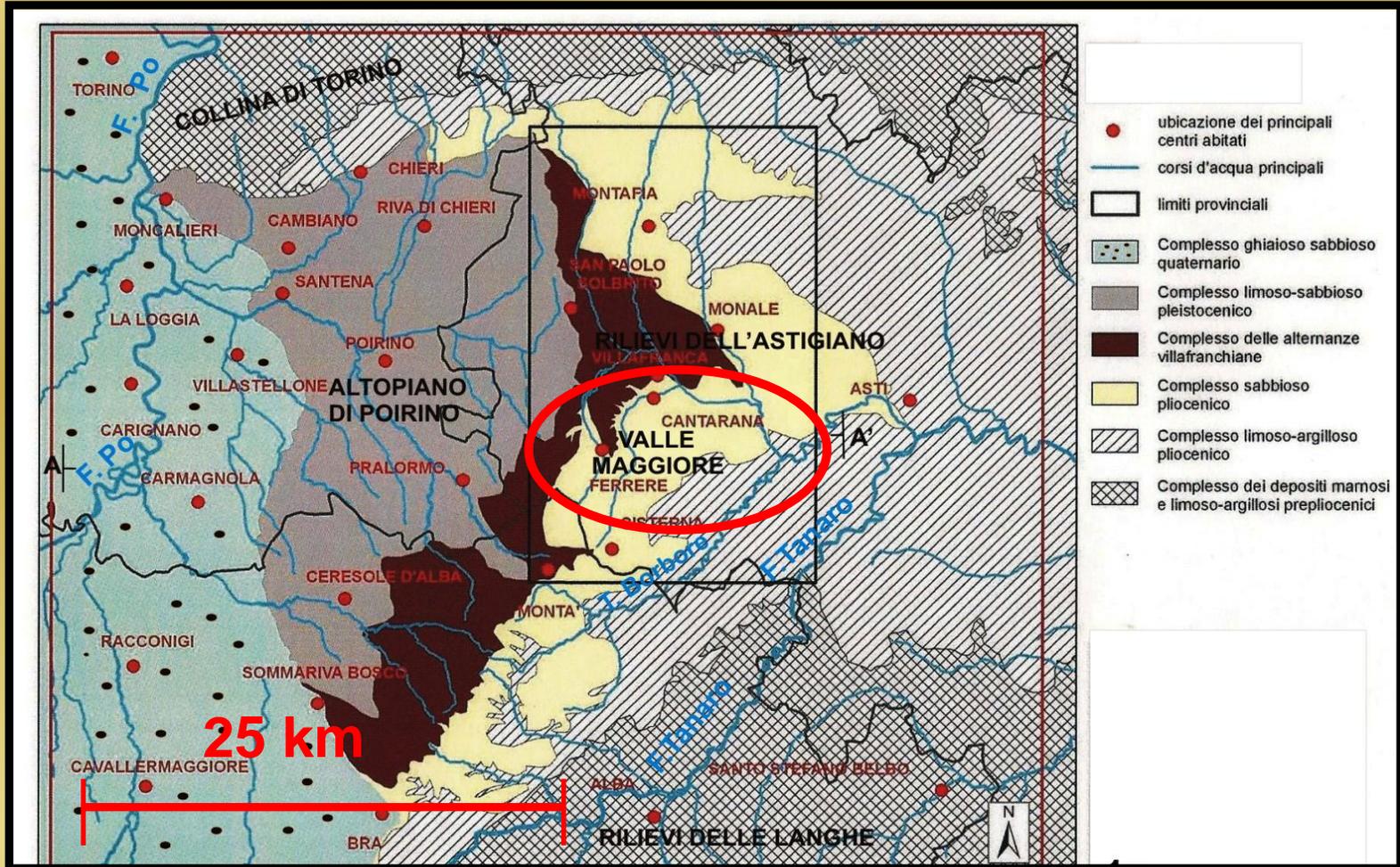
Depositi siltosi dell'Unità di S. Martino interessati da fratture con direzione N-S (Valfenera).



- 1) Complesso Villafranchiano inferiore (Pliocene medio);
- 2) Complesso Villafranchiano superiore (Pleistocene inferiore);
- 3) depositi fluviali del Pleistocene medio;
- 4) depositi fluviali del Pleistocene superiore;
- 5) asse della sinclinale.

Nell'area di Cantarana si rinviene un **acquifero multifalda** a permeabilità media, ospitato nel “**Complesso sabbioso pliocenico**”, (Sabbie di Asti e Unità di Ferrere) e nel “**Complesso delle alternanze villafranchiane**” (Unità di San Martino).

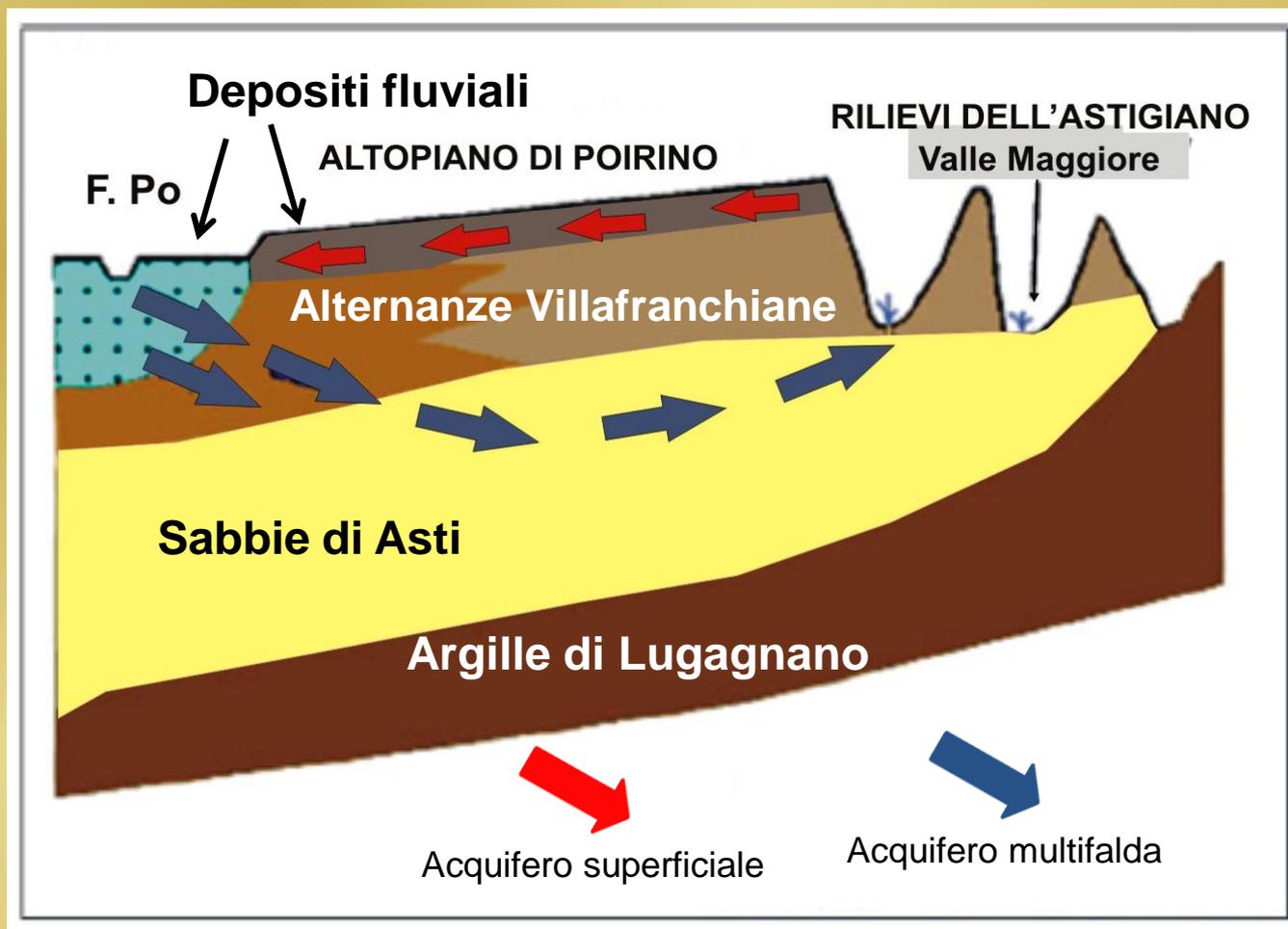
ASSETTO IDROGEOLOGICO



GRUPPO NAZIONALE
DI GEOFISICA DELLA TERRA SOLIDA

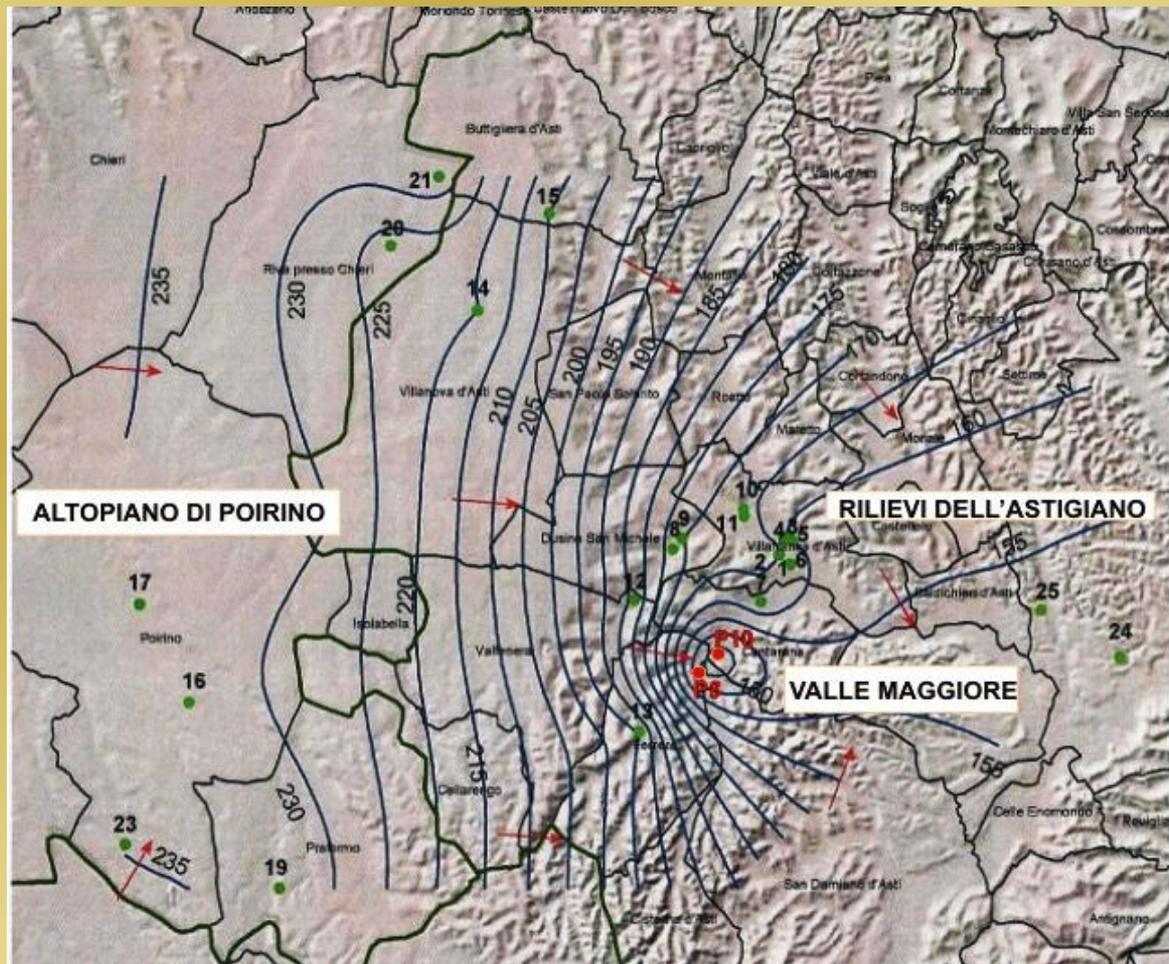
L'**acquifero multifalda**, prevalentemente alimentato dalla pianura del F. Po e drenante verso E, possiede localmente **caratteristiche artesiane** raggiungendo nell'area di Cantarana un livello piezometrico di circa 6 metri al di sopra del piano campagna.

**MODELLO
IDROGEOLOGICO**



Il flusso della falda, diretto da W verso E, mostra un **pronunciato cono di depressione** a causa del sensibile prelievo. Il **gradiente idraulico** della falda raggiunge un **valore medio di circa 2.5%** a causa della sensibile depressione della falda connessa allo sfruttamento idropotabile.

CAMPAGNA PIEZOMETRICA



**CAMPAGNA PIEZOMETRICA
APRILE-GIUGNO 2013**

LEGENDA

- limiti provinciali
- limiti comunali
- 11 punti di monitoraggio e relativa denominazione
- linee isopiezometriche (m s.l.m.)
- linee di flusso

0 3 6 Km



**GRUPPO NAZIONALE
DI GEOFISICA DELLA TERRA SOLIDA**

Le misure termometriche sono state eseguite nel luglio 2014 in 2 pozzi non attivi (P8 e P10) che si collocano proprio all'interno del cono di depressione. I pozzi hanno diametro medio di circa 300 mm e una profondità di 110 metri. La distanza tra i pozzi è di 500 m. Essi captano prevalentemente le falde artesiane presenti nei livelli sabbiosi e sabbioso-ghiaiosi della formazione delle Sabbie di Asti.

Pozzo P 8



Quota p.c.:
171 m s.l.m.

Soggiacenza:
38 m da p.c.



Pozzo P 10



Quota p.c.:
180 m s.l.m.

Soggiacenza:
24 m da p.c.



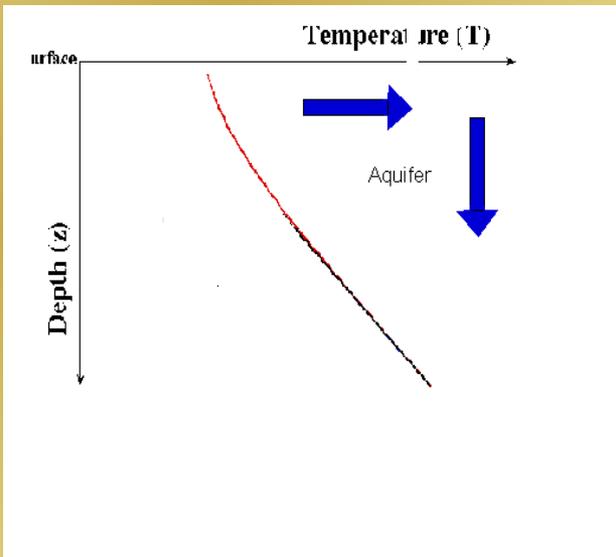
STRUMENTAZIONE DI MISURA

Le misure di temperatura sono state eseguite a intervalli di profondità di 2.5 m, mediante un **sensore di temperatura di alta precisione**, costituito da una **resistenza al platino con una sensibilità di 0.01 C**.



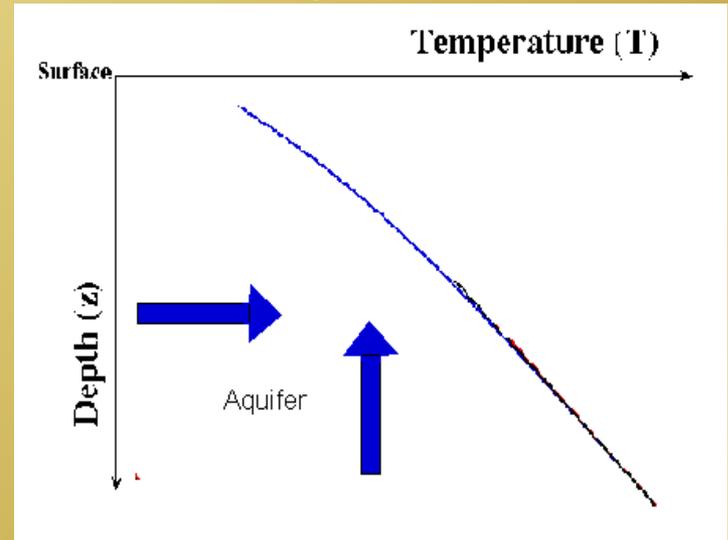
GRUPPO NAZIONALE
DI GEOFISICA DELLA TERRA SOLIDA

Il trasporto di calore per avvezione, dovuto al flusso di acqua sotterranea, provoca delle deviazioni dall'andamento lineare del profilo termico che si avrebbe in regime puramente conduttivo dando luogo a concavità e convessità. L'analisi qualitativa delle misure consente di evidenziare nei profili di temperatura e di gradiente termico andamenti riconducibili a movimenti di acqua di falda.



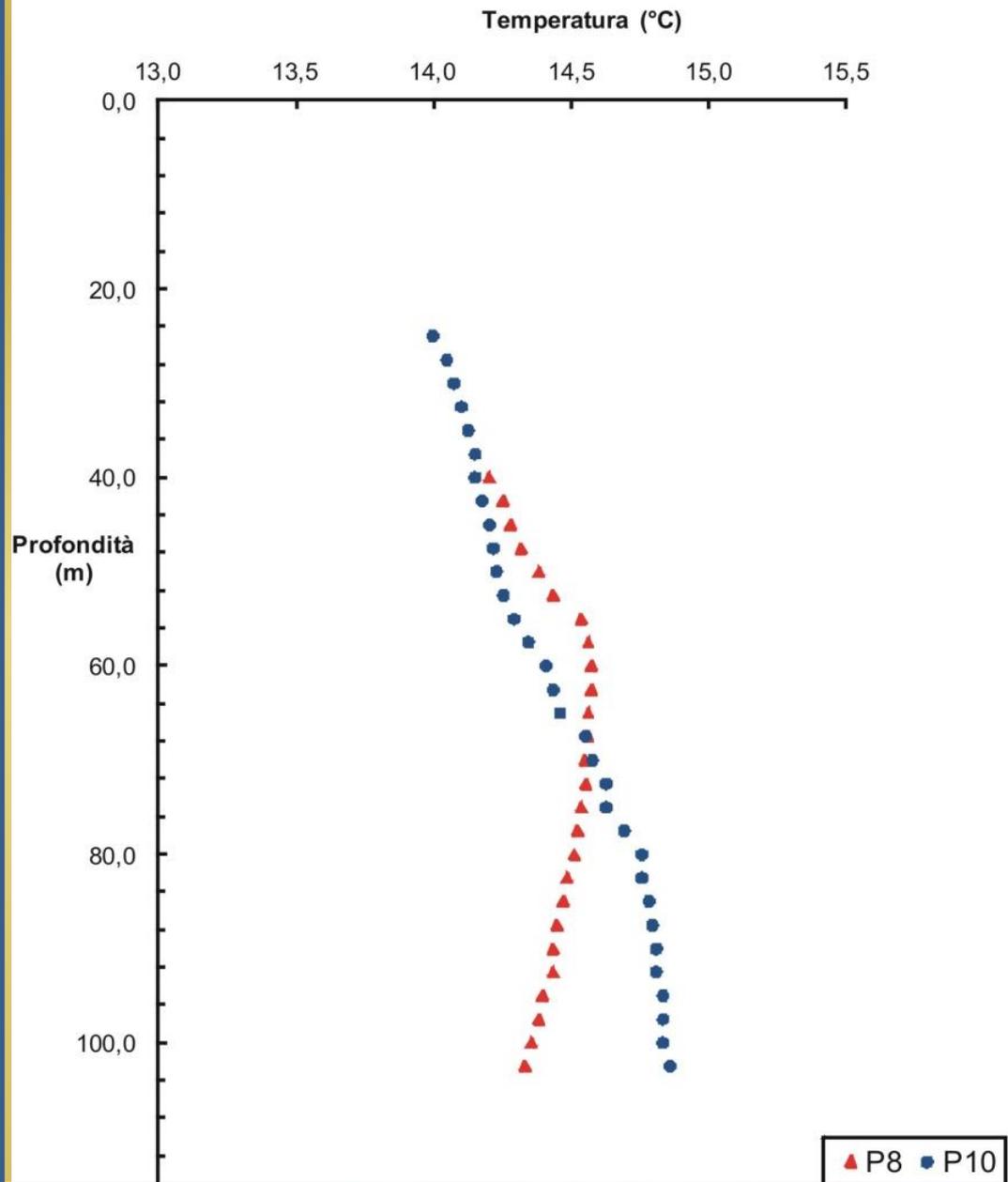
Flusso d'acqua verso il basso o flusso orizzontale in un acquifero relativamente più freddo

Flusso d'acqua verso l'alto o flusso orizzontale in un acquifero relativamente più caldo



PROFILI DI TEMPERATURA

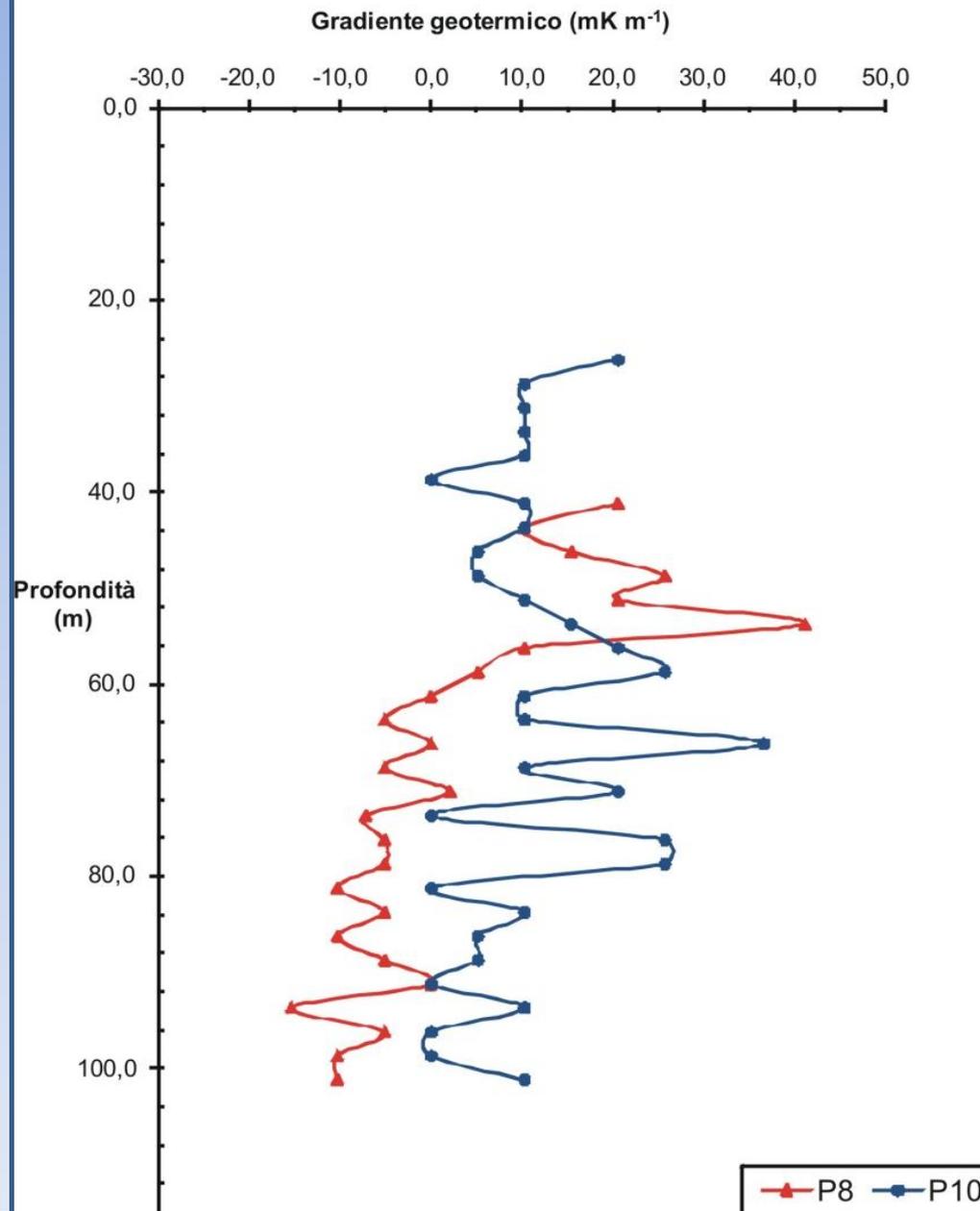
La distribuzione delle temperature nei pozzi investigati è consistente con la presenza di un **flusso d'acqua orizzontale relativamente più caldo negli orizzonti permeabili sabbiosi in un acquifero**, più evidente in P8.



GRADIENTE GEOTERMICO

Il pozzo P10 è caratterizzato nel complesso da un gradiente termico positivo, anche se esso tende a diminuire verso il basso.

Il pozzo P8 ha un andamento simile al pozzo P10, ma il suo gradiente diviene negativo a partire da 60 m di profondità.



In condizioni di **regime termico stazionario**, in **formazioni permeabili** con **proprietà termiche e idrauliche omogenee**, la variazione della temperatura T con la profondità z può essere espressa da

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \rho_w c_w v_z \frac{\partial T}{\partial z} + \rho_w c_w v_x \Gamma_x \quad (1)$$

essendo:

v_x e v_z le componenti orizzontali (positivo per un flusso freddo) e verticali (positivo per flusso discendente) della velocità di Darcy;

ρ_w e c_w la densità e il calore specifico dell'acqua;

λ la conducibilità termica;

Γ_x il gradiente orizzontale di temperatura

In aree di fondovalle alluvionale, distanti da aree di ricarica e di scarica degli acquiferi, e in condizioni stazionarie, **si può considerare trascurabile la componente verticale della velocità**. Integrando due volte la (1) con

condizioni al contorno: $\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{z=0} = \Gamma_{z_0}$ e $T = T_L$ per $z = L$ si ottiene

$$T = T_L - \frac{L}{2} \left(\alpha \Gamma_x + 2 \Gamma_{z_0} \right) + \Gamma_{z_0} z + \frac{\alpha}{2L} \Gamma_x z^2 \quad (2)$$

(Verdoya *et al.*, 2008)

essendo:

$$\alpha = \rho_w c_w v_x L / \lambda;$$

L è lo spessore di acquifero investigato;

T_L è la temperatura alla base del tratto di acquifero studiato;

Γ_{z_0} è il gradiente verticale di temperatura alla profondità $z=0$.

Questa soluzione considera Γ_x uniforme, mentre le osservazioni sperimentali evidenziano che il gradiente orizzontale di temperatura può dipendere dalla profondità.

Pertanto, assumendo in prima approssimazione che Γ_x cresca linearmente con la profondità, la soluzione è del tipo

$$T = \left[T_L - L\Gamma_{z_o} - \alpha\Gamma_{x_o} \left(\frac{L}{2} + \frac{L^2 D}{6} \right) \right] + \Gamma_{z_o} z + \frac{\alpha}{2L} \Gamma_{x_o} z^2 + \frac{\alpha}{6L} \Gamma_{x_o} D z^3 \quad (3)$$

essendo:

Γ_{x_o} è il gradiente orizzontale di temperatura in corrispondenza del tetto dell'acquifero;

D (m^{-1}) la variazione Γ_x con la profondità.

In alternativa, Reiter (2001) ha suggerito che l'analisi dei gradienti di temperatura verticale Γ_z permette di valutare l'effetto termico delle acque sotterranee.

Quando prevale la componente orizzontale del flusso, il gradiente diviene funzione lineare della profondità nella forma

$$\Gamma_z = \frac{\alpha\Gamma_x z}{L} + \delta \quad (4)$$

dove δ è la costante di integrazione.

La procedura di analisi consiste nell'applicare i modelli analitici di trasferimento di calore per avvezione, valutando, tra le varie soluzioni ottenute, quelle in grado di offrire il miglior accordo con le misure sperimentali di temperatura e di gradiente termico.

Dal punto di vista statistico, diversi modelli possono offrire buoni risultati, ma possono dare indicazioni discordanti in termini di direzione di flusso e temperatura dell'acquifero, che si riflettono nel segno delle componenti della velocità di Darcy.

Modello	Equazione	Coefficienti	Componente orizzontale v_x
A	$T = a_1 z^2 + b_1 z + c_1$	$a_1 = \rho_w c_w v_x \Gamma_x / 2\lambda$	$2\lambda a_1 / \Gamma_x c_w \rho_w$
B	$T = a_2 z^3 + b_2 z^2 + c_2 z + d_2$	$b_2 = \rho_w c_w v_x \Gamma_x / 2\lambda$	$2\lambda b_2 / \Gamma_x c_w \rho_w$
C	$\Gamma = a_3 z + b_3$	$a_3 = \rho_w c_w v_x \Gamma_x / \lambda$	$\lambda a_3 / \rho c \Gamma_x$

Tab. 1 – Modelli ed equazioni in forma semplificata di distribuzione verticale della temperatura in regime avveztivo con flusso orizzontale.

I coefficienti dei modelli possono essere ottenuti con il metodo dei minimi quadrati. Il calcolo della componente orizzontale della velocità di Darcy richiede la stima del gradiente di temperatura orizzontale.

STIMA DEI PARAMETRI TERMICI

Per la determinazione della componente orizzontale della velocità di Darcy, è stato necessario stimare:

- ✓ il gradiente termico orizzontale Γ_x
- ✓ la conducibilità termica λ

Le misure termiche effettuate mostrano che Γ_x varia tra $2.5 \cdot 10^{-4}$ e $9.5 \cdot 10^{-4}$ mK m⁻¹, con un valore medio rappresentativo di **$4.8 \cdot 10^{-4}$ mK·m⁻¹**.

La **conducibilità termica λ** è stata assunta pari **$1.8 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$** , sulla base di determinazioni di laboratorio per rocce del bacino Padano riportate da Pasquale *et al.* (2014).

Inoltre sono stati assunti $\rho_w = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ e $c_w = 4187 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Valori della componente orizzontale di velocità di Darcy ricavati dai coefficienti delle equazioni e i parametri statistici, con livello di confidenza pari al 95%, ottenuti nel processo di ottimizzazione.

Modello	Equazione	Coefficienti	Componente orizzontale v_x			
A	$T = a_1 z^2 + b_1 z + c_1$	$a_1 = \rho_w c_w v_x \Gamma_x / 2\lambda$	$2\lambda a_1 / \Gamma_x c_w \rho_w$			
B	$T = a_2 z^3 + b_2 z^2 + c_2 z + d_2$	$b_2 = \rho_w c_w v_x \Gamma_x / 2\lambda$	$2\lambda b_2 / \Gamma_x c_w \rho_w$			
C	$\Gamma = a_3 z + b_3$	$a_3 = \rho_w c_w v_x \Gamma_x / \lambda$	$\lambda a_3 / \rho c \Gamma_x$			

Pozzo	Modello	Coefficienti	SSE	R	RMSE	v_x (m·s ⁻¹)
P8	A	$a_1 = -3.19 \cdot 10^{-6}$	0.011	0.981	0.022	$-5.71 \cdot 10^{-7}$
	B	$b_2 = -1.52 \cdot 10^{-4}$	0.006	0.989	0.016	$-2.73 \cdot 10^{-6}$
	C	$a_3 = -5.83 \cdot 10^{-6}$	0.0004	0.936	0.004	$-5.22 \cdot 10^{-7}$
P10	A	$a_1 = -1.14 \cdot 10^{-5}$	0.076	0.985	0.051	$-2.04 \cdot 10^{-8}$
	B	$b_2 = 7.29 \cdot 10^{-6}$	0.018	0.997	0.025	$-7.04 \cdot 10^{-9}$
	C	$a_3 = -7.15 \cdot 10^{-5}$	0.0009	0.276	0.005	$-6.40 \cdot 10^{-8}$

Tab. 2 - I parametri statistici **SSE (somma dei quadrati residui)** e **RMSE (scarto quadratico medio)** sono dati in C nei modelli A e B e in mK·m⁻¹ nel modello C. **R** è il coefficiente di correlazione.

Il modello B fornisce il miglior accordo statistico tra i dati sperimentali e le curve calcolate, mentre per i modelli A e C la correlazione appare inferiore.

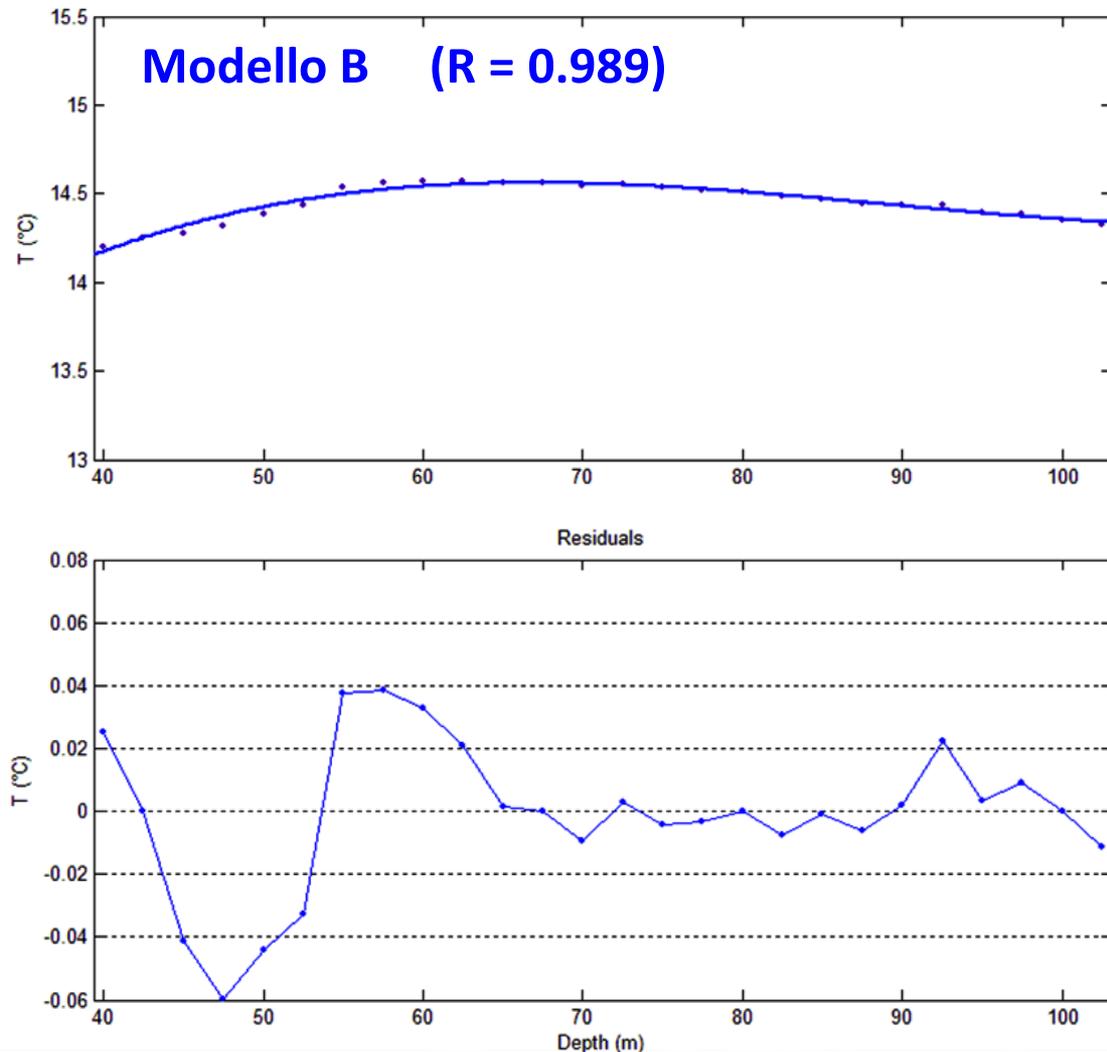
I risultati per il pozzo P10 indicherebbero velocità di due ordini di grandezza più basse rispetto al pozzo P8.

Curve di *best fit* del Pozzo P8 (Modello B)

Il modello B fornisce il miglior accordo statistico

RISULTATI

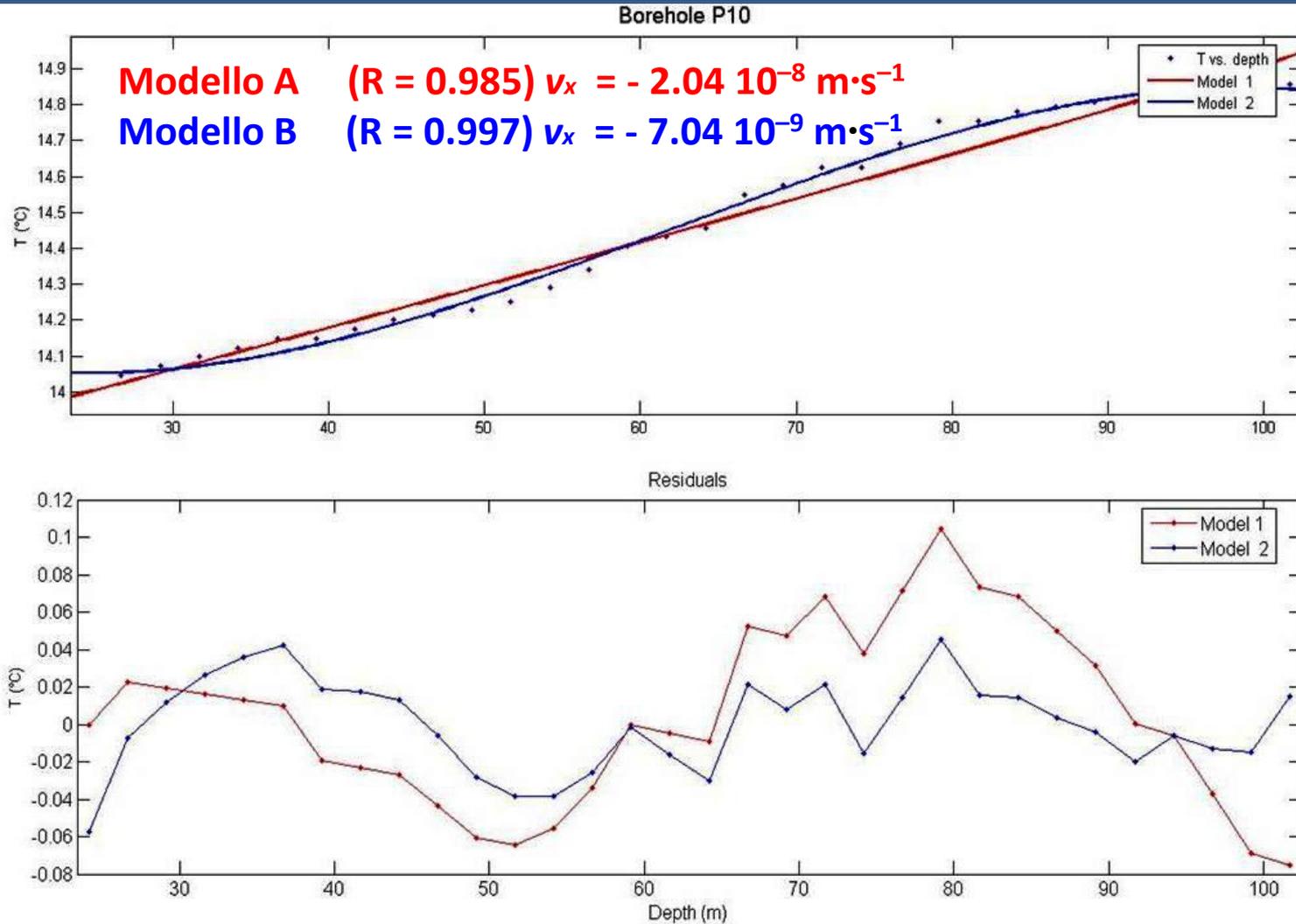
$v_x = - 2.73 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, (cioè 0.23 m/d) mentre per i modelli A e C si ha un incremento di un ordine di grandezza.



Curve di *best fit* del Pozzo P10 (Confronto Modello A e B)

Il modello B fornisce il miglior accordo statistico

RISULTATI



I risultati per il pozzo P10 (10^{-8}) indicherebbero valori di v_x di due ordini di grandezza inferiori rispetto al pozzo P8 (10^{-6})

La differenza nei valori riscontrati di velocità tra il pozzo P8 e P10 potrebbe risiedere nel fatto che:

- ✓ l'analisi dei dati di temperatura è stata estesa a tutta la sezione del pozzo P10, al di sotto del livello dell'acqua, mentre il tratto effettivamente interessato da flusso orizzontale potrebbe essere posto ad una profondità al di sotto di 60-70 m;
- ✓ infatti a partire da circa 60 m, si osserverebbe l'inizio del tratto di profilo termico maggiormente perturbato da movimenti avvettivi: applicando i modelli A e B a questa sezione di pozzo, si ottengono valori della componente orizzontale della velocità di Darcy di $-4.81 \cdot 10^{-7}$ e di $2.09 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, con coefficienti di correlazione uguali e pari a 0.994.

La misura del **gradiente di temperatura** in pozzi rappresenta un **valido strumento per l'individuazione e la valutazione quantitativa di movimenti d'acqua sotterranea**.

L'applicazione di soluzioni analitiche, che descrivono il valore atteso di temperatura al variare della profondità in terreni interessati da processi di trasporto di calore per avvezione, **consentono di ricavare informazioni quantitative sulla velocità della falda**.

Questo tipo di **informazioni** sono **essenziali per lo sviluppo di modelli idrogeologici concettuali**, in cui si vuole **ricostruire la circolazione idrica all'interno di potenziali *reservoirs* geotermici**, in una fase preliminare di caratterizzazione.

L'applicazione delle tecniche ai pozzi della Valle Maggiore hanno evidenziato la presenza di un **acquifero relativamente più caldo, a prevalente scorrimento orizzontale**. Il flusso maggiore si collocherebbe a profondità superiori a 60 m, all'interno delle formazioni sabbiose con valori di **velocità orizzontali dell'ordine di 10^{-6} - 10^{-7} m·s⁻¹**.



***GRAZIE PER
L'ATTENZIONE !!***



**GRUPPO NAZIONALE
DI GEOFISICA DELLA TERRA SOLIDA**