

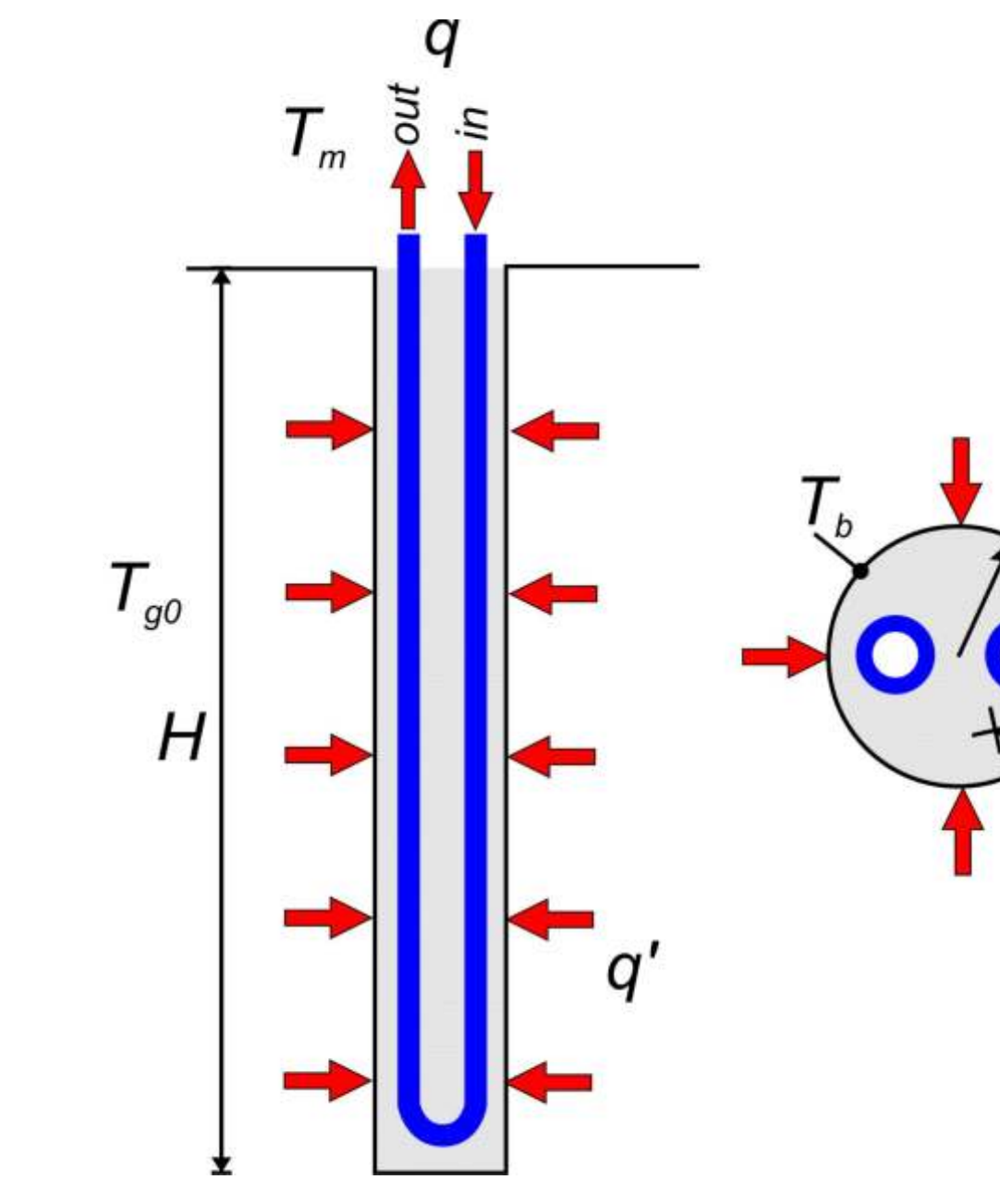
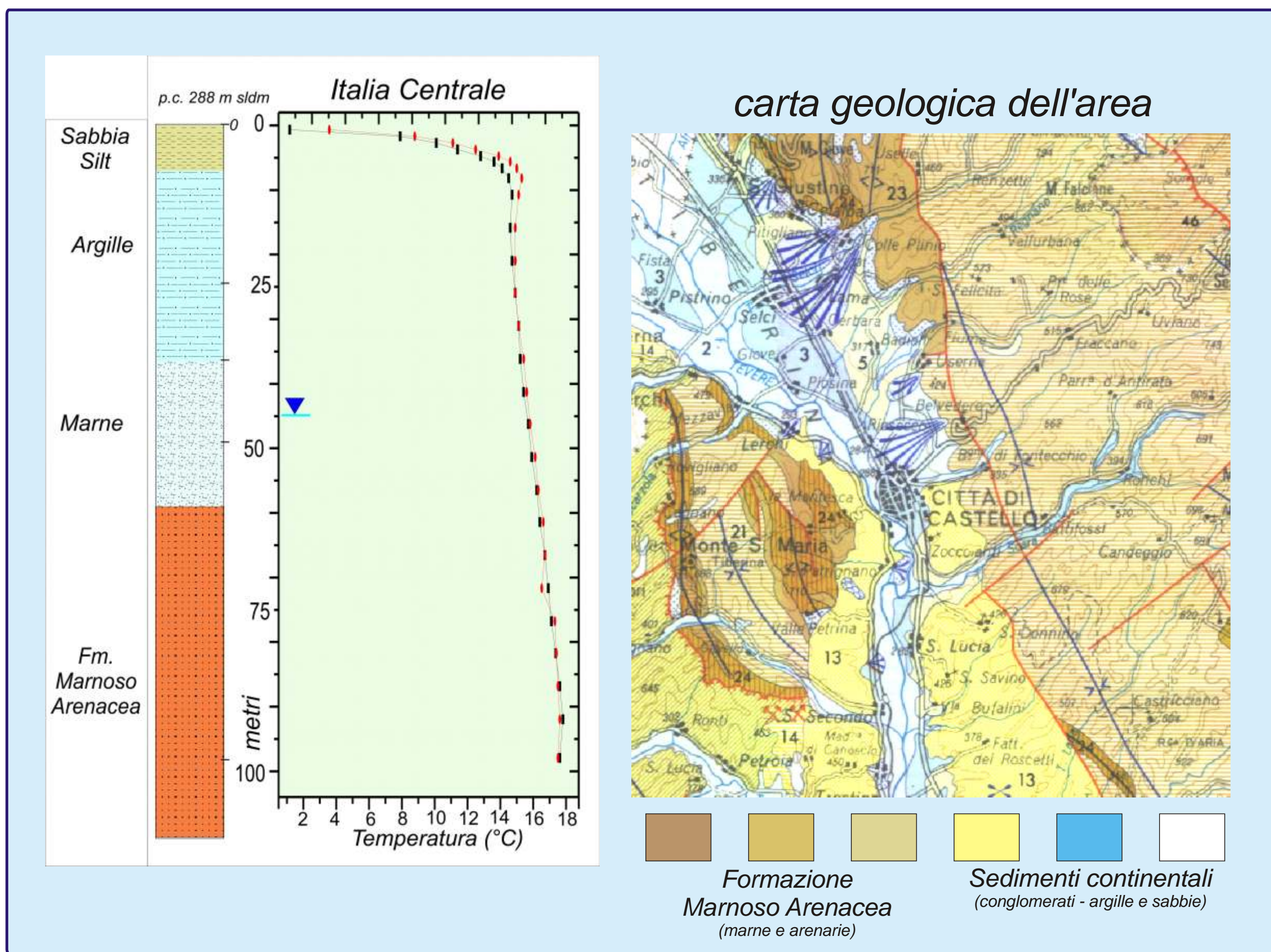
Distribuzione verticale della conducibilità termica dal Thermal Response Test

Marco Menichetti

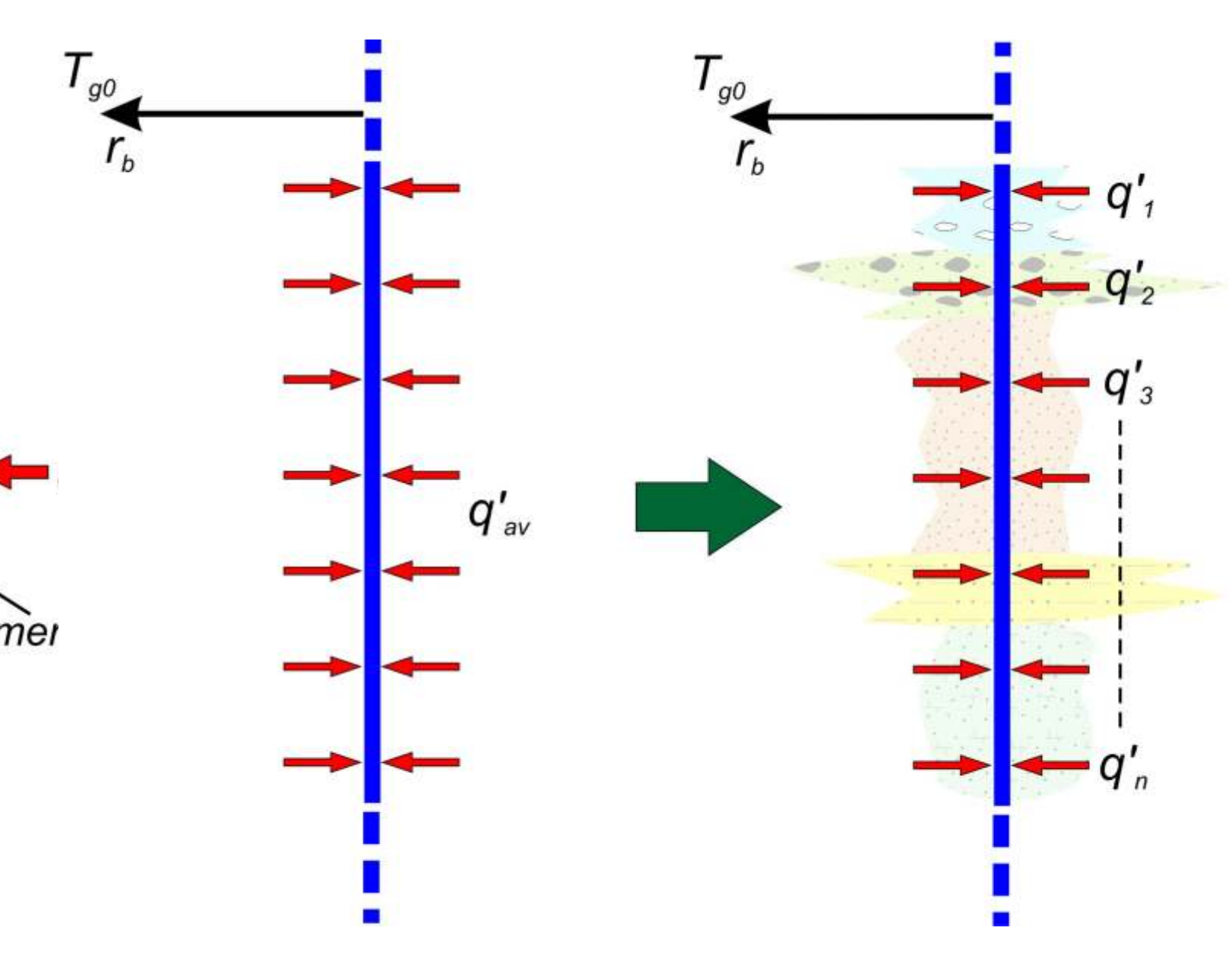
Dipartimento di Scienze Geologiche, Tecnologie Chimiche Ambientali
 Università di Urbino (marco.menichetti@uniurb.it)



Il TRT (Thermal Response Test) rappresenta lo strumento più versatile attualmente disponibile per determinare i parametri termici del sottosuolo, necessari alla progettazione e al dimensionamento di sonde geotermiche. Un TRT permette di ricavare la conducibilità termica media del sistema sonda/terreno nell'intervallo stratigrafico attraversato. La misura della variazione della temperatura lungo la sonda permette di ottenere una conducibilità e resa termica per ogni intervallo stratigrafico, in funzione delle caratteristiche litologiche ed idrogeologiche dell'area.

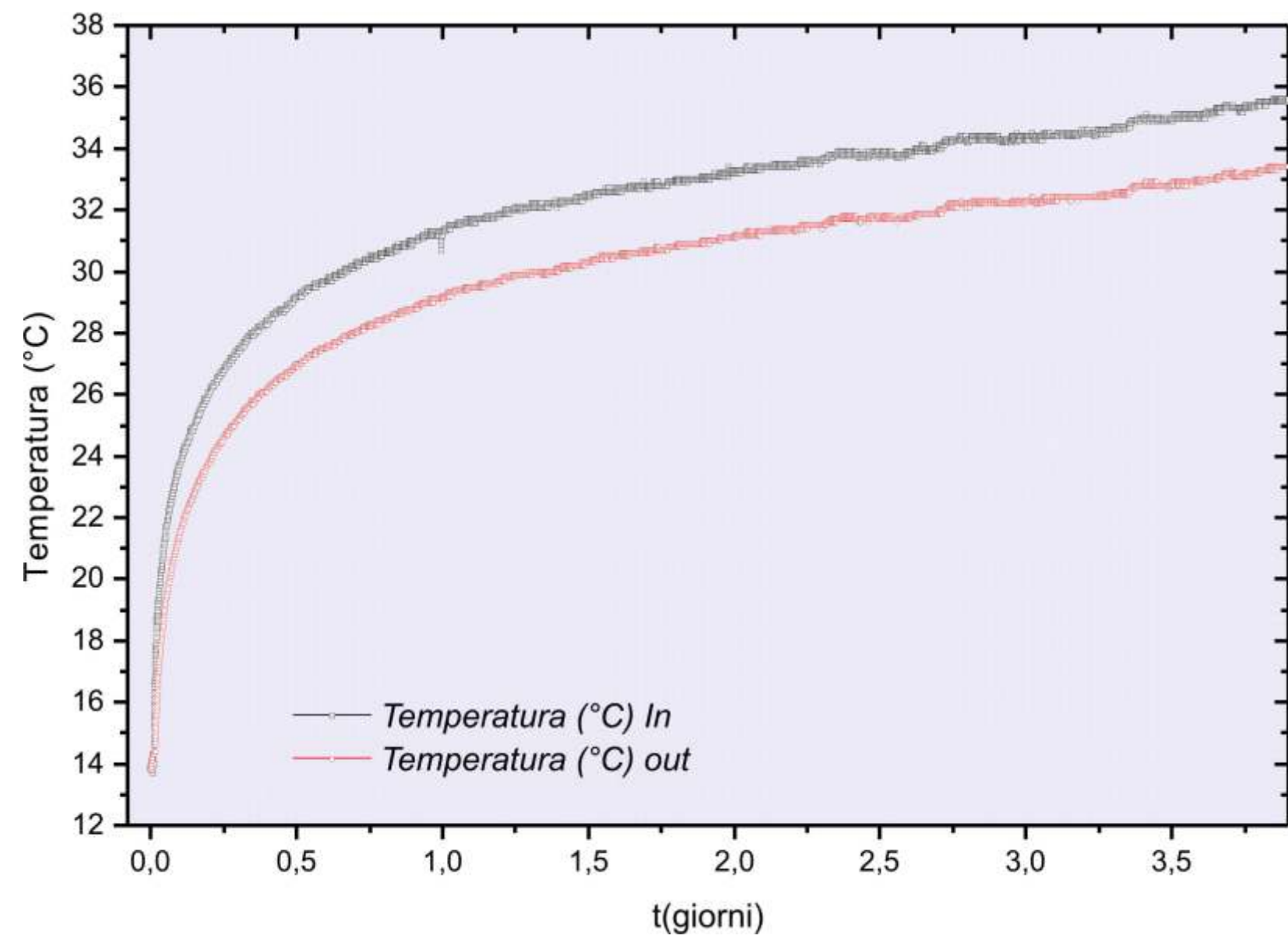


Schema di una sonda geotermica. H : profondità; q : potenza immessa; q' : potenza termica estratta; r_b : raggio della sonda terminata; T_m : temperatura media tra ingresso e uscita dalla sonda; T_g0 : temperatura del terreno; T_c : temperatura al contatto tra la sonda e il terreno.

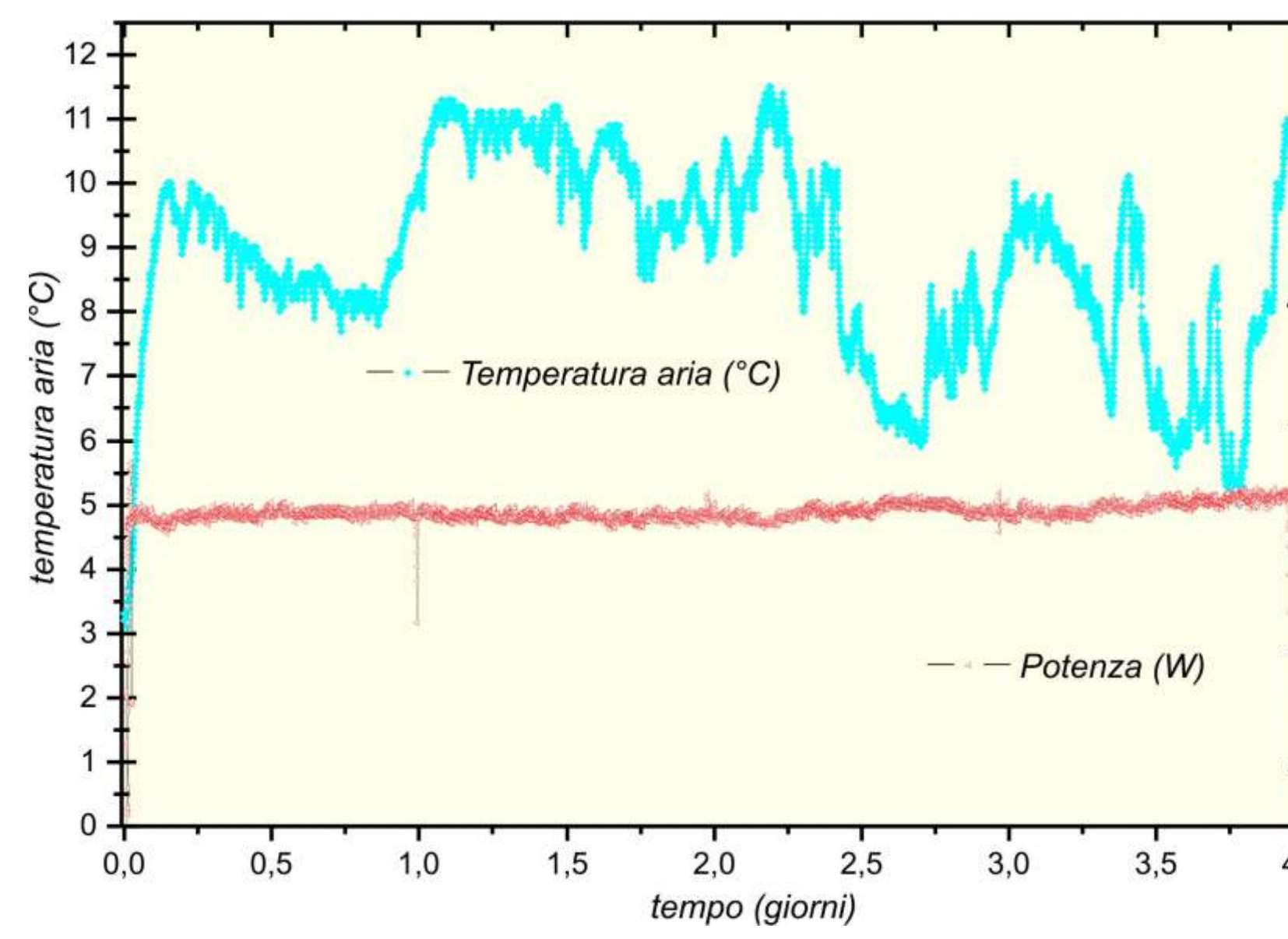


Modello di una sorgente lineare infinita. A destra modello reale con un terreno costituito da livelli stratigrafici con differenti proprietà termiche. q' : potenza termica estratta media; q'1, q'2, q'3 : potenza estratta dal livello stratigrafico 1, 2, etc - r_b : raggio della sonda terminata; T_g0 : temperatura del terreno indisturbato.

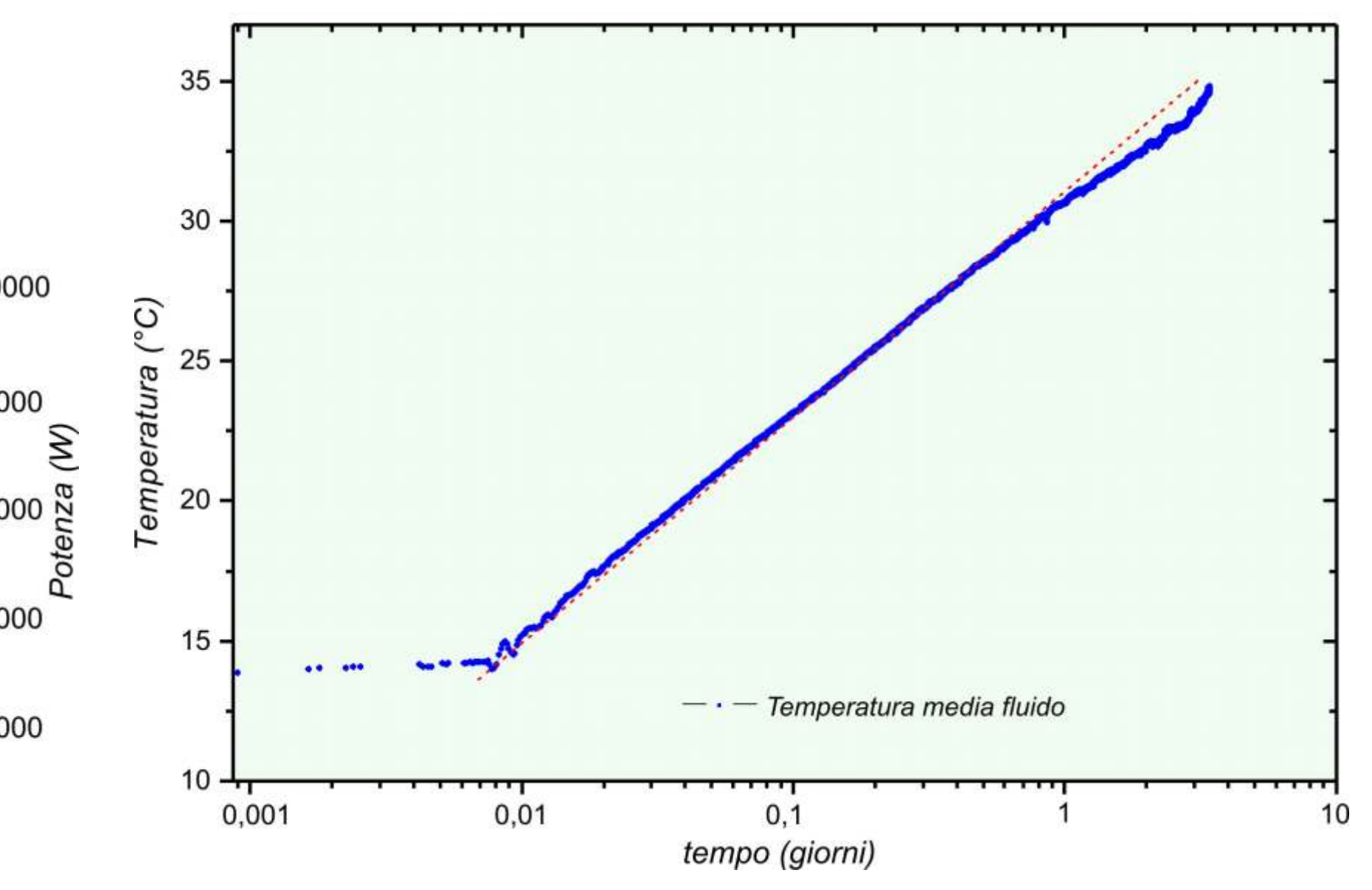
Ubicazione delle sonde geotermiche nell'alta valle del F. Tevere - Carta geologica schematica (da regione Umbria, 1986) - Stratigrafia schematica e profilo termico verticale lungo l'asse della sonda misurato nei mesi invernali. Il gradiente geotermico è di 0,026°C/m



Variazione della temperatura in ingresso ed in uscita dalla sonda geotermica durante un Thermal Response Test della durata di circa 96 ore (dati gentilmente forniti da Geonet Srl di Imola)



Variazione della temperatura esterna e della potenza erogata alla sonda geotermica durante un Thermal Response Test (dati gentilmente forniti da Geonet Srl di Imola).



Variazione della temperatura media nella sonda geotermica durante un Thermal Response Test (dati gentilmente forniti da Geonet Srl di Imola).

La teoria della sorgente lineare è una semplificazione della sorgente cilindrica e deriva dal modello termico di Kelvin che è stato applicato alle sonde geotermiche da Ingersoll et al. (1948). La metodologia è stata successivamente sviluppata da Mørgensen (1983) ed applicata per interpretare il TRT. Questo tipo di approccio adotta la soluzione analitica della risposta di una sorgente lineare all'interno di un mezzo omogeneo isotropo infinito. Il flusso verticale lungo la sonda viene assunto trascurabile mentre il flusso laterale è considerato costante. La variazione della temperatura nell'intorno della sonda è funzione del tempo t , della distanza radiale r dall'asse della perforazione e della quantità di calore q iniettata nel terreno (Carslaw & Jager, 1959):

$$T(r,t) = \frac{q}{4\pi k} \int_0^z \frac{e^{-u} du}{u} + T_0 + \frac{Q}{4\pi k} \int_0^z \frac{e^{-u} du}{u} + \frac{Q}{4\pi k} \int_0^z \frac{e^{-u} du}{u} + \frac{Q}{4\pi k} \int_0^z \frac{e^{-u} du}{u}$$

Dove T_0 è la temperatura indisturbata del terreno, $a = k/\rho c$ è la diffusività termica della roccia, Q è la quantità di calore costante immessa, z è la lunghezza della sonda e $g = 0.577...$ è la costante di Eulero. Questa equazione non è valida per brevi periodi di tempo, in quanto la capacità termica delle varie componenti della sonda geotermica hanno una influenza rilevante sul campo termico esterno. Inoltre l'approssimazione nell'integrale presente nella formula sopra comporta un errore massimo del 2,5% quando $ra, a^2 > 5$, indicando con r il diametro della sonda (Gehlin, 2002). E' necessario quindi togliere dall'analisi dei test le prime ore di funzionamento.

Un altro aspetto importante del TRT è la stazionarietà del sistema nel tempo. Alcuni A (Chad et al., 1988) suggeriscono che questo tempo possa essere pari a $z^2/9a$. Inoltre se il test viene condotto con una durata di circa $t=20$ ore si ha una deviazione standard del valore di 1_{gr} del $\pm 15\%$, mentre per un test della durata $t=50$ ore si ha diminuzione della deviazione standard al $\pm 5\%$. Questo suggerisce di eseguire il test nell'arco di almeno 72 ore. Va ricordato infine che nel calcolo dell'energia immessa nel sottosuolo attraverso la sonda geotermica, vanno considerate le perdite di calore lungo le tubazioni e la strumentazione verso l'ambiente esterno. A seconda delle situazioni ambientali e della strumentazione, questi valori possono variare tra il 1-25% dell'energia totale immessa.

Per una sorgente lineare di lunghezza z , la temperatura media della sonda $T_m(r=r_b)$ causata dal flusso di calore specifico radiale $q = Q/z$ attraverso la sonda stessa è data da:

$$T_m = T(r=r_b, t) + qR_b = \frac{q}{4\pi k} \int_0^z \frac{e^{-u} du}{u} + \frac{q}{4\pi k} \int_0^z \frac{e^{-u} du}{u} + \frac{q}{4\pi k} \int_0^z \frac{e^{-u} du}{u} + \frac{q}{4\pi k} \int_0^z \frac{e^{-u} du}{u}$$

Dove R_b [K/Wm] è la resistenza termica della sonda considerata tra la parete del foro e il fluido di circolazione. Usando una simulazione numerica si dimostra che T_m corrisponde alla media della temperatura in ingresso ed in uscita del fluido dalla sonda $T_m = (T_{in} + T_{out})/2$ (Mørgensen, 1983). Dall'equazione sopra si può notare che la T_m è una funzione lineare del logaritmo tempo t :

$$T_m = a \ln(t) + b$$

La conducibilità termica della roccia può essere quindi ricavata dalla pendenza a della relazione:

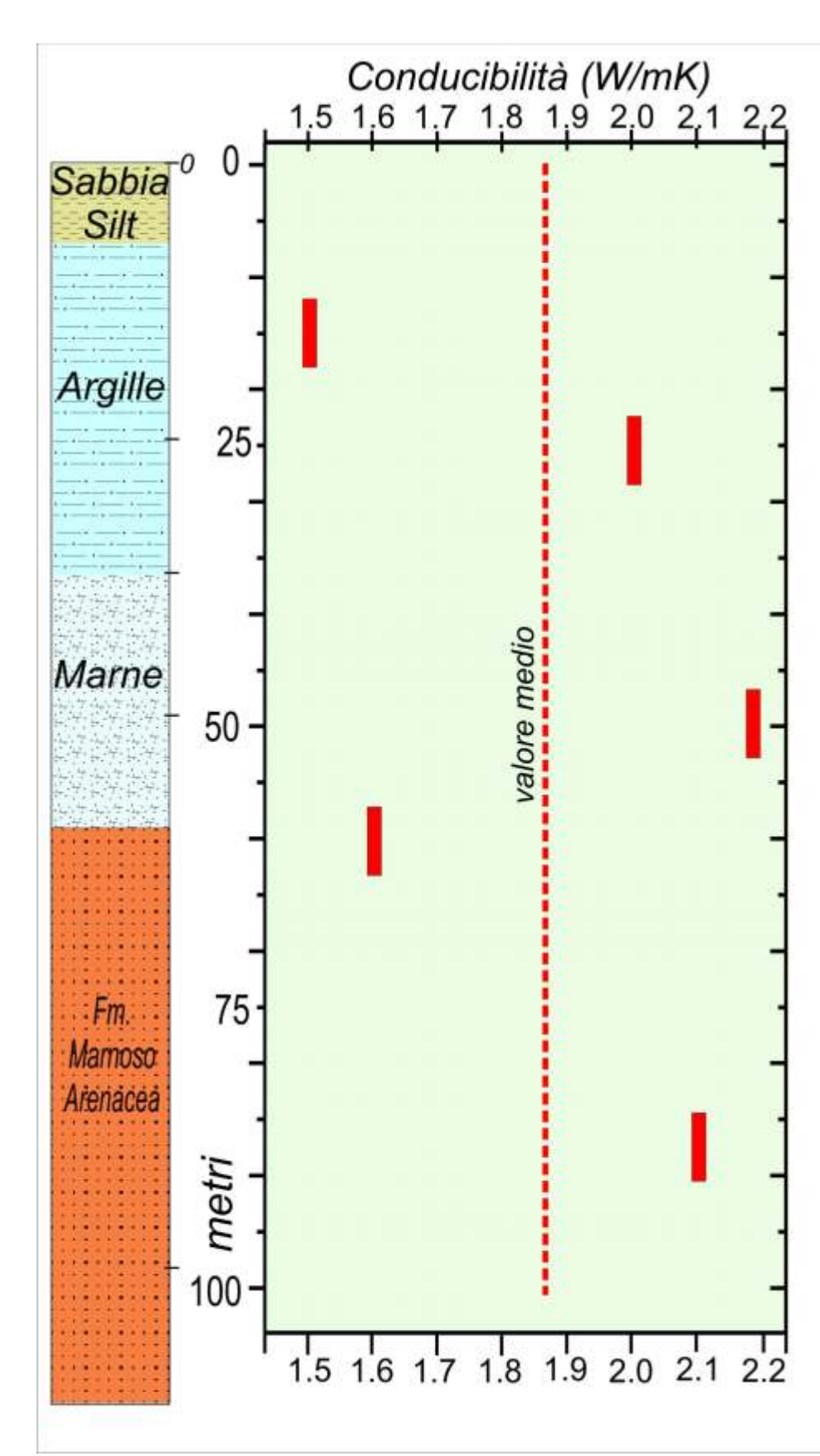
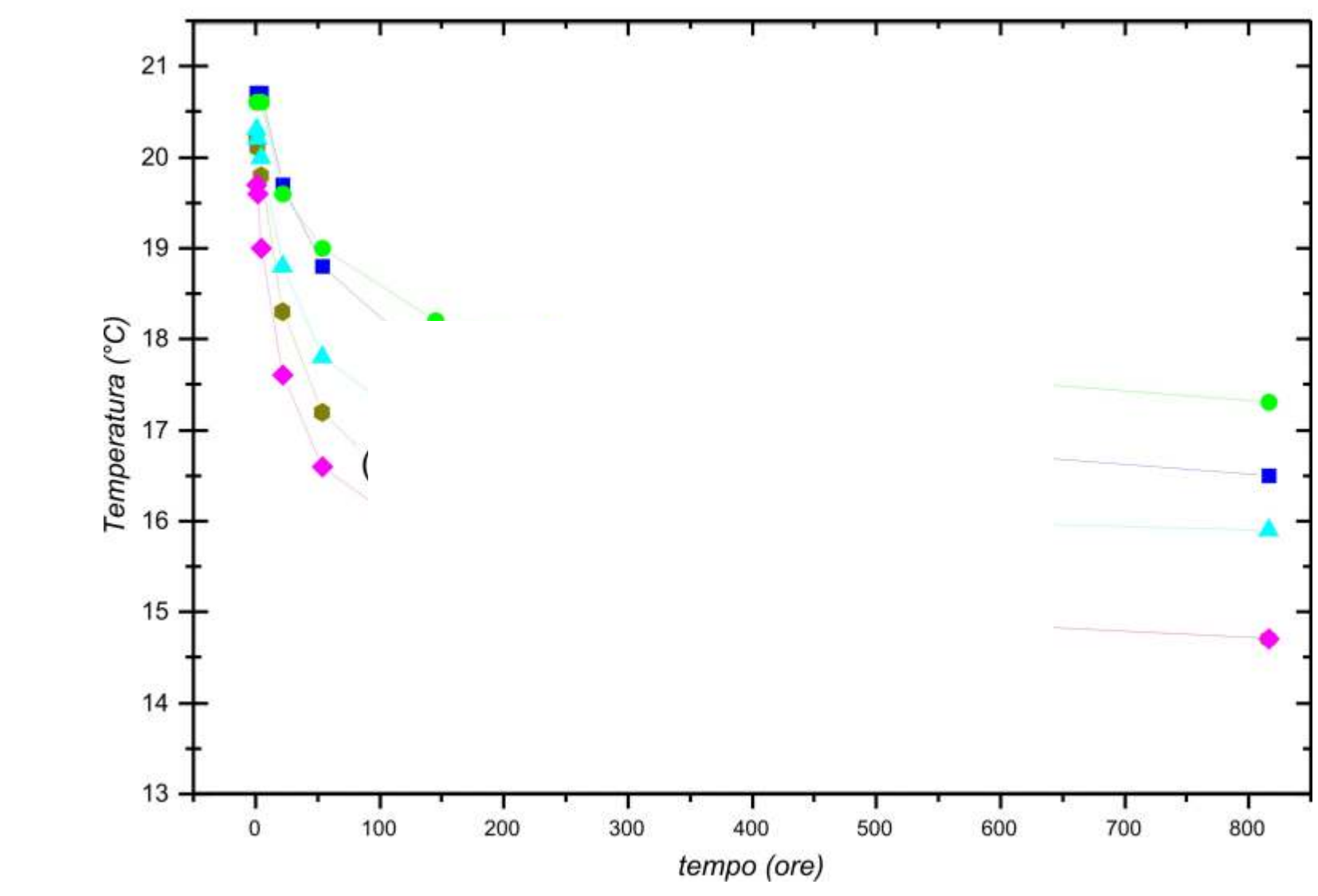
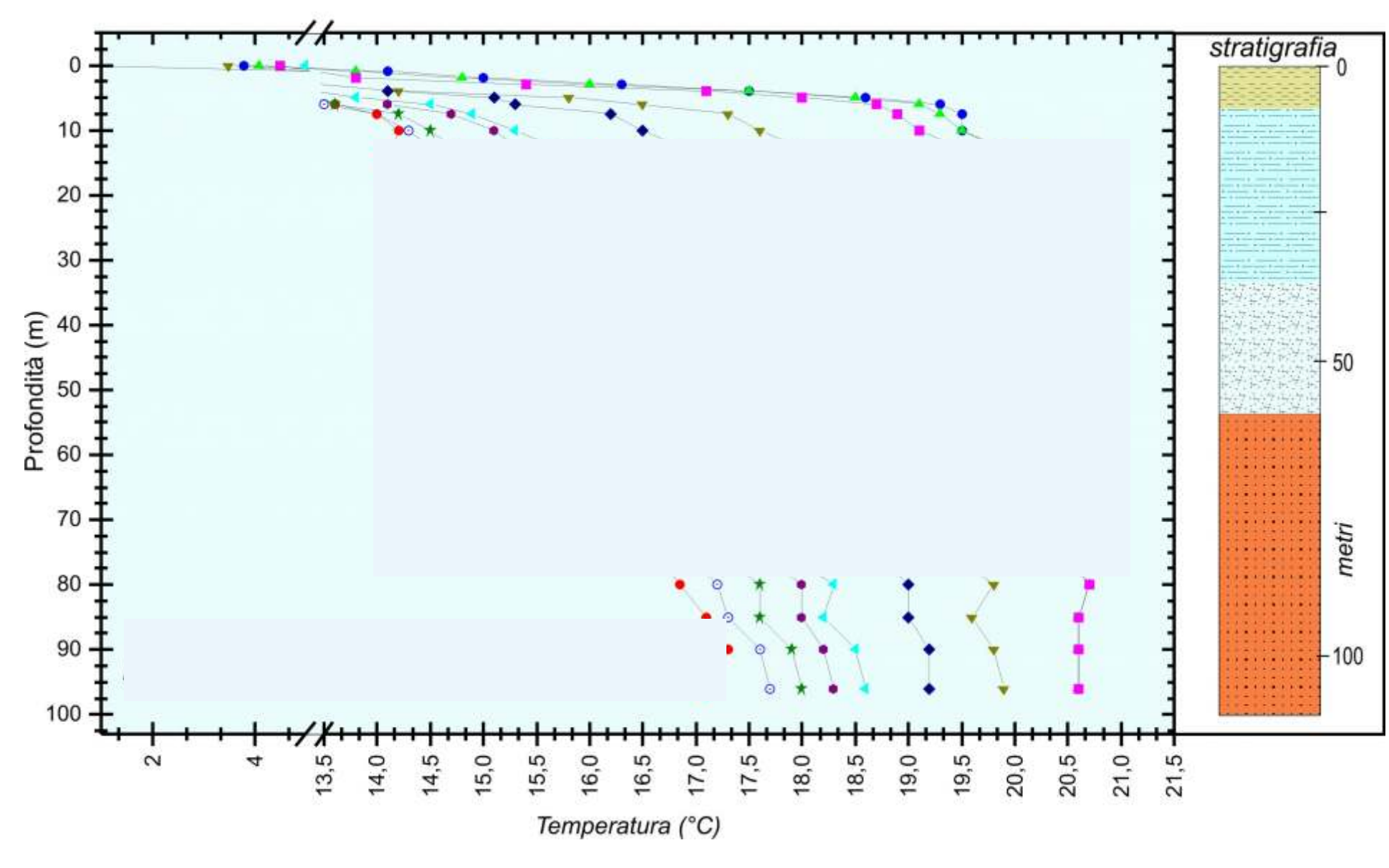
$$k = \frac{q}{4\pi} \frac{\ln(t_2) - \ln(t_1)}{T_m(t_2) - T_m(t_1)}$$

Considerando errori sistematici e casuali che possono aver luogo durante le operazioni di esecuzione di un TRT, questa procedura può essere considerata una buona approssimazione della misura della conducibilità termica del terreno con errori di $\pm 10\%$ (Claesson & Eskilson, 1988)

La precisione del TRT è condizionata soprattutto:

- dalle caratteristiche termiche dei riempimenti del foro che generalmente hanno una bassa conducibilità termica;
- dalle variazioni verticali di flusso di calore dovute alle oscillazioni naturali del gradiente geotermico;
- da un tipo trasferimento termico predominante che avviene per advezione, cioè dove è presente un sottosuolo con una falda che fluisce con velocità non trascurabili;
- dalla durata dell'esecuzione.

La resistenza termica R_b è un parametro importante per il dimensionamento delle sonde geotermiche e può essere ricavato direttamente dalla relazione sopra

$$R_b = \frac{T_m}{q}$$


Conducibilità termica di alcuni intervalli stratigrafici calcolata applicando la teoria della sorgente lineare infinita partendo dai dati del raffreddamento della sonda geotermica.