

AperTO - Archivio Istituzionale Open Access dell'Università di Torino

Il terreno come stoccaggio di energia termica: un sito sperimentale a Grugliasco - Università di Torino

This is the author's manuscript

Original Citation:

Availability:

This version is available <http://hdl.handle.net/2318/1559014> since 2016-03-31T12:57:17Z

Terms of use:

Open Access

Anyone can freely access the full text of works made available as "Open Access". Works made available under a Creative Commons license can be used according to the terms and conditions of said license. Use of all other works requires consent of the right holder (author or publisher) if not exempted from copyright protection by the applicable law.

(Article begins on next page)



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12

This is an author version of the contribution published on:

Questa è la versione dell'autore dell'opera:

[Geologia Tecnica e Ambientale, 3, Consiglio Nazionale dei Geologi, 2015, 55-79]

The definitive version is available at:

La versione definitiva è disponibile alla URL:

[www.cngeologi.it/t/geologia-tecnica-e-ambientale/]

Il terreno per lo stoccaggio di energia termica: un sito sperimentale a Grugliasco – Università di Torino

Giordano N.¹, Comina C.¹⁻², Mandrone G.¹⁻², Cagni A.³

¹ Dipartimento di Scienze della Terra – Università degli Studi di Torino

² AG3 srl, Spin Off Company dell'Università degli Studi di Torino

³ EQ Ingegneria – Ghibardo Cagni Zilioli Associati

Riassunto

L'accumulo di energia termica permette di ridurre lo sbilanciamento tra la sorgente (es. solare) e i fabbisogni invernali di riscaldamento e acqua calda sanitaria. Una delle possibilità è quella di utilizzare il sottosuolo come volume di accumulo, tramite l'accoppiamento di pannelli solari e sonde geotermiche a ciclo chiuso o ciclo aperto. A Grugliasco (TO) è stato messo a punto un laboratorio a scala reale con lo scopo di indagare il comportamento termico di depositi alluvionali insaturi e la loro capacità di accumulare l'energia prodotta dal Sole nella stagione calda e di rilasciarla in inverno per soddisfare la domanda termica. 2 pannelli solari e 4 sonde geotermiche sono collegati all'interno di un circuito che produce e trasferisce calore al terreno da Aprile a Settembre; ad Ottobre il circuito viene invertito e l'energia termica estratta. Il presente articolo riporta i risultati della prima fase di carica dell'impianto (Aprile-Ottobre 2014), del monitoraggio diretto ed indiretto, le previsioni numeriche e alcune ipotesi migliorative dell'impianto.

Parole chiave: stoccaggio termico; sonde geotermiche; simulazioni numeriche; indagini geofisiche; Torino

Abstract

Heat storage means to mind the gap between supply and demand in order to provide energy for heating and domestic hot water needs. A chance we have is to use the underground as storage volume by coupling solar thermal collectors and closed-loop or open-loop borehole heat exchangers. A test site was built in Grugliasco (TO) aiming at the evaluation of the thermal behavior of shallow alluvial deposits and their ability to store solar energy during the warm season and to provide it in winter. 2 solar panels were coupled with 4 closed-loop borehole heat exchangers in order to produce and transfer heat to the underground from April to September; in October the cycle starts working in reverse mode so to extract the energy collected. This paper presents the results of the first injection period (April-October 2014), direct and indirect monitoring activity, numerical simulation outcomes and some hypotheses to improve plant's efficiency.

Key words: heat storage; borehole heat exchangers; numerical simulations; geophysical surveys; Torino

48 1. Introduzione

49 L'accumulo di energia è un concetto fortemente attuale in quanto le principali fonti energetiche
50 rinnovabili (FER) presentano caratteri di non-programmabilità (es. solare, eolico) e disallineamento tra
51 domanda ed offerta. Ma se dal lato della produzione elettrica le batterie sono diventate di uso comune
52 in qualunque tipo di dispositivo già da diversi decenni, in campo termico le applicazioni quotidiane
53 sono piuttosto scarse. Tuttavia la ricerca scientifica in entrambi i settori è molto attiva, con studi a
54 scala internazionale su materiali e metodi di stoccaggio (IEA SHC Programme – Task 42).

55 Concentrandoci sul termico, un'applicazione che permetta di diminuire il gap tra la sorgente di
56 energia e la domanda giornaliera viene detta "a breve termine" o "diurna" e generalmente viene
57 garantita da serbatoi d'acqua (es. i serbatoi dei pannelli solari termici). Quando si ha l'esigenza di
58 accumulare per un periodo di tempo maggiore (es. tra estate e inverno), le applicazioni sono dette "a
59 lungo termine" o "stagionali". In questo caso sono necessari volumi di materiale di accumulo maggiori
60 o con migliori caratteristiche termiche. Per quanto riguarda l'immagazzinamento stagionale, alcuni
61 metodi prevedono di utilizzare il sottosuolo come volume di accumulo, aumentandone la temperatura
62 nella stagione estiva (fase di carica) ed estraendone calore nella stagione invernale (fase di scarica),
63 per soddisfare i fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento (heating and cooling – H&C) e di acqua
64 calda sanitaria (ACS) di edifici residenziali e commerciali. Classicamente l'energia termica viene
65 prodotta da appositi collettori solari, ma niente vieta di sfruttare i surplus termici o altre fonti di
66 energia. Come vedremo nel sussiego dell'articolo, la parte sottosuolo dell'impianto può essere a ciclo
67 aperto o a ciclo chiuso, come le ordinarie applicazioni geotermiche a bassa entalpia (Casasso e Sethi,
68 2013). A differenza di queste ultime però, l'accoppiamento solare-geotermico fornisce l'indubbio
69 vantaggio di poter fare a meno delle pompe di calore e di risparmiare quindi sull'energia elettrica
70 necessaria a farle funzionare.

71 Come è chiaro da questi primi paragrafi, il terreno assume un doppio ruolo fondamentale: (i)
72 volume di accumulo nella fase di carica e (ii) sorgente di calore nella fase di scarica. Lo studio del suo
73 comportamento termico e della sua capacità di accumulare e rilasciare energia sono quindi alla base
74 della progettazione e dell'attività di monitoraggio necessarie per l'ottimizzazione di questi impianti.
75 L'attività di ricerca portata avanti dagli autori mira pertanto alla necessità di comprendere al meglio la
76 risposta del terreno soggetto a immissione ed estrazione di energia termica. Questo articolo presenta i
77 primi risultati di un impianto di dimensioni ridotte e composto da 2 pannelli solari collegati
78 direttamente a 4 sonde geotermiche (27 m di profondità) impostate in depositi alluvionali ghiaioso-
79 sabbiosi insaturi. Il sistema messo a punto, ispirato al concetto dei *living lab*, vuole essere un
80 laboratorio a scala reale per lo studio dell'interazione opera-terreno e per la valutazione di tecniche
81 indirette di monitoraggio dell'estensione del pennacchio termico indotto. Esso è la naturale
82 prosecuzione di un lavoro di ricerca portato avanti da alcuni anni alla scala di laboratorio per valutare
83 il comportamento di alcuni mezzi porosi naturali soggetti a sollecitazioni termiche (Giordano et al.,
84 2013; Comina et al., 2013) e la potenzialità delle indagini geofisiche di tipo elettrico per il
85 monitoraggio della propagazione del calore, sfruttando la relazione esistente tra resistività elettrica e
86 termica (Giordano et al., 2015).

87 2. Stato dell'arte

88 I sistemi di stoccaggio termico a calore sensibile

89 I più avanzati sistemi di accumulo termico sfruttano il calore sensibile, ossia quel quantitativo di
90 energia che concorre all'aumento di temperatura del materiale soggetto a riscaldamento senza indurre
91 cambiamenti di fase (generati invece dal calore latente) (Cabeza, 2015). I materiali più utilizzati nei
92 sistemi a calore sensibile sono l'acqua (capacità termica $C = 4,2 \text{ MJ/m}^3/\text{K}$), il terreno o la roccia ($C =$
93 $1,3 - 2,2 \text{ MJ/m}^3/\text{K}$), ma vengono impiegati anche calcestruzzi o sali fusi (Frattini et al., 2014).

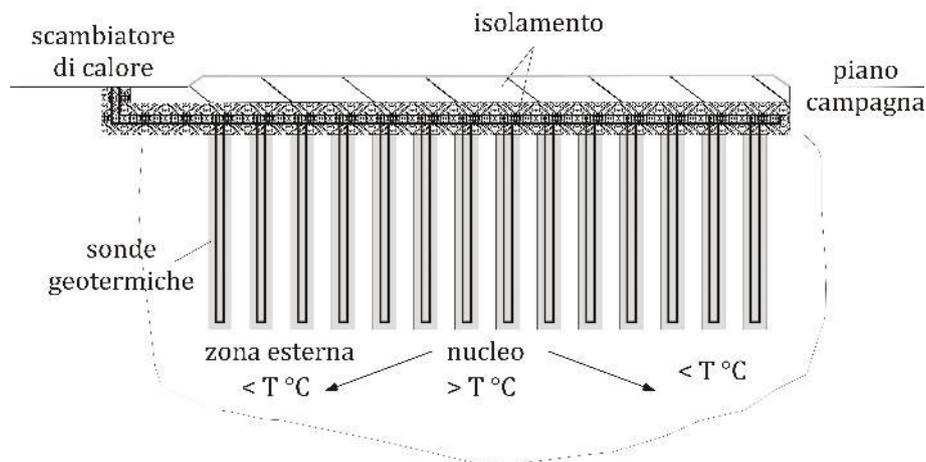
94 L'acqua è sicuramente il mezzo più favorevole per l'accumulo di calore sensibile perché ha una
95 buona capacità termica e può essere pompata ed estratta facilmente, oltre a essere ampiamente
96 disponibile. I primi sistemi messi a punto riguardano serbatoi artificiali che possono essere interrati,
97 per limitare la dissipazione del calore accumulato, oppure incorporati in un edificio. Il termine
98 anglosassone per indicare questo tipo di applicazione è solitamente *tank thermal energy storage*
99 (TTES) (Xu et al., 2014) e diversi impianti furono costruiti negli anni '80 e '90 in Svezia, Germania,
100 Danimarca e Italia (Oliveti et al., 1998) sia con finalità di accumulo a breve termine sia per stoccaggi
101 di maggior durata per coprire lo sbilanciamento tra estate e inverno.

103 L'acqua viene anche sfruttata in sistemi più complessi che prevedono di estrarre acqua di falda
104 ad una certa T dal sottosuolo (solitamente 10-15°C, a seconda delle condizioni idrogeologiche e
105 climatiche locali), riscaldarla per mezzo dell'energia termica a disposizione e re-iniettarla nello stesso
106 (o diverso) acquifero ad una temperatura maggiore (ΔT 5-10°C in base alla normativa e agli studi di
107 impatto ambientale). Per questi sistemi (detti *aquifer thermal energy storage* – ATES) sono sufficienti
108 due pozzi posizionati correttamente in modo da non creare interferenza tra estrazione ed immissione e
109 scongiurare un corto-circuito termico (Banks, 2009). Germania, Olanda e Turchia sono state pioniere
110 in questo campo (Schmidt et al., 2004).

111 Altre applicazioni che sfruttano l'acqua come mezzo di stoccaggio sono i *solar ponds* (Pinel et
112 al., 2011), letteralmente stagni solari, o i *cavern thermal energy storage* (CTES) (Nordell, 2012). I
113 primi consistono in laghi artificiali o naturali il cui fondo viene spesso coperto da teli neri per attirare
114 maggiormente la luce solare. I CTES sono sistemi che utilizzano serbatoi sotterranei, precedentemente
115 sfruttati da industrie minerarie o petrolifere, per accumulare grandi quantitativi di acqua e sfruttarli in
116 maniera analoga ai TTES.

117 I *rock beds* (detti anche *water-gravel thermal energy storage* – WGTES) consistono in serbatoi
118 artificiali riempiti di ghiaia o pezzi di cemento saturi di acqua o aria, le quali agiscono da fluido di
119 trasporto del calore (Phillips, 1981). Se si utilizza aria, questa fa solo da mezzo trasportatore, se al
120 contrario viene applicata l'acqua, essa contribuisce anche allo stoccaggio e il sistema viene detto
121 ibrido attivo. Germania e Cina hanno messo in atto diverse applicazioni di questo tipo (Schmidt et al.,
122 2004; Zhao et al., 2011).

123 Infine, rocce o sedimenti sciolti possono essere sfruttati in modo indiretto in sistemi a circuito
124 chiuso che utilizzano sonde geotermiche di medio-basse profondità (30-150 m) collegate direttamente,
125 o tramite uno stoccaggio intermedio, a pannelli solari che producono l'energia termica (**Fig. 1**). L'uso
126 delle sonde ha dato il nome a questi sistemi che vengono definiti *borehole thermal energy storage*
127 (BTES) (Xu et al., 2014). Le sonde geotermiche, in numero variabile da 30 a 50, sono solitamente
128 disposte su un'area circolare e collegate in serie a blocchi di 5-6. Quelle centrali agiscono da nucleo
129 caldo e spostandosi verso l'esterno la temperatura di ingresso (e quindi quella conseguente nel
130 terreno/roccia) è progressivamente inferiore.



131
132 **Fig. 1** – Esempio di impianto BTES con sviluppo verticale. La parte centrale del volume presenta temperature
133 maggiori rispetto all'esterno.

134 Le indagini geoelettriche come strumento di monitoraggio

136 Uno dei principali problemi quando si studiano gli stoccaggi di calore nel terreno è il
137 monitoraggio delle variazioni indotte nel terreno. Solitamente si utilizzano sensori di temperatura posti
138 in piezometri, o direttamente a contatto con il terreno, o nelle sonde geotermiche, ma questo innesca
139 comunque problemi di perturbazione nel sottosuolo e quindi anche le misure possono essere affette da
140 una certa variazione di significatività a seconda di come sono posizionati i sensori.

Uno degli scopi del *living lab* di Grugliasco è proprio quello di trasportare a scala reale alcune esperienze di successo ottenute a scala di laboratorio per misurare la variazione di temperatura nel terreno con tecniche indirette (indagini geofisiche).

La resistività elettrica dipende da numerosi fattori tra cui la temperatura (Hayashi, 2004). Con un'indagine geoelettrica (*electric resistivity tomography* – ERT) temporale si può pertanto ricostruire lo stato del sottosuolo soggetto ad immissione di energia termica. Le ERT sono state ampiamente utilizzate in passato (e lo sono tuttora) per individuare la presenza di fluidi idrotermali nel campo della geotermia a medio-alta entalpia ($T > 90^\circ$). Il loro utilizzo nell'ambito della geotermia superficiale è nettamente meno sviluppato, ma non mancano interessanti applicazioni che ne hanno dimostrato l'utilizzabilità come strumento di monitoraggio della propagazione del pennacchio termico (Hermans et al., 2015) o di caratterizzazione termica del mezzo indagato (Cardarelli et al., 2014) sfruttando la relazione logaritmica che lega le resistività termica ed elettrica (Singh et al., 2001).

3. L'impianto sperimentale di Grugliasco

Inquadramento geografico, climatico e geologico

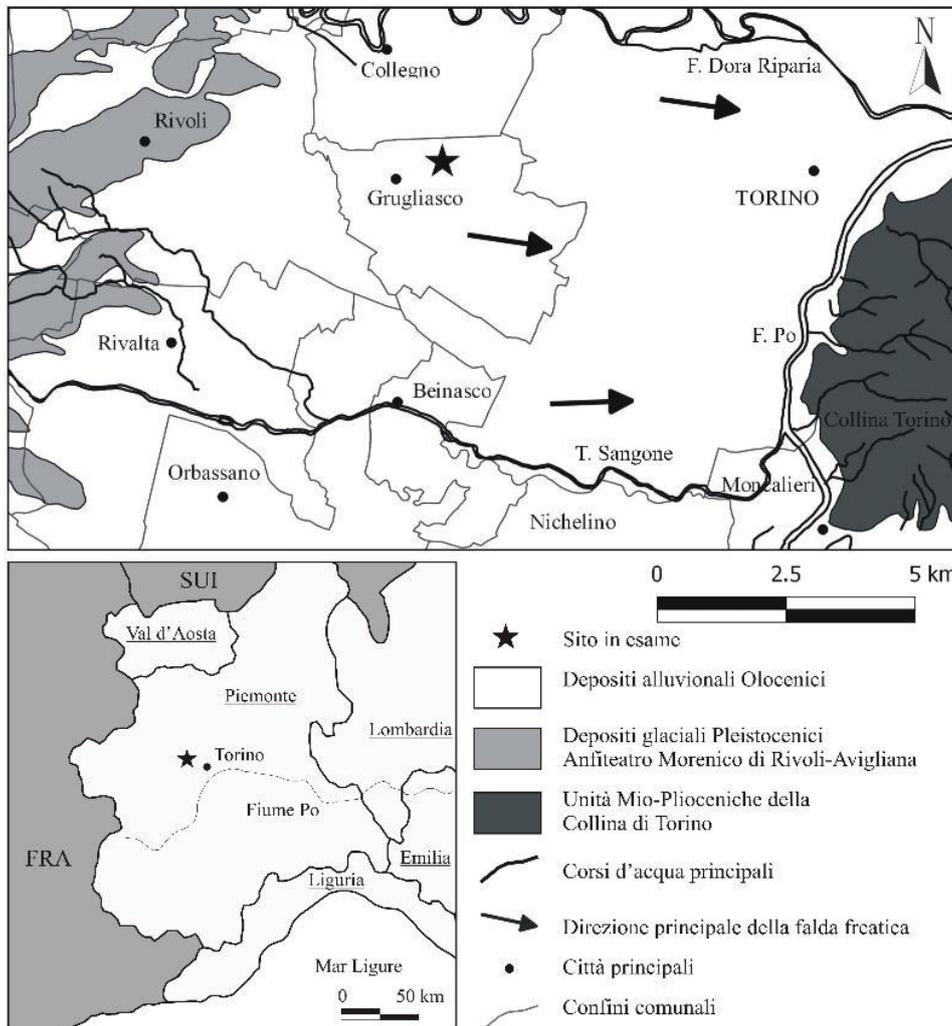
Il sito sperimentale è situato nel comune di Grugliasco (coordinate geografiche $45^\circ 3' 55''$ N, $7^\circ 35' 23''$ E) nella porzione nord-ovest dell'alta Pianura Padana, delimitata a sud dal T. Sangone, a est dal F. Po e a Nord dal F. Dora Riparia. La quota rispetto al livello del mare è pari a circa 287 m, più elevata di circa 70 m rispetto al livello base del Po. La radiazione solare ricevuta annualmente dal sito in esame è pari a circa 1.300 kWh/m^2 , con un valore annuale di 2.092 gradi-giorno di riscaldamento con riferimento a 18°C (Tab. 1).

Tab. 1 – Dati di irradiazione globale, inclinazione ottimale, temperature media dell'aria e gradi-giorno di riscaldamento per l'area di Grugliasco (dati PVGIS).

Mese	Irradiazione globale (Hz) [Wh m ⁻² giorno ⁻¹]	Inclinazione ottimale [°]	Temp. media dell'aria [°C]	Gradi-giorno di riscaldamento [°C]
Gen	1,520	66	3.9	410
Feb	2,070	57	5.6	328
Mar	3,520	46	9.1	221
Apr	4,390	30	12.0	112
Mag	5,090	17	17.0	12
Giu	6,040	12	20.9	0
Lug	6,310	15	22.9	0
Ago	5,480	26	22.5	1
Set	4,060	41	18.5	42
Ott	2,590	53	14.3	184
Nov	1,590	63	8.4	352
Dic	1,220	67	4.8	430
Anno	3,670	37	13.3	2,092

La pianura compresa tra l'arco delle Alpi Occidentali e la Collina di Torino è costituita da una potente successione sedimentaria di depositi fluvio-glaciali (Pleistocene – Attuale), organizzati in numerosi conoidi coalescenti che si adagiano sulle facies di transizione marino-continentali (Pliocene Med. – Pleistocene Inf.) e più in profondità sulle unità Mioceniche della Collina di Torino (Fig. 2). I depositi più superficiali consistono in ghiaie e sabbie ad alta permeabilità con potenza massima di 60-70 m (più potente nei settori mediani, minore nei settori apicale e distale). All'interno di tali materiali è frequente trovare porzioni particolarmente compattate ("Ceppo") e spesso cementate da cemento di natura carbonatica e origine fluvio-glaciale. In particolare nell'area in esame, i depositi affioranti appartengono al *Subsintema di Col Giansesco* (Pleistocene Inf. – Holocene), a sua volta parte del

174 “Sintema di Frassinere”: all’interno di questo litotipo si distinguono ciottoli di quarziti, serpentiniti,
 175 gneiss, prasiniti e calcescisti (Polino et al., 2010). Al di sotto di tale termine, la successione continua
 176 con alternanze di sabbie e limi tipiche di un ambiente deposizionale di transizione, in cui si sono
 177 susseguiti fenomeni di trasgressione e regressione della linea di costa nel Pliocene Med. – Pleistocene
 178 Inf. (Fig. 3).



179
 180 **Fig. 2** – Inquadramento geologico e geografico dell’area.

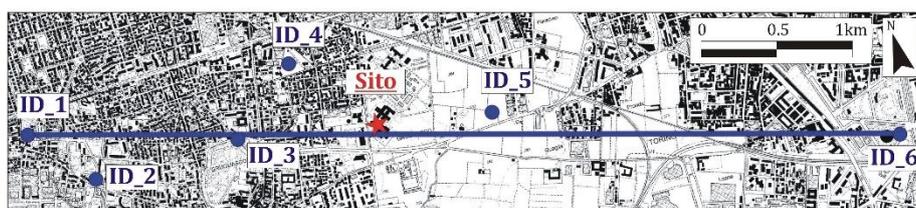
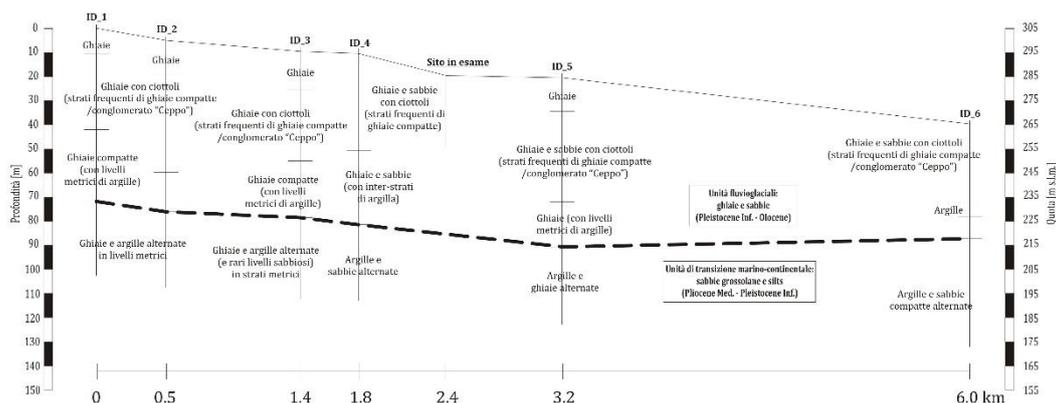


Fig. 3 – Sezione stratigrafica dell’area in esame (dati Arpa Piemonte).

181
 182
 183
 184 Le attività di perforazione eseguite in corrispondenza del sito in esame hanno rivelato la
 185 presenza fino a 30 – 32 m di ghiaie e sabbie non sature, con locali livelli di depositi cementati (a 10 e
 186 21 m) che hanno restituito carote compatte. Analizzate in laboratorio con attacco di acido cloridrico,
 187 hanno rivelato la presenza di cemento carbonatico come atteso e riportato in letteratura. Campioni di
 188 depositi sciolti sono stati estratti (a 7,5, 21 e 27 m) e analizzati dal punto di vista granulometrico, e
 189 hanno restituito le curve granulometriche riportate in **Fig. 4**. Tali campioni sono anche stati testati dal
 190 punto di vista termico (**Tab. 2**), con alcune difficoltà di misura legate alla presenza di ciottoli anche di
 191 grandi dimensioni. Per le misure sono stati impiegati gli strumenti ISOMET 2114 (Applied Precision
 192 Ltd., Bratislava, SK) e KD2 Pro (Decagon Devices Inc., Pullman, WA, USA) che permettono misure
 193 sia su campioni sciolti sia su rocce grazie alla possibilità di impiegare diversi accessori. Entrambi si
 194 basano sul “*transient line source method*”, ma applicano algoritmi di calcolo differenti in base
 195 all’accessorio utilizzato per la misura. La misura avviene fornendo un piccolo quantitativo di calore al
 196 mezzo e misurandone la risposta in termini di conducibilità termica λ [W/m/K]. Con l’ISOMET 2114
 197 è stata impiegata la sonda ad ago IPN 1100 (range di misura 0,015 – 2,0 W/m/K, accuratezza 5%); con
 198 il K2D Pro è stata invece adottata la sonda a singolo ago TR-1 (range di misura 0,1 – 4,0 W/m/K,
 199 accuratezza 10%).

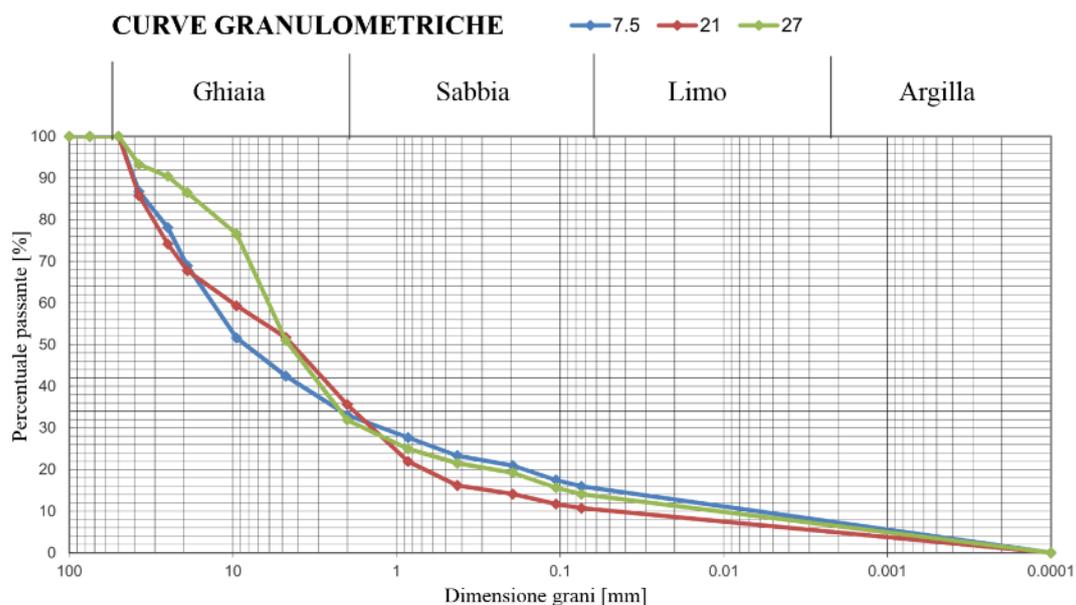


Fig. 4 – Curve granulometriche dei 3 campioni di terreno analizzati.

Tab. 2 – Misure di conducibilità termica sui campioni di terreno.

Prof. campioni [m]	Conducibilità termica [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]		Strumento
	secco	saturo	
7.5	0.47 ± 0.02	2.55 ± 0.04	ISOMET 2114
21	0.55 ± 0.02	2.52 ± 0.05	ISOMET 2114
27	0.45 ± 0.03	2.31 ± 0.07	KD2 Pro

Dal punto di vista idrogeologico, i depositi sopra descritti ospitano una falda superficiale di tipo libero in connessione diretta con il reticolato idrografico principale che, generalmente, la drena. Sulla base dei dati disponibili in letteratura e delle indagini eseguite in sito, si ipotizza che la falda freatica si attesti ad una profondità di 35-40 m da piano campagna con direzione verso E-NE. L'unità più profonda, costituita da facies di transizione a permeabilità medio-bassa, è caratterizzata dalla presenza di un sistema multi-falde. Le analisi granulometriche dei 3 campioni analizzati hanno permesso una stima della conducibilità idraulica K [m/s] delle unità litologiche in posto, eseguita tramite l'equazione di Kozeny-Carman (Carrier, 2003). I campioni superficiale, intermedio e profondo hanno restituito valori di K pari a $2,3 \times 10^{-4}$, $5,6 \times 10^{-4}$ e $3,5 \times 10^{-4}$ m/s rispettivamente, presentando una permeabilità medio-alta come atteso.

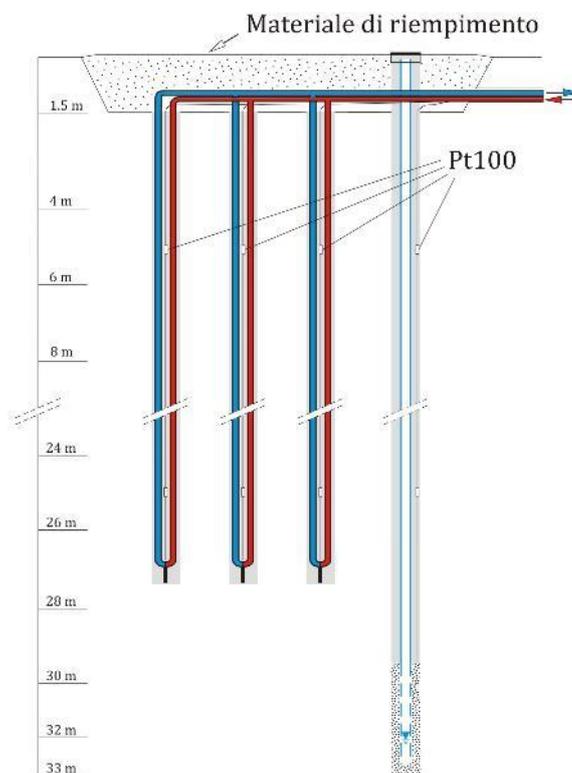
Descrizione dell'impianto

Alla luce delle condizioni geologiche ed idrogeologiche sopra descritte e sentite le amministrazioni locali, l'impianto è stato impostato nella zona non satura dell'acquifero superficiale. In Italia purtroppo una normativa unificata a riguardo delle applicazioni geotermiche a bassa entalpia non è stata fino ad ora redatta, ma è stato conferito alle Regioni il potere di legiferare nello specifico a livello locale. In Piemonte, gli impianti a ciclo aperto atti ad alimentare pompe di calore geotermiche seguono la normativa pozzi ad uso civile/industriale (enti competenti le Province); gli impianti a ciclo chiuso sono soggetti a semplici "Dichiarazioni di inizio attività", ma sempre soggetti a controllo Provinciale nell'attestazione di efficacia della cementazione quando si attraversa la base dell'acquifero superficiale. Gli impianti di stoccaggio non sono ancora contemplati a livello normativo, data la sostanziale innovatività in ambito italiano, pertanto si è deciso di non interferire con l'acquifero. Tale situazione ha permesso in ogni caso di valutare la capacità di depositi ghiaioso-sabbiosi a bassa conducibilità termica ad ospitare sistemi di accumulo stagionale.



229
230
231
232
233

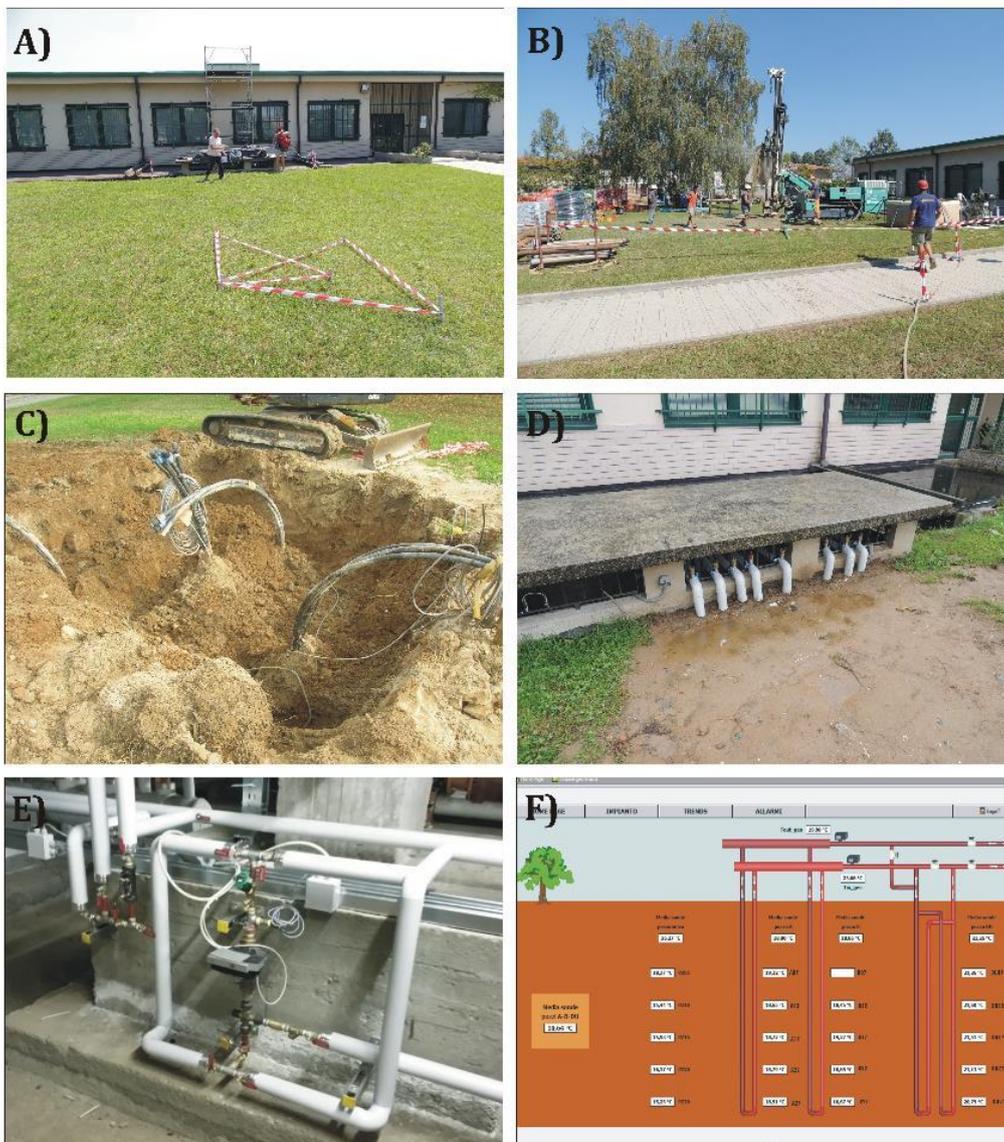
Fig. 5 – Immagine satellitare del sito. La posizione di sonde e tubo di monitoraggio è riportata con l'indicazione di quali perfori sono attrezzati con sensori di temperatura. L'edificio nella figura è il Dip. di Topografia sul quale sono stati posizionati i pannelli solari termici.



234
235

Fig. 6 – Sezione schematica della parte di impianto sotto-terra.

236 L'impianto è stato situato a fianco dell'edificio di Topografia del Dipartimento di Scienze
 237 Agrarie, Forestali e Alimentari all'interno del comprensorio UniTo (Via Leonardo Da Vinci, 42 –
 238 Grugliasco, TO). 4 perfori sono stati eseguiti fino a 27 m e attrezzati con sonde geotermiche adatte a
 239 resistere alle alte temperature. La disposizione delle sonde è stata pensata per creare un nucleo caldo
 240 interno, con una sonda centrale a doppia U, e un anello protettivo intorno costituito da 3 sonde a
 241 singola U disposte ai vertici di un triangolo equilatero di 2 m di lato (**Fig. 5**). A fianco del campo
 242 sonde è stato eseguito un perforo fino a 33 m da p.c. da attrezzare con piezometro in PVC a tubo
 243 aperto per monitorare le oscillazioni freatiche della falda assieme alla sua temperatura e composizione
 244 chimica (eventualmente influenzate dall'impianto). Tuttavia, a causa di problemi operativi incontrati
 245 durante tale perforazione il piezometro risulta tuttora secco e viene pertanto utilizzato come tubo di
 246 monitoraggio (MH) della temperatura del sottosuolo; in ogni caso il franco di 6 m rispetto alla base
 247 delle sonde geotermiche permette di avere un controllo su una possibile interferenza per risalita della
 248 superficie piezometrica. La boccaforo delle sonde è stata posta ad una profondità di 1,5 m da p.c. in
 249 modo da poter garantire uno strato isolante per minimizzare le perdite termiche verso l'atmosfera (**Fig.**
 250 **6**). Anche i tubi in uscita dai perfori (che procedono verso l'edificio per il collegamento ai pannelli
 251 solari) sono interrati alla stessa profondità (**Fig. 7D**).
 252



253 **Fig. 7** – Foto del sito: (A) Agosto 2013 prima dell'inizio dei lavori; (B) lavori di perforazione; (C) profondità
 254 della boccaforo delle sonde; (D) situazione alla fine dei lavori; (E) tubazioni dell'impianto sopra-terra; (F)
 255 schermata di gestione da remoto del sistema.
 256

257 Per rendere i tubi in PVC solidali al terreno è stato utilizzato un cemento termicamente
 258 migliorato, che garantisce una conducibilità nominale pari a 2 W/m/K. Alcuni giorni dopo la fine delle
 259 attività di perforazione, sono stati eseguiti 3 campionamenti superficiali della miscela cementizia in
 260 posto e i campioni sono stati analizzati termicamente per mezzo degli strumenti ISOMET 2114 e KD2
 261 Pro descritti in precedenza. L'interazione tra la miscela cementizia e il terreno dà come risultati valori
 262 inferiori a 1 W/m/K (**Tab. 3**). Tale valore potrebbe sembrare insoddisfacente, ma alla luce dei valori di
 263 conducibilità termica del terreno circostante può essere accettato perché è principalmente importante
 264 che non ci siano grandi differenze tra cemento e terreno, in modo da avere quanto più possibile
 265 omogeneità termica.

266
 267 **Tab. 3** – Misure di conducibilità termica sui campioni di cemento geotermico.

Campione	Conducibilità termica [W m ⁻¹ K ⁻¹]		Strumento
	secco	saturo	
1	0.77±0.03	0.93±0.01	ISOMET 2114
2	0.69±0.09	0.84±0.04	ISOMET 2114
3	0.67±0.01	0.83±0.01	ISOMET 2114
4	0.64±0.01	-	ISOMET 2114
5	0.73±0.01	0.62±0.12	ISOMET 2114
6	0.40±0.01	0.78±0.00	ISOMET 2114
7	0.31±0.08	-	KD2 Pro
8	0.27±0.05	-	KD2 Pro

268
 269 La parte sopra-terra dell'impianto è stata posizionata nell'adiacente edificio. 2 pannelli solari
 270 termici con superficie lorda pari a 5 m², sono stati messi a sul tetto con un'inclinazione di 10° rispetto
 271 all'orizzontale. Tipicamente ai collettori termici viene data un'inclinazione di 30° in modo da garantire
 272 una buona produttività durante l'intero arco dell'anno. In questo caso, volendo massimizzare la
 273 produzione estiva si è conferito un angolo minore (circa 10°C), più vicino ai valori ottimali elencati in
 274 **Tab. 1** per i mesi centrali dell'anno. Il circuito pannelli-sonde è governato da una pompa idraulica da
 275 59 W di potenza posizionata nel piano interrato dell'edificio, dove tutti i tubi sono arrangiati insieme
 276 (**Fig. 7E**). La pompa garantisce una portata nominale di 200 l/h ad una pressione costante di circa 2
 277 bar. Il fluido termo-vettore è costituito da acqua additivata da Glicole Propilenico al 25% vol. Siccome
 278 può capitare che l'impianto sia fermo soprattutto durante la stagione invernale, si è scelta una
 279 percentuale di anti-congelante piuttosto elevata in modo da prevenire la possibilità di congelamento
 280 anche a temperature di 15-20°C sotto zero. Nel seminterrato dell'edificio è stata anche posta un'unità
 281 di riscaldamento (classico *fan-coil*) da utilizzare come dissipatore di calore nella stagione invernale,
 282 quando si inverte il ciclo e si estrae energia termica dal terreno.

283 L'impianto è stato pensato nell'ottica di un laboratorio a scala reale, che fosse quindi flessibile a
 284 qualunque tipo di modalità di circolazione. Per questa ragione si è strutturato un sistema di
 285 acquisizione con numerosi sensori di temperatura applicati lungo tutto il circuito e con una gestione da
 286 remoto dal Dip. di Scienze della Terra UNITO, situato nella città di Torino. Un sito web
 287 (www.gtes.unito.it) è stato organizzato in modo da spiegare le caratteristiche principali dell'impianto e
 288 delle attività che si eseguono all'interno della ricerca, e pensato per permettere a qualunque utente
 289 esterno di visualizzare la situazione in tempo reale con valori di temperatura nel terreno (**Fig. 7F**) e
 290 lungo il circuito, portate idrauliche, potenza istantanea ed energia prodotta o consumata
 291 progressivamente.

292 In totale sono stati posizionati 20 sensori RTD Pt100 a 4 fili (range di misura -50 – 180°C,
 293 accuratezza 5%) nei perfori eseguiti. Il MH e 3 delle sonde hanno sensori ogni 5 m di profondità a
 294 partire da fondo foro. Altri 10 sensori di temperatura dello stesso tipo sono stati applicati lungo il
 295 circuito sopra-terra e sui pannelli solari. Inoltre, un misuratore di flusso ad ultrasuoni e un
 296 contabilizzatore di energia sono stati posizionati “a monte” e “a valle” del campo sonde per calcolare
 297 la potenza istantanea P [W] dell'impianto e l'energia traferita o estratta dal terreno progressivamente.

298 Sulla base della differenza di temperatura ΔT [°C] tra ingresso e uscita dal campo geotermico, la
299 portata q [m³/s] e la capacità termica volumetrica C [J/m³/K] del fluido termo-vettore è possibile
300 calcolare prima la potenza:

$$301 \quad P = C \cdot (T_{out} - T_{in}) \cdot q \quad [1]$$

302
303 e successivamente l'energia prodotta E [Wh] in base alle ore di funzionamento dell'impianto. Tutti i
304 sensori e contabilizzatori sono collegati ad un data-logger che acquisisce in continuo i dati e archivia
305 gli stessi con un intervallo di campionamento di 0,5 h.

306 La modalità di funzionamento dell'impianto per la prima "fase di carica" (trasferimento di
307 energia termica dai pannelli al terreno) è stata adottata ispirandosi ai numerosi impianti già operativi
308 che, come descritto, mirano a creare un nucleo caldo protetto da sonde esterne a temperatura più bassa.
309 La circolazione principale prevede perciò che il fluido in uscita dai pannelli sia indirizzato prima alla
310 sonda centrale e successivamente, in uscita da questa, in parallelo alle tre sonde esterne. Dopo questo
311 doppio passaggio nel terreno, il fluido ritorna ai pannelli per una nuova ricarica di energia termica da
312 trasferire analogamente al terreno. Il sistema è dotato di logiche preimpostate in modo che sia in grado
313 di decidere da solo quando funzionare o meno (oltre alla modalità manuale, naturalmente). Se la
314 temperatura dei pannelli non è maggiore di almeno 5°C rispetto a quella registrata dai sensori nel
315 sottosuolo, il circuito si ferma in modo da non raffreddare il terreno e generare dissipazione del calore
316 fino a quel momento accumulato. Tale modalità fa sì che l'impianto funzioni sempre nei giorni di bel
317 tempo e si fermi nei giorni piovosi o di notte. Al contrario, la "fase di scarica" viene applicata nella
318 stagione invernale, procedendo all'estrazione dell'energia precedentemente accumulata: in questo caso
319 il fluido viaggia in parallelo nelle 4 sonde e i pannelli sono isolati dal sistema, mettendo in funzione il
320 dissipatore di calore e quantificando l'energia prodotta dal terreno. Analogamente alla fase di carica,
321 sono stati imposti una serie di vincoli per far sì che l'impianto funzioni solo quando la temperatura del
322 campo geotermico è maggiore dell'esterno (con un range di variabilità di 2°C)

323 L'impianto è stato avviato ufficialmente il 2 Aprile del 2014 e la fase di carica è stata interrotta
324 il 20 Ottobre dello stesso anno. I risultati del presente articolo riguardano solo questa prima fase di
325 trasferimento di energia al terreno.

326 Monitoraggio indiretto del pennacchio termico: le indagini geoelettriche

327 L'attività di monitoraggio indiretta dell'immissione di energia termica nel terreno è stata
328 eseguita con indagini geofisiche di tipo elettrico (Loke, 2000). Sono state adottate differenti
329 configurazioni elettrode e diversi array di acquisizione con due intervalli temporali di indagine. Le
330 indagini sono state effettuate principalmente con cadenza mensile dalla condizione di partenza (Aprile
331 2014) fino al termine della prima fase di carica del terreno (Ottobre 2014). In aggiunta si sono
332 organizzate alcune acquisizioni durante l'arco di un'intera giornata a cadenza di 0,5 o 1 h a seconda
333 del tempo necessario per la singola registrazione.

334 Come rappresentato in **Fig. 8**, lo spazio a disposizione per disporre gli stendimenti non è
335 particolarmente ampio. Si è proceduto pertanto ad uno stendimento lineare da 72 elettrodi (spaziatura
336 1 m), per mezzo del quale sono stati applicati array di acquisizione Wenner-Schlumberger (WS),
337 Dipolo-Dipolo (DD), Polo-Dipolo (PD) e Sondaggio Elettrico Verticale (SEV), ed uno stendimento
338 per acquisizione 3D Dipolo-Dipolo con elettrodi disposti in griglia 9x8 con interdistanza di 3 m. La
339 profondità di indagine è stata maggiore nelle indagini SEV (circa 20 m in corrispondenza del campo
340 sonde), media in WS, DP e DD (circa 10-13 m) e bassa nel 3D (6 m).

341 Per le registrazioni in campo è stato impiegato l'acquisitore *SYSCAL Pro* della *IRIS Instruments*
342 a 72 canali. Per il processamento dei dati 2D è stato utilizzato il codice *R2* (Prof. Andrew Binley, ©
343 2012, Lancaster University), per il 3D l'algoritmo di inversione sviluppato da Borsic e Adler (2012).
344 In entrambi i casi è stato utilizzato il metodo di inversione ai minimi quadrati dato che gli errori
345 seguivano una distribuzione gaussiana e ci si attendeva una variazione spaziale di resistività elettrica
346 piuttosto omogenea. Il modello di partenza per l'inversione *time-lapse* è stato ottenuto dall'inversione
347 dei dati di *background* in modo da ottenere un buon punto di partenza per la minimizzazione
348 dell'errore tra modello ipotetico e modello reale.



Fig. 8 – Schematizzazione delle indagini geoelettriche eseguite in sito.

Modellazione numerica

La simulazione numerica dell'impianto di Grugliasco è stata eseguita con l'intento di prevedere l'estensione del pennacchio termico generato dalla fase di carica nel primo anno e di comprendere l'influenza dell'impianto negli anni a venire prendendo in considerazione entrambe le fasi di funzionamento. Tutti i dati raccolti durante le attività di perforazione e quelli disponibili in letteratura sono stati utilizzati come valori di input al modello di partenza. Una valutazione in *back-analysis* dei valori adottati è stata eseguita confrontando le temperature di monitoraggio sperimentali con quelle in uscita dal modello numerico. Tale attività è risultata utile per migliorare gli input di portata e di ore di funzionamento dell'impianto, che a priori sono risultati decisamente sovrastimati. L'approccio generale ha permesso di ottenere un modello affidabile perché calibrato su dati fisici sperimentali (permeabilità, conducibilità e capacità termica) e di funzionamento dell'impianto durante il primo anno. Ovviamente le portate e le ore di funzionamento sono strettamente legate alla situazione meteorologica dell'anno in esame, per cui con il passare degli anni sarà necessario aggiornare progressivamente i dati di input.

Tab. 4 – Proprietà adottate nel modello numerico con FeFlow.

T indisturbata [°C]	14.2
Porosità	0.3
Contenuto d'acqua [%]	50
Capacità termica volumetrica della fase solida [$10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$]	2.2
Conducibilità termica della fase solida [$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$]	3.0
Capacità termica volumetrica della fase fluida [$10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$]	2.1
Conducibilità termica della fase fluida [$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$]	0.1
Conducibilità termica del cemento [$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$]	0.7
Capacità termica volumetrica del fluido termovettore [$10^6 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$]	4.0
Conducibilità termica del fluido termovettore [$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$]	0.6
Viscosità dinamica del fluido termovettore [10^{-3} Pa s]	0.5

371 Per il modello geometrico è stato predisposto un cubo di 50 m di lato e suddiviso in circa
372 140.000 elementi prismatici triangolari per la discretizzazione spaziale (*mesh*), con celle più fini nel
373 centro del modello (in corrispondenza delle sonde) e progressivamente maggiori verso le porzioni
374 laterali. La modellizzazione è stata eseguita per mezzo del codice commerciale FeFlow® v. 6.1 della
375 DHI-WASY (Diersch, 2014). I dati di input della simulazione riguardanti le proprietà fisiche del
376 terreno, le caratteristiche dell'impianto, dei tubi e del fluido termo-vettore sono riportati in **Tab. 4**.

377 La simulazione principale è stata eseguita in un intervallo temporale di 5 anni, impostando
378 un'alternanza di 6 mesi di carica e 6 mesi di scarica del terreno. Un simile impianto dovrebbe essere
379 simulato con discretizzazione temporale oraria, dato che per 8 h il circuito fornisce circa 60°C al
380 terreno e per le restanti 16 h della giornata una temperatura inferiore legata alla temperatura dell'aria.
381 Tuttavia, un tipo di discretizzazione così organizzato causerebbe un tempo di calcolo decisamente
382 dispendioso, per cui si è deciso di adottare una media pesata durante l'arco della giornata come
383 proposto da Diersch et al. (2011). Al termine della prima fase di carica si è in ogni caso proceduto alla
384 calibrazione a ritroso del modello in base ai dati di temperatura, portata ed ore di funzionamento
385 effettivamente registrati dal sistema. Dopo diversi test, la discretizzazione temporale adottata è pari a
386 18.250 step da 0,1 giorni ognuno (per un totale di 1.825 giorni = 5 anni).

387

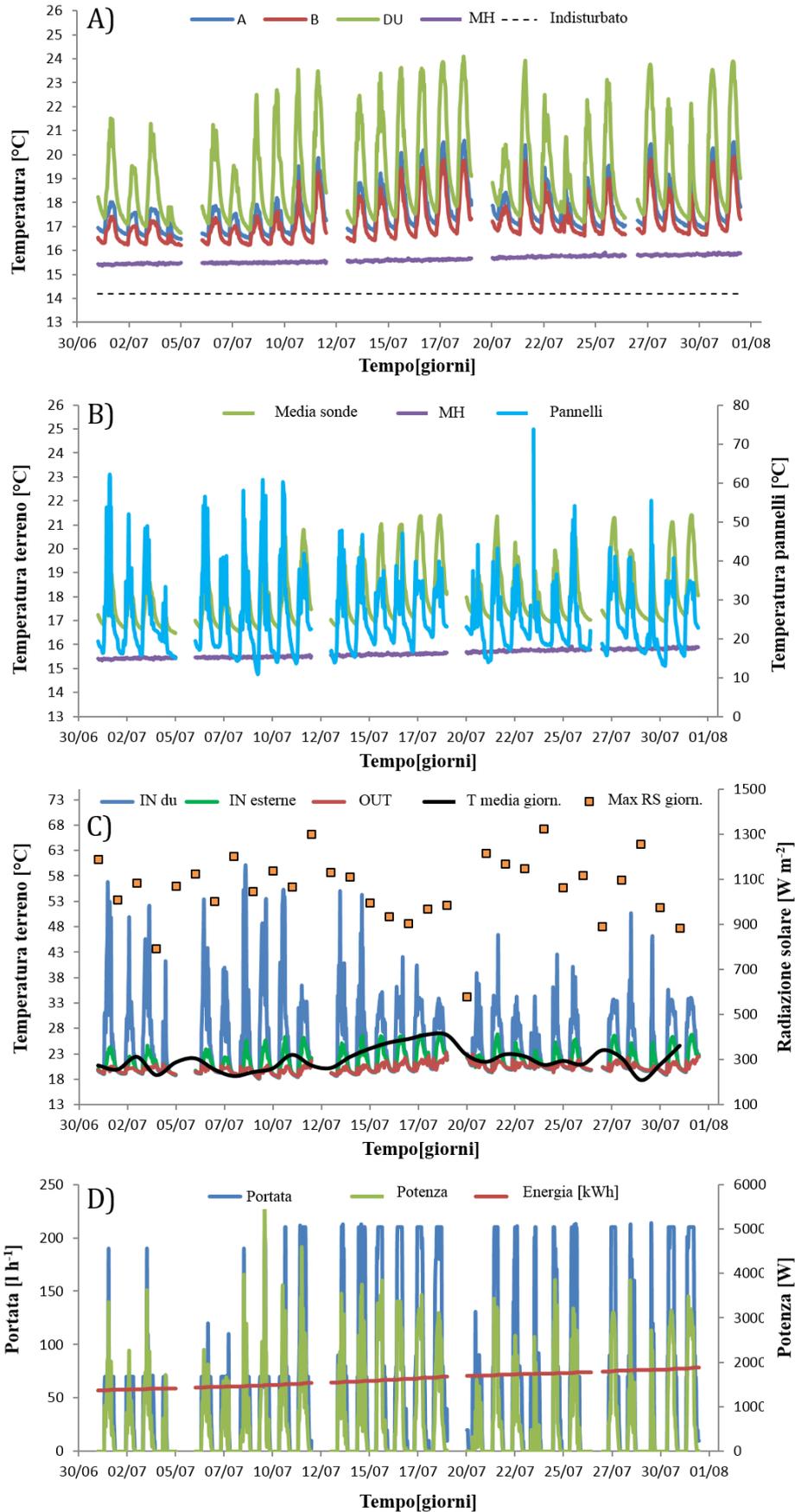
388 **4. Risultati**

389 Monitoraggio diretto

390 La stagione primavera-estate 2014 al Nord-Ovest è stata caratterizzata da una situazione
391 meteorologica fuori dalla media per quanto riguarda i dati di temperatura e di precipitazione, come
392 evidenziato anche da Mercalli e Cat Berro (2014). Rispetto ai 9 anni precedenti, la temperatura
393 registrata da Maggio a Settembre è stata chiaramente inferiore, con valori di circa 21°C a Luglio e
394 Agosto (media 2005-2013 a 24°C); inoltre luglio 2014 è stato il più piovoso degli ultimi dieci anni.

395 In **Fig. 9** sono riportati i grafici che descrivono l'andamento di tutti i parametri in registrazione
396 dell'impianto (più quelli meteorologici) durante il mese di Luglio 2014. I dati di temperatura del
397 terreno misurati vicino alle sonde ed esternamente e sono rappresentati nel grafico **A**. DU, A, B e MH
398 si riferiscono rispettivamente alla sonda centrale, a due delle tre sonde esterne e al tubo di controllo. Il
399 grafico **B** mette in paragone le temperature del sottosuolo con quella registrata dai pannelli.
400 Temperature in ingresso e in uscita dai collettori sono messe a confronto con i dati meteo (temperatura
401 media e radiazione solare massima giornaliera) nel grafico **C**. L'ultimo plot (**D**) mostra l'operatività
402 dell'impianto (portata del circuito) insieme alla potenza istantanea e alla progressiva produzione di
403 energia.

404 Durante la prima parte della fase di carica il sistema di gestione è stato vincolato in modo che
405 garantisca a regime portate del circuito su valori medi (80-90 l/h), così da massimizzare la temperatura
406 del fluido termo-vettore in ingresso alla sonda centrale (nell'ottica di creare un nucleo più caldo). Tale
407 situazione è perdurata fino al 10 Luglio, quando si è deciso di cambiare i vincoli e garantire sempre la
408 portata massima di 200 l/h (**Fig. 9D**), con conseguenti temperature del fluido inferiori. La potenza
409 prodotta è risultata analoga (vista l'**Eq. [1]**), ma sono stati osservati cambiamenti nella distribuzione
410 del calore all'interno del campo geotermico, in particolare con temperature nelle sonde esterne
411 maggiori rispetto al periodo precedente, ma invariate in quella centrale (**Fig. 9A**). La differenza di
412 temperatura tra fluido in ingresso alla sonda centrale e alle sonde esterne è scesa a valori di 10-15°C
413 contro i circa 30°C registrati in precedenza (**Fig. 9C**); questo significa che la distribuzione del calore è
414 stata più efficiente da quel momento in avanti. Il tubo di controllo ha registrato il tasso di crescita
415 maggiore dal 20 al 31, in risposta ritardata (come atteso, data la distanza di 2 m dal centro del campo
416 geotermico) rispetto all'elevata produzione di energia registrata nel periodo 8-18. Luglio è stato il
417 mese più produttivo tra tutti, con 514 kWh di energia termica trasferita al terreno, nonostante i primi e
418 gli ultimi giorni del mese siano stati caratterizzati da meteo piovoso e fresco.



419
420
421

Fig. 9 – Dati di monitoraggio del mese di Luglio 2014. I dati meteorologici appartengono alla stazione meteo del Dip. di Fisica UNITO. I dati mancanti sono dovuti ad errori di acquisizione del sistema.

422
423 Il 20 di Ottobre l'impianto è stato spento perché nella prima decade del mese sono stati
424 registrati andamenti negativi nelle temperature del terreno. Il totale dell'energia prodotta e trasferita al
425 sottosuolo di Grugliasco dal 2 Aprile al 20 Ottobre 2014 ammonta a 2,83 MWh. Alla luce dei dati di
426 **Tab. 1**, la stima dell'energia che si può produrre in questo periodo con i pannelli utilizzati (efficienza
427 82%) è pari a circa 4,2 MWh. Pertanto circa il 65% dell'energia prodotta dai pannelli è stata trasferita
428 al terreno. Ipotizzando ragionevolmente nel 5-10% la quota parte di perdite termiche lungo il circuito,
429 si assume un valore effettivo di energia trasmessa al sottosuolo pari a $E_T = 9,1$ GJ. Se assumiamo che
430 l'influenza termica sia tale per aumenti di temperatura pari a 1°C , e ipotizzando in $2,1$ MJ/m³/K la
431 capacità termica volumetrica del terreno, allora si può scrivere:

$$432 \quad V = \frac{E_T}{\Delta T \cdot C v_b} = \frac{9.100}{1 \cdot 2,1} = 4,300 \text{ m}^3$$

433 stimando in 4.300 m³ il volume di terreno influenzato dall'attività dell'impianto; tale volume
434 corrisponde approssimativamente ad un cilindro di 7 m di diametro e 28 m di profondità.

435 Tuttavia, nell'ottica del recupero di tale energia durante la stagione invernale, è stata calcolata
436 l'energia effettivamente presente nel terreno fino ad una distanza di 2 m dalla sonda centrale. Le
437 temperature di equilibrio registrate nelle sonde e nel tubo di controllo in data 22 ottobre (dopo due
438 giorni di quiete dell'impianto) sono pari a $16,2^\circ\text{C}$ in MH, $16,4^\circ\text{C}$ e $16,6^\circ\text{C}$ in A e B e $16,4^\circ\text{C}$ in DU. Il
439 totale dell'energia termica presente nel volume cilindrico così definito è pari a 1,6-2,0 GJ a seconda
440 che si ipotizzi in $2,0$ o $2,5^\circ\text{C}$ l'incremento di temperatura indotto. Tale risultato attesta l'efficienza di
441 accumulo del sottosuolo in esame su valori del 17-22%.

442 Per brevità sono state riportate qui solo alcune considerazioni generali sulla prima fase di
443 immissione di energia termica, con dettagli sulle osservazioni più interessanti. Per una trattazione
444 specifica si rimanda alla consultazione del lavoro di Giordano (2015) e del sito web preposto
445 (www.gtes.unito.it).

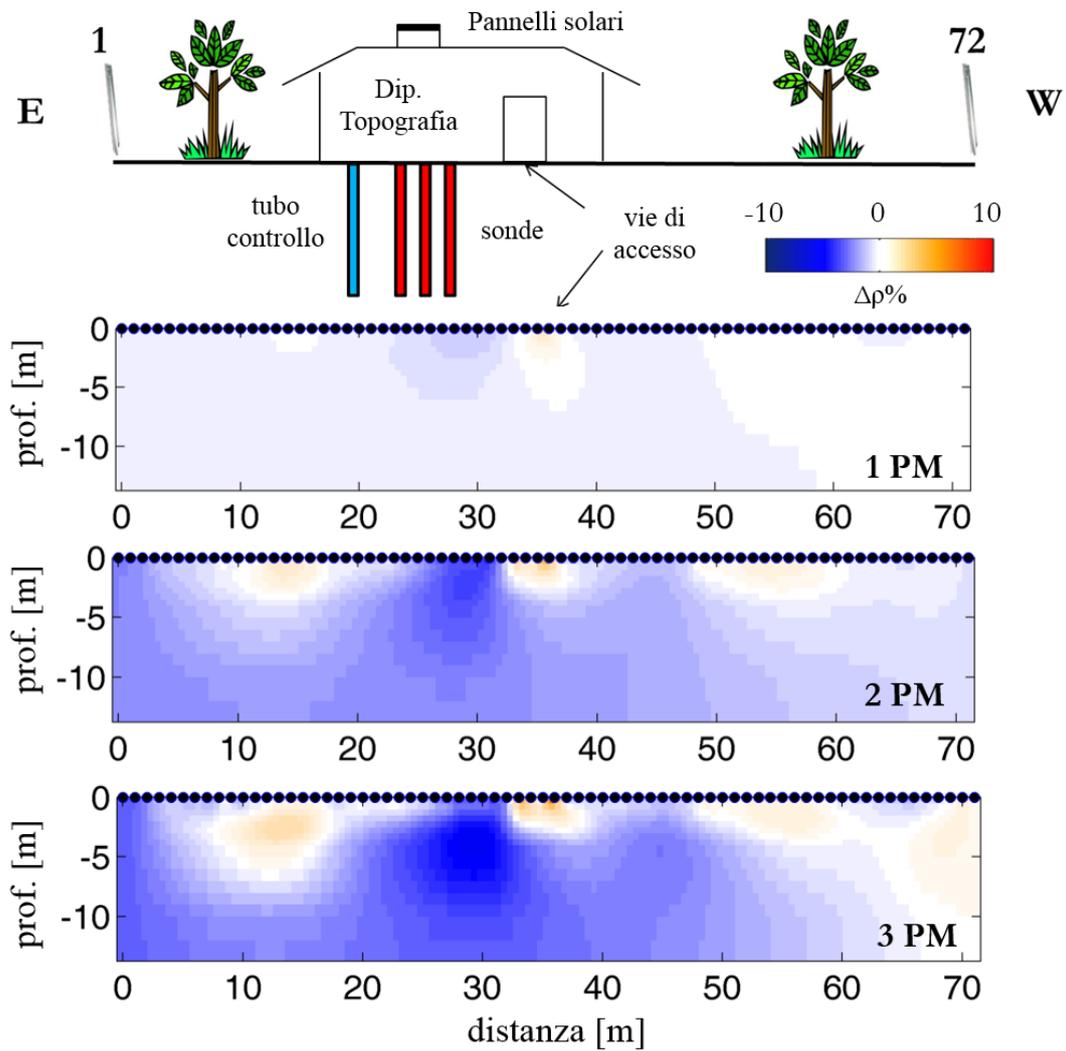
446 Monitoraggio indiretto

447 L'utilizzo delle indagini ERT per individuare il comportamento del pennacchio termico
448 (*thermal affected zone* – TAZ) in profondità non è stato un lavoro privo di difficoltà all'interno del sito
449 in esame. In primo luogo, come descritto in precedenza, le sonde geotermiche sono impostate nella
450 zona insatura dei depositi alluvionali e la variazione di resistività elettrica durante un periodo di tempo
451 prolungato (da Aprile ad Ottobre) è legata a numerosi fattori, tra cui principalmente la variazione di
452 umidità del terreno regolata dalle piogge. In secondo luogo, lo spazio per eseguire le indagini risulta
453 piuttosto circoscritto, limitando pertanto la profondità di indagine raggiungibile. Infine, la presenza di
454 numerosi elementi antropici interrati rende l'acquisizione del dato e la sua successiva elaborazione di
455 non facile gestione.

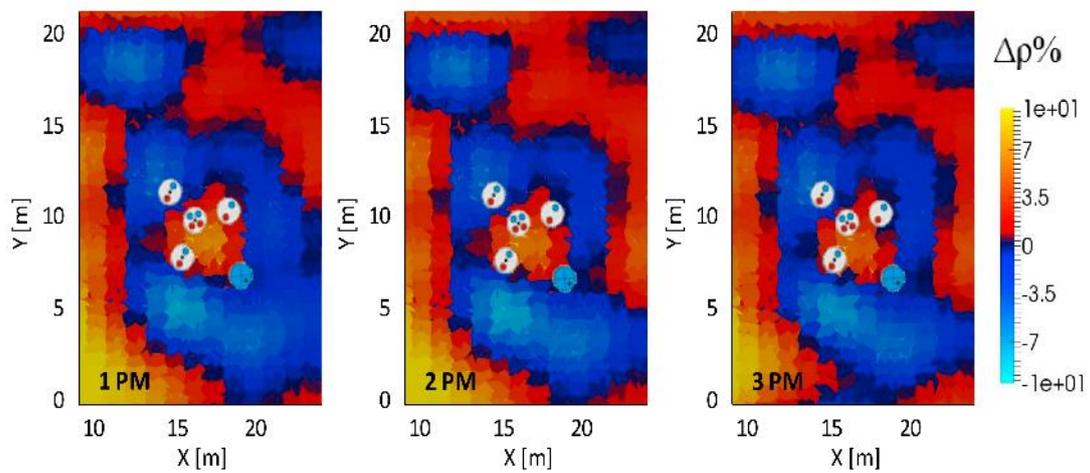
456 I dati acquisiti hanno generalmente buona qualità, con deviazione standard oscillante in un
457 range accettabile di 0,1-5%. Le resistività apparenti variano da 50 a 250 Ωm con alcuni *outlier* in
458 corrispondenza delle strade di accesso; tali valori di anomalie positive o negative rispetto al sottosuolo
459 circostante sono stati filtrati prima dei processi di inversione.

460 Nelle **Figure 10** e **11** sono riportati i risultati rispettivamente delle inversioni 2D e 3D. In
461 entrambi i casi sono dati di acquisizioni giornaliere, grazie alle quali si è potuta limitare l'influenza
462 della variazione del contenuto d'acqua. Nel 2D si hanno immagini del sottosuolo fino a circa 10 m di
463 profondità, nel 3D fette di terreno in pianta a circa 2 m sotto il p.c. dove la copertura dei dati è
464 ottimale. La variazione di resistività è stata ottenuta rispetto alla condizione iniziale, rappresentata dai
465 valori di *background* che rispecchiano l'inizio della giornata. Entrambe le acquisizioni hanno
466 evidenziato un'influenza dovuta al trasferimento di energia termica al terreno, mostrando una
467 diminuzione di resistività nell'ordine del 5-10% in corrispondenza del campo sonde. Tali valori sono
468 compatibili con l'aumento di temperatura registrato dai sensori presenti lungo le sonde ($2-5^\circ\text{C}$).
469 Tuttavia, i risultati 2D mostrano una sovrastima dell'estensione del pennacchio termico, dovuta
470 essenzialmente alle condizioni al contorno del processo di inversione e all'influenza
471 dell'irraggiamento solare in superficie. Nel 3D, anche se la profondità di indagine non è ottimale (a
472 causa delle problematiche già descritte), le dimensioni della TAZ sono restituite in modo
473 soddisfacente (3 m dalla sonda centrale). Qui, l'anomalia di variazione positiva registrata nel primo
474

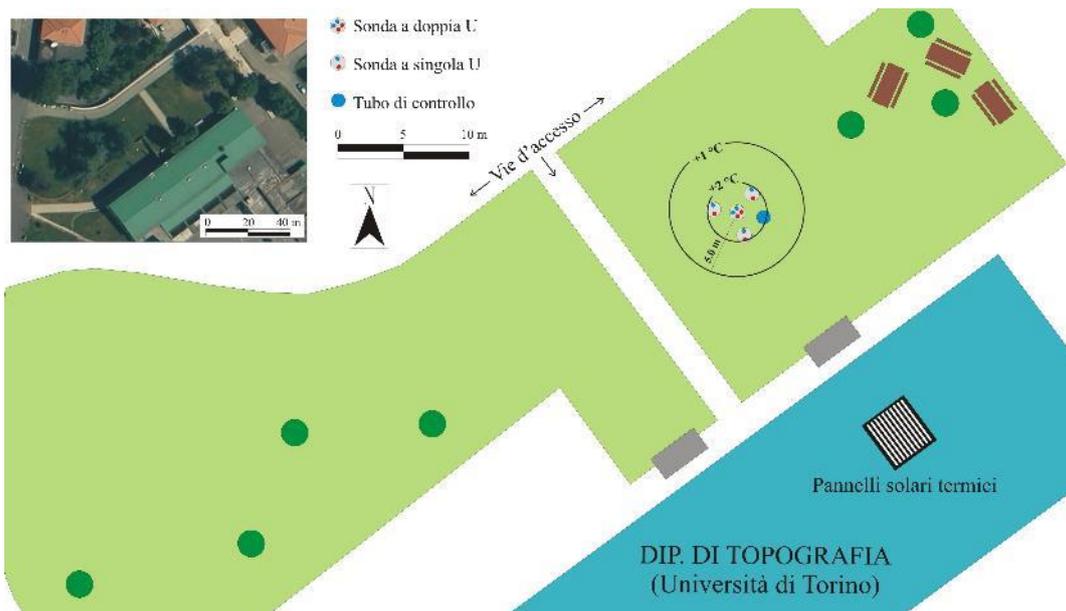
475 intorno del campo sonde è da attribuire all'influenza dell'impianto stesso e quindi non rappresentativa
 476 del sottosuolo.



477
 478 **Fig. 10** – Risultati delle inversioni *time-lapse* 2D.
 479



480
 481 **Fig. 11** – Risultati delle inversioni *time-lapse* 3D a 2 m dal p.c.
 482
 483



485

486

Fig. 12 – Previsione di estensione del pennacchio termico a 4,5 anni dall’inizio della simulazione.

487

488

489

490

491

492

493

494

495

496

497

498

499

500

501

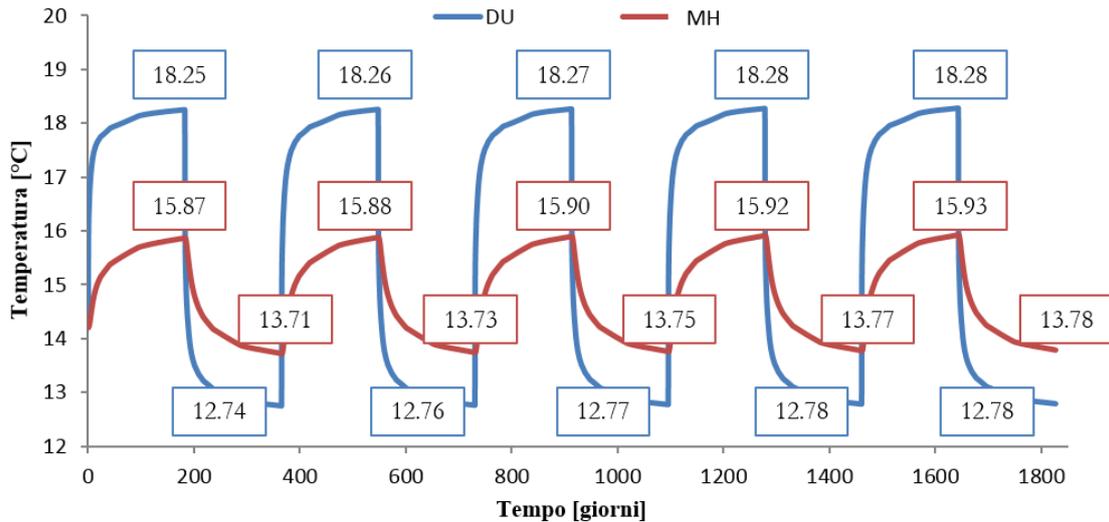
502

503

504

505

I dati di input (temperature di ingresso e uscita alle sonde, portate e ore di funzionamento dell’impianto) delle simulazioni numeriche eseguite per prevedere la distribuzione termica all’interno del sottosuolo sono stati definiti al termine del primo periodo di carica. Diverse modellizzazioni eseguite in precedenza, e basate su dati di letteratura, sono risultate sovrastimanti l’incremento di temperatura indotto nel terreno a confronto con i dati sperimentali registrati dal sistema di acquisizione. Nuove modellizzazioni sono pertanto state eseguite assegnando valori di temperatura al fluido entrante nella sonda centrale e nelle sonde esterne pari rispettivamente $24,5^{\circ}\text{C}$ e $20,3^{\circ}\text{C}$, valori mediati sull’intero periodo. La fase di scarica del terreno è stata simulata con una temperatura costante del fluido pari a 10°C in tutte le sonde. I risultati numerici rivelano un’influenza termica sul terreno piuttosto limitata per i 5 anni esaminati. Alla fine dell’ultimo periodo di carica (4,5 anni), l’isoterma $+2^{\circ}\text{C}$ presenta un’estensione non maggiore del campo sonde stesso e l’isoterma $+1^{\circ}\text{C}$ ha un raggio di influenza di circa 5 m dalla sonda centrale (**Fig. 12**). Le curve tempo-temperatura registrate nella sonda DU e nel tubo di controllo (**Fig. 13**) descrivono una situazione piuttosto stazionaria, con valori massimi di $18,3^{\circ}\text{C}$ e minimi di $12,8^{\circ}\text{C}$ in corrispondenza del centro del campo sonde. In corrispondenza del tubo di monitoraggio la temperatura alla fine di ogni ciclo di carica è pari a circa $15,9^{\circ}\text{C}$, contro un valore di $16,3^{\circ}\text{C}$ registrato al termine della prima fase di ricarica ad Ottobre 2014: tale divergenza risulta tuttavia accettabile.



506

507 **Fig. 13** – Curve tempo-temperatura nei 5 anni di simulazione in corrispondenza della sonda centrale (DU) e del
 508 tubo di controllo (MH).

509

510 **5. Discussione e ipotesi migliorative dell'impianto**

511 La registrazione dei valori di temperatura ha mostrato come i sensori inseriti nella cementazione
 512 delle sonde sono molto sensibili alla circolazione del fluido termo-vettore. Le oscillazioni legate
 513 all'alternanza giorno/notte sono sempre evidenti e i periodi di brutto tempo facilmente riscontrabili.
 514 Ovviamente in un piccolo impianto come quello costruito a Grugliasco non sarebbe stato
 515 economicamente sostenibile eseguire apposite perforazioni per posizionare solamente catene di
 516 sensori. In impianti di maggiori dimensioni sarebbe al contrario utile pensare di predisporre fori adibiti
 517 al solo monitoraggio della temperatura del sottosuolo soggetta all'attività dell'impianto in senso
 518 globale. I sensori piazzati all'interno del foro attrezzato con tubo piezometrico hanno infatti registrato
 519 un aumento di temperatura lineare in funzione del progressivo accumulo termico.

520 Le due differenti modalità di funzionamento adottate durante la fase di carica hanno rivelato due
 521 comportamenti differenti del sottosuolo. La portata media (80 l/h) adottata nella prima fase del periodo
 522 di carica dell'impianto ha permesso di conferire un'elevata temperatura al fluido circolante. I sensori
 523 in ingresso alla sonda centrale han fatto registrare picchi giornalieri a 50-55°C, ma l'ingresso alle
 524 sonde esterne si è attestato in media su valori di 20-25°C. Dopo il 10 Luglio, si è adottata una modalità
 525 di funzionamento che garantisca la massima portata di circolazione (200 l/h) a regime durante le ore
 526 più calde della giornata. Tale modalità ha fatto sì che la temperatura di ingresso al campo sonde fosse
 527 decisamente minore (media di 30-35°C), ma l'energia immessa parzialmente maggiore; tale
 528 considerazione è confermata dal fatto che la potenza istantanea ha registrato picchi più elevati rispetto
 529 al periodo antecedente il 10 di Luglio. Il risultato più evidente è stato che l'energia prodotta fosse
 530 trasferita al terreno in modo più omogeneo: lo dimostra il fatto che le temperature registrate dai sensori
 531 posizionati nelle sonde esterne hanno disegnato curve con ampiezza maggiore sul grafico tempo-
 532 temperatura. Questo ha teoricamente permesso di diminuire il gradiente termico tra il centro del
 533 campo e l'esterno, poco evidente in un piccolo campo come quello in esame, ma fattore chiave per
 534 l'ottimizzazione di impianti di grandi dimensioni. È fondamentale infatti decidere se sia utile avere un
 535 nucleo significativamente più caldo del restante volume di accumulo, oppure se distribuire l'energia
 536 termica in modo più omogeneo all'interno del campo. Nel primo caso, il volume esterno potrebbe
 537 essere caricato progressivamente una volta raggiunta la temperatura voluta nel centro (concetto di
 538 stratificazione), ma il maggior gradiente termico verso l'esterno potrebbe causare una dispersività
 539 termica più alta e quindi una perdita di efficienza di accumulo se il volume non è correttamente
 540 isolato. Nel secondo caso si minimizzerebbero le perdite, ma risulterebbe più difficile caricare il
 541 volume di accumulo in assenza di stratificazione.

542 Cosa sia stato meglio per l'accumulo termico dell'impianto di Grugliasco risulta in ogni caso
 543 difficile da stabilire, perché le temperature di lavoro del circuito sono strettamente connesse alle
 544 condizioni meteo. Si è pertanto deciso di mettere a confronto periodi di 10 giorni, due prima e due

545 dopo il 10 Luglio. In media le temperature di ingresso al campo sono state ampiamente maggiori nella
546 modalità “bassa portata”, fatta eccezione per picchi isolati legati semplicemente a repentini
547 cambiamenti delle condizioni meteo. La temperatura di ingresso alle sonde esterne è stata maggiore
548 nella modalità “alta portata”. L’energia prodotta nei quattro periodi è stata di 144, 123, 192 e 130 kWh
549 rispettivamente. Le differenze sembrano principalmente legate alle condizioni meteo e solo in secondo
550 piano alla modalità di funzionamento, che sembra non aver influenzato in modo drastico il
551 trasferimento di energia.

552 La modellizzazione numerica è stata utile per prevedere il comportamento termico del terreno
553 negli anni a venire. La simulazione a 5 anni ha mostrato un impatto sul terreno limitato grazie al ciclo
554 combinato carica/scarica. In ogni caso, alla fine dei singoli periodi di immissione ed estrazione di
555 energia le temperature raggiunte dal terreno a 2 m dalla sonda centrale si discostano rispettivamente di
556 1,6-1,7°C (in positivo) e 0,5°C (in negativo) dalla T indisturbata registrata in condizioni normali. In
557 corrispondenza del nucleo del campo sonde, la variazione risulta di 4°C in riscaldamento e di 1,5°C in
558 raffreddamento.

559
560 Alla luce delle considerazioni sopra riportate, è possibile definire alcune possibili
561 implementazioni dell’impianto per migliorare la sua funzione di “laboratorio a scala reale”. Tali
562 proposte possono in ogni caso valere come parziali prescrizioni per l’esecuzione di un impianto di
563 questo tipo a supporto di una reale utenza finale.

564 L’accoppiamento diretto tra pannelli solari e sonde geotermiche ha causato un funzionamento
565 dell’impianto molto variabile nel tempo, anche all’interno della stessa giornata, a causa dello stretto
566 legame con l’irraggiamento ricevuto. Tale variabilità ha avuto ovvie conseguenze sul trasferimento
567 termico al terreno, generando non poche difficoltà nelle valutazioni a posteriori sull’efficienza
568 dell’impianto e sulla miglior modalità di funzionamento. Un’unità di stoccaggio intermedio a breve
569 termine (serbatoio di acqua) potrebbe essere utile alla causa, fornendo al campo geotermico un fluido a
570 temperatura quanto più possibile costante nel tempo. Negli impianti di maggiori dimensioni, infatti,
571 tali unità di stoccaggio a breve termine (*buffer storage*) sono quasi sempre presenti, in modo da
572 decidere a monte (in base alla temperatura del serbatoio intermedio) se rifornire o meno il volume di
573 stoccaggio a lungo termine, prevenendo così raffreddamenti controproducenti. Tale eventualità è stata
574 in ogni caso scongiurata a Grugliasco, impostando che la circolazione dell’impianto si arrestasse in
575 caso di temperature esterne non produttive. Tuttavia, con un *buffer* intermedio si avrebbe una maggior
576 costanza nelle temperature registrate nel terreno con un aumento lineare, per non parlare di un
577 indubbio aumento nella quantità di energia accumulata.

578 I sensori inseriti nella cementazione delle sonde registrano valori fortemente condizionati dalla
579 temperatura del fluido circolante e non restituiscono valori attendibili del terreno se non dopo un
580 periodo di quiete dell’impianto. Diversamente, i sensori lungo MH forniscono valori ad andamento
581 crescente costante. Questi dati sono dunque gli unici valori diretti di temperatura all’interno del
582 terreno. Essi possono essere presi come riferimento per un raggio pari alla sua distanza solo nel caso in
583 cui il sottosuolo si assuma a comportamento termicamente omogeneo e garantisca una diffusione
584 perfettamente radiale dal campo geotermico. In questo contesto sarebbe importante eseguire appositi
585 fori per posizionare altre catene di sensori, in modo da mappare con precisione maggiore la
586 distribuzione del pennacchio termico nel sottosuolo e poter di conseguenza calibrare ulteriormente le
587 simulazioni numeriche.

588 Sulla base del modello numerico costruito con i dati registrati nella prima fase di carica, sono
589 state eseguite alcune valutazioni su come migliorare l’efficienza di accumulo del terreno in esame. Si è
590 aggiunto al modello un anello di isolamento intorno alle sonde, costituito da materiale argilloso (0,15
591 W/m/K e 1.300 J/kg/K) per uno spessore di 0,2 m. L’anello isolante ha raggio pari a 3 m (a 1 m di
592 distanza da MH) e profondità di 28 m, in modo da creare un volume cilindrico di accumulo di circa
593 790 m³. Si è così lanciata una simulazione analoga alla precedente e i risultati mostrano come
594 l’isolamento prevenga la dispersione termica, permettendo al terreno all’interno di aumentare
595 maggiormente la temperatura (+2,3°C in corrispondenza di MH), con conseguente incremento
596 dell’energia accumulata. Sezioni verticali (X-Z) ed orizzontali (X-Y) dei modelli con e senza
597 isolamento sono state ottenute per calcolare cella per cella l’energia immagazzinata in base
598 all’incremento di temperatura. La sommatoria dell’energia per ogni cella porta ad un risultato di 4,6

599 GJ di energia termica accumulata, che corrisponde al 50% di efficienza contro il 17% senza
600 isolamento (dato sperimentale ottenuto anche in campo numerico).

601 L'isolamento riprodotto dalla simulazione numerica garantirebbe pertanto di raddoppiare la
602 quantità di energia accumulata dall'impianto di Grugliasco. Considerando che le proprietà termiche
603 dell'argilla sono peggiori, ma tutto sommato simili al terreno circostante, possiamo concludere che un
604 isolamento eseguito con appositi materiali a bassa conducibilità termica (materiali sintetici come XPS
605 o EPS) potrebbe migliorare ulteriormente il dato di efficienza e contestualmente permetterebbe di
606 abbattere l'impatto ambientale dell'impianto.

607

608 **6. Conclusioni**

609 Le principali conclusioni dello studio possono essere così sintetizzate:

610

611 (i) il modello numerico calibrato con i dati sperimentali del primo anno di funzionamento ha dato
612 come risultato un impatto ambientale limitato nel terreno circostante per i successivi 5 anni di
613 funzionamento, mostrando una situazione stazionaria che alterna riscaldamenti e raffreddamenti
614 in un range di variazione tra +4°C e -1,5°C (rispetto all'indisturbato) nel centro del volume di
615 stoccaggio;

616 (ii) al termine della prima fase di carica (finita il 20 Ottobre 2014) l'impianto ha prodotto e
617 trasferito al terreno circa 9,1 GJ di energia termica. Sulla base dei dati sperimentali solo il 17%
618 di quell'energia è recuperabile nella fase di scarica. Secondo stime numeriche, un isolamento
619 eseguito con materiale argilloso intorno alle sonde potrebbe garantire il recupero del 50% di
620 quell'energia;

621 (iii) in generale, i depositi alluvionali insaturi della pianura torinese si sono rivelati adatti ad ospitare
622 un impianto di stoccaggio, pur possedendo scadenti caratteristiche termiche. L'impianto ha già
623 fornito interessanti informazioni e con alcune implementazioni può essere utilizzato come sito
624 sperimentale per testare differenti metodologie di ottimizzazione e di monitoraggio
625 dell'influenza termica nel terreno;

626 (iv) il collegamento diretto tra pannelli solari e sonde rende difficile un accumulo costante e i
627 sensori di temperatura posizionati a contatto con i tubi complicano la definizione della migliore
628 modalità di funzionamento perché il fluido termo-vettore influenza significativamente le letture.
629 Per il futuro si pensa di predisporre ulteriori fori adibiti al solo posizionamento di catene di
630 sensori;

631 (v) le indagini geofisiche eseguite (ERT) presentano una buona potenzialità come strumento di
632 monitoraggio indiretto. I risultati hanno dimostrato una buona sensibilità della resistività
633 elettrica nell'evidenziare l'estensione della TAZ nel sottosuolo anche se diverse difficoltà
634 tecniche e logistiche hanno complicato l'acquisizione e il processamento dei dati. La novità
635 dell'applicazione di ERT a sistemi geotermici superficiali richiede ulteriori dimostrazioni per
636 poterle utilizzare in modo ottimale ed affidabile.

637

638 In linea generale, si può dire che la prima fase di carica dell'impianto ha permesso di fare
639 numerose osservazioni e ottenere importanti informazioni sul comportamento del terreno soggetto ad
640 immissione termica. Le ricerche future potranno prevedere l'implementazione dell'impianto e
641 l'ottimizzazione del monitoraggio diretto ed indiretto in accoppiamento alla modellazione numerica.
642 In aggiunta, potrebbe essere interessante studiare tecniche di immagazzinamento del freddo per
643 accumulare l'energia necessaria al condizionamento estivo degli edifici. Questa quota parte di energia
644 risulta infatti quella che pesa maggiormente nel bilancio energetico annuale di quelle porzioni di
645 territorio affacciate sul Mediterraneo (centro/sud Italia, sud Francia, Grecia, Spagna, Turchia e tutti i
646 paesi del nord-Africa).

647

648 **RINGRAZIAMENTI**

649 L'impianto GTES di Grugliasco è stato finanziato principalmente da un progetto di Alcotra
650 Innovazione nel 2012 e uno del *P.O.R.-F.E.S.R.* nel 2013. Gli autori vogliono pertanto rendere
651 omaggio alla Regione Piemonte che con questi due progetti ha reso possibile la costruzione
652 dell'impianto.

653 Gli autori desiderando altresì ringraziare: il Dr. Alessandro Arato del Politecnico di Torino per
654 la collaborazione fornita durante l'elaborazione dei dati geofisici; la Dr.ssa Eloisa Di Sipio del CNR-
655 IGG di Padova per le analisi di proprietà termiche con lo strumento ISOMET 2114; il Dr. Salvatore
656 Giammanco dell'INGV di Catania per le analoghe misure con lo strumento KD2 Pro.

657

658 **BIBLIOGRAFIA**

659 Borsic, A., Adler, A., 2012. A Primal Dual - Interior Point Framework for Using the L1-Norm or the L2-Norm
660 on the Data and Regularization terms of inverse problems. *Inverse Problems*, 28, 095011.

661 Cabeza, L.F., 2015. *Advances in thermal energy storage systems – methods and applications*. Woodhead
662 Publishing Series in Energy, Cambridge, UK, 592 pp.

663 Cardarelli, E., Alimonti, C., Di Filippo, G., 2014. Geophysical and geological survey to plan a low-enthalpy
664 geothermal system. The case study of Borgo Isonzo – Latina Italy. In: Lollino et al. (eds.) - *Engineering geology
665 for society and territory*, 1(64): 341-344, DOI: 10.1007/978-3-319-09300-0_64.

666 Carrier, W.D., 2003. Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman. Technical note in *Journal of Geotechnical and
667 Geoenvironmental Engineering*, 129(11): 1054-1056.

668 Casasso, A., Sethi, R., 2013. Tecnologia e potenzialità dei sistemi geotermici a bassa entalpia. *Geingegneria
669 Ambientale e Mineraria*, 138(1): 13-22.

670 Comina, C., Dietrich, P., Firmbach, L., Giordano, N., Kolditz, O., Mandrone, G., Vienken, T., Watanabe, N.,
671 2013. Heat flow's propagation within a porous medium: analogical and numerical modeling. *Proceedings
672 European Geothermal Congress 2013, 3-7-June 2013*, ISBN 978-2-8052-0226-1.

673 Diersch, H.J.G., Bauer, D., Heidemann, W., Rühaak, W., Schätzl, P., 2011. Finite element modeling of borehole
674 heat exchanger systems. Part 2. Numerical simulation. *Computer & Geosciences*, 37: 1136-1147.

675 Diersch, H.J.G., 2014. *FEFLOW: Finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and
676 fractured media*. Springer, Berlin, Germany, 996 pp.

677 Frattini, D., Colangelo, F., De Pertis, M., De Rosa, F.M., Ferone, C., Roviello, G., Cioffi, R., 2014. Materiali da
678 costruzione innovativi per accumulo di energia termica. *La Termotecnica – Energia & Edifici*, Dicembre: 53-56.

679 Giordano, N., Bima, E., Caviglia, C., Comina, C., Mandrone, G., Passarella, M., 2013. Modellizzazione
680 analogica e numerica di un flusso termico in un mezzo poroso in laboratorio attraverso scatola termica.
681 *Geingegneria Ambientale e Mineraria*, Anno XLX, 1: 23-32.

682 Giordano N., 2015. Ground thermal energy storage: analogical and numerical modeling coupled with
683 geophysical monitoring from laboratory to field scale. PhD thesis, DOI: 10.13140/2.1.3671.5843, 236 pp.

684 Giordano N., Comina C., Mandrone G., 2015. Laboratory scale resistivity monitoring of thermal flows –
685 analogical and numerical simulations in water flux condition. *Proceedings 21st European Meeting of
686 Environmental and Engineering Geophysics*, September 6-10, Torino, Italy, Tu21B06.

687 Hermans, T., Wildemeersch, S., Jamin, P., Orban, P., Brouyère, S., Dassargues, A., Nguyen, F., 2015.
688 Quantitative temperature monitoring of a heat tracing experiment using cross-borehole ERT. *Geothermics*, **53**,
689 14-26.

690 Loke, M.H., 2000. *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies – A practical guide to
691 2-D and 3-D surveys*. Copyright (1999) M.H. Loke, 67 pp.

692 Oliveti, G., Arcuri, N., Ruffolo, S., 1998. First experimental results from a prototype plant for the interseasonal
693 storage of solar energy for the winter heating of buildings. *Solar Energy* 62: 281–290.

694 Polino, R., 2010. Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 155 Torino Ovest.
695 Progetto CARG ISPRA, Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche, Arpa Piemonte, 150 pp.

696 Schmidt, T., Mangold, D., Müller-Steinhagen, H., 2004. Central solar heating plants with seasonal storage in
697 Germany. *Solar Energy* 76: 165–174.

698 Singh, D.N., Kuriyan, S.J., Manthena, K.C., 2001. A generalised relationship between soil electrical and thermal
699 resistivities. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **24**, 175-181.

- 700 Xu, J., Wang, R.Z., Li, Y., 2014. A review of available technologies for seasonal thermal energy storage. Solar
701 Energy, 103: 610-638.
- 702 Zhao, D.L., Li, Y., Dai, Y.J., Wang, R.Z., 2011. Optimal study of a solar air heating system with pebble bed
703 energy storage. Energy Conversion and Management, 52: 2392-2400.
- 704 **RIFERIMENTI WEB**
- 705 GeoPortale Arpa Piemonte – <http://webgis.arpa.piemonte.it/geoportale/> ultimo accesso 15 Giugno 2015.
- 706 GTES Grugliasco Living Lab – www.gtes.unito.it ultimo accesso 15 Giugno 2015.
- 707 International Energy Agency (IEA), SHC Programme, Task 42, Compact thermal energy storage -
708 <http://task42.iea-shc.org/> ultimo accesso 15 Giugno 2015.
- 709 Mercalli, L., Cat Berro, D., 2014. Luglio 2014 al nord Italia; frescura non eccezionale, ma piogge straordinarie e
710 pochissimo sole. Servizio Meteorologico Italiano, Redazione Nimbus -
711 www.nimbus.it/clima/2014/140804Luglio2014.htm ultimo accesso 15 Giugno 2015.
- 712 PVGIS - <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php?lang=en&map=Europe> ultimo accesso 15 Giugno
713 2015.
- 714 Stazione Meteo Dip. di Fisica UNITO - www.meteo.dfg.unito.it ultimo accesso 15 Giugno 2015.