



Ricerca di Sistema elettrico

Caratterizzazione termica stagionale del campo geosonde. Assemblaggio del circuito di prova. Risultati di monitoraggio

A. C. Violante, R. Trinchieri, M. Proposito

CARATTERIZZAZIONE TERMICA STAGIONALE DEL CAMPO GEOSONDE. ASSEMBLAGGIO DEL CIRCUITO DI PROVA. RISULTATI DI MONITORAGGIO

A. C. Violante, R. Trinchieri, M. Proposito

DICEMBRE 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 – III annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Work package: Pompe di calore

Linea di attività: *LA 3.24 – Completamento del campo geosonde e del relativo sistema di monitoraggio e acquisizione dati, che comprenderà anche l'attività di caratterizzazione e monitoraggio dei gradienti termici e delle potenze termiche rese disponibili dal campo geosonde*

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Raniero Trinchieri, ENEA

Si ringrazia l'Ing. Simone Mataloni (Assegnista di ricerca presso l'Università di Bologna UNIBO, Dipartimento di Ingegneria Industriale) per aver contribuito alla stesura del documento, all'analisi dei dati di monitoraggio del campo geosonde e all'assistenza durante l'assemblaggio del circuito prova.

Indice

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE	5
1.1. TEMPERATURE MISURATE DURANTE IL GROUND RESPONSE TEST (GRT)	5
1.2. TEMPERATURE MISURATE NEI QUATTRO POZZI: INTERVALLO TEMPORALE 1 MAGGIO-31 DICEMBRE 2021	7
1.2.1 Pozzo 1	7
1.2.2 Pozzo 2	8
1.2.3 Pozzo 3	9
1.2.4 Pozzo 4	11
2 SUCCESSIONE LITOSTRATIGRAFICA DI DETTAGLIO	13
2.1. CORRELAZIONE TERMICO-STRATIGRAFICA	14
2.2. DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DELLA CURVA DI CONDUCEBILITÀ TERMICA	17
2.3. DETERMINAZIONE ANALITICA DELLA CURVA DI CONDUCEBILITÀ TERMICA	18
3 DATI CLIMATICI	22
3.1. TEMPERATURA DEL TERRENO T_g	25
3.1.1 <i>Temperature del terreno nelle condizioni di progetto</i>	31
4 ANDAMENTO DELLA TEMPERATURA SUPERFICIALE E DETERMINAZIONE DEI CORRISPONDENTI FLUSSI TERMICI	32
5 DATI DI PRECIPITAZIONE	34
6 CALCOLO DELLA RESISTENZA TERMICA EQUIVALENTE DELLO SCAMBIATORE A TERRENO (R_B)	36
6.1 CALCOLO DELLE RESISTENZE TERMICHE EFFICACI DEL TERRENO	37
7 ASSEMBLAGGIO DEL CIRCUITO DI PROVA	39
7.1 COMPONENTI DELL'IMPIANTO	39
7.2 STRUMENTI DI CONTROLLO	46
7.3 SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DELL'IMPIANTO	50
7.4 CONTROLLO E MONITORAGGIO DELL'IMPIANTO	52
CONCLUSIONI	55
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	56
ACRONIMI	56

Sommario

L'attività descritta nel presente report è parte del progetto di ricerca di cui all'art. 10 comma 2, lettera a) del Decreto 26/01/2000, relativo al Piano Triennale di realizzazione 2019-2021 della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale, e riguarda la linea di attività 1.7 denominata "Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali". Nello specifico, l'attività in oggetto è la L.A. 3.24, contenuta nel WP3, riguardante il "Completamento del campo geosonde e del relativo sistema di monitoraggio e acquisizione dati, che comprenderà anche l'attività di caratterizzazione e monitoraggio dei gradienti termici e delle potenze termiche rese disponibili dal campo geosonde".

Pertanto, durante il terzo anno, l'attività è stata incentrata sullo studio e sulla caratterizzazione termica stagionale del campo geosonde, realizzato ad andamento verticale, a circuito chiuso e configurazione *double U*. Per la difficoltà a reperire parte della componentistica dell'impianto, causata dalla situazione pandemica, la conclusione e l'assemblaggio del circuito di prova è tutt'ora in corso anche se in fase di ultimazione; ciò ha comportato il monitoraggio dei valori termometrici all'interno dei pozzi a circuito spento. Tutti i dati di temperatura mensili dei 4 pozzi sono stati confrontati con i dati del mese di maggio del pozzo 1, in quanto risente ancora delle variazioni di temperatura indotte durante il test di risposta termica (GRT) effettuato, il 15 aprile 2021, sulle due coppie di sonde geotermiche. Inoltre, da una nuova ricognizione delle carote provenienti dal sondaggio geognostico è stato possibile ottenere una valutazione stratigrafica di maggior dettaglio, utile per correlare i dati termometrici con la corrispondente litologia. Sulla base dei dati di temperatura è stato possibile estrapolare sperimentalmente la curva di conducibilità termica della successione stratigrafica. Inoltre, l'utilizzo di adeguati ambienti di simulazione termica computazionale ha permesso di ricostruire l'alterazione del campo termico indisturbato del terreno sotto l'azione del geoscambio sonde-terreno. Successivamente, il confronto tra i dati climatici annuali registrati dalle stazioni meteorologiche all'interno del C. R. Casaccia con i dati di temperatura rilevati direttamente dalle fibre ottiche, ha consentito di determinare la profondità fin dove si risente dell'irraggiamento solare nei 4 pozzi. Sono stati calcolati i valori di resistenza termica equivalente dello scambiatore a terreno, intesi come la somma della resistenza termica legata al fluido di scorrimento nelle sonde geotermiche (acqua e glicole) e al materiale di riempimento (cemento bentonitico). Infine, è stato descritto il funzionamento dell'impianto, le sue componenti, gli strumenti di controllo e di monitoraggio.

1 Introduzione

La caratterizzazione termica stagionale del campo geosonde è stata condotta elaborando i dati di temperatura rilevati nei quattro pozzi con fibre ottiche di tipo DTS (*Distributed Temperature Sensor*). Quest'ultime hanno permesso di acquisire le temperature ogni due metri, in maniera distribuita lungo la verticale, rendendo così possibile la profilazione termica del sottosuolo alle diverse profondità. Si ricorda che, in ogni pozzo, le fibre ottiche sono state inserite all'interno di un tubicino predisposto riempito di acqua – contestualmente alla messa in posa delle sonde geotermiche.

Di seguito, si riportano i risultati del monitoraggio termico e le evidenze riscontrate, al fine di caratterizzare il campo termico nell'intorno delle sonde geotermiche in rapporto al contesto geo-litologico e idrogeologico dell'area di studio. Lo scambio termico che avviene nel terreno è dovuto a diversi fenomeni [1]:

- dall'alto: fenomeno dell'irraggiamento solare, eventi meteorici, trasmissione per convezione con l'atmosfera (compreso l'effetto del vento) e altri fenomeni locali minori, tra cui il calore estratto dalla vegetazione e il calore scambiato con edifici soprastanti;
- lateralmente: influenza degli acquiferi, che possono apportare o sottrarre energia;
- dal basso: apporto termico legato al flusso geotermico profondo, o al contributo di un acquifero profondo qualora il moto di filtrazione avvenga con una componente verticale significativa. I tre principali fattori (atmosfera, moti di filtrazione, flusso geotermico) agiscono separatamente. Il bilancio globale termico non è determinabile tramite la sovrapposizione degli effetti dei diversi fattori, ma è necessario tenere conto della mutua influenza.

1.1. Temperature misurate durante il Ground Response Test (GRT)

Il test di risposta termica (*Ground Response Test*, GRT) è cominciato il 14 aprile 2021 sul pozzo 1 per valutare la risposta termica del terreno, sottoposto a sollecitazione termica, e quindi poterne determinare le proprietà termotecniche, quali la temperatura indisturbata, la conducibilità termica (λ) e la resistenza termica della sonda (R_b).

La prova, della durata di 72 ore, è stata eseguita imponendo al sistema sonda geotermica-terreno, per mezzo di resistenze elettriche, un flusso termico controllato e costantemente misurato. La fase iniziale del test è stata condotta senza l'utilizzo delle termoresistenze, per stimare la temperatura media del terreno indisturbato (17,67 °C) e l'influenza delle eventuali falde.

Misurata la potenza totale fornita al fluido termovettore attraverso le resistenze elettriche e la pompa, e note le temperature di ingresso e di uscita delle sonde, è stato possibile determinare il coefficiente di scambio termico per unità di lunghezza della sonda (1,21 W/mK). Accertata la natura vulcanica delle litologie presenti nel sottosuolo, è stata stimata una capacità termica volumica pari a 2,6 MJ/(m³K). Il dato di resistività termica della sonda geotermica, indice della qualità dell'accoppiamento terreno-malta, è pari a 0,1204 mK/W, valore considerato ottimo. Durante l'effettuazione del test di risposta termica è stata effettuata la misurazione contemporanea della temperatura ogni 2 m nei quattro pozzi. Come riportato in Tabella 1, durante il test il pozzo 1 raggiunge temperature molto elevate rispetto agli altri pozzi, arrivando a una media di 31,41 °C lungo il profilo verticale. Inoltre, dai profili di temperatura dei pozzi 2, 3 e 4 (Figura 1), disposti a L rispetto al pozzo 1 (intersezione tra il pozzo 1 e i pozzi 3, 4 e 5, disposti sulla stessa linea del pozzo 2), si evince che questi non vengono minimamente influenzati dal test, ciò a riprova della corretta distanza reciproca scelta (9 metri, 12 m soltanto tra i pozzi 3 e 4) e dell'assenza, pertanto, di fenomeni di circuitazione termica.

Tabella 1. Profilo di temperatura in ogni pozzo durante l’effettuazione del *Ground Response Test* (GRT)

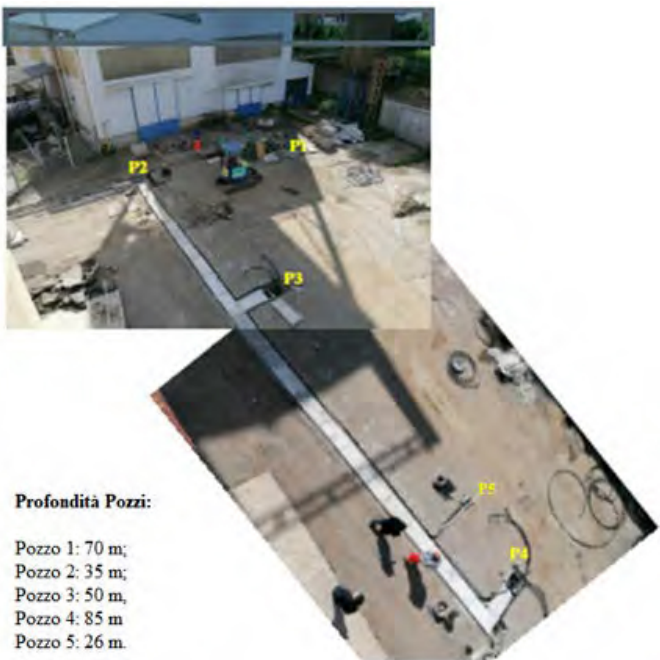
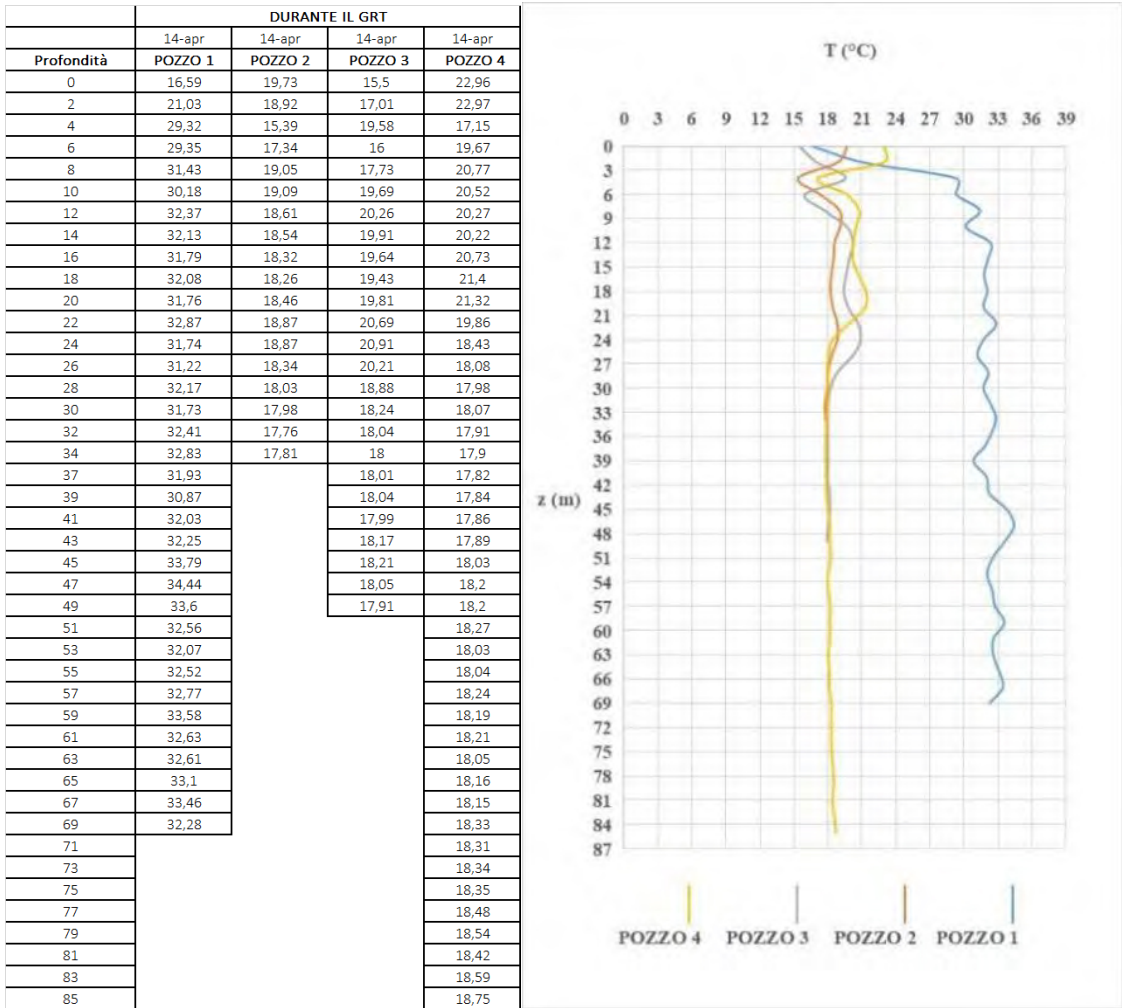


Figura 1. Vista dall’alto del campo geosonde e ubicazione dei pozzi geotermici con relative profondità

1.2. Temperature misurate nei quattro pozzi: intervallo temporale 1 maggio-31 dicembre 2021

1.2.1 Pozzo 1

La Tabella 2 riporta i valori di temperatura misurati nel pozzo 1, dal 1 maggio al 31 dicembre 2021, mentre la Figura 2 mostra l'andamento della temperatura in funzione della profondità nei diversi mesi dell'anno. Si può notare che l'influenza annuale, mensile e giornaliera dovuta al fenomeno di irraggiamento solare perde di importanza già a scarsa profondità (al di sotto dei 10 m). Vedremo nel seguito che il pozzo 1 si comporta in maniera diversa rispetto agli altri in quanto è soggetto al fenomeno di ombreggiamento da parte di un edificio adiacente, che limita l'irraggiamento solare diretto.

Tabella 2. Temperature misurate nel pozzo 1 (dal 1 maggio al 31 dicembre 2021)

POZZO 1								
Profondità	may-21	jun-21	jul-21	aug-21	sep-21	oct-21	nov-21	dec-21
0	17,19	21,10	29,92	26,14	25,70	19,29	14,40	10,63
2	17,66	21,74	29,32	25,82	25,09	19,10	14,62	11,21
4	16,26	18,17	22,83	24,09	23,59	20,84	17,69	15,17
6	16,28	16,35	17,17	18,82	19,05	19,29	18,64	17,45
8	17,35	17,17	17,15	17,21	17,29	17,56	17,71	17,60
10	17,98	17,76	17,65	17,41	17,40	17,41	17,36	17,33
12	18,15	17,88	17,73	17,54	17,52	17,50	17,39	17,30
14	18,05	17,78	17,64	17,49	17,49	17,50	17,40	17,31
16	17,94	17,69	17,57	17,43	17,43	17,45	17,36	17,28
18	17,87	17,64	17,53	17,40	17,40	17,42	17,34	17,26
20	17,77	17,57	17,49	17,37	17,37	17,39	17,31	17,24
22	17,72	17,54	17,47	17,36	17,36	17,38	17,31	17,23
24	17,66	17,51	17,45	17,34	17,34	17,37	17,29	17,22
26	17,60	17,46	17,41	17,32	17,32	17,35	17,28	17,20
28	17,49	17,39	17,37	17,28	17,29	17,32	17,25	17,17
30	17,39	17,34	17,33	17,25	17,26	17,29	17,22	17,15
32	17,35	17,31	17,32	17,25	17,25	17,28	17,21	17,14
34	17,42	17,35	17,34	17,26	17,27	17,30	17,23	17,16
37	17,45	17,36	17,34	17,27	17,27	17,30	17,23	17,16
39	17,34	17,34	17,35	17,28	17,28	17,32	17,25	17,18
41	17,37	17,36	17,37	17,30	17,30	17,34	17,27	17,20
43	17,66	17,51	17,46	17,36	17,36	17,38	17,31	17,24
45	17,75	17,56	17,49	17,38	17,38	17,40	17,33	17,26
47	17,62	17,51	17,47	17,38	17,39	17,42	17,35	17,27
49	17,81	17,62	17,54	17,43	17,43	17,46	17,38	17,30
51	17,93	17,72	17,62	17,48	17,48	17,50	17,41	17,33
53	17,95	17,73	17,63	17,49	17,49	17,51	17,42	17,34
55	17,98	17,74	17,63	17,50	17,50	17,51	17,43	17,36
57	17,95	17,72	17,62	17,49	17,49	17,51	17,43	17,35
59	17,95	17,72	17,63	17,50	17,51	17,52	17,45	17,37
61	17,93	17,74	17,65	17,52	17,51	17,53	17,45	17,37
63	17,97	17,77	17,68	17,54	17,54	17,56	17,47	17,39
65	18,01	17,79	17,69	17,56	17,55	17,57	17,49	17,41
67	18,01	17,80	17,70	17,57	17,57	17,59	17,50	17,42
69	18,04	17,81	17,71	17,58	17,58	17,59	17,51	17,43

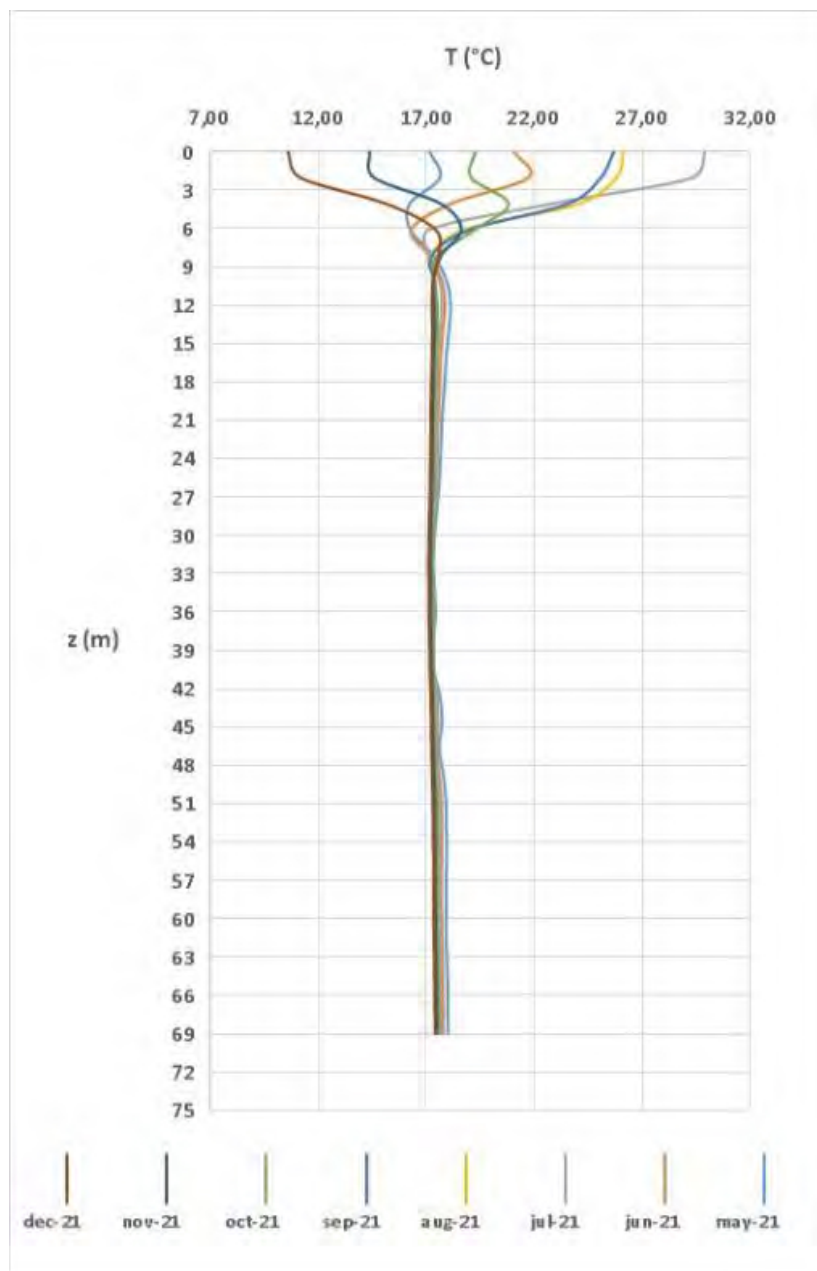


Figura 2. Profilo di temperatura del pozzo 1 in funzione della profondità nei diversi mesi dell'anno

1.2.2 Pozzo 2

In Tabella 3 sono riportati i valori di temperatura misurati nel pozzo 2, dal 1 maggio al 31 dicembre 2021. La Figura 3 mostra l'andamento della temperatura in funzione della profondità nei diversi mesi dell'anno. A differenza del pozzo 1, l'andamento della temperatura superficiale (fino a circa 10 m) è in linea con le temperature medie mensili stagionali; infatti, agosto è il mese più caldo e registra un valore di temperatura sul piano campagna pari a 31,52 °C. Il pozzo 2 risente solo in piccola parte del fenomeno di ombreggiamento dovuto all'alto edificio ubicato a margine del piazzale.

Tabella 3. Temperature misurate nel pozzo 2 (dal 1 maggio al 31 dicembre 2021)

POZZO 2								
Profondità	may-21	jun-21	jul-21	aug-21	sep-21	oct-21	nov-21	dec-21
0	17,44	25,71	30,85	31,52	26,65	19,05	14,61	9,89
2	17,99	25,10	30,10	31,04	26,41	19,54	15,58	11,41
4	16,65	19,71	23,36	25,79	24,39	21,99	19,28	16,73
6	16,88	17,08	17,84	19,06	19,60	19,91	19,53	18,58
8	17,82	17,72	17,71	17,69	17,84	18,08	18,19	18,23
10	18,33	18,21	18,10	17,94	17,84	17,84	17,74	17,74
12	18,25	18,17	18,07	17,99	17,87	17,85	17,71	17,64
14	18,00	17,93	17,87	17,82	17,74	17,75	17,62	17,56
16	17,84	17,77	17,71	17,67	17,60	17,63	17,52	17,47
18	17,76	17,69	17,63	17,58	17,52	17,55	17,44	17,39
20	17,83	17,72	17,64	17,56	17,49	17,51	17,40	17,34
22	18,00	17,80	17,68	17,57	17,49	17,49	17,37	17,31
24	17,93	17,75	17,61	17,53	17,43	17,43	17,31	17,24
26	17,71	17,60	17,50	17,42	17,34	17,35	17,23	17,17
28	17,57	17,49	17,41	17,35	17,28	17,30	17,18	17,12
30	17,45	17,40	17,34	17,29	17,22	17,25	17,14	17,08
32	17,42	17,36	17,31	17,25	17,20	17,23	17,12	17,06
34	17,40	17,34	17,29	17,23	17,18	17,21	17,10	17,04

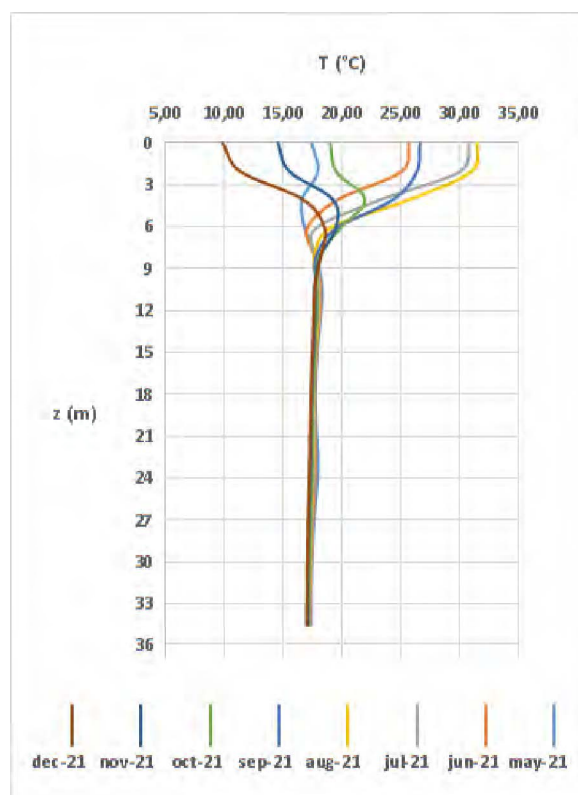


Figura 3. Profilo di temperatura del pozzo 2 in funzione della profondità nei diversi mesi dell'anno

1.2.3 Pozzo 3

Nella Tabella 4 sono riportati i valori di temperatura e in Figura 4 l'andamento della temperatura in funzione della profondità nei diversi mesi dell'anno riferiti al pozzo 3, dal 1 maggio al 31 dicembre 2021.

Data l'ubicazione del pozzo sul piazzale e il maggiore soleggiamento a cui è sottoposto, la temperatura sul piano campagna, riferita al mese di agosto, è pari a 34,13 °C (circa 2,5 °C in più rispetto al pozzo 2 e più di 8 °C rispetto al pozzo 1). Analogamente, il pozzo 3 risulta essere più caldo anche nel mese più freddo, ossia dicembre, in cui la temperatura superficiale è circa 1° C più elevata rispetto al pozzo 2.

Tabella 4. Temperature misurate nel pozzo 3 (dal 1 maggio al 31 dicembre 2021)

POZZO 3								
Profondità	may-21	jun-21	jul-21	aug-21	sep-21	oct-21	nov-21	dec-21
0	18,87	27,69	33,23	34,13	28,86	20,69	15,75	10,88
2	19,08	28,05	33,34	34,38	29,06	20,72	15,60	10,74
4	20,47	27,77	32,58	33,93	28,48	20,67	16,11	11,63
6	17,85	21,20	24,84	27,44	26,03	23,56	20,74	17,99
8	17,75	18,25	19,23	20,48	20,94	21,27	20,97	20,14
10	19,10	18,93	19,01	19,03	19,11	19,37	19,52	19,55
12	19,57	19,40	19,34	19,20	19,02	19,03	18,97	18,93
14	19,34	19,23	19,21	19,15	18,95	18,93	18,81	18,71
16	19,03	18,93	18,94	18,92	18,75	18,75	18,65	18,55
18	18,81	18,72	18,74	18,71	18,55	18,57	18,48	18,38
20	18,88	18,70	18,68	18,60	18,45	18,46	18,36	18,26
22	19,22	18,85	18,72	18,60	18,40	18,39	18,27	18,16
24	19,28	18,84	18,66	18,52	18,30	18,28	18,16	18,05
26	18,87	18,55	18,42	18,33	18,12	18,11	17,99	17,89
28	18,26	18,14	18,13	18,09	17,92	17,94	17,84	17,75
30	17,93	17,90	17,96	17,94	17,81	17,84	17,75	17,66
32	17,82	17,81	17,88	17,87	17,75	17,78	17,70	17,61
34	17,76	17,75	17,83	17,82	17,69	17,73	17,65	17,57
37	17,76	17,73	17,80	17,79	17,66	17,70	17,63	17,54
39	17,74	17,72	17,78	17,76	17,64	17,68	17,61	17,52
41	17,74	17,70	17,77	17,75	17,63	17,68	17,60	17,52
43	17,73	17,70	17,77	17,75	17,63	17,67	17,59	17,51
45	17,82	17,76	17,81	17,77	17,65	17,69	17,61	17,53
47	17,76	17,73	17,79	17,77	17,65	17,69	17,62	17,53
49	17,72	17,71	17,79	17,77	17,66	17,70	17,63	17,55

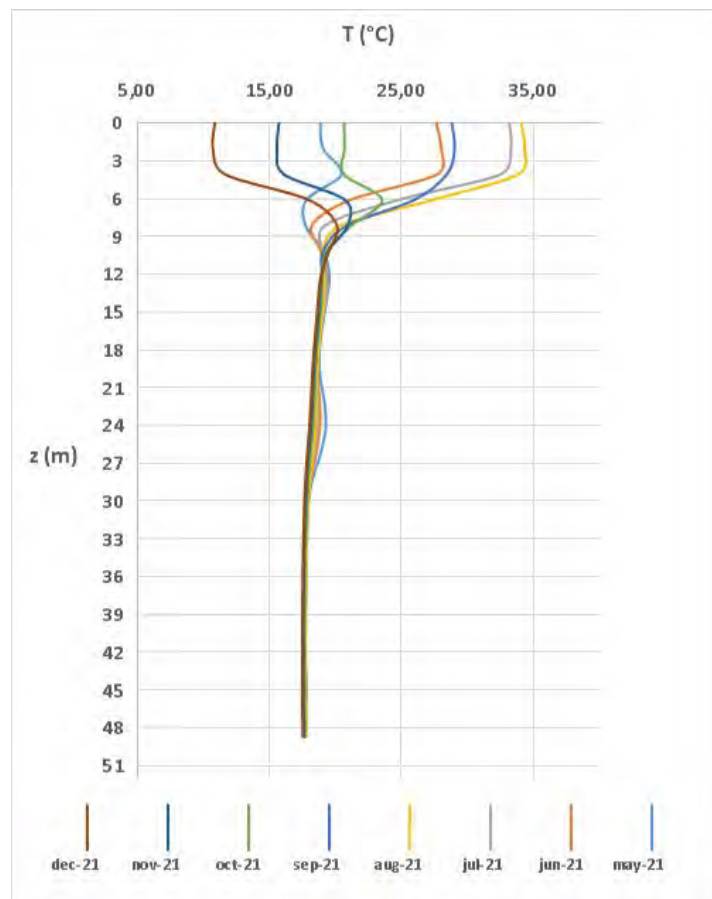


Figura 4. Profilo di temperatura del pozzo 3 in funzione della profondità nei diversi mesi dell'anno

1.2.4 Pozzo 4

Nella Tabella 5 sono riportati i valori di temperatura e nella Figura 5 l'andamento della temperatura in funzione della profondità riferiti al pozzo 4, nel periodo compreso tra il 1 maggio e il 31 dicembre 2021.

La temperatura più alta registrata sul piano campagna è 35,13 °C (agosto 2021), risultando così quella più elevata tra i quattro pozzi (+ 9 °C rispetto al pozzo 1; + 3,5 °C rispetto al pozzo 2 e + 1 °C rispetto al pozzo 3). Inoltre, il valore di temperatura registrato nel mese più freddo è pari a 9,08°C, risultando così il pozzo più freddo nel mese più freddo dell'anno. Tali evidenze sono del tutto prevedibili e spiegabili in quanto è il pozzo che risente meno di fenomeni di ombreggiamento da parte degli edifici antistanti il piazzale e della presenza di vegetazione.

Tabella 5. Temperature misurate nel pozzo 4 (dal 1 maggio al 31 dicembre 2021)

POZZO 4								
Profondità	may-21	jun-21	jul-21	aug-21	sep-21	oct-21	nov-21	dec-21
0	20,60	28,80	33,70	35,13	29,26	19,64	14,09	9,08
2	20,80	27,98	32,15	34,15	28,76	20,83	15,82	11,06
4	17,76	20,54	23,53	25,96	25,02	23,06	20,50	17,72
6	18,69	18,66	19,22	20,05	20,54	20,89	20,80	20,35
8	19,86	19,51	19,32	19,20	19,27	19,43	19,49	19,51
10	19,88	19,68	19,51	19,34	19,24	19,22	19,11	19,02
12	19,55	19,40	19,29	19,21	19,12	19,10	18,97	18,83
14	19,26	19,12	19,04	18,97	18,92	18,93	18,81	18,68
16	19,25	19,04	18,93	18,84	18,78	18,78	18,66	18,54
18	19,53	19,14	18,95	18,80	18,72	18,70	18,58	18,44
20	19,44	19,03	18,79	18,65	18,54	18,51	18,39	18,25
22	18,80	18,58	18,44	18,35	18,28	18,27	18,16	18,03
24	18,29	18,23	18,17	18,11	18,08	18,09	17,98	17,87
26	18,07	18,05	18,02	17,98	17,96	17,98	17,89	17,78
28	17,97	17,94	17,93	17,89	17,88	17,90	17,81	17,70
30	17,91	17,88	17,87	17,83	17,82	17,85	17,76	17,65
32	17,86	17,84	17,82	17,78	17,78	17,81	17,71	17,61
34	17,83	17,80	17,79	17,75	17,75	17,78	17,68	17,58
37	17,80	17,77	17,76	17,71	17,71	17,74	17,65	17,55
39	17,78	17,75	17,74	17,69	17,69	17,73	17,63	17,53
41	17,77	17,74	17,72	17,68	17,68	17,71	17,61	17,51
43	17,77	17,74	17,71	17,67	17,67	17,70	17,60	17,50
45	17,82	17,75	17,72	17,66	17,66	17,69	17,59	17,49
47	17,90	17,80	17,75	17,68	17,67	17,69	17,60	17,49
49	17,91	17,81	17,75	17,69	17,67	17,70	17,60	17,49
51	17,87	17,79	17,74	17,68	17,68	17,70	17,60	17,49
53	17,79	17,74	17,72	17,67	17,67	17,70	17,61	17,50
55	17,86	17,79	17,76	17,70	17,70	17,73	17,63	17,53
57	17,91	17,83	17,79	17,73	17,72	17,75	17,65	17,55
59	17,92	17,84	17,80	17,74	17,74	17,77	17,67	17,56
61	17,91	17,85	17,81	17,75	17,75	17,78	17,68	17,57
63	17,93	17,86	17,82	17,77	17,77	17,79	17,69	17,59
65	17,94	17,87	17,84	17,78	17,78	17,81	17,71	17,60
67	17,97	17,90	17,87	17,81	17,81	17,83	17,73	17,63
69	18,00	17,93	17,89	17,83	17,82	17,85	17,75	17,65
71	18,02	17,95	17,92	17,85	17,85	17,88	17,78	17,68
73	18,06	17,99	17,95	17,89	17,89	17,92	17,82	17,72
75	18,13	18,06	18,02	17,96	17,96	17,99	17,89	17,79
77	18,20	18,13	18,09	18,03	18,03	18,06	17,96	17,86
79	18,26	18,19	18,16	18,10	18,11	18,14	18,04	17,94
81	18,27	18,24	18,22	18,17	18,19	18,24	18,15	18,05
83	18,40	18,37	18,37	18,32	18,35	18,40	18,32	18,22
85	18,61	18,58	18,58	18,52	18,55	18,60	18,51	18,41

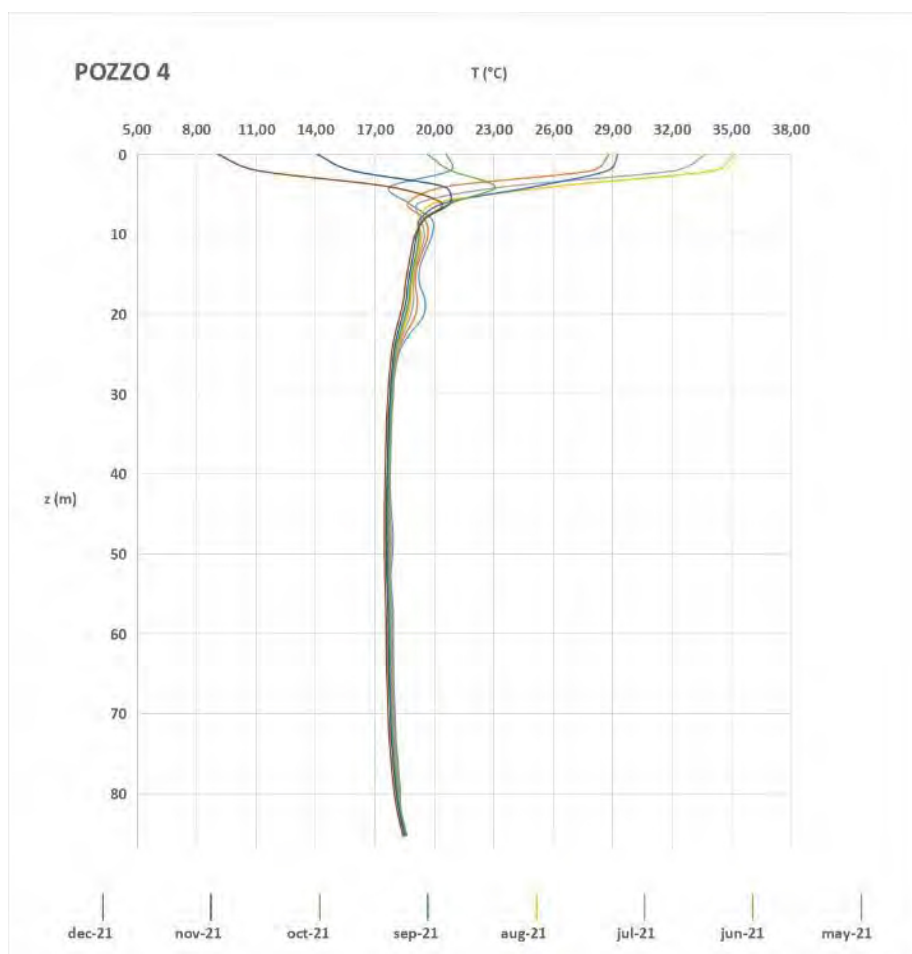
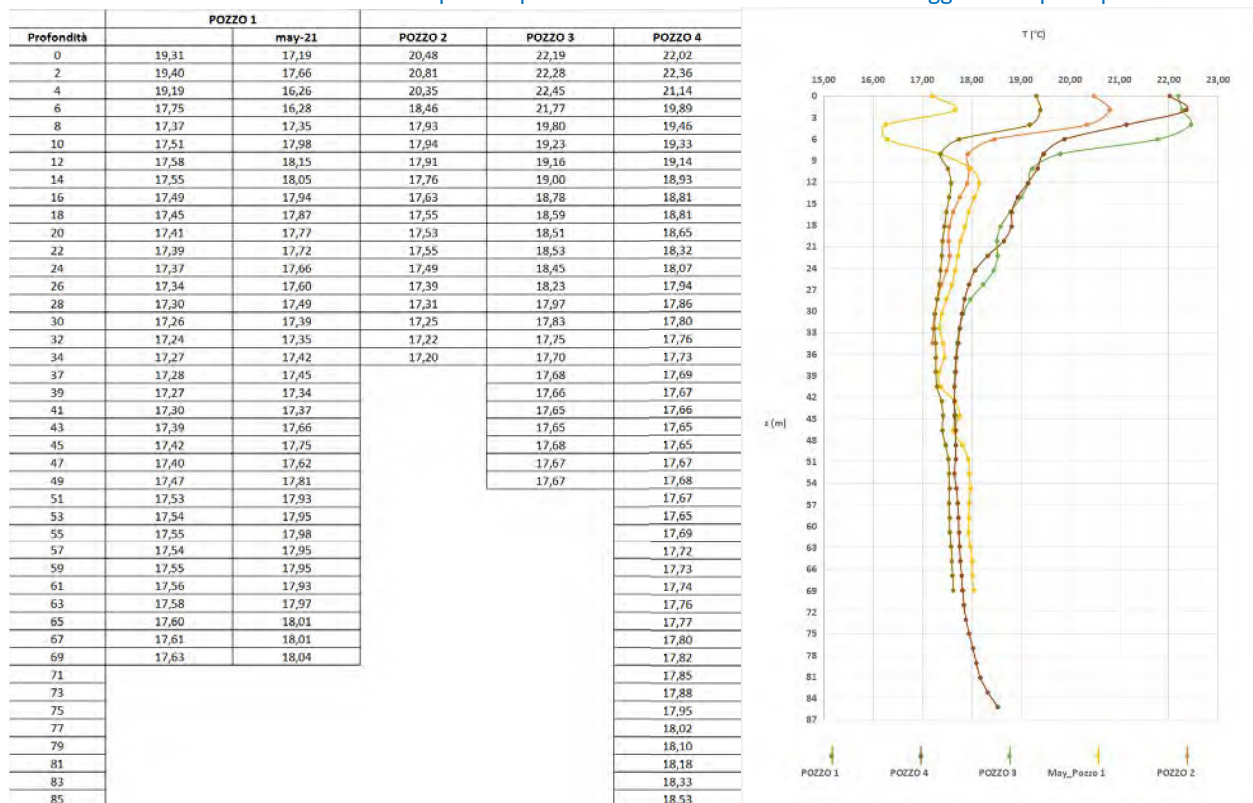


Figura 5. Profilo di temperatura del pozzo 4 in funzione della profondità nei diversi mesi dell'anno

Infine, in Tabella 6 è riportato l'andamento delle temperature medie mensili in funzione della profondità nei quattro pozzi e il profilo di temperatura relativo al solo mese di maggio 2021 del pozzo 1. I profili medi mensili dei quattro pozzi (cfr figura a destra della Tabella), ad andamento regolare, possono essere considerati come valori di riferimento in condizioni di tipo stazionario, ossia non soggette a sollecitazione termica indotta. Al contrario, il profilo verticale di temperatura riferito al mese di maggio per il pozzo 1 evidenzia la risposta termica del terreno in funzione del valore della conducibilità termica della litologia attraversata e dell'eventuale presenza di un acquifero basale o acquiclude sospeso. Pertanto, per le correlazioni di tipo termico-stratigrafico tra i quattro pozzi si considerano tali valori di temperatura come riferimento, in quanto risentendo ancora del test di risposta termica permettono di simulare l'impianto in funzione. È possibile vedere come il comportamento tra il pozzo 1 e il pozzo 2 sia molto simile, benché posti a una distanza di 9 m ma trovandosi comunque alla stessa quota topografica e caratterizzati dallo medesimo assetto litostratigrafico.

Tabella 6. Medie mensili dei quattro pozzi e media mensile del mese di maggio 2021 per il pozzo 1



2 Successione litostratigrafica di dettaglio

Al fine di effettuare una correlazione puntuale tra l'andamento dei valori di temperatura nei quattro pozzi e le litologie presenti si è resa necessaria una nuova ispezione, accurata e puntuale, dei campioni di roccia (carote) provenienti dal sondaggio geognostico. Ciò al fine di individuare, in dettaglio, gli spessori corrispondenti a ogni litotipo, i cambiamenti e le eteropie di facies anche all'interno della stessa litologia. I depositi vulcanici di tipo piroclastico, per natura eterogenei, possono interessare aree topografiche circoscritte in modo diverso, a seconda dell'ambiente deposizionale e del tipo di prodotto dell'attività esplosiva. Le colate piroclastiche prodotte dal collasso delle colonne eruttive sono costituite da gas, ceneri e frammenti di magma incandescente che si muovono in modo turbolento a velocità elevata sotto l'azione della gravità. A causa della loro elevata densità, queste colate si adeguano al contesto topografico che incontrano nel loro tragitto fino a depositarsi in modo concentrato nelle aree morfologicamente depresse, talvolta colmandole. Il deposito risultante da una colata piroclastica è formato da un insieme caotico di cenere, in cui sono immersi frammenti di varia dimensione e natura, spesso anche materiale vegetale inglobato durante il percorso. Se la temperatura della colata è sufficientemente elevata al momento della deposizione, i vari componenti (piroclasti) possono saldarsi tra loro dando origine a una massa compatta (ignimbrite). Piroclasti possono essere rappresentati da cristalli, frammenti di cristalli, vetro, porzioni di magma, frammenti di rocce del condotto vulcanico. La loro classificazione è su base granulometrica e sono detti bombe (diametro > 64 mm), blocchi (diametro > 64 mm ma di forma angolosa, già litificati al momento dell'eruzione), lapilli (diametro tra 64 e 2 mm) e ceneri (diametro minore di 2 mm). Pertanto, il valore di conducibilità è fortemente dipendente dal tipo di clasto contenuto al suo interno, dall'evento eruttivo e dal contesto di sedimentazione e dal contenuto dei fluidi.

La successione stratigrafica di dettaglio, nell'area in esame, è la seguente (Tabella 7):

Tabella 7. Stratigrafia di dettaglio nell'area in esame

Riporto	0- 0,5
Ignimbrite di colore marrone a granulometria sabbiosa	3,00
Tufo marrone scuro a granulometria fine con argillificazione	6
Tufo sabbioso con presenza di inclusi litici	7,50
Tufo marrone scuro a granulometria fine	10
Tufo francamente sabbioso marrone molto chiaro	11
Tufo marrone sabbioso con inclusi scoriacei grigi scuri. Assenti i litici	15
Tufo sabbioso con argillificazione , di colore marrone scuro	17,50
Tufo sabbioso con sparsi inclusi scoriacei grigio scuri	19
Tufo a granulometria variabile fino alla sabbia grossolana , con matrice anche argillosa e con presenza di litici eterometrici (bombette)	22
Lava compatta con occasionali fratture. Presenza di patine di ossidazione da ossidi di Fe e Mn (da 30 m a 33,5 m). Presenza di cristalli di leucite analcimizzata con dimensione da millimetrica a centimetrica	33,50
Tufo terroso sabbioso di colore marrone chiaro, che passa da 35 m a 36,5 m a pozzolana a matrice sabbiosa grigio scura	36,50
Pozzolana sabbiosa di colore marroncino-verdastra con aumento della componente argillosa	38,60
Tufo da marrone a ocra, a matrice sabbiosa , con presenza di scarsi inclusi e debolmente argillificato. Alla base granulometria più fine	46,50
Tufo a componente sabbiosa di colore marrone rossastro. Inclusi eterogenei, a granulometria variabile	51,80
Tufo rosso a scorie nere . Intercalazioni più sabbiose (da 59,5 m a 62 m)	65,50
Tufo sabbioso- argilloso	69
Tufo di colore avana chiaro, con pomici grigio scure	70
Tufi Varicolori di Sacrofano	82
Limi sabbiosi mediamente grossolani	94

2.1. Correlazione termico-stratigrafica

Nella Figura 6 è mostrato l'andamento della temperatura in funzione della profondità nei quattro pozzi, riferito al maggio 2021. Il pozzo 1, come già detto, è indicativo della risposta termica di ogni litologia in quanto ancora risente della sollecitazione termica indotta con il GRT. Durante il test, il trasferimento termico operato dalla sonda verso il terreno circostante determina una variazione di temperatura che stabilisce l'efficienza della sonda geotermica in esercizio. Come è noto, la temperatura del sottosuolo è influenzata da diversi fattori, climatici, topografici, geologici e idrogeologici. Pertanto, le variazioni verticali di temperatura

permettono di determinare le caratteristiche termiche in funzione della litologia e soprattutto della presenza di falde freatiche [2].

I profili verticali di temperatura, ottenuti durante e dopo il GRT, consentono di stimare la conducibilità termica distribuita per ciascun livello stratigrafico, e di verificare il contributo che le differenti litologie e la presenza eventualmente di masse d'acqua forniscono allo scambio termico tra il terreno e le sonde geotermiche.

In generale, è possibile notare come i tufi con argillificazione abbiano una maggiore inerzia termica rispetto ai tufi a granulometria sabbiosa/grossolana o rispetto alla lava, e quindi valori di conducibilità termica inferiori. In particolare, la lava è caratterizzata da una conducibilità termica molto alta e tende a raffreddarsi molto più velocemente, permettendo un maggiore geoscambio tra terreno e sonda.

Per il momento non si considerano i primi 10 m di terreno, in quanto l'andamento della temperatura è condizionato dalle variazioni climatiche stagionali. I profili termici dei pozzi 2, 3 e 4 (Figura 6) possono essere considerati in regime stazionario e sono indicativi dei valori di conducibilità termica delle litologie presenti.

Dai 14 ai 19 m il tufo a matrice sabbiosa presenta un'intercalazione a componente argillosa (2,5 m), a cui corrisponde una minore conducibilità termica e una maggiore inerzia termica del terreno in quanto il calore ha difficoltà a disperdersi lateralmente. Successivamente, fino ai 22 m, il tufo mostra granulometria più grossolana, che permette un maggiore scambio di calore tra sonda e terreno. Sotto al tufo, stratigraficamente, si trova la lava compatta, poco fratturata, con patine di ossidazione da ossidi di Fe e Mn (da 30 m a 33,5 m) e presenza di cristalli di leucite analcimizzata; ciò implica la presenza di circolazione di fluidi.

Al di sotto della lava e fino a circa 82 m di profondità, le fluttuazioni della curva della temperatura sono condizionate dalla presenza dell'acquifero basale. È interessante notare come nei limi sabbiosi (a profondità maggiori di 82 m) le temperature siano più alte alla base, essendo in prossimità del letto della falda (argille) dove si risente del flusso geotermico terrestre profondo. Chiaramente, l'inerzia termica della falda principale è variabile, e dipende dal movimento della massa d'acqua, dalla direzione e dai fenomeni di miscelazione, sicuramente maggiori verso l'alto stratigrafico.

Inoltre, l'andamento dei 4 profili di temperatura permette di ricostruirne l'altezza topografica. In particolare, risulta che i pozzi 1 e 2 si trovano alla stessa quota, il pozzo 3 scende leggermente (circa 1 m) mentre il pozzo 4 risale di quota di circa 3 m. Questa evidenza potrebbe indicare che il pozzo 3 giace in corrispondenza di una paleovalle, successivamente colmata dai depositi vulcanici.

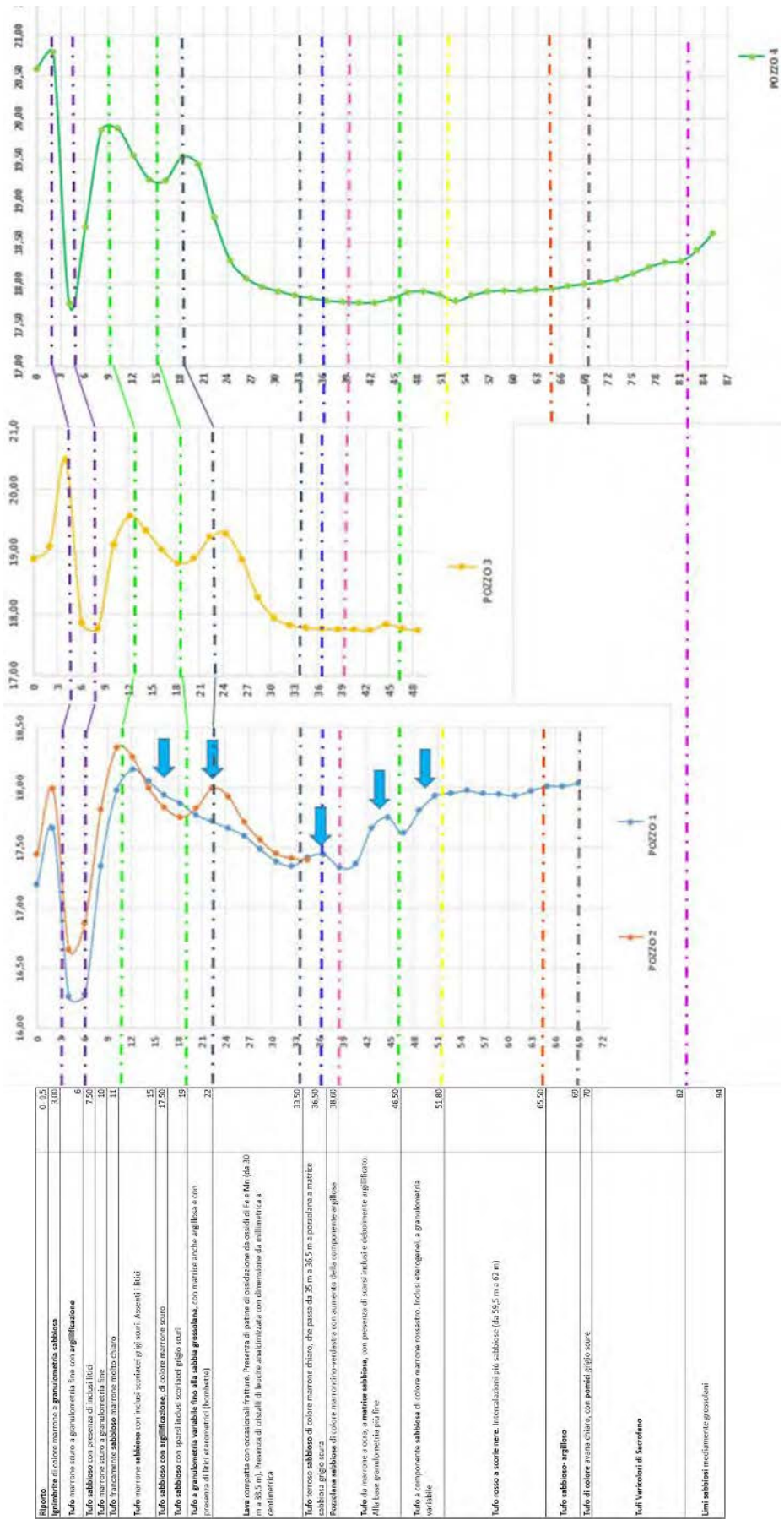


Figura 6. Correlazione termico-stratigrafica tra i quattro pozzi

2.2. Determinazione sperimentale della curva di conducibilità termica

Nel pozzo 1 il sondaggio geognostico è stato spinto fino alla profondità di 100 m. L'analisi di dettaglio delle carote e un accurato studio dei dati di letteratura hanno reso possibile la stima delle conducibilità termiche di ogni litologia in funzione della profondità.

L'andamento del profilo verticale di temperatura nel pozzo 1, riferito al maggio 2021, ha permesso di estrapolare i valori di conducibilità termica di ogni litologia. Tra le due curve c'è un rapporto di proporzionalità inverso; pertanto, terreni poco conduttivi presentano un'inerzia termica maggiore in quanto il calore non riesce a dissiparsi (Figura 7). Al contrario, l'inerzia termica di una litologia diminuisce laddove è presente un terreno molto conduttivo come la lava, che cede velocemente il calore raffreddandosi. Il valor medio dei dati di conducibilità termica determinati sperimentalmente è pari a 1,20 W/mK (Tabella 8), che può essere considerato accettabile in quanto è in linea con il valore determinato durante il GRT (1,21 W/mK).

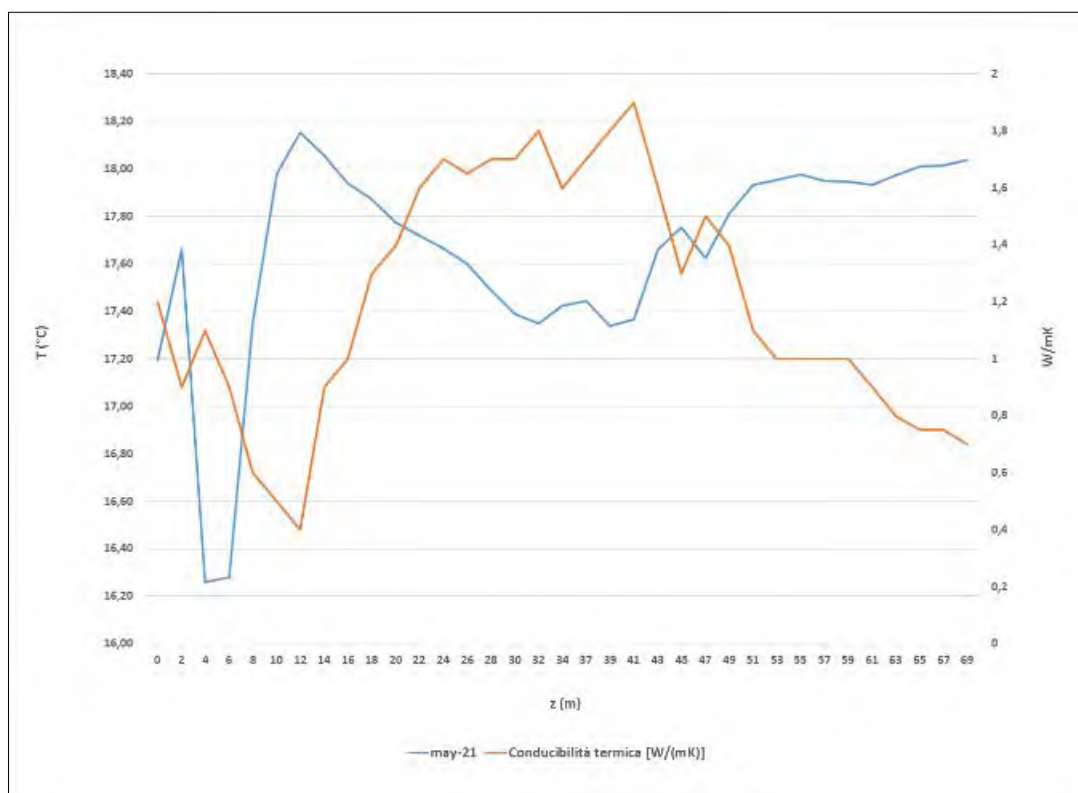


Figura 7. Correlazione tra profilo di temperatura e conducibilità termica (W/mK)

Tabella 8. Valori di conducibilità termica (W/mK)

Profondità	Conducibilità termica [W/(mK)]
0	1,2
2	0,9
4	1,1
6	0,9
8	0,6
10	0,5
12	0,4
14	0,9
16	1
18	1,3
20	1,4
22	1,6
24	1,7
26	1,65
28	1,7
30	1,7
32	1,8
34	1,6
37	1,7
39	1,8
41	1,9
43	1,6
45	1,3
47	1,5
49	1,4
51	1,1
53	1
55	1
57	1
59	1
61	0,9
63	0,8
65	0,75
67	0,75
69	0,7
MEDIA	1,20

2.3. Determinazione analitica della curva di conducibilità termica

Con l'utilizzo di adeguati ambienti di simulazione termica computazionale è stato possibile ricostruire l'alterazione del campo termico indisturbato del terreno sotto l'azione del geoscambio sonde-terreno. Per validare i dati di conduttività sono stati presi come riferimento i valori di temperatura del terreno al primo giorno utile di misurazione (1/5/2021), circa 15 giorni dopo l'esecuzione del GRT nel pozzo 1, che aveva indotto un'alterazione delle condizioni termiche del terreno circostante la sonda. Attraverso un simulatore computazionale (Ansys® Fluent®) è stato possibile stimare gli effetti di risposta del terreno.

A tal proposito, sono stati considerati i seguenti parametri:

- potenza termica media immessa: 52,85 W/m;
- durata del test: 73 h;
- temperatura indisturbata del terreno: 17,67 °C.

Si è considerato un periodo di attività della sonda pari a 73 ore (coincidenti con la durata effettiva del GRT) e un successivo periodo di quiescenza di 15 giorni.

Ai fini della simulazione, è stato costruito un modello composto da 35 strati, ognuno di altezza 2 m e larghezza 9 m (Figura 8 A). L'altezza di ogni strato è uguale alle quote di misurazione di temperatura del fascio di fibre ottiche nel pozzo 1. La larghezza di 9 m è determinata dalla distanza dalla sonda adiacente. Ad ognuno dei 35 strati è stato assegnato il valore di conduttività termica, densità e calore specifico del litotipo corrispondente. I primi due valori sono stati stimati, il terzo è stato calcolato a partire dalla capacità termica volumica. Quest'ultima è stata fornita dal GRT (2,6 MJ/(m³K)). Viene quindi creata una mesh del dominio bidimensionale con grandezza degli elementi pari a 1 m, che permette di ottenere un ottimo grado di rappresentazione del sistema (Figura 8 B).

Il modello, che conta un'altezza complessiva di 70 m, è stato simulato in geometria assialsimmetrica rispetto al centro della sonda. Essendo il diametro della sonda pari a 15 cm, è stato posto il dominio di calcolo a distanza di 7,5 cm dall'asse di rotazione, così da rappresentare al meglio la configurazione reale (Figura 9).

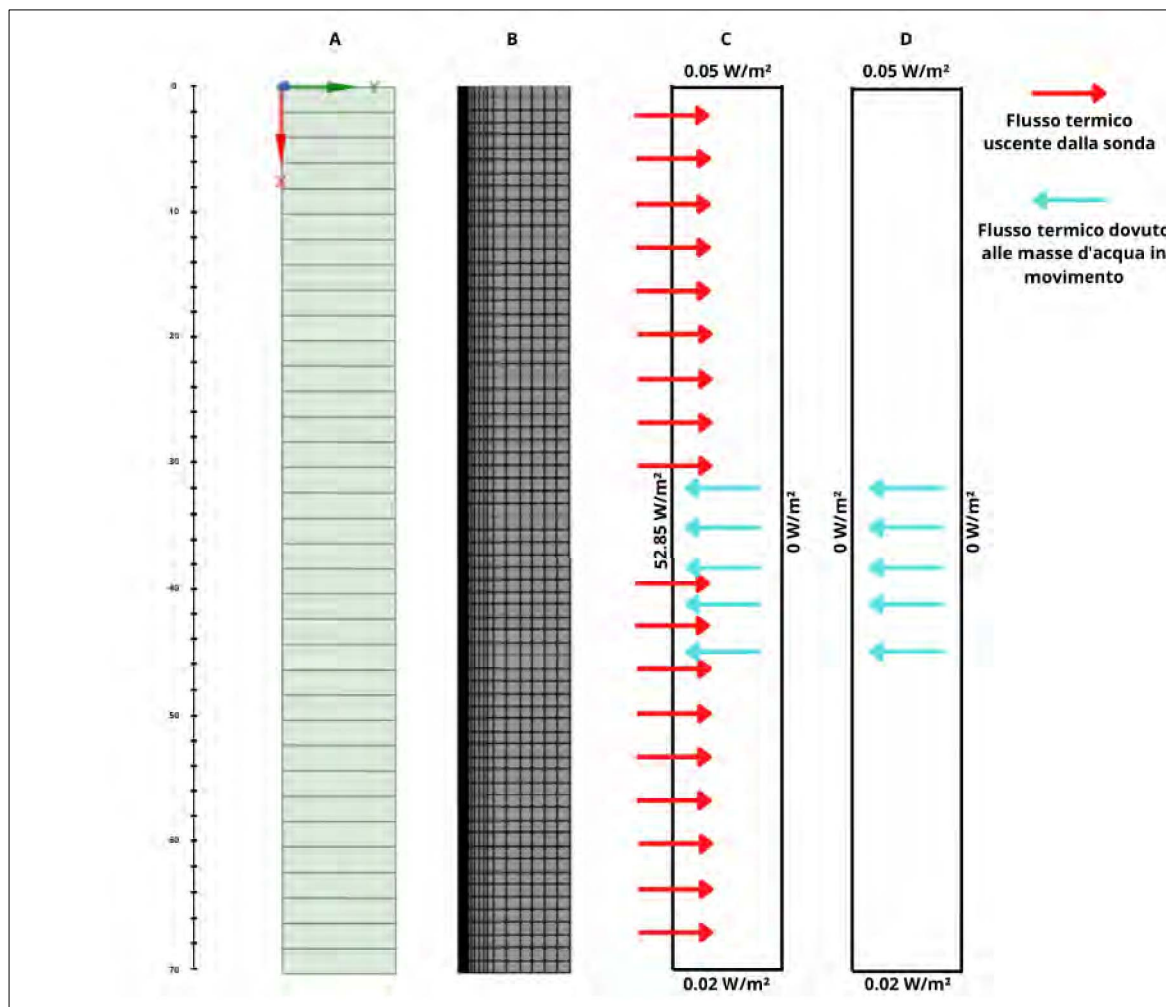


Figura 8. A: modello geometrico stratigrafico; B: mesh; C: condizioni al contorno "Periodo 1"; D: condizioni al contorno "Periodo 2"



Figura 9. Dettaglio della configurazione dell'asse di simmetria

Si è generata una zona di infittimento. Con riferimento alla mesh, in prossimità della parete della sonda si è generata una zona di infittimento per aumentare il grado di precisione dove lo scambio termico è più influente (Figura 10).

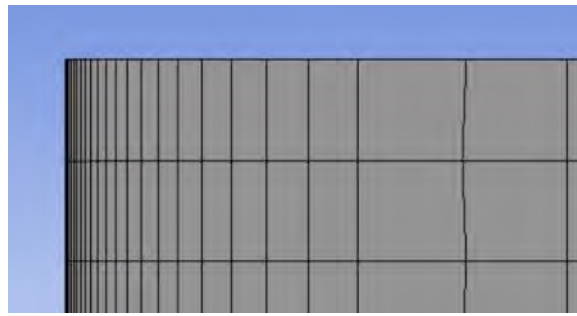


Figura 10. Dettaglio dell'infiltramento in prossimità dell'interfaccia sonda-terreno

Per simulare il trasporto di calore per conduzione dalla sonda al terreno nel tempo, viene attivato il modello di calcolo di energia e posta la simulazione in regime transitorio.

Per le condizioni al contorno è necessario fare differenza tra il periodo di attività della sonda durante il GRT (le prime 73 ore), indicato con "Periodo 1", e l'intervallo di quiescenza (i successivi 15 giorni), denominato "Periodo 2". Per il Periodo 1 viene imposto, come condizione al contorno lungo la sonda, un flusso di calore costante e pari alla potenza termica immessa durante il GRT ($52,85 \text{ W/m}^2$) (Figura 8 C). Per il Periodo 2 invece, si pone il flusso lungo la sonda costante e pari a valor nullo (Figura 8 D).

Per apprezzare la variazione del flusso uscente dalla sonda, trascorse le 73 ore relative al test, la condizione al contorno è fornita attraverso una funzione IF ($\text{IF Timestep} < 74, 52,85 [\text{W m}^{-2}], 0 [\text{W m}^{-2}]$), funzione logica che fornisce valori diversi se la condizione impostata risulta verificata o meno.

Inoltre, sono state considerate anche le seguenti condizioni fisse al contorno:

- flusso termico al terreno pari a $0,05 \text{ W/m}^2$, calcolato dai dati di temperatura misurati il 1 maggio 2021 e dalla media delle conducibilità termiche della porzione superiore del terreno (fino a 32 m);
- flusso termico alla base della sonda pari a $0,02 \text{ W/m}^2$, secondo le stesse assunzioni fatte nel punto precedente, relative alla porzione inferiore (32-70 m);
- flusso termico nullo a distanza di 9 m dalla sonda.

La condizione iniziale di temperatura, imposta per il dominio di simulazione, è pari alla temperatura indisturbata del terreno ($17,67^\circ\text{C}$). Viene impostato un time-step di un'ora (3600 s) e un numero di passi pari alla somma dei due periodi di interesse per un totale di 433 ore.

All'inizio sono stati considerati i valori di conducibilità termica determinati sperimentalmente (Tabella 8); successivamente, questi sono stati iterati fino ad ottenere una sovrapposizione con la curva di temperatura misurata il 1 maggio 2021 (Tabella 9). La sovrapposizione delle due curve non si verifica nell'intervallo 24-43 m di profondità (Figura 11) in quanto la temperatura misurata è inferiore a quella indisturbata del terreno. Tale condizione potrebbe essere imputata all'influenza di una massa d'acqua in movimento, che accresce la velocità di smaltimento del calore dalla porzione interessata. Pertanto, in tale tratto il valore di conducibilità termica è rimasto fisso ed è variato il valore del flusso termico. Questo approccio è stato considerato nelle zone presunte sature, per le quali è stato necessario rimodulare i valori di flusso imposti come condizioni al contorno. In conclusione, è stato possibile stimare un valore corrispondente alla portata termica equivalente sottratta pari a circa $3,5 \text{ W/m}^2$.

Tabella 9. Valori di conducibilità termica (W/mK) calcolati analiticamente

Profondità	Conducibilità termica [W/(mK)]
10	0,5
12	0,4
14	0,5
16	0,75
18	1
20	1,25
22	1,5
24	1,7
26	1,65
28	1,7
30	1,7
32	1,8
34	1,6
37	1,7
39	1,8
41	1,9
43	1,6
45	1,3
47	1,7
49	1
51	0,7
53	0,65
55	0,6
57	0,65
59	0,65
61	0,75
63	0,7
65	0,6
67	0,6
69	0,55
MEDIA	1,11666667

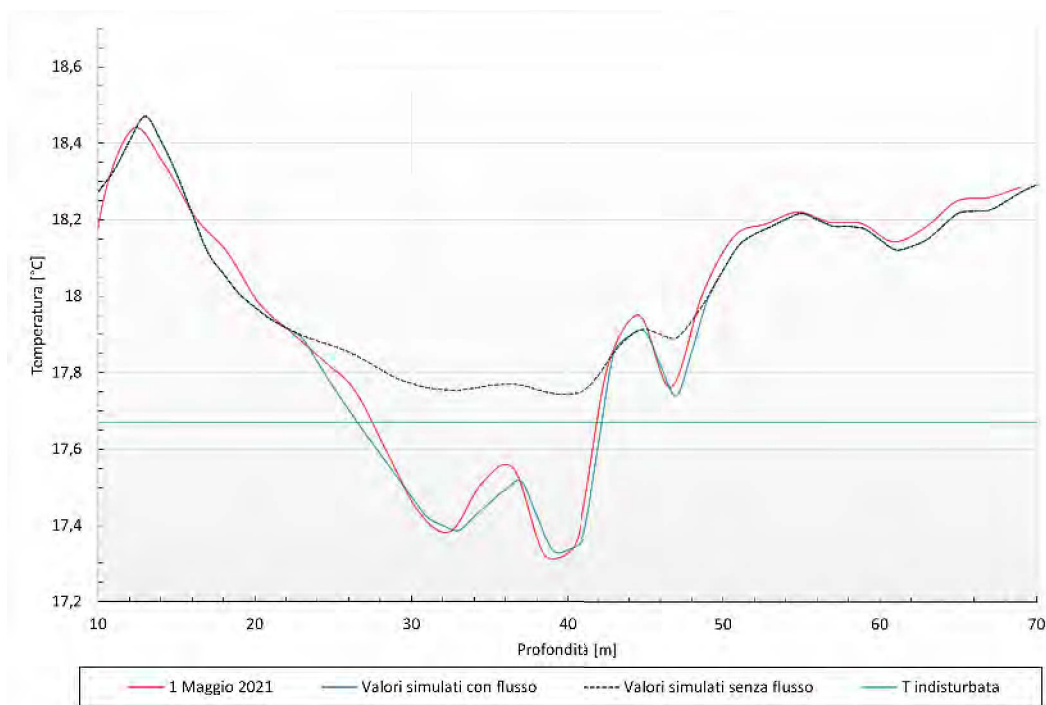


Figura 11. Simulazione conducibilità termica

3 Dati climatici

Per i dati meteorologici riferiti all'anno 2021 sono stati utilizzati i dati rilevati dalle stazioni meteorologiche ubicate all'interno del C. R. ENEA-Casaccia (Tabella 10, Figura 12).

Tabella 10. Dati climatici rilevati nel C.R. Enea Casaccia (anno 2021)

GIORNI	GENNAIO	FEBBRAIO	MARZO	APRILE	MAGGIO	GIUGNO	LUGLIO	AGOSTO	SETTEMBRE	OTTOBRE	NOVEMBRE	DICEMBRE
1	6,33	9,41	9,36	14,23	16,26	18,86	23,76	26,40	23,20	20,98	16,20	8,98
2	8,19	10,38	9,69	14,39	14,04	18,84	24,29	23,01	23,44	19,26	14,22	11,11
3	5,38	11,05	9,64	13,36	12,97	20,94	24,86	25,24	23,44	19,33	15,23	8,61
4	5,77	11,86	8,18	12,60	12,45	21,65	24,63	26,24	23,25	21,88	13,80	8,46
5	5,26	11,18	9,52	9,88	14,38	20,03	25,86	24,00	23,69	17,85	12,07	10,54
6	5,13	13,22	10,47	10,46	15,91	19,64	26,79	23,97	23,56	16,43	14,23	6,55
7	5,08	12,96	8,24	7,32	15,90	20,38	26,37	25,78	23,04	15,00	18,07	5,39
8	6,06	10,66	9,18	6,82	17,56	17,75	26,12	26,57	22,23	16,73	14,36	7,21
9	5,71	11,68	8,00	8,46	18,24	19,91	25,86	26,28	21,53	17,07	15,02	7,34
10	5,70	11,63	9,01	10,38	19,02	21,53	25,69	27,71	21,81	13,71	16,70	4,15
11	4,38	9,06	9,30	12,03	16,79	21,92	24,94	29,57	23,47	12,64	15,55	7,03
12	4,52	8,55	11,86	11,03	15,59	23,14	25,03	30,48	23,18	14,06	14,28	7,33
13	5,11	2,90	12,32	10,00	15,31	24,38	24,19	29,62	23,16	14,82	13,04	8,22
14	7,47	1,77	9,81	9,87	12,77	23,05	21,58	29,55	22,45	12,71	12,76	10,43
15	6,08	2,98	8,29	9,35	14,67	22,27	21,55	29,20	22,64	13,77	13,25	9,62
16	3,89	4,56	7,04	10,16	15,88	22,07	22,03	26,47	24,52	14,71	12,40	9,03
17	2,18	8,32	4,80	10,63	17,04	23,17	22,10	26,12	22,74	14,69	12,90	8,73
18	4,44	9,10	6,18	8,47	15,83	23,00	25,61	25,20	22,83	14,67	13,77	8,66
19	5,64	8,47	6,58	9,24	16,17	23,39	26,29	24,92	22,23	14,19	13,08	6,99
20	8,39	10,73	7,69	8,24	16,14	24,38	25,62	25,36	20,65	10,29	11,74	7,78
21	10,83	9,61	7,29	11,06	15,76	25,41	25,59	26,01	21,51	16,33	10,83	7,74
22	12,39	10,40	8,17	12,18	17,29	26,14	28,22	25,96	21,50	17,55	12,72	7,43
23	10,15	10,63	7,28	13,73	18,50	25,69	27,05	24,73	19,66	16,99	12,97	7,76
24	8,52	12,02	9,69	14,76	19,78	24,76	25,68	23,48	19,88	17,25	12,55	10,59
25	6,95	11,35	10,71	14,18	17,82	24,00	26,56	24,25	21,18	15,83	11,12	12,89
26	4,98	10,91	10,31	14,84	17,71	24,36	26,11	23,78	22,46	14,84	9,35	11,54
27	4,03	8,90	11,40	14,94	16,85	25,82	26,23	23,21	21,90	15,34	11,49	10,08
28	6,20	11,47	12,11	15,17	18,92	26,77	26,67	21,99	22,12	14,26	9,47	10,95
29	9,84		12,88	15,25	19,65	25,13	26,44	21,74	21,29	13,67	5,79	12,50
30	10,66		14,35	17,83	18,70	24,01	27,39	21,50	22,05	14,27	5,29	10,98
31	10,60		14,96		18,89		27,02	21,49		15,17		11,08
MEDIA	6,67	9,49	9,49	11,70	16,55	22,75	25,36	25,48	22,35	15,69	12,81	8,89

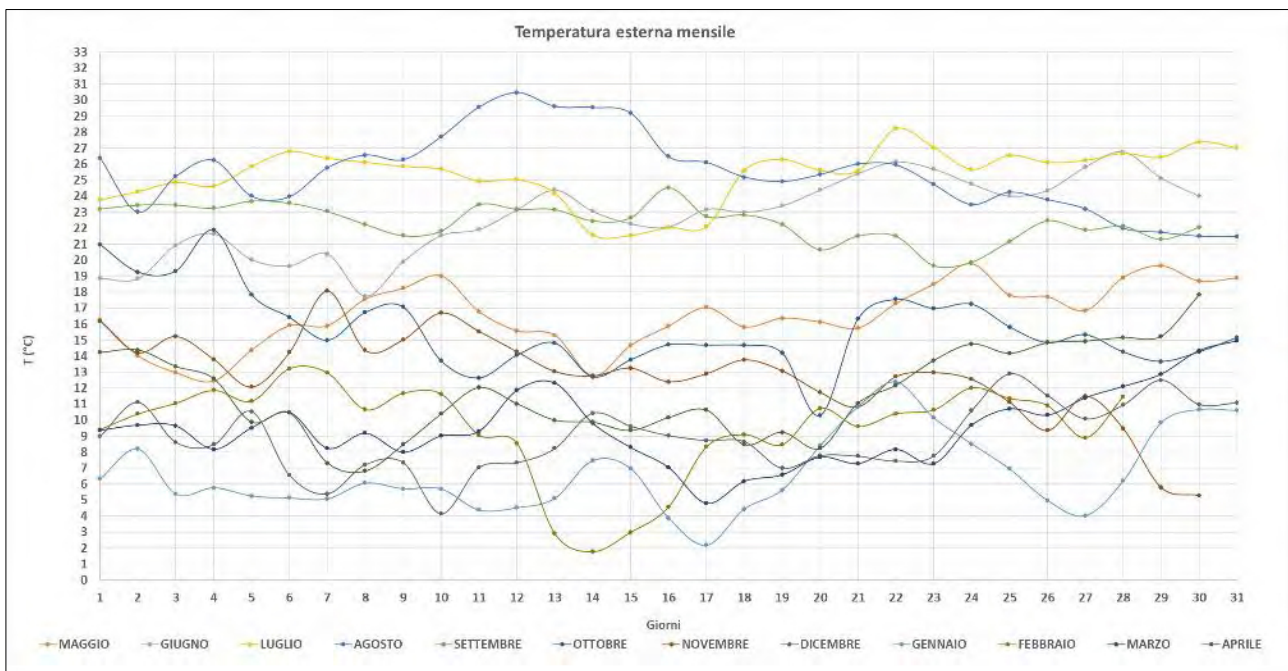


Figura 12. Andamento della temperatura esterna mensile nel C.R. ENEA-Casaccia (anno 2021)

Il 12 agosto è stato il giorno più caldo dell'anno (30,48 °C), mentre il 14 febbraio quello più freddo del 2021 (1,77 °C). Per questi due giorni è stato possibile misurare il comportamento termico con frequenza bimetrica dei pozzi 2, 3 e 4 (Tabella 11, Figura 13).

Si nota innanzitutto che tutti e tre i pozzi non risentono più delle variazioni stagionali di temperatura a partire dai 10 m circa di profondità rispetto al piano campagna. Nel pozzo 2, nel giorno più freddo dell'anno si registra una temperatura superficiale di 9,25 °C e nel giorno più caldo 31,90 °C. Sia nel giorno più freddo che in quello più caldo dell'anno, il pozzo 3 rileva valori di temperatura leggermente più alti rispetto al pozzo 2, rispettivamente 10,20 °C e 34,31 °C. Come prevedibile data l'ubicazione sul piazzale, il pozzo 4 risulta essere quello più sensibile alle variazioni climatiche sia in inverno che in estate, con una temperatura superficiale di

7,09 °C il 14 febbraio e 36,27 °C il 12 agosto. In conclusione, il pozzo 2 è il pozzo più freddo nel giorno più caldo dell'anno, mentre il pozzo 4 è il pozzo più freddo nel giorno più freddo dell'anno (-2 °C rispetto al pozzo 2 e -3 °C rispetto al pozzo 3). Inoltre, il pozzo 4 è il più caldo nel giorno più caldo dell'anno (+4 °C rispetto al pozzo 2 e +2 °C rispetto al pozzo 3).

Tabella 11. Dati di temperatura nel giorno più caldo e in quello più freddo del 2021 (pozzi 2, 3 e 4)

	pozzo 2	pozzo 3	pozzo 4	pozzo 2	pozzo 3	pozzo 4
Profondità	12-ago	12-ago	12-ago	14-feb	14-feb	14-feb
0	31,90	34,31	36,27	9,25	10,20	7,09
2	31,49	34,64	35,44	10,90	9,80	10,23
4	26,00	34,56	26,10	17,05	10,83	18,18
6	19,06	27,66	20,01	18,78	18,39	20,44
8	17,62	20,50	19,12	18,20	20,30	19,48
10	17,88	18,98	19,27	17,70	19,51	19,02
12	17,93	19,16	19,14	17,62	18,89	18,84
14	17,77	19,13	18,91	17,54	18,68	18,69
16	17,60	18,90	18,77	17,44	18,52	18,56
18	17,52	18,68	18,74	17,37	18,35	18,46
20	17,50	18,57	18,60	17,32	18,23	18,26
22	17,52	18,57	18,29	17,29	18,14	18,05
24	17,47	18,50	18,04	17,23	18,03	17,88
26	17,37	18,30	17,90	17,16	17,86	17,80
28	17,29	18,06	17,82	17,10	17,72	17,71
30	17,22	17,92	17,76	17,06	17,63	17,67
32	17,20	17,84	17,71	17,05	17,58	17,62
34	17,18	17,79	17,68	17,02	17,54	17,60
37		17,75	17,64		17,52	17,56
39		17,73	17,62		17,50	17,54
41		17,72	17,61		17,49	17,53
43		17,71	17,60		17,49	17,52
45		17,74	17,59		17,50	17,50
47		17,74	17,60		17,50	17,51
49		17,74	17,61		17,52	17,51
51			17,61			17,51
53			17,60			17,51
55			17,62			17,55
57			17,66			17,56
59			17,67			17,58
61			17,68			17,59
63			17,70			17,61
65			17,72			17,62
67			17,73			17,66
69			17,76			17,66
71			17,78			17,70
73			17,82			17,73
75			17,88			17,81
77			17,96			17,88
79			18,03			17,97
81			18,10			18,07
83			18,23			18,25
85			18,45			18,44

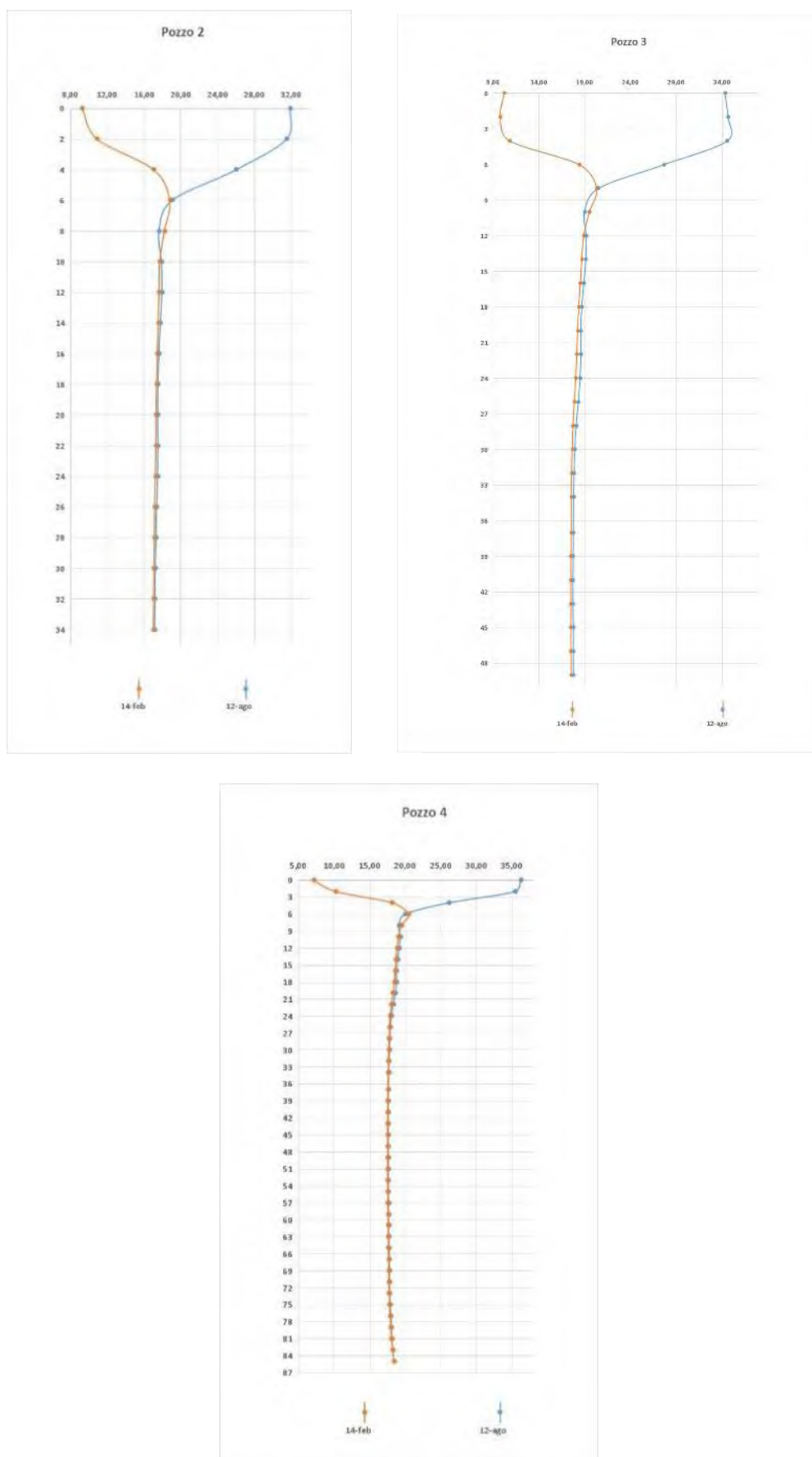


Figura 13. Andamento della temperatura nel giorno più caldo e in quello più freddo del 2021 (pozzi 2,3 e 4)

3.1. Temperatura del terreno Tg

La temperatura del terreno varia in funzione della profondità e del periodo dell'anno considerato [3].

Accettando le seguenti ipotesi:

- è trascurabile l'acqua di infiltrazione meteorica;
- flusso geotermico profondo trascurabile;
- la temperatura superficiale del terreno è pari alla temperatura media dell'aria esterna e ha un'evoluzione temporale di tipo sinusoidale;
- l'effetto dell'irraggiamento solare è trascurabile.

Per il calcolo della temperatura del terreno ad una certa profondità $\theta_g(d,t)$ si fa riferimento all'equazione analitica (1) di diffusione del calore in un piano semi-infinito dovuto a una sollecitazione sinusoidale di temperatura:

$$\theta_g(d,t) = \theta_M - A_{\theta_s} \cdot \exp \left[-d \cdot \left(\frac{\pi}{T \cdot \alpha} \right)^{1/2} \right] \cos \left[\frac{2\pi}{T} \left(t - T_0 - \frac{d}{\pi \cdot \alpha} \right)^{1/2} \right] \quad (1)$$

dove:

$\theta_g(d,t)$ è la temperatura del terreno alla profondità d dopo t giorni dal primo giorno di gennaio [°C];

θ_M è la temperatura media del terreno nello strato termicamente stabile [°C];

A_{θ_s} è l'ampiezza di oscillazione annuale della temperatura [°C];

T_0 è il numero del giorno corrispondente alla temperatura minima del terreno (a partire dal primo gennaio) [-];

d è la profondità [m];

t è il numero di giorni (1 gennaio = 1);

α è la diffusività termica del terreno (m^2/giorno).

La grandezza θ_M è valutabile come il valore medio annuo della temperatura dell'aria nel sito considerato. Anche la grandezza A_{θ_s} può essere valutata dai dati meteorologici dell'area in esame. La temperatura media esterna annuale è pari a 15,60 °C, con un'ampiezza di oscillazione annuale di 18,81 °C (Tabella 12). Inoltre, il 12 agosto è stato il giorno più caldo del 2021 (30,48 °C) e il 14 febbraio quello più freddo (1,77 °C).

Tabella 12. Temperatura media annuale, ampiezza di oscillazione e giorno più freddo e più caldo del 2021 (dati stazione meteorologica C.R. ENEA Casaccia)

Temperatura media annuale	15,60
Ampiezza oscillazione A_{θ_s}	18,81
Giorno più freddo dell'anno	14-feb
Giorno più caldo dell'anno	12-ago

La diffusività termica media per ogni livello stratigrafico è stata calcolata come il rapporto tra la conducibilità termica estrapolata per ogni litotipo e la capacità termica volumica media ($2,6 \text{ MJ}/(\text{m}^3\text{K})$) determinata con il GRT (2) (Tabella 13):

$$\alpha = \frac{\lambda}{C} \quad [\text{m}^2/\text{giorno}] \quad (2)$$

dove:

λ è la conducibilità termica [W/mK];

C è la capacità termica volumetrica [m^2s]

Tabella 13. Diffusività termica (m²/giorno)

Profondità	Conducibilità termica [W/(mK)]	Diffusività (m ² /giorno)
0	1,2	3,99E-02
2	0,9	2,99E-02
4	1,1	3,66E-02
6	0,9	2,99E-02
8	0,6	1,99E-02
10	0,5	1,66E-02
12	0,4	1,33E-02
14	0,9	2,99E-02
16	1	3,32E-02
18	1,3	4,32E-02
20	1,4	4,65E-02
22	1,6	5,32E-02
24	1,7	5,65E-02
26	1,65	5,48E-02
28	1,7	5,65E-02
30	1,7	5,65E-02
32	1,8	5,98E-02
34	1,6	5,32E-02
37	1,7	5,65E-02
39	1,8	5,98E-02
41	1,9	6,31E-02
43	1,6	5,32E-02
45	1,3	4,32E-02
47	1,5	4,98E-02
49	1,4	4,65E-02
51	1,1	3,66E-02
53	1	3,32E-02
55	1	3,32E-02
57	1	3,32E-02
59	1	3,32E-02
61	0,9	2,99E-02
63	0,8	2,66E-02
65	0,75	2,49E-02
67	0,75	2,49E-02
69	0,7	2,33E-02
MEDIA	1,20	4,0E-02

In accordo con la (1) è stata calcolata la temperatura del terreno a diverse profondità in funzione del tempo (Tabella 14), considerando i seguenti valori:

- temperatura media annuale di 15,60 °C;
- ampiezza di oscillazione dell'onda termica di 18,81 °C;
- giorno in cui si registra la temperatura minima dell'anno [T₀] (14 febbraio = giorno 45 dal 1 gennaio), con valore di diffusività termica media pari a 0,04 m²/giorno;
- periodo T pari a 365 giorni (1 anno).

Tabella 14. Temperatura del terreno a diverse profondità in funzione del tempo (anno 2021)

	Giorni anno 2021									
Profondità	01-gen	30-gen	19-feb	10-apr	30-mag	19-lug	07-set	27-ott	16-dic	31-dic
	0	30	50	100	150	200	250	300	350	365
2 m	3,45	0,55	0,79	8,44	21,06	29,89	28,78	18,50	6,20	3,47
3 m	4,17	2,00	2,53	9,98	21,34	28,71	26,96	17,31	6,47	4,19
4 m	4,92	3,37	4,11	11,30	21,48	27,57	25,33	16,33	6,82	4,93
5 m	5,67	4,64	5,56	12,43	21,51	26,48	23,88	15,52	7,22	5,69
6 m	6,42	5,83	6,87	13,39	21,44	25,44	22,59	14,88	7,67	6,43
7 m	7,16	6,93	8,05	14,19	21,31	24,46	21,45	14,37	8,14	7,17
8 m	7,88	7,94	9,11	14,86	21,12	23,54	20,44	13,97	8,63	7,88
9 m	8,57	8,86	10,06	15,41	20,89	22,69	19,56	13,68	9,13	8,57
10 m	9,22	9,70	10,90	15,85	20,63	21,90	18,80	13,47	9,62	9,22
11 m	9,84	10,47	11,65	16,21	20,34	21,18	18,13	13,33	10,10	9,84
12 m	10,43	11,16	12,31	16,49	20,04	20,51	17,56	13,25	10,57	10,43
13 m	10,97	11,78	12,89	16,70	19,74	19,90	17,07	13,22	11,02	10,97
14 m	11,48	12,33	13,40	16,85	19,44	19,35	16,66	13,23	11,45	11,47
15 m	11,94	12,83	13,84	16,96	19,13	18,85	16,31	13,27	11,85	11,94
16 m	12,37	13,26	14,22	17,03	18,84	18,40	16,01	13,34	12,23	12,37
18 m	13,12	13,99	14,82	17,07	18,29	17,64	15,57	13,53	12,92	13,12
20 m	13,74	14,55	15,26	17,02	17,79	17,04	15,29	13,75	13,50	13,73
22 m	14,23	14,96	15,56	16,91	17,35	16,58	15,12	14,00	13,99	14,23
28 m	14,63	15,27	15,75	16,77	16,98	16,22	15,04	14,24	14,39	14,62

Dalla Figura 14 si nota quanto sia evidente, fino a circa 14 m di profondità dal piano campagna, l'effetto delle fluttuazioni climatiche stagionali legate alla temperatura esterna dell'aria. Oltre tale profondità la curva via via si appiattisce, fino a registrare una temperatura media stazionaria di circa 15 °C a partire dai 18 m.

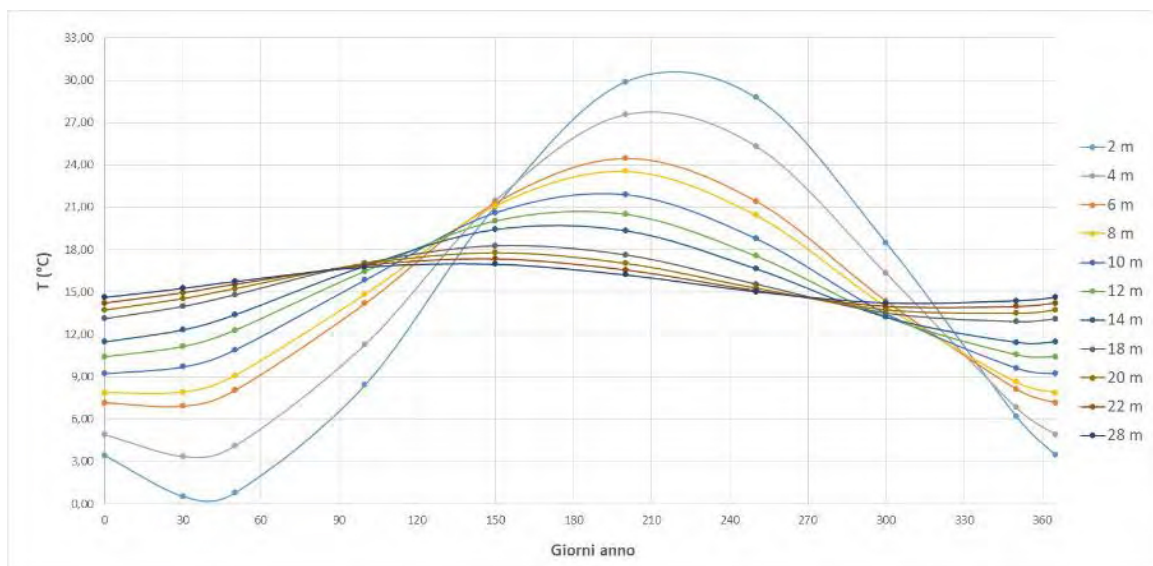


Figura 14. Temperatura del terreno a diverse profondità in funzione del tempo (anno 2021)

Sono stati confrontati i dati di temperatura effettivamente misurati dalle fibre ottiche nel pozzo (da giugno a dicembre 2021) con quelli semestrali climatici (Tabella 15). I dati di temperatura misurati dalle fibre ottiche sono quelli relativi al pozzo 4 (Tabella 16), che risente meno degli altri di fenomeni di ombreggiamento e/o di copertura dovuta da vegetazione ed è quindi il più freddo in inverno e il più caldo d'estate.

Tabella 15. Temperatura del terreno a diverse profondità in funzione del tempo (periodo giugno-dicembre 2021)

	6 MESI							
	01-giu	01-lug	01-ago	01-set	01-ott	01-nov	01-dic	31-dic
Profondità	151	181	212	243	273	304	334	365
2 m	21,31	27,50	30,63	29,59	24,86	17,47	9,79	3,47
3 m	21,55	26,82	29,19	27,78	23,18	16,38	9,56	4,19
4 m	21,66	26,12	27,83	26,15	21,72	15,49	9,46	4,93
5 m	21,67	25,40	26,56	24,69	20,45	14,77	9,47	5,69
6 m	21,58	24,67	25,38	23,37	19,36	14,20	9,56	6,43
7 m	21,43	23,96	24,29	22,20	18,43	13,77	9,73	7,17
8 m	21,22	23,27	23,28	21,17	17,63	13,44	9,94	7,88
9 m	20,97	22,60	22,36	20,25	16,97	13,21	10,20	8,57
10 m	20,69	21,96	21,52	19,44	16,41	13,06	10,48	9,22
11 m	20,40	21,35	20,76	18,74	15,94	12,97	10,78	9,84
12 m	20,09	20,78	20,07	18,12	15,56	12,94	11,09	10,43
13 m	19,78	20,24	19,45	17,59	15,26	12,95	11,41	10,97
14 m	19,46	19,74	18,90	17,13	15,02	13,00	11,73	11,47
15 m	19,16	19,28	18,40	16,74	14,83	13,07	12,04	11,94
16 m	18,86	18,85	17,96	16,41	14,69	13,17	12,34	12,37
18 m	18,29	18,11	17,23	15,90	14,53	13,41	12,90	13,12
20 m	17,79	17,49	16,67	15,55	14,48	13,68	13,41	13,73
22 m	17,35	17,00	16,25	15,33	14,50	13,95	13,85	14,23
24 m	16,97	16,60	15,95	15,20	14,58	14,21	14,23	14,62
26 m	16,65	16,29	15,73	15,13	14,68	14,46	14,55	14,93
28 m	16,39	16,06	15,58	15,11	14,79	14,67	14,81	15,16

Tabella 16. Temperatura del terreno a diverse profondità in funzione del tempo rilevate dalle fibre ottiche e riferite al pozzo 4 (periodo giugno-dicembre 2021)

	POZZO 4 (dati fibre ottiche)								
	01-giu	01-lug	01-ago	01-set	01-ott	01-nov	01-dic	31-dic	
Profondità	151	181	212	243	273	304	334	365	MEDIA
0 m (fibre)	24,27	34,92	35,97	31,04	27,22	17,73	8,41	10,62	23,77
2 m (fibre)	24,46	32,54	34,67	30,45	26,70	18,73	11,56	11,67	23,85
4 m (fibre)	18,99	22,42	25,39	25,25	24,61	21,80	18,96	16,91	21,79
6 m (fibre)	18,63	18,96	19,75	20,23	20,82	20,98	20,53	20,14	20,01
8 m (fibre)	19,69	19,43	19,20	19,21	19,36	19,54	19,44	19,59	19,43
10 m (fibre)	19,81	19,60	19,40	19,26	19,23	19,21	19,00	19,06	19,32
12 m (fibre)	19,49	19,35	19,25	19,13	19,11	19,08	18,84	18,85	19,14
14 m (fibre)	19,21	19,08	19,01	18,91	18,93	18,92	18,68	18,69	18,93
16 m (fibre)	19,15	19,00	18,88	18,79	18,78	18,78	18,54	18,55	18,81
18 m (fibre)	19,31	19,04	18,85	18,73	18,71	18,69	18,46	18,47	18,78
20 m (fibre)	19,20	18,88	18,71	18,56	18,54	18,50	18,26	18,26	18,61
22 m (fibre)	18,70	18,50	18,39	18,29	18,28	18,27	18,04	18,05	18,31
24 m (fibre)	18,30	18,20	18,15	18,07	18,09	18,10	17,88	17,90	18,09
26 m (fibre)	18,11	18,06	17,99	17,94	17,98	17,99	17,77	17,79	17,96
28 m (fibre)	18,01	17,96	17,90	17,86	17,90	17,91	17,70	17,72	17,87

Osservando la Figura 15, l'andamento della temperatura in funzione della profondità riferita ai 6 mesi rispecchia quanto visto in precedenza, raggiungendo una stabilità di circa 15 °C oltre i 18 m di profondità. Al contrario, le temperature effettivamente misurate dalle fibre ottiche a diverse profondità, nello stesso periodo, evidenziano un comportamento del tutto diverso. Dai 6 m di profondità sembrerebbe non risentirsi più delle fluttuazioni climatiche stagionali, e la curva tende ad appiattirsi già da 8-10 m di profondità, attestandosi ad una temperatura di circa 19 °C. Alla stessa profondità, la temperatura – tenendo conto delle sole variazioni climatiche stagionali – si attesta a circa 16 °C. Questa differenza di circa 3 °C in più potrebbe essere spiegata con la possibile presenza di una massa fluida calda che si infila nei terreni con moto verso la superficie (idrotermalismo). Al fine di verificare o smentire tale ipotesi, sono stati analizzati anche i profili di temperatura in funzione della profondità dei pozzi 1, 2 e 3 (Tabella 17).

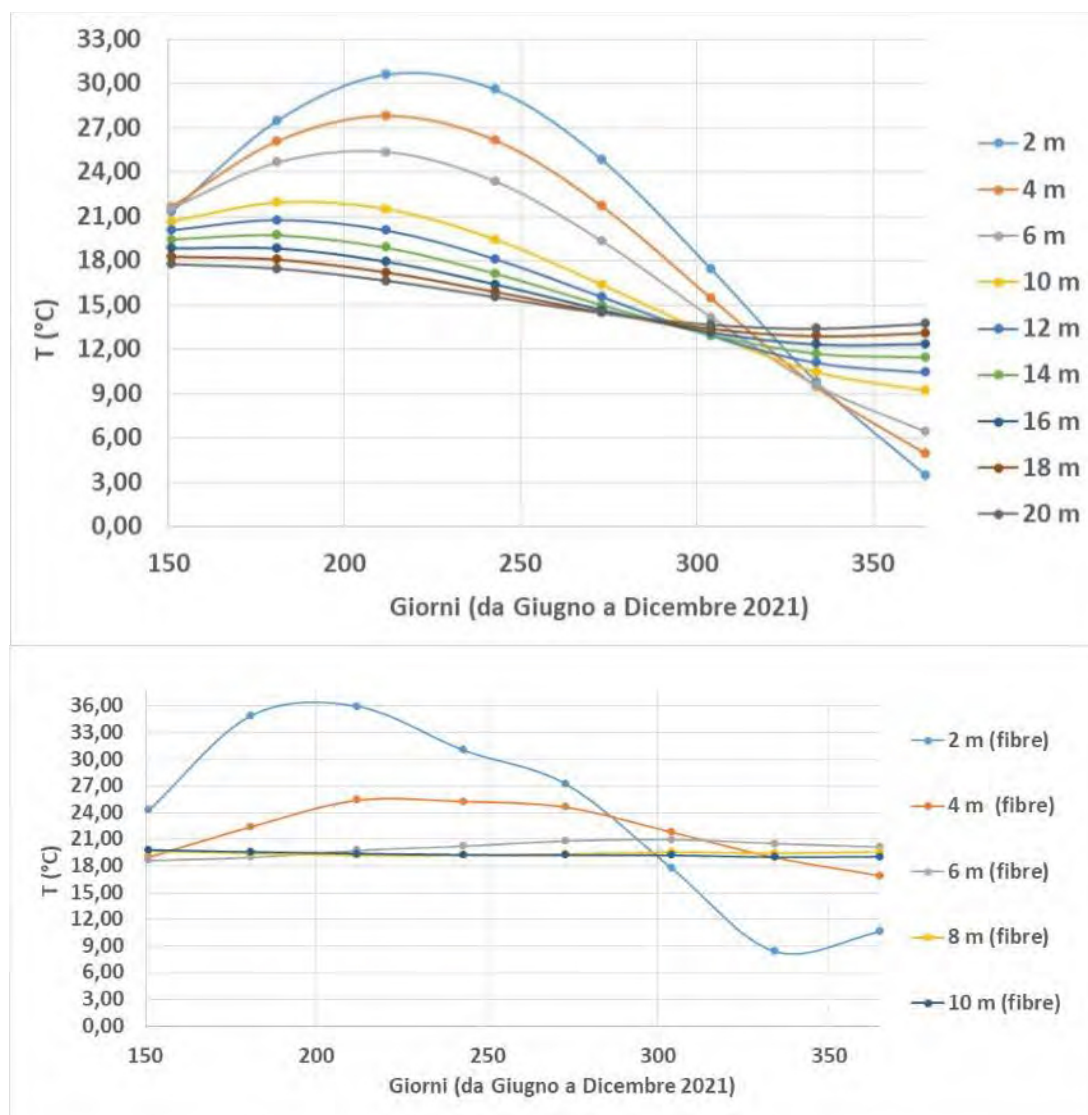


Figura 15. Confronto tra le temperature del terreno a diverse profondità in funzione del tempo e quelle corrispondenti misurate dalle fibre ottiche nel pozzo 4 (periodo giugno-dicembre 2021)

La Figura 16 mostra anche in questo caso la stabilizzazione della temperatura, tra 8 e 10 m di profondità, per i tre pozzi considerati. Nel pozzo 1, la temperatura media registrata in corrispondenza di tale livello stratigrafico si attesta intorno a 17 °C, nel pozzo 2 a 18 °C e nel pozzo 3 a 20 °C. Da tali evidenze, non è da escludere l'ipotesi che la zona del campo geosonde possa essere interessata da circolazione di fluidi caldi provenienti dalla falda basale, che infiltrandosi nelle lave fratturate raggiungano gli strati più superficiali del sottosuolo. Lo stato di fratturazione delle lave, la presenza di ossidi di Fe e Mn e di leucite analcimizzata avvalorerebbero tale ipotesi.

Tabella 17. Temperatura del terreno a diverse profondità in funzione del tempo misurate dalle fibre ottiche nei pozzi 2,3 e 4 (periodo giugno-dicembre 2021)

Profondità	POZZO 1												POZZO 2												POZZO 3											
	6	7	8	9	10	11	12	6	7	8	9	10	11	12	6	7	8	9	10	11	12															
0 m	21,10	29,92	26,14	25,70	19,29	14,40	10,63	25,71	30,85	31,52	26,65	19,05	14,61	9,89	27,69	33,23	34,13	28,86	20,69	15,75	10,88															
2 m	21,74	29,32	25,82	25,09	19,10	14,62	11,21	25,10	30,10	31,04	26,41	19,54	15,58	11,41	28,05	33,34	34,38	29,06	20,72	15,60	10,74															
4 m	18,17	22,83	24,09	23,59	20,84	17,69	15,17	19,71	23,36	25,79	24,39	21,99	19,28	16,73	27,77	32,58	33,93	28,48	20,67	16,11	11,63															
6 m	16,35	17,17	18,82	19,05	19,29	18,64	17,45	17,08	17,84	19,06	19,60	19,91	19,53	18,58	21,20	24,84	27,44	26,03	23,56	20,74	17,99															
8 m	17,17	17,15	17,21	17,29	17,56	17,71	17,60	17,72	17,71	17,69	17,84	18,08	18,19	18,23	18,25	19,23	20,48	20,94	21,27	20,97	20,14															
10 m	17,76	17,65	17,41	17,40	17,41	17,36	17,33	18,21	18,10	17,94	17,84	17,84	17,74	17,74	18,93	19,01	19,03	19,11	19,37	19,52	19,55															
12 m	17,88	17,73	17,54	17,52	17,50	17,39	17,30	18,17	18,07	17,99	17,87	17,85	17,71	17,64	19,40	19,34	19,20	19,02	19,03	18,97	18,93															
14 m	17,78	17,64	17,49	17,49	17,50	17,40	17,31	17,93	17,87	17,82	17,74	17,75	17,62	17,56	19,23	19,21	19,15	18,95	18,93	18,81	18,71															
16 m	17,69	17,57	17,43	17,43	17,45	17,36	17,28	17,77	17,71	17,67	17,60	17,63	17,52	17,47	18,93	18,94	18,92	18,75	18,75	18,65	18,55															
18 m	17,64	17,53	17,40	17,40	17,42	17,34	17,26	17,69	17,63	17,58	17,52	17,55	17,44	17,39	18,72	18,74	18,71	18,55	18,57	18,48	18,38															
20 m	17,57	17,49	17,37	17,37	17,39	17,31	17,24	17,72	17,64	17,56	17,49	17,51	17,40	17,34	18,70	18,68	18,60	18,45	18,46	18,36	18,26															

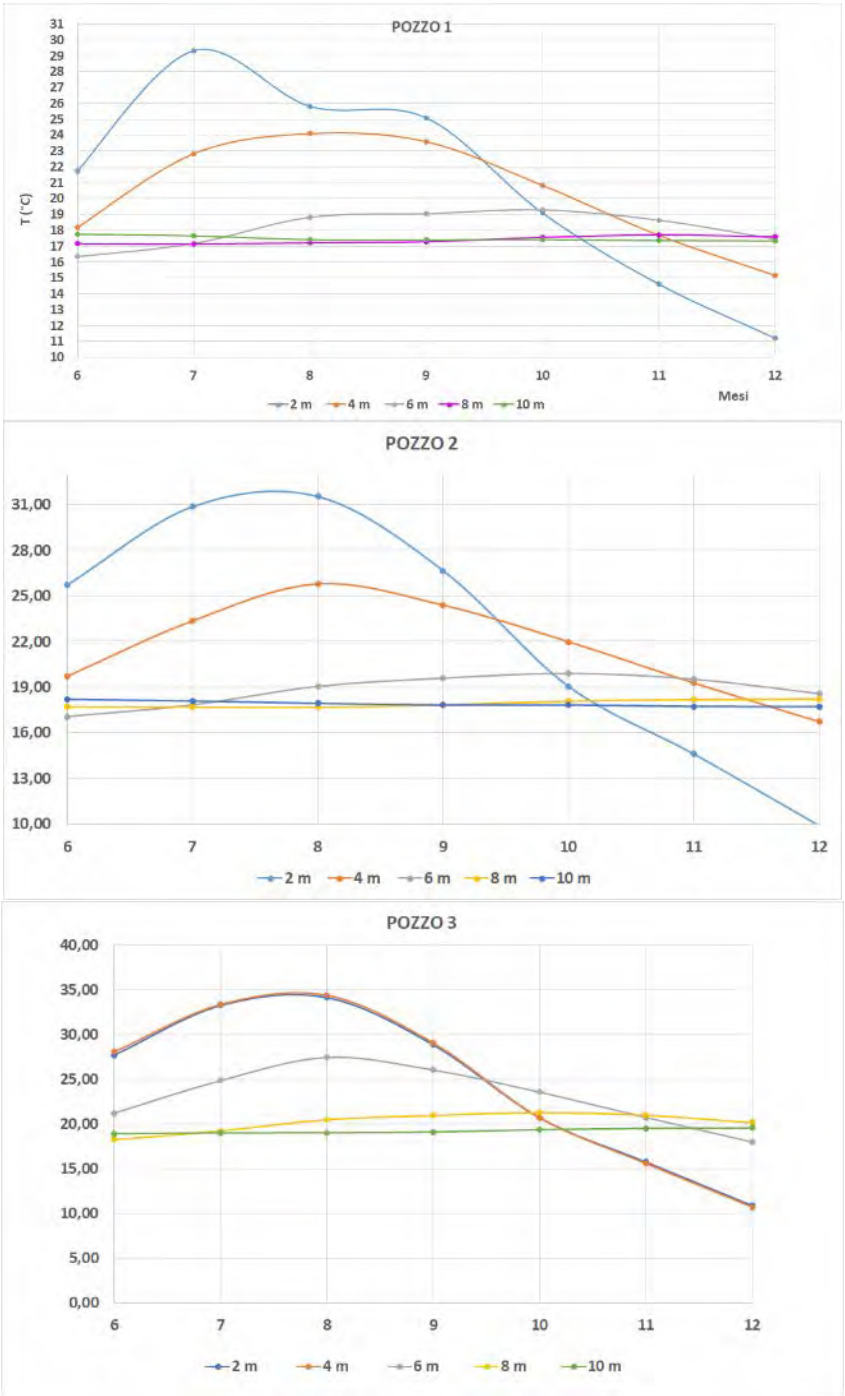


Figura 16. Andamento delle curve di temperatura nei pozzi 1, 2 e 3 in funzione della profondità (periodo giugno-dicembre 2021)

3.1.1 Temperature del terreno nelle condizioni di progetto

È necessario determinare le temperature del terreno in condizioni di progetto, in corrispondenza quindi del mese più freddo e più caldo in cui si verificano rispettivamente i carichi termici e frigoriferi di progetto. Per una data profondità media di installazione d , nota la diffusività termica α è possibile calcolare la temperatura di progetto del terreno attraverso le seguenti equazioni (3) e (4):

- Determinazione della temperatura adimensionale $\theta'_g(d, T_0)$ del terreno nella stagione di riscaldamento in corrispondenza del giorno T_0 in cui si verifica il minimo di temperatura dell'aria esterna (14 febbraio):

$$\theta'_g(d, T_0) = - \text{Exp} \left[-d \cdot \left(\frac{\pi}{365 \cdot \alpha} \right)^{1/2} \right] \cos \left[\frac{2\pi}{365} \left(- \frac{d}{2} \left(\frac{365}{\pi \cdot \alpha} \right)^{1/2} \right) \right] \quad (3)$$

- Determinazione della temperatura adimensionale $\theta'_g(d, T_0 + 224)$ del terreno nella stagione di raffreddamento in corrispondenza del giorno $T_0 + 224$ in cui si verifica il massimo di temperatura dell'aria esterna (12 agosto):

$$\theta'_g(d, T_0 + 224) = - \text{Exp} \left[-d \cdot \left(\frac{\pi}{365 \cdot \alpha} \right)^{1/2} \right] \cos \left[\frac{2\pi}{365} \left(224 - \frac{d}{2} \left(\frac{365}{\pi \cdot \alpha} \right)^{1/2} \right) \right] \quad (4)$$

Si procede quindi al calcolo delle temperature medie mensili. In particolare, occorre calcolare le temperature del terreno $\theta_{s,L}$ e $\theta_{s,H}$ minima e massima rispettivamente nelle condizioni di picco a partire dai valori precedentemente determinati:

$$\theta_{s,L} = \theta_g(d, T_0) \cdot A_{\theta,s} + \theta_M \quad [^\circ\text{C}] \quad (5)$$

$$\theta_{s,H} = \theta_g(d, T_0 + 224) \cdot A_{\theta,s} + \theta_M \quad [^\circ\text{C}] \quad (6)$$

dove:

- la grandezza θ_M è pari a 15,60 °C;
- la grandezza $A_{\theta,s}$ è pari a 18,81 °C.

Tali assunzioni sono accettabili se si considera che la temperatura del terreno abbia un'evoluzione sinusoidale analoga a quella dell'aria esterna e che l'effetto dell'irraggiamento solare sia trascurabile.

Dall'esame dei dati della Tabella 18, la temperatura più bassa e più alta dell'anno nel giorno di progetto si rileva a 2 m di profondità dal piano campagna. Nel profilo verticale di temperatura relativo al 14 febbraio, il terreno registra la stessa temperatura dell'aria esterna a circa 24 m di profondità. Per quanto riguarda il giorno più caldo, la temperatura di circa 16 °C si registra a minore profondità (circa 11 m).

Tabella 18. Temperatura del terreno a diverse profondità nel giorno più freddo e più caldo del 2021

Profondità (m)	Temperatura giorno più freddo (14 Febbraio 2021)	Profondità (m)	Temperatura giorno più caldo (12 Agosto 2021)
2	0,56	2	25,67
3	2,25	3	23,94
4	3,79	4	22,44
5	5,21	5	21,12
6	6,51	6	19,98
7	7,68	7	19,00
8	8,74	8	18,16
9	9,69	9	17,44
10	10,54	10	16,84
11	11,31	11	16,34
12	11,98	12	15,92
13	12,58	13	15,58
14	13,10	14	15,30
15	13,56	15	15,09
16	13,96	16	14,92
18	14,60	18	14,70
20	15,07	20	14,61
22	15,41	22	14,60
24	15,63	24	14,65
26	15,78	26	14,72
28	15,86	28	14,82

4 Andamento della temperatura superficiale e determinazione dei corrispondenti flussi termici

Interpolando graficamente i valori di temperatura dei quattro pozzi è possibile ricostruire il profilo termico del sottosuolo al variare della coordinata spaziale piana, ovvero della distanza tra i pozzi 2, 3 e 4. Nel grafico in Figura 17 sono state messe a confronto le temperature dei pozzi, da giugno a dicembre 2021, a una profondità di 6 m. In ascissa 0 sono riportati i dati relativi al pozzo 2, in ascissa 9 quelli riferiti al pozzo 3 e a 21 m le temperature del pozzo 4.

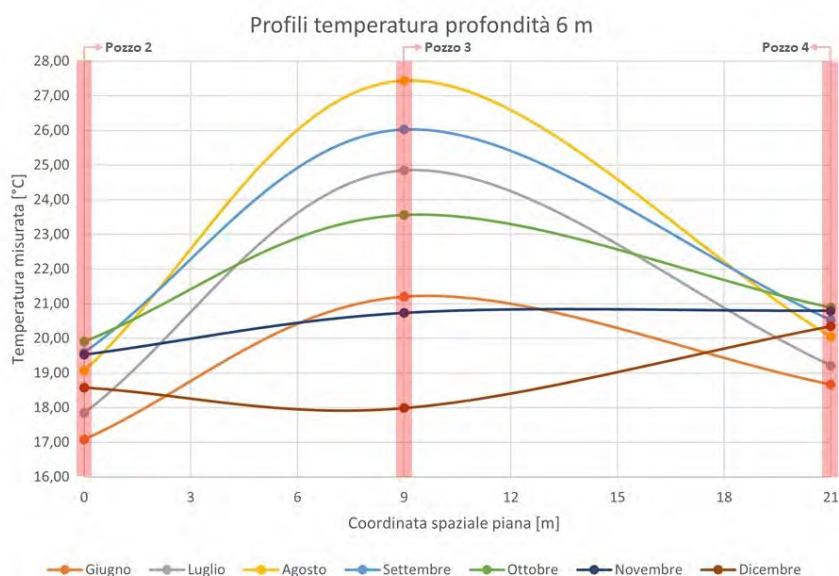


Figura 17. Andamento della temperatura mensile alla profondità di 6 m in coordinata spaziale piana

In prossimità del pozzo 3 le curve di temperatura presentano un massimo per quasi tutto il periodo temporale considerato. In particolare, si osserva un aumento di temperatura tra giugno e agosto, mese in cui la

temperatura raggiunge il suo massimo assoluto (27,44 °C). Successivamente, la temperatura diminuisce fino a un minimo di 18 °C in dicembre, valore nettamente inferiore rispetto a quelli registrati nei pozzi adiacenti, rispettivamente 18,58 °C nel pozzo 2 e 20,35 °C nel pozzo 4. È plausibile che la risalita di fluidi caldi nel pozzo 3 sia più marcata rispetto agli adiacenti ed è dipendente dalla ricarica dell'acquifero, che generalmente avviene nei mesi estivi. Infatti, la temperatura minima nel pozzo 3 si presenta nel mese di Dicembre, mentre quella dei pozzi 2 e 4 nel mese di Giugno. Questo diverso comportamento in un arco di tempo relativamente breve (si possono osservare variazioni dell'ordine del grado centigrado di mese in mese), può confermare l'ipotesi della risalita di acque calde dal sottosuolo in corrispondenza del pozzo 3, che a loro volta svolgono un'azione di mitigazione nel terreno circostante.

Dal confronto con i grafici relativi alle profondità 8, 10 e 12 m è possibile osservare come questo effetto si mitighi gradualmente fino ad annullarsi completamente (Figure 18, 19 e 20).

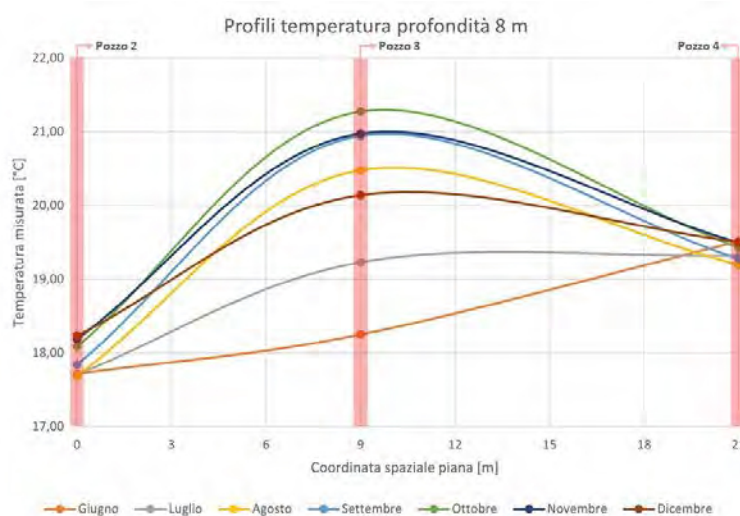


Figura 18. Andamento della temperatura mensile alla profondità di 8 m in coordinata spaziale piana

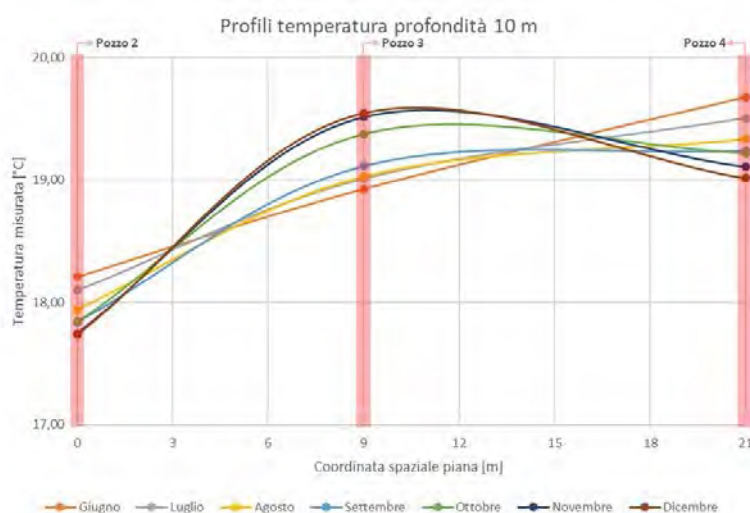


Figura 19. Andamento della temperatura mensile alla profondità di 10 m in coordinata spaziale piana

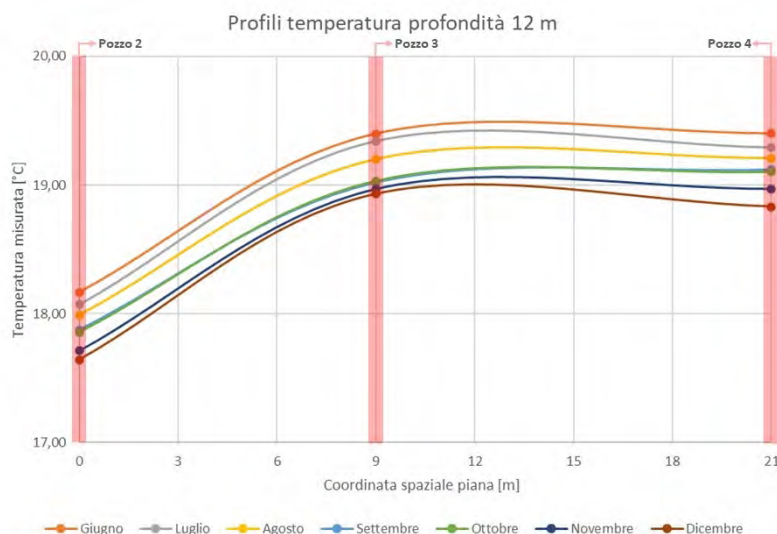


Figura 20. Andamento della temperatura mensile alla profondità di 12 m in coordinata spaziale plana

Per la determinazione dei flussi superficiali sono stati considerati i pozzi 2, 3 e 4, in quanto il pozzo 1 è soggetto a fenomeni di ombreggiamento e quindi non idoneo per la determinazione del flusso dovuto all'irraggiamento solare.

Per il calcolo dei flussi termici sono state considerate le conducibilità termiche delle rispettive litologie e le temperature medie mensili dei pozzi alle profondità esaminate.

Fino a circa 6 m dal piano campagna si risente dell'apporto solare. Con l'aumento della profondità si possono individuare due flussi diversi, uno fino a 10 m e l'altro da 12 m a 22 m, che interessa l'intero spessore delle lave. Il flusso superficiale più elevato si osserva nel pozzo 3, nell'intervallo 6-10 m (Tabella 19).

Per stimare il contributo dell'apporto solare si considera la media del flusso termico, dal piano campagna fino a 6 m di profondità, dei pozzi 2 e 4, pari a $1,26 \text{ W/m}^2$. Alla stessa profondità il flusso termico calcolato per il pozzo 3 è nettamente inferiore ($0,44 \text{ W/m}^2$) per via della mitigazione dei due flussi ($0,82 \text{ W/m}^2$), l'uno superficiale dovuto all'irraggiamento solare e l'altro prodotto dalla risalita dei fluidi caldi. Il flusso termico che interessa l'intero spessore delle lave (da 12 a 22 m) è in linea con l'andamento della superficie piezometrica e il verso di scorrimento della falda. Infatti, il flusso termico va via via diminuendo dal pozzo 4 al pozzo 2 in quanto le masse d'acqua della falda basale costituita dal Lago di Bracciano confluiscono verso i due fossi che costeggiano il Centro, il Fosso dell'Arrone e il Fosso della Casaccia.

Tabella 19. Valori dei flussi superficiali nel pozzo 2, 3 e 4 [W/m^2]

	POZZO 2	POZZO 3	POZZO 4
da 0 a 6 m	1,2	0,44	1,32
fino a 10 m	0,53	1,79	0,42
da 12 m a 22 m	0,04	0,08	0,1

5 Dati di precipitazione

L'accesso ai dati di precipitazione, rilevati dai pluviometri all'interno del C. R. ENEA-Casaccia, ha reso possibile definire le medie mensili di precipitazione e i giorni più piovosi del mese, per il 2021 (Tabella 20).

Tabella 20. Medie mensili precipitazione e giorni più piovosi del mese (anno 2021)

	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Medie mensili precipitazione	0,63	1,21	0,03	0,21	0,18	0,87	7,07	2,83
Giorni più piovosi (Giugno-Dicembre)	11	6	26	24	17	6	3	8

Sono stati quindi considerati i valori di temperatura ogni 2 m del pozzo 4, in corrispondenza dei giorni più piovosi del mese, riferiti all'anno 2021 (Tabella 21).

Da 16 m a 22 m, la temperatura mostra un andamento differente rispetto ai due tratti adiacenti (intervalli di profondità maggiore e minore), presentando valori più elevati soprattutto nei mesi estivi (Figura 21). Ciò a supporto dell'ipotesi avanzata precedentemente sulla presenza di una massa d'acqua in tale intervallo stratigrafico. Temperature maggiori si riscontrano nei mesi estivi in cui la falda freatica basale si ricarica (Figura 22), probabilmente dovute a fenomeni di risalite idrotermali, dalla falda basale attraverso le fratture nelle lave, fino a giungere in prossimità della superficie.

Tabella 21. Valori di temperatura nel pozzo 4 nei giorni più piovosi del mese (anno 2021)

z	POZZO 4							
	11-mag	06-giu	26-lug	24-ago	17-set	06-ott	03-nov	08-dic
0	21,18	24,01	31,02	34,00	28,30	21,54	16,40	7,08
2	20,16	24,04	30,26	33,00	28,10	22,85	17,85	10,44
4	17,50	19,54	24,66	26,50	25,02	24,18	21,61	18,38
6	18,70	18,65	19,59	20,38	20,56	20,87	20,96	20,48
8	19,93	19,63	19,26	19,27	19,25	19,40	19,52	19,48
10	19,92	19,77	19,47	19,35	19,20	19,23	19,20	19,02
12	19,58	19,47	19,30	19,25	19,08	19,13	19,07	18,86
14	19,29	19,18	19,05	19,02	18,88	18,93	18,89	18,70
16	19,29	19,12	18,92	18,88	18,75	18,79	18,75	18,57
18	19,60	19,25	18,91	18,83	18,68	18,72	18,67	18,47
20	19,53	19,13	18,77	18,69	18,50	18,53	18,48	18,28
22	18,86	18,66	18,44	18,40	18,24	18,29	18,24	18,06
24	18,30	18,29	18,19	18,17	18,04	18,10	18,07	17,90
26	18,08	18,11	18,04	18,03	17,93	18,00	17,97	17,80
28	17,97	18,00	17,95	17,95	17,84	17,92	17,89	17,72
30	17,93	17,95	17,89	17,89	17,79	17,86	17,85	17,67
32	17,87	17,89	17,84	17,85	17,74	17,81	17,79	17,63
34	17,84	17,87	17,80	17,81	17,71	17,79	17,76	17,60
37	17,80	17,83	17,77	17,77	17,68	17,75	17,73	17,57
39	17,79	17,82	17,75	17,75	17,66	17,73	17,72	17,56
41	17,77	17,80	17,73	17,73	17,64	17,72	17,70	17,53
43	17,78	17,81	17,72	17,73	17,63	17,72	17,68	17,52
45	17,82	17,82	17,73	17,72	17,62	17,69	17,67	17,51
47	17,92	17,87	17,75	17,74	17,64	17,71	17,68	17,50
49	17,93	17,88	17,75	17,74	17,63	17,71	17,68	17,51
51	17,88	17,86	17,75	17,74	17,64	17,71	17,68	17,51
53	17,80	17,81	17,74	17,73	17,64	17,71	17,68	17,52
55	17,87	17,86	17,77	17,76	17,67	17,74	17,71	17,55
57	17,92	17,90	17,79	17,79	17,69	17,77	17,74	17,57
59	17,93	17,91	17,81	17,80	17,71	17,78	17,75	17,59
61	17,92	17,92	17,80	17,81	17,71	17,79	17,76	17,59
63	17,94	17,92	17,83	17,83	17,73	17,81	17,78	17,61
65	17,95	17,94	17,85	17,85	17,74	17,82	17,79	17,63
67	17,98	17,97	17,88	17,87	17,77	17,85	17,82	17,64
69	18,00	17,99	17,90	17,90	17,79	17,87	17,83	17,67
71	18,03	18,02	17,92	17,92	17,82	17,90	17,87	17,71
73	18,07	18,06	17,96	17,96	17,86	17,94	17,91	17,74
75	18,14	18,13	18,03	18,01	17,93	18,00	17,97	17,82
77	18,21	18,19	18,09	18,09	17,99	18,07	18,04	17,88
79	18,27	18,26	18,17	18,16	18,07	18,15	18,13	17,97
81	18,28	18,30	18,23	18,24	18,17	18,25	18,23	18,08
83	18,40	18,44	18,38	18,38	18,32	18,42	18,39	18,25
85	18,61	18,65	18,58	18,59	18,52	18,61	18,59	18,44

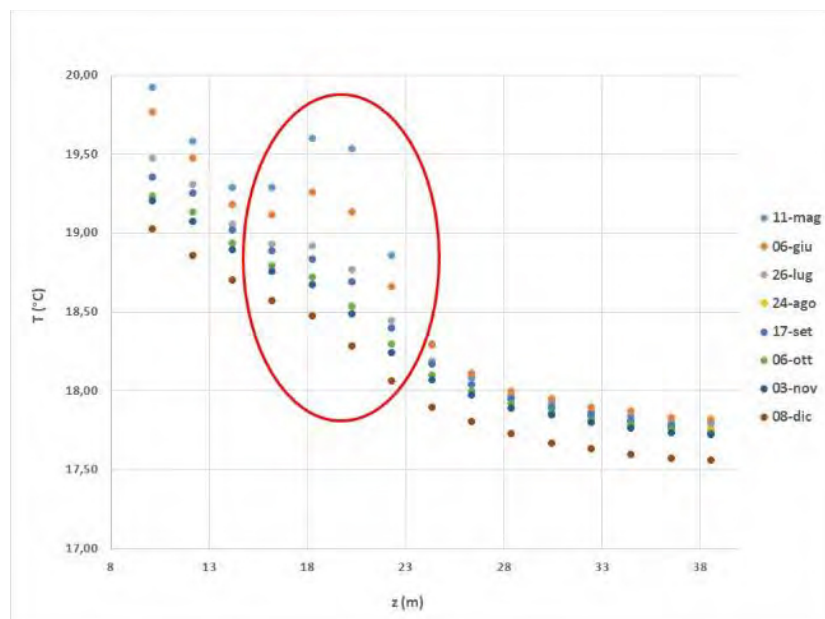


Figura 21. Andamento delle temperature nel pozzo 4 nei giorni più piovosi del 2021

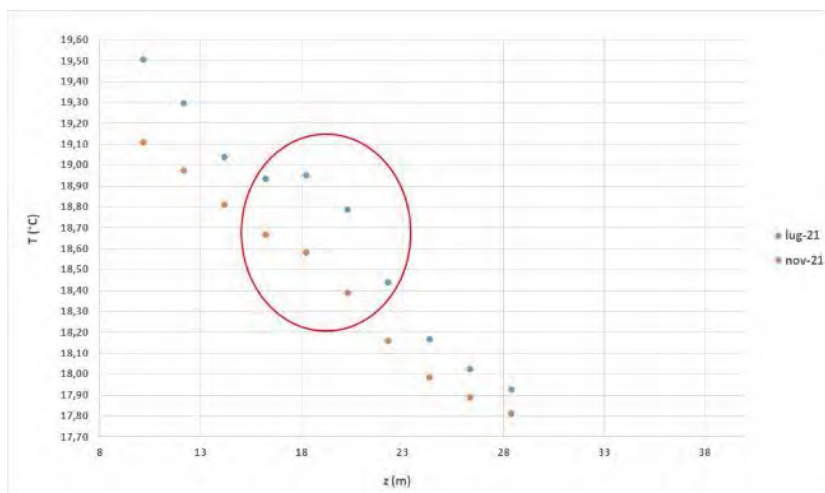


Figura 22. Andamento delle temperature nel mese più e meno piovoso del 2021

6 Calcolo della resistenza termica equivalente dello scambiatore a terreno (R_b)

In questo paragrafo si vuole determinare la resistenza termica equivalente della sonda geotermica relativa all'interfaccia tra fluido termovettore e parete della perforazione (R_b).

Dalla letteratura, il coefficiente R_b è dato dalla somma delle seguenti tre resistenze termiche:

- 1- resistenza termica del tubo in cui viene fatto scorrere il fluido R_{pp} ;
- 2- resistenza termica del materiale di riempimento (interfaccia tubo terreno) R_{gr} ;
- 3- resistenza termica dell'eventuale tubo esterno R_t .

Pertanto, si può affermare che:

$$R_b = R_{pp} + R_{gr} + R_t \quad (7)$$

dove:

$$R_{pp} = \frac{\left[\frac{1}{2\pi\lambda_{pp}} \ln\left(\frac{d_e}{d_i}\right) + \frac{1}{\pi \cdot d_i \cdot h_i} \right]}{N \text{ tubi}} \quad (8)$$

con:

d_e : diametro esterno del tubo [m];

d_i : diametro interno del tubo [m];

λ : conducibilità termica del materiale del tubo [W/(m K)];

h_i : coefficiente di scambio termico per convezione all'interno del tubo [W/(m² K)];

N: numero dei tubi che compongono lo scambiatore di calore. Per scambiatore a singola U è pari a 2; per lo scambiatore a doppia U è pari a 4.

La resistenza termica del materiale di riempimento, valida per lo scambiatore di calore a terreno del tipo a doppia U, si calcola come segue [4]:

$$R_{gr} = \frac{1}{2\pi\lambda_{gr}} \left[\ln\left(\frac{D_b}{D_e}\right) - \frac{3}{4} + \left(\frac{D}{D_b}\right)^2 - \frac{1}{4} \ln\left(1 - \left(\frac{D}{D_b}\right)^8\right) - \frac{1}{2} \ln\left(\frac{\sqrt{2} D}{d_e}\right) - \frac{1}{4} \ln\left(\frac{2D}{d_e}\right) \right] \quad (9)$$

dove:

D_b : diametro della perforazione [m];

d_e : diametro esterno della tubazione [m];

D : interasse tra i tubi (distanza centro-centro dei tubi) [m].

λ_{gr} conduttività termica del materiale di riempimento [W/(m K)].

$$R_t = \frac{1}{2\pi\lambda_t} \ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right) \quad (10)$$

dove:

D_e : diametro esterno del tubo [m];

D_i : diametro interno del tubo [m];

λ_t : conduttività termica del materiale del tubo [W/(m K)].

Nel nostro caso il termine R_t ha valore nullo in quanto non è presente il tubo esterno della perforazione (casing).

La Tabella 22 riporta i parametri considerati nel caso studio e i valori di R_{pp} e R_{gr} . In conclusione, si ottiene un valore di resistenza termica equivalente della sonda geotermica relativa all'interfaccia tra fluido termovettore e la parete della perforazione pari a 0,0328 mK/W.

Tabella 22. Calcolo R_{pp} e R_{gr} al caso studio

d_e	0,032	m	λ_{gr}	1,2	W/mK
d_i	0,026	m	D_b	0,15	m
h_i	1.864	W/m ² K	d_e	0,032	m
$\lambda_{polietilene}$	0,38	W/mK	D	0,072	m
N_{tubi}	4		R_{gr}	0,009452	
R_{pp}	0,023395				

6.1 Calcolo delle resistenze termiche efficaci del terreno

Le resistenze termiche del terreno circostante la geosonda sono di tipo impulsivo e sono suddivise in funzione della durata dell'impulso stesso [3]. La resistenza termica R_{ga} è riferita ad un impulso annuale, quando cioè il terreno ha raggiunto un nuovo livello di stabilità nello scambio termico (uno o più anni). La resistenza termica R_{gm} è riferita ad un impulso mensile, in corrispondenza dello scambio termico medio nel mese di progetto. La resistenza termica R_{gd} è riferita ad un impulso giornaliero, in corrispondenza allo scambio termico di picco nelle ore di progetto.

Per mettere in relazione il tempo che definisce l'impulso di scambio con le caratteristiche geometriche dello scambiatore di calore e le proprietà del terreno, si utilizza la seguente relazione nella quale viene definito il numero di Fourier [3]:

$$Fo = \frac{4\alpha g T}{D_b^2} \quad (11)$$

dove:

α_g : diffusività del terreno [m^2/s];

T: periodo di durata dell'impulso considerato [s];

D_b : diametro della perforazione, espresso in [m].

L'impulso considerato per il calcolo della resistenza termica equivalente annuale ha durata pari a 3650 giorni (10 anni), in quanto si assume che in tale lasso di tempo si stabilizza il flusso termico scambiato con il terreno. Per il calcolo della resistenza termica equivalente mensile è stato considerato un impulso pari a 30 giorni. L'impulso considerato per il calcolo della resistenza termica equivalente giornaliera è stato posto pari a 0,25 giorni (6 ore).

In funzione delle durate dei tre impulsi (Tabella 23) sono stati definiti i tre numeri di Fourier (12), (13) e (14):

Tabella 23. Durate dei tre impulsi

		Giorni	
Impulso annuale	T_1	3650	10 anni
Impulso mensile	T_2	3680	1 mese
Impulso giornaliero	T_f	3680,25	6 ore

$$Fo_1 = \frac{4\alpha g (T_f - T_1)}{D_b^2} \quad (12)$$

$$Fo_2 = \frac{4\alpha g T (T_f - T_2)}{D_b^2} \quad (13)$$

$$Fo_f = \frac{4\alpha g T f}{D_b^2} \quad (14)$$

Per ogni numero di Fourier ricavato con le relazioni (11) (12) e (13) si calcola il corrispondente G-Factor mediante la relazione (15) (soluzione della sorgente cilindrica di [5]):

$$G = 0,0758 \times \ln(Fo) + 0,1009 \quad (15)$$

Le tre resistenze termiche equivalenti del terreno sono state calcolate con le seguenti relazioni:

$$R_{ga} = \frac{G_f - G_1}{\lambda g} \quad (16)$$

$$R_{gm} = \frac{G_1 - G_2}{\lambda g} \quad (17)$$

$$R_{gd} = \frac{G_2}{\lambda g} \quad (18)$$

dove:

G_f : G-Factor relativo al numero di Fourier Fo_f ;

G_1 : G-Factor relativo al numero di Fourier Fo_1 ;

G_2 : G-Factor relativo al numero di Fourier Fo_2 ;

λ_g : conduttività termica equivalente del terreno [W/(m K)].

Nel caso studio, considerando una diffusività termica del terreno pari a 0,04 m²/giorno e un diametro della perforazione di 0,15 m sono stati calcolati i tre numeri di Fourier (Tabella 24).

Tabella 24. Calcolo dei tre numeri di Fourier riferiti al caso studio

F ₀₁	215,1111
F ₀₂	1,777778
F _{0f}	26170,67

Successivamente, è stato calcolato il valore di G-Factor e i relativi valori delle resistenze termiche equivalenti (Tabella 25).

Tabella 25. Calcolo delle tre G-Factor e delle tre resistenze termiche equivalenti (annuale, mensile e giornaliera)

G ₁	0,508034	R _{ga}	0,300772
G ₂	0,144513	R _{gm}	0,300431
G _f	0,871968	R _{gd}	0,119432

7 Assemblaggio del circuito di prova

Per la difficoltà a reperire parte della componentistica dell'impianto, causata dalla situazione pandemica, la conclusione e l'assemblaggio del circuito di prova è tutt'ora in corso anche se in fase di ultimazione. Ciò ha comportato il monitoraggio dei valori termometrici all'interno dei pozzi a circuito spento. Quando l'impianto sarà in funzione sarà possibile capire se il terreno può essere considerato un serbatoio termico, e se il calore stoccato durante i mesi estivi possa essere utilizzato durante i mesi invernali. Per tale motivo, lo schema impiantistico risulta un sistema chiuso che considera solo lato sonde e lato chiller, non prevedendo l'allaccio ad alcuna utenza. Lo scopo è monitorare il campo termico tridimensionalmente nell'intorno dell'area occupata dalle geosonde, la sua evoluzione nell'arco delle stagioni, e non ultimo l'efficienza nel tempo del sistema sonde-terreno.

Di seguito sono descritte le linee di distribuzione, la componentistica idraulica e il sistema di trasferimento di calore terreno-chiller. Il circuito è composto da componenti e accessori che permettono il corretto funzionamento, da organi che completano l'impianto in termini di sicurezza, e da apparecchi di regolazione, di manutenzione, per adattarsi alla variazione delle portate o delle temperature simulate richieste. Le tubazioni di raccordo, dalle sonde geotermiche alla centrale termica, sono in polietilene DN32. I vantaggi sono legati al costo contenuto, alla durata e alla facilità di posa. Inoltre, essendo costituite dello stesso materiale delle sonde geotermiche, non è necessaria un'interfaccia particolare per il raccordo dei componenti. Le tubazioni hanno una pressione nominale pari a 16 bar. Nella centrale termica si sono utilizzati tubazioni in rame, preferibile per il minor ingombro delle saldature, maggiore flessibilità di utilizzo e di modificabilità successivamente alla posa, rispetto al materiale plastico. Inoltre, i raccordi presenti sono flangiati o filettati. I due collettori, quello di mandata e di ritorno, a 8 diramazioni, sono anch'essi in rame.

7.1 Componenti dell'impianto

Le componenti costitutive dell'impianto sono:

- 2 collettori a 8 diramazioni: utilizzati per connettere insieme le sonde geotermiche in un unico sistema. Sono equipaggiati con valvole a sfera da 1" (DN32, PN30), sul circuito di ritorno dalle sonde geotermiche (Figura 23 a, b) e con regolatori di portata, sul circuito di mandata alle sonde geotermiche (Figura 24).
- 8 valvole per regolazione di portata (IMI Hydronic Engineering - STAD DN10-50, PN25) sul collettore di mandata alle sonde geotermiche (Figura 25). Range di esercizio: - 20 °C/120 °C. Permettono di

regolare la portata nell'impianto, incrementando la resistenza del circuito stesso. A tre vie: l'azione regolante determina un by-pass del circuito regolato. Filetto a norma ISO 228. Lunghezza filetto a norma ISO 7/1.



a)



b)

Figura 23. a) Valvole a sfera per intercettazione sul collettore di ritorno dalle sonde; b) particolare della valvola a sfera

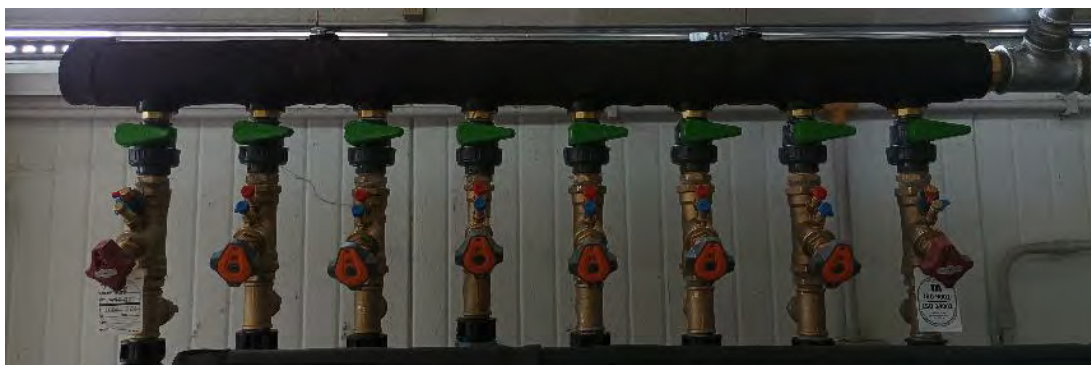


Figura 24. Valvole di regolazione di portata (collettore di mandata alle sonde)

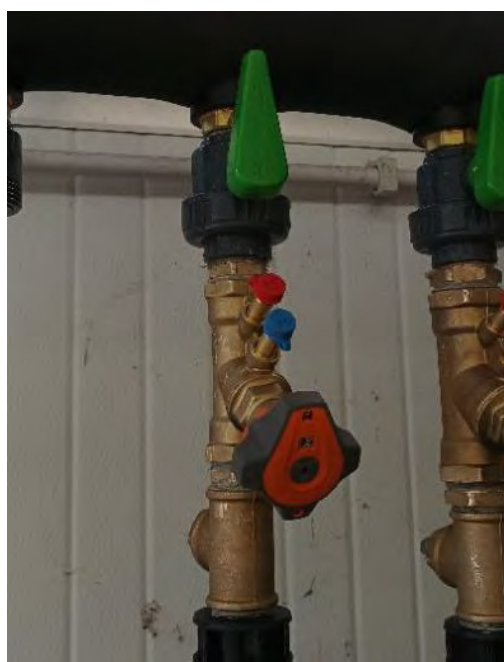


Figura 25. Valvola per regolazione di portata

- Chiller e Pompa di circolazione (Figura 26):** il chiller, installato all'esterno, è un refrigeratore ad acqua condensato ad aria con ventilatori assiali. Prodotto dalla IDROSISTEMI s.r.l., modello Life 61, inverter scroll, fluido di refrigerazione R410A. La struttura è a telaio portante, realizzata in Peraluman e lamiera zincata con supporti antivibranti in gomma. La viteria è in acciaio inox. I compressori sono di tipo scroll ermetico trifase completi di protezione interna (Klixon) e resistenza carter, montati su supporti antivibranti in gomma. I ventilatori sono di tipo assiale a basso numero di giri e profilo alare speciale, sono direttamente accoppiati a motori a rotore esterno con grado di protezione IP44. Una rete antinfortunistica è posta sull'uscita dell'aria. Il condensatore è costituito da una batteria alettata con tubi di rame e alette in alluminio. L'evaporatore è a piastre saldobrasate in acciaio inox AISI 316, inserito all'interno del serbatoio. Il quadro elettrico include il sezionatore generale con dispositivo bloccoporta, fusibili, filtro antisturbo, teleruttore compressore e teleruttore pompa. E' dotato di microprocessore per la gestione automatica di alcune funzioni, quali: regolazione della temperatura dell'acqua, protezione antigelo, temporizzazione del compressore, reset allarmi, contatto cumulativo d'allarme per segnalazione remota, commutazione locale o remota del ciclo raffreddamento, visualizzazione su display per: ciclo di funzionamento, compressore richiesto/attivato, temperatura dell'acqua di ritorno dell'impianto, set temperatura e differenziali impostati, codice allarmi. Dispositivo elettronico proporzionale per l'attenuazione del livello sonoro, ottenuta mediante regolazione in continuo della velocità di rotazione dei ventilatori; tale dispositivo permette anche il funzionamento dell'unità in raffreddamento fino a temperature dell'aria esterna di -20 °C. Il circuito frigorifero è realizzato in tubo di rame, include: filtro disidratatore, valvola d'espansione e pressostato di alta e riarmo manuale. Il circuito idraulico è realizzato in tubo di rame, include: pressostato differenziale acqua, valvola di sfiato aria manuale, serbatoio coibentato, pompa di circolazione, valvola di sicurezza (3 bar), manometro, rubinetto di carico e scarico impianto e vaso di espansione inserito all'interno del serbatoio. Nella Tabella 26 sono riportati i dati tecnici generali, mentre nella Tabella 27 i dati elettrici del chiller (modello 61) e della pompa di circolazione. Da notare (Figura 27) che per una portata d'acqua pari a 0,73 l/s corrisponde una prevalenza utile della pompa di circolazione pari a 123 kPa.



Figura 26. Chiller e pompa di circolazione integrata

Tabella 26. Dati tecnici generali del chiller (modello 61) e della pompa di circolazione

MODELLO		15	18	21	25	31	41	51	61	71	81
Raffreddamento:											
Resa nominale	kW	4,2	5,1	6,4	7,5	8,6	10,4	12,2	15,3	18,6	20,5
Riscaldamento:											
Resa nominale	kW	5,0	6,0	8,0	8,7	10,3	12,4	14,8	18,8	21,9	24,4
Compressori:											
Numero	n°	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Tipo		<----- Rotary ----->						<----- Scroll ----->			
Potenza ass. in raffreddamento	kW	1,3	1,6	2,0	2,4	2,8	3,4	3,7	4,7	5,7	6,3
Potenza ass. in riscaldamento	kW	1,6	1,9	2,5	2,8	3,4	4,1	4,5	5,9	6,8	7,7
Ventilatori:											
Portata aria	m³/s	0,97	0,97	0,89	0,89	0,82	0,82	1,94	1,78	1,78	1,64
N° x Potenza installata	n°x kW	1x0,14	1x0,14	1x0,14	1x0,14	1x0,14	1x0,14	2x0,14	2x0,14	2x0,14	2x0,14
Carica refrigerante:											
Versione solo raffreddamento	kg	1,6	1,7	1,9	2,1	2,3	2,4	3,6	4,0	4,4	4,5
Versione a pompa di calore	kg	1,8	1,9	2,1	2,3	2,4	2,5	4,1	4,5	4,9	5,0
Carica olio:											
	kg	0,4	0,4	0,6	0,6	0,7	1,0	1,6	1,6	1,6	1,6
Circuito idraulico:											
Portata acqua	l/s	0,20	0,24	0,31	0,36	0,41	0,50	0,58	0,73	0,89	0,98
Potenza nom. pompa	kW	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,30	0,30	0,30	0,30
Prevalenza utile	kPa	52	48	35	45	41	42	140	123	90	80
Contenuto d'acqua serbatoio	l	<----- 25 ----->						<----- 50 ----->			
Vaso d'espansione	l	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
Attacchi idraulici	"G	3/4"	3/4"	3/4"	3/4"	3/4"	3/4"	1"	1"	1"	1"
Pesi *:											
Peso di trasporto	Kg	96	98	106	110	118	120	192	194	196	198
Peso in esercizio	Kg	121	123	131	135	143	145	242	244	246	248

Tabella 27. Dati elettrici del chiller (modello 61) e della pompa di circolazione

MODELLI		15	18	21	25	31	41	51	61	71	81
Massima potenza assorbita	kW	1,9	2,3	2,8	2,9	3,7	4,1	4,8	5,6	6,6	7,3
Corrente max allo spunto	A	39	43	62	62	79	86	58	61	78	106
Corrente massima assorbita	A	7	9	11	13	15	19	12	13	15	17
Pot. nomin. motore ventilatore	kW	<----- 1 x 0,14 ----->						<----- 2 x 0,14 ----->			
Corrente. nomin. motore ventilat.	A	<----- 1 x 0,58 ----->						<----- 2 x 0,58 ----->			
Pot. nomin. motore pompa	kW	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,30	0,30	0,30	0,30
Corrente. nomin. motore pompa	A	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,98	2,5	2,5	2,5	2,5
Alimentazione elettrica	V/~ /Hz	<----- 230/1/50 ±5% ----->						<--- 400/3+N/50 ±5% --->			
Alimentazioni ausiliari	V/~ /Hz	<----- 230-24/1/50 ±5% ----->									

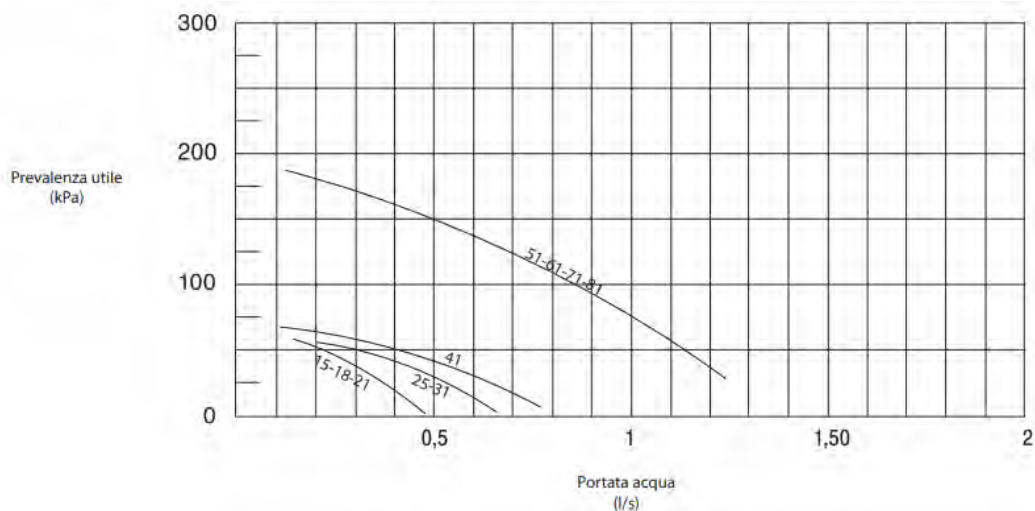


Figura 27. Curva prevalenza utile della pompa in funzione della portata

Nel circuito idraulico si prevede di utilizzare una miscela di acqua e glicole per prevenire la formazione di ghiaccio sia negli scambiatori dei refrigeratori che nei serbatoi del circuito. L'impiego di miscele a basso punto di congelamento produce una variazione delle principali caratteristiche termodinamiche delle unità. In Tabella 28 i parametri relativi alla percentuale in volume del glicole.

Tabella 28. Percentuale di glicole etilenico in peso (%)

Percentuale di glicole etilenico in peso (%)	0	10	20	30	40	50
Temp.di congelamento (°C)	0	-4,5	-9,5	-15,5	-21,5	-32,5
Coefficiente correttivo resa frigorifera	1	0,975	0,95	0,93	0,91	0,88
Coeff. corr. potenza assorbita compressore	1	1,01	0,995	0,990	0,985	0,975
Coefficiente correttivo portata miscela	1	1,01	1,04	1,08	1,14	1,20
Coefficiente correttivo prevalenza utile	1	0,96	0,95	0,92	0,84	0,78

- **Giunti antivibranti:** Sono giunti in gomma posizionati immediatamente a contatto con il chiller (Figura 28 a, b), che limitano la propagazione delle vibrazioni indotte dalle macchine in movimento, evitando stress meccanici alle tubazioni e riducendo il rumore.



a)



b)

Figura 28. a) giunto antivibrante collegato al chiller, b) particolare del giunto antivibrante

- **Serbatoio di accumulo** (Figura 29): serbatoio cilindrico ad asse verticale coibentato con capienza di 500 L. Il serbatoio è fornito con 8 fori filettati per tubazioni di impianto e accessori. Come schematizzato in Figura 30, presenta 2 accessi per le tubazioni lungo la parete verticale, 3 accessi per sonde di misura, sempre lungo la parete verticale, posizionate a diverse altezze per garantire l'omogeneità della misura, infine un accesso sulla testa del serbatoio per la valvola di sfiato dell'aria.



Figura 29. Serbatoio da 500 L installato

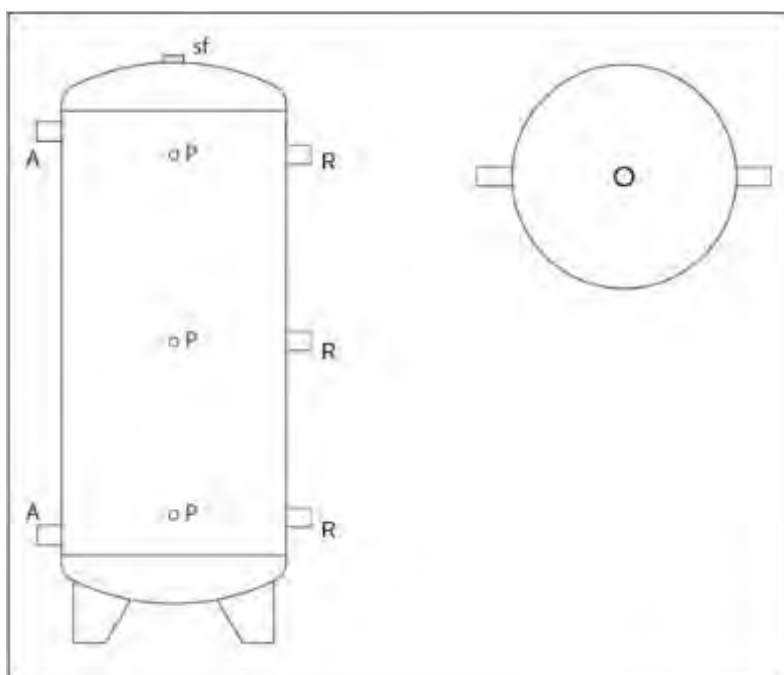


Figura 30. Schema del serbatoio di accumulo con uscite per componenti e tubazioni

Il serbatoio installato presenta inoltre 3 fori per il posizionamento di tre serpentine di scambio a resistenza elettrica della potenza di circa 15 kW totali.
La Tabella 29 riporta le condizioni di esercizio del serbatoio di accumulo.

Tabella 29. Condizioni di esercizio del serbatoio di accumulo

Pressione d'esercizio	bar 6
Temperatura d'esercizio	-10/+50°C

- 3 riscaldatori elettrici (Figura 31): riscaldatori elettrici ad immersione con termostato di regolazione e di sicurezza, ognuno di potenza pari a 5 kW e con alimentazione di tipo trifase a 400 V ($\pm 10\%$) in corrente alternata con frequenza di 50/60 Hz. Sono utilizzati come fonte ausiliaria di riscaldamento all'interno di bollitori o serbatoi di accumulo. Prodotti da Cordivari®.



Figura 31. Resistenza elettrica inserita nel serbatoio di accumulo

- Vaso di espansione (Figura 32): compensa, mediante una membrana elastica, la variazione di pressione conseguente ai cambiamenti di temperatura nei circuiti chiusi. Il serbatoio ha una capacità di 35 litri.

La pressione nominale di esercizio è di 1,5 bar; tuttavia, per l'impianto in oggetto viene settata a 1 bar attraverso la valvola di sfogo posta in testa al serbatoio. La pressione massima di funzionamento è 5 bar, mentre il valore massimo raggiunto durante i test prima della rottura della membrana è 7,2 bar. Il campo di applicazione è compreso tra -10 e 100 °C.



Figura 32. Vaso di espansione

7.2 Strumenti di controllo

- 8 sensori di portata DN15 e 1 sensore di portata DN25 sul collettore di ritorno dalle sonde (Figura 33 a, b): sono misuratori di portata elettromagnetici. Nelle Tabelle 30 e 31 si riportano i valori del flusso massimo, minimo e nominale, riferiti rispettivamente al sensore DN15 e al sensore DN25. La portata totale richiesta dall’impianto è di 2 m³/h, e per ogni coppia, bisogna assicurare una portata di 0,5 m³/h. Gli 8 sensori di portata DN15 sono collocati su ogni ramo di ritorno dalle sonde e ognuno assicura una portata massima del flusso pari a 1,5 m³/h (Figura 34 a, b). Il flussimetro DN25 è ubicato sul ramo uscente dal collettore di ritorno dalle sonde e consente un flusso massimo di 3 m³/h. Entrambi risultano appropriati alle esigenze dell’impianto.

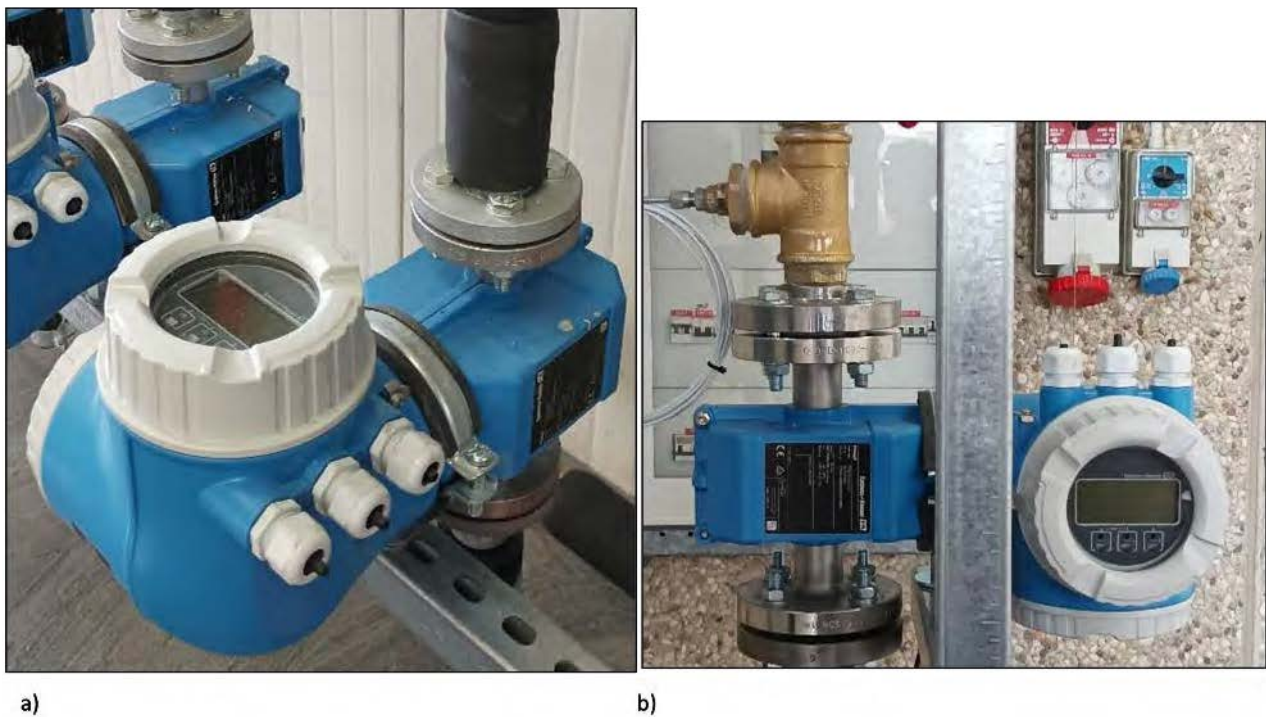


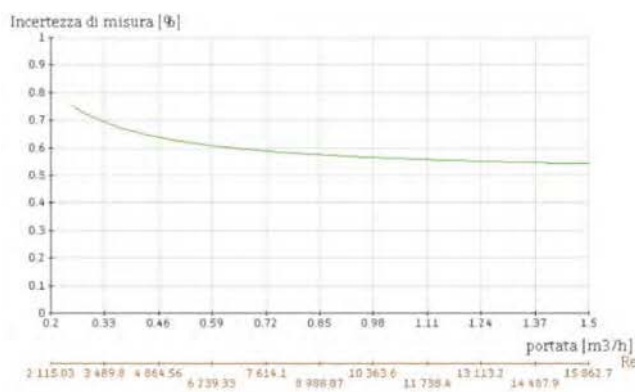
Figura 33. a) misuratore di portata DN15, b) misuratore di portata DN25

Tabella 30. Valori di flusso minimo, massimo e nominale del sensore di portata DN15

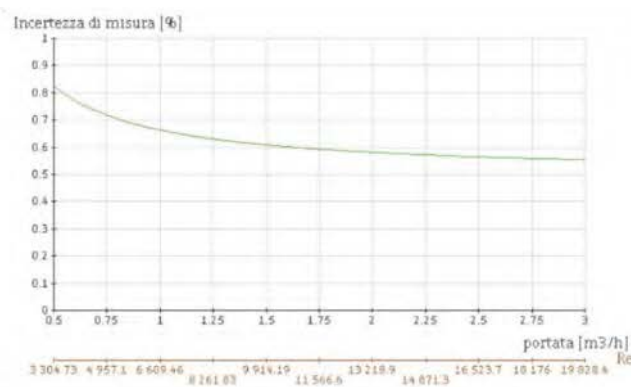
		Flusso minimo	Flusso nominale	Flusso massimo	Unità
Portata richiesta		0.25	0.5	1.5	m3/h
Velocità		0.393	0.786	2.358	m/s
Errore di misura Volume	☒	0.75	0.63	0.54	%
Errore di misura vol. maggiore precisione	☐	0.71	0.45	0.28	%
Numero di Reynolds		928	5 288	25 925	

Tabella 31. Valori di flusso minimo, massimo e nominale del sensore di portata DN25

	Flusso minimo	Flusso nominale	Flusso massimo	Unità
Portata richiesta <i>i</i>	0.5	1.5	3	m ³ /h
Velocità <i>i</i>	0.307	0.921	1.842	m/s
Errore di misura Volume <i>i</i> ☒	0.83	0.61	0.55	%
Errore di misura vol. maggiore precisione <i>i</i> ☐	0.85	0.42	0.31	%
Numero di Reynolds <i>i</i>	1 160	9 914	32 406	



a)



b)

Figura 34. Valori di incertezza in funzione della portata: a) DN15; b) DN25

- Sensori di temperatura** (Figura 35): questi sensori (tipo PT100) rilevano le temperature misurando la variazione di una resistenza in platino posta all'interno di un involucro di acciaio inox. Le sonde hanno un diametro di 3 mm e una lunghezza di 100 mm. Il valore nominale della resistenza è 100 Ohm (a 0 °C). I termistori sono prodotti da Metron s.r.l.
 Le PT100 misurano temperature nel range compreso tra -50 e 600 °C, con una accuratezza di $\pm 0,2$ °C. Il valore restituito dalla sonda è di tipo elettrico e varia tra 4 e 20 mA.
 Normativa di riferimento: Classe 1/10 DIN – IEC 751 (tolleranza $\pm (0,03 + 0,0005 (T))$)

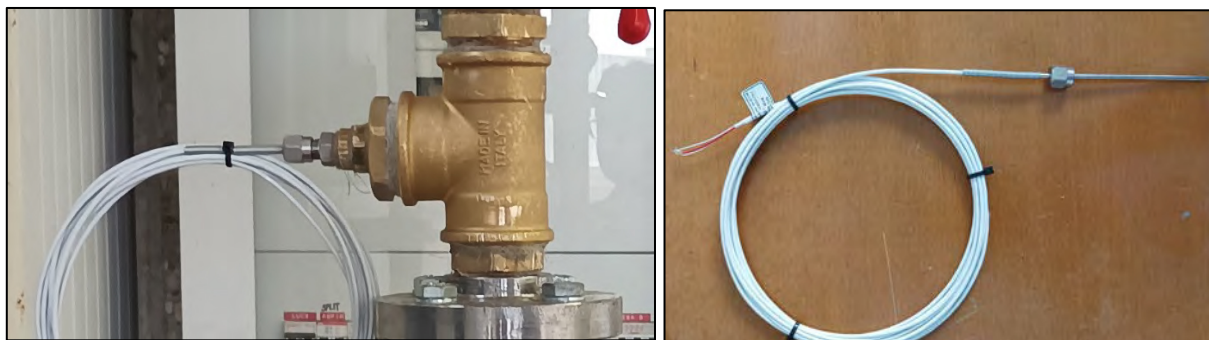


Figura 35. Sensore di temperatura PT100

- Sensori di pressione (Figura 36): tipo NAT 8252, sono prodotti da Trafag AG. Dispongono di una cella sensore con stabilità a lungo termine di tipo a pellicola sottile su acciaio con sicurezza da sovrappressione tripla. Il campo di applicazione varia tra -40 e 125 °C. Il range di misura del sensore è $0 \div 16$ bar, con sovrappressione di 48 bar e pressione di scoppio pari a 200 bar. Il valore restituito dalla sonda è di tipo elettrico e varia tra 4 e 20 mA.



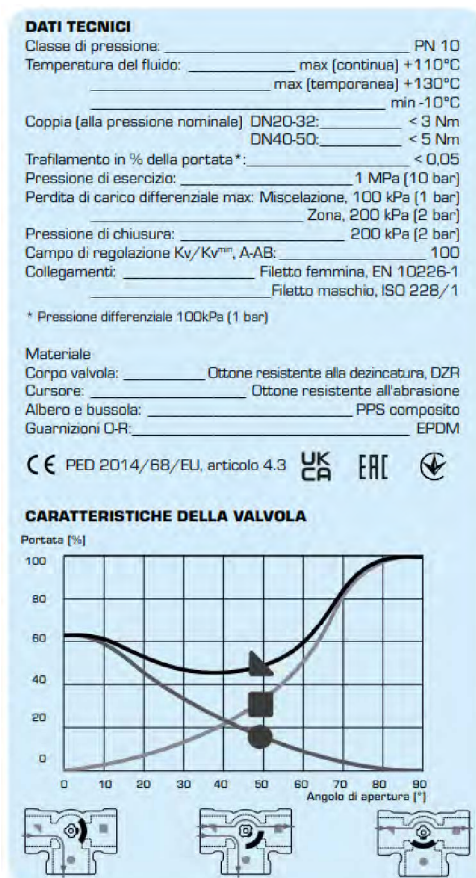
Figura 36. Sensore di pressione

- 2 valvole miscelatrici DN32 con attuatore (Figura 37): i miscelatori compatti a perdita ridotta ESBE (DN32) sono realizzati in leghe speciali di ottone che ne consentono l'utilizzo in impianti di riscaldamento e raffreddamento. Per agevolare il funzionamento manuale, le valvole sono dotate di pulsanti antiscivolo con finecorsa per un angolo di rotazione di 90° . In combinazione all'attuatore ESBE serie ARA600, le valvole VRG332 possono essere automatizzate facilmente grazie all'interfaccia tra valvola e attuatore. Nella Tabella 32 sono riportati i dati tecnici delle valvole miscelatrici installate e il diagramma che indica la portata del fluido in termini percentuali in funzione dell'angolo di apertura della valvola miscelatrice.



Figura 37. Valvola miscelatrice con attuatore

Tabella 32. Dati tecnici e caratteristiche della valvola miscelatrice installata



7.3 Schema di funzionamento dell'impianto

Di seguito viene fornita la descrizione in dettaglio dello schema dell'impianto e del suo funzionamento in opera (Figure 38, 39, 40).

Il circuito idraulico contiene acqua e glicole etilenico diluito al 10% in volume (circa 150 L). Un sistema di regolazione automatica della portata e della pressione, settato a 1 bar, garantisce la pressione sufficiente affinché l'impianto funzioni a pieno regime.

Il fluido viene inviato alla pompa di circolazione, che mette in movimento la miscela acqua-glicole. La pompa di circolazione è integrata nel chiller ed è azionabile indipendentemente dall'accensione di quest'ultimo. Il liquido circola attraverso il circuito di refrigerazione del chiller a prescindere dal fatto che lo scambio termico della macchina avvenga o no. In uscita da quest'ultima è presente un sensore di temperatura, che permette la regolazione dello scambio termico a carico della macchina.

Proseguendo lungo il circuito, troviamo la prima elettrovalvola di miscelazione, posta in un ramo con due valvole di intercettazione agli estremi, così da poterla escludere a piacimento dall'impianto.

In parallelo è presente un ramo di bypass per garantire il normale scorrimento del liquido nel caso in cui non sia necessario miscelare il fluido in uscita dal chiller.

Quando si attiva la valvola di miscelazione il fluido può seguire due strade:

- fluire direttamente nel collettore di mandata al circuito sonde;
- essere indirizzato al serbatoio di accumulo.

Il serbatoio, dotato di tre resistenze elettriche da 5 kW ognuna, è equipaggiato con un sensore di temperatura in testa e un altro sul ramo di uscita, entrambi necessari per il controllo della temperatura del fluido uscente. Parallelamente al serbatoio si trova un ramo di bypass per poter escludere l'unità dall'impianto. In entrambi i casi il fluido viene convogliato al collettore di mandata, a 8 diramazioni, ognuna delle quali è munita di un sensore per controllare che il fluido inviato ai pozzi geotermici sia alla temperatura voluta. Il singolo sensore ha la capacità di intervenire sulla valvola di miscelazione, così da riportare il valore al set-point.

Su ogni ramo uscente dal collettore di mandata al circuito sonde è ubicata una valvola di intercettazione per poter escludere il singolo circuito e, di seguito, una valvola manuale per la regolazione della portata.

Il circuito sonde si conclude al collettore di ritorno, equipaggiato in ingresso con sensori di portata su ogni ramo. Questi ultimi controllano la quantità di fluido che passa attraverso i pozzi e forniscono all'utente un'indicazione sul grado di apertura necessario delle valvole regolatrici. Subito a valle di ogni flussimetro è posto un termistore, che misura la temperatura in uscita dalle sonde e, paragonandola con quella in entrata, fornisce la quantità di calore scambiata in ogni circuito. Ogni tubazione entrante nel collettore è equipaggiata con una valvola di intercettazione.

Su entrambi i collettori è presente un sensore di pressione per monitorare eventuali perdite di carico del circuito.

In uscita dal collettore è stato posto un ulteriore sensore per controllare la temperatura del fluido in ingresso al chiller. Il sensore controlla la seconda elettrovalvola di miscelazione che regola il bypass della pompa di calore. Infine, un flussimetro controlla la portata totale fluente nell'impianto. Prima del ritorno del fluido al chiller sono posti un filtro a Y per lo spurgo delle tubazioni e un vaso di espansione per compensare le variazioni di pressione lungo l'impianto.

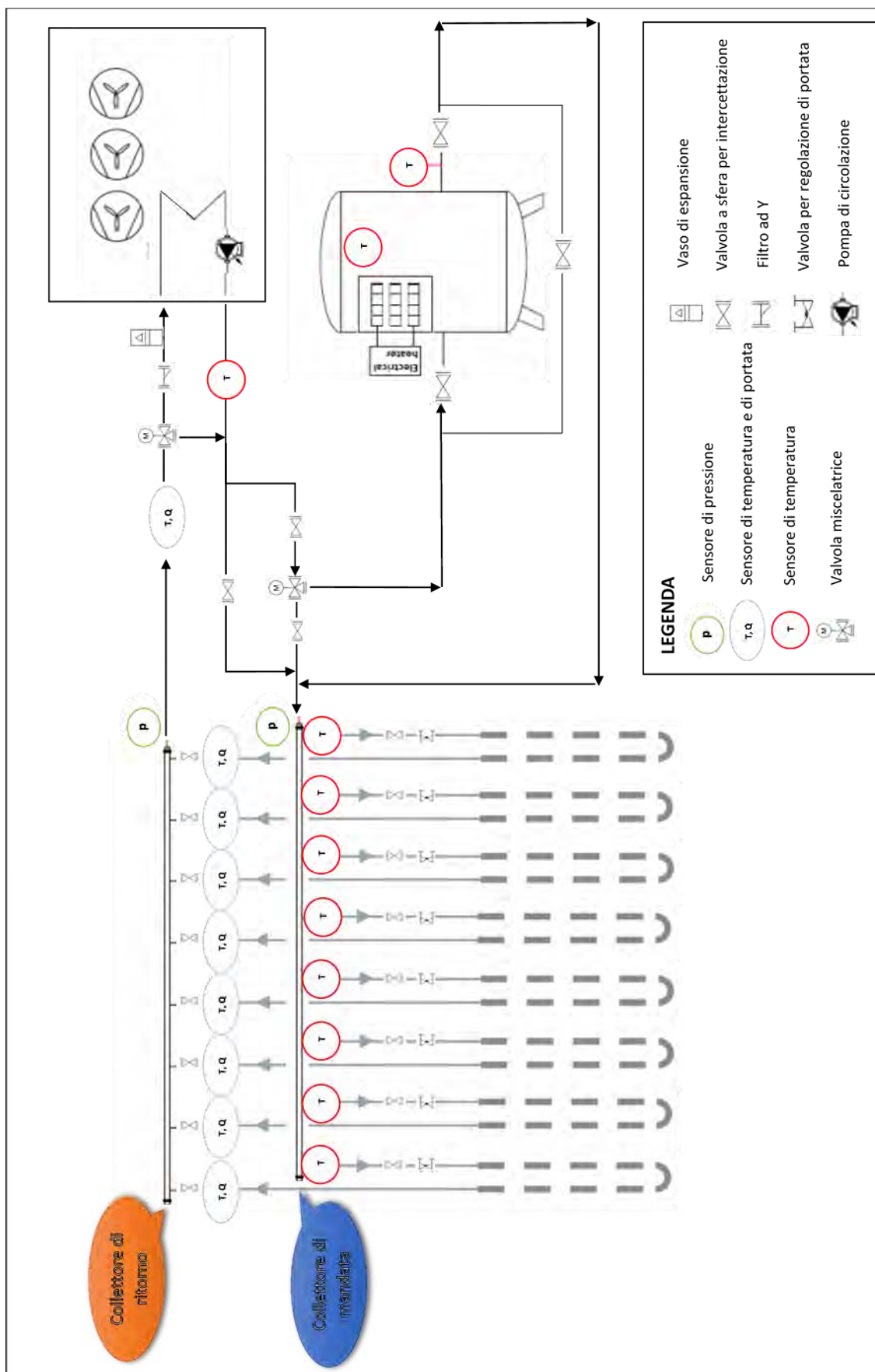


Figura 38. Schema dell'impianto realizzato



Figura 39. Collegamento delle sonde geotermiche ai due collettori e sensori di controllo



Figura 40. Chiller, serbatoio e collegamento delle sonde geotermiche ai due collettori

7.4 Controllo e monitoraggio dell'impianto

I sensori installati sull'impianto verranno collegati a schede di acquisizione (National Instruments - NI) per convertire il segnale elettrico in dati di misura. Questi dati potranno essere monitorati in ambiente LabVIEW, e sarà possibile anche gestire le componenti dell'impianto imputate al controllo di flusso e temperatura: in particolare, le resistenze del serbatoio di accumulo e la pompa di circolazione attraverso delle schede relé, e il chiller e le valvole miscelatrici attraverso segnali elettrici modulabili.

Le schede utilizzate sono le seguenti:

- NI9216 (Figura 41): modulo di input di temperatura C Series PT100 RTD a 8 canali, 400 S/s aggregato, da 0 Ω a 400 Ω —NI-9216 è un modulo di ingresso RTD (*Resistance Temperature Detector*). Ogni scheda ha alloggiamenti sufficienti per alimentare e leggere i dati di 8 PT100 contemporaneamente. Poiché sono presenti 21 sensori di temperatura, è stata prevista l'installazione di 3 schede.



Figura 41. Scheda Analog Input Temperatura NI9216

- **NI9208** (Figura 42): modulo di input di corrente C Series a 16 canali di comunicazione, 500 S/s, $\pm 21,5$ mA. Viene utilizzato per l'acquisizione dei dati analogici provenienti dai 2 sensori di pressione e dai 9 flussimetri, per un totale di 11 dati in ingresso. Non è possibile alimentare direttamente dalla scheda i sensori sopra citati, dunque sarà prevista un'alimentazione esterna.



Figura 42. Scheda Analog Input NI9208

- **NI9265** (Figura 43): modulo di output di corrente C Series a 4 canali, per l'interfaccia e il controllo di attuatori industriali ad alta velocità. Il modulo integra rilevamento loop aperto che genera un *interrupt* nel software ogni volta che viene rilevato un loop aperto e output *zeroing* per consentire una maggiore protezione e per evitare l'attivazione degli attuatori all'accensione del sistema. NI-9265 richiede alimentazione esterna e include una barriera a doppio isolamento a terra (da canale a terra) per la sicurezza e per l'isolamento dal rumore. Alla scheda NI9265 è deputato il controllo degli attuatori delle valvole di miscelazione.



Figura 43. Scheda Analog Output NI9265

- NI9485** (Figura 44): modulo digitale C Series a 8 canali, relay SSR, 60 VDC/30 Vrms, 750 mA. Permette la connessione diretta a un'ampia gamma di dispositivi industriali come motori, attuatori e dispositivi DC. Ogni canale dispone di accesso a SSR (*solid state relay*) per lo switch di segnali di tensione fino a 60 VDC/30 Vrms, con corrente di switch fino a 750 mA per canale (1,2 A su 4 canali). Ogni canale fornisce anche isolamento canale-canale.

La scheda relay è utilizzata per controllare il comando di accensione del chiller e della pompa di circolazione.



Figura 44. Scheda Relay NI9485

- cDAQ-9178** (Figura 45): chassis CompactDAQ USB a 8 slot—c. Progettato per sistemi di misura con sensori portatili, ha dimensioni compatte. Lo chassis offre la semplicità plug-and-play della tecnologia USB per misure elettriche e con sensore. Controlla anche la temporizzazione, la sincronizzazione e il trasferimento dati tra moduli I/O C Series e un host esterno.

Allo chassis saranno collegate le schede della National Instruments precedentemente descritte. Con esso è possibile controllare le schede tramite un PC in ambiente LabVIEW.



Figura 45. Chassis di alimentazione e collegamento delle schede NI

Conclusioni

Nell'anno in corso è stata effettuata la caratterizzazione termica del campo geosonde, elaborando i dati di temperatura misurati con le fibre ottiche nei 4 pozzi relativi al periodo compreso tra giugno e dicembre 2021. Per il protrarsi dell'emergenza dovuta alla pandemia da COVID-19 non è stato possibile ultimare l'assemblamento del circuito di prova entro i tempi previsti. Pertanto la caratterizzazione è stata fatta confrontando i dati rilevati nei quattro pozzi con quelli del pozzo 1 relativi al mese di maggio, in quanto il terreno risentiva ancora delle sollecitazioni indotte dal test di risposta termica (GRT).

Per un'accurata correlazione termico-stratigrafica si è resa necessaria l'analisi di dettaglio delle carote provenienti dal sondaggio geognostico, per definire spessori, cambiamenti di facies ed eventuale presenza di eteropie di facies anche all'interno della stessa litologia. La correlazione ha evidenziato anche le differenze nelle quote stratigrafiche delle litologie presenti in corrispondenza dei pozzi. In particolare, la ricognizione dell'assetto geologico-stratigrafico porta a ipotizzare la presenza di una paleovalle, successivamente colmata, nel sito in cui è stato trivellato il pozzo 3.

Non essendo disponibili i valori di conducibilità termica di ogni litotipo, si è proceduto con una valutazione sperimentale ed analitica per definire i valori corrispondenti. È risultato che, in media, lungo la verticale (70 m) essi sono all'incirca uguali al valore di conduttività medio determinato con il GRT.

Inoltre, è stata quantificata la temperatura del terreno, a diverse profondità, in funzione del tempo e della diffusività termica media sui diversi litotipi ($0,04 \text{ m}^2/\text{giorno}$), considerando una temperatura media annuale di $15,60 \text{ }^\circ\text{C}$ e un'ampiezza di oscillazione pari a $18,81 \text{ }^\circ\text{C}$. È stato così possibile determinare che fino alla profondità di 14 m si risente, in tutti e 4 i pozzi, delle fluttuazioni climatiche stagionali. Tuttavia, elaborando i dati misurati nei 4 pozzi con le fibre ottiche si assiste a uno scenario completamente differente. Infatti, la temperatura si stabilizza già tra 8 e 10 m di profondità, attestandosi a un valore medio di circa $19 \text{ }^\circ\text{C}$. Alla stessa profondità, considerando soltanto le variazioni climatiche stagionali, la temperatura è circa $16 \text{ }^\circ\text{C}$. Questa differenza di $3 \text{ }^\circ\text{C}$ potrebbe essere dovuta alla presenza di una massa fluida calda in movimento verso la superficie (risalite idrotermali).

A riprova di ciò sono stati calcolati i flussi superficiali nei pozzi 2, 3 e 4, considerando i valori di conducibilità termica di ogni litotipo e i delta di temperatura agli estremi di ogni formazione geologica. Sono stati valutati due flussi: uno superficiale dovuto all'irraggiamento solare, diretto dal piano campagna in profondità, e un secondo che, al contrario, si propaga in direzione opposta, dal basso stratigrafico verso la superficie. Il valore più elevato di flusso termico si riscontra in corrispondenza del pozzo 3 a una profondità di 10 m ($1,79 \text{ W/m}^2$), dove evidentemente la componente superficiale è molto ridotta. Ciò è dovuto alla mitigazione dei due flussi. L'evidenza di idrotermalismo è anche dimostrata dall'andamento delle temperature nel mese più piovoso e in quello più siccitoso dell'anno; infatti, nell'intervallo di profondità considerato, l'andamento della temperatura non è regolare, bensì presenta valori più alti nei mesi estivi piuttosto che in quelli invernali, del tutto prevedibile in quanto è correlato alla ricarica dell'acquifero basale.

È stata determinata la resistenza termica equivalente dello scambiatore a terreno come la somma delle resistenze legate al fluido di circolazione nelle sonde geotermiche (acqua e glicole) e del materiale di riempimento del pozzo (cemento bentonico).

L'assemblaggio del circuito di prova è in fase di ultimazione. Sono state installate le componenti principali dell'impianto, le linee di distribuzione, la componentistica idraulica e gli strumenti di controllo e monitoraggio (temperatura, pressione e portata) che permetteranno di simulare gli apporti dal/al terreno per valutarne l'inerzia termica stagionale. Lo schema impiantistico risulta un sistema chiuso che considera solo lato sonde e lato chiller, e non è previsto alcun allaccio all'utenza. Questo perché si vuole simulare il comportamento del terreno, in termini di variazione delle portate o delle temperature richieste, al fine di caratterizzare il serbatoio termico nell'arco stagionale e di comprendere se il calore stoccato durante i mesi estivi possa essere utilizzato durante i mesi invernali.

Riferimenti bibliografici

- [1] Delmastro R., Noce G. (2011) Manuale di geotermia a sonde verticali: Biblioteca Tecnica Hoepli, pp.516, ISBN 978-88-203-4539-6
- [2] Blasi A., Menichetti M. (2012) Conducibilità termica distribuita da un test di risposta termica (TRT) su una sonda geotermica. Thermal conductivity distributed from a Thermal Response Test (TRT) in a borehole heat exchanger (BHE), Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater, DOI 10.7343/AS-010-12-0027
- [3] RSE (2012) Linee Guida per la progettazione dei campi geotermici per pompe di calore
- [4] Hellström G, Sanner B. (1994) Earth energy designer: software for dimensioning of deep boreholes for heat extraction. Department of Mathematical Physics, Lund University, Sweden
- [5] Carslaw H.S., Jaeger J.C. (1959) Conduction of heat in solids. Clarendon Press, Oxford

Acronimi

DTS - Distributed Temperatures Sensor
GRT - Ground Response Test
NI - National Instruments