

A.C. VIOLANTE

Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili
Sezione Supporto Tecnico Strategico
Centro Ricerche Casaccia, Roma

M. PROPOSITO

Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al
cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Protezione e valorizzazione del territorio
e del capitale naturale
Laboratorio di Osservazioni e Misure per l'ambiente e il clima
Centro Ricerche Casaccia, Roma

G. GUIDI

Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili
Sezione Supporto Tecnico Strategico
Centro Ricerche Casaccia, Roma

R. TRINCHIERI

Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili
Divisione Produzione, Storage e Utilizzo dell'Energia
Laboratorio Ingegneria dei Processi e dei Sistemi per
la Decarbonizzazione Energetica
Centro Ricerche Casaccia, Roma

IMPIANTO GEOTERMICO SPERIMENTALE A BASSA ENTALPIA PRESSO IL C.R. ENEA-CASACCIA

Caratterizzazione termica stagionale, assemblaggio
del circuito di prova, risultati del monitoraggio

RT/2024/4/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

A.C. VIOLANTE

Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili
Sezione Supporto Tecnico Strategico
Centro Ricerche Casaccia, Roma

M. PROPOSITO

Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al
cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Protezione e valorizzazione del territorio
e del capitale naturale
Laboratorio di Osservazioni e Misure per l'ambiente e il clima
Centro Ricerche Casaccia, Roma

G. GUIDI

Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili
Sezione Supporto Tecnico Strategico
Centro Ricerche Casaccia, Roma

R. TRINCHIERI

Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili
Divisione Produzione, Storage e Utilizzo dell'Energia
Laboratorio Ingegneria dei Processi e dei Sistemi per
la Decarbonizzazione Energetica
Centro Ricerche Casaccia, Roma

IMPIANTO GEOTERMICO SPERIMENTALE A BASSA ENTALPIA PRESSO IL C.R. ENEA-CASACCIA

Caratterizzazione termica stagionale, assemblaggio
del circuito di prova, risultati del monitoraggio

RT/2024/4/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina www.enea.it

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

IMPIANTO GEOTERMICO SPERIMENTALE A BASSA ENTALPIA PRESSO IL C.R. ENEA-CASACCIA

Caratterizzazione termica stagionale, assemblaggio del circuito di prova, risultati del monitoraggio

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

Riassunto

L'attività descritta nel presente report è parte del progetto di ricerca, relativo al Piano Triennale di realizzazione 2019-2021 della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale, linea di attività 1.7 "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.

Nel terzo anno, l'attività è stata incentrata sullo studio e la caratterizzazione termica stagionale del campo geosonde. Per la difficoltà a reperire alcune componenti dell'impianto, causata dalla situazione pandemica, l'assemblaggio del circuito di prova ha subito ritardi, e quindi il monitoraggio dei valori termometrici all'interno dei pozzi è stato effettuato a circuito spento. Tutti i dati mensili di temperatura dei quattro 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. Sulla base dei dati di temperatura è stato possibile estrapolare la curva di conducibilità termica sperimentale della successione stratigrafica. Inoltre, con l'utilizzo della simulazione termica computazionale si è ricostruita 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 le temperature rilevate direttamente dalle fibre ottiche ha consentito di determinare la profondità fin dove si risente dell'irraggiamento solare nei quattro pozzi. Sono stati calcolati i valori di resistenza termica equivalente dello scambiatore a terreno, ed è stato descritto il funzionamento dell'impianto, le sue componenti, gli strumenti di controllo e di monitoraggio.

Parole chiave: Sonde geotermiche verticali, GRT (Ground Response Test), Fibre ottiche DiTeSt, Monitoraggio temperatura.

Abstract

The activity described in this report is part of the research project, related to the 2019-2021 Three-Year Implementation Plan of the National Electricity System Research, activity line 1.7 "Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali". Specifically, this activity is L.A. 3.24, contained in WP3.

In the third year, the activity focused on the study and seasonal thermal characterisation of the geosonde field. Due to the difficulty in finding part of the plant components, caused by the pandemic situation, the assembly of the test circuit was delayed and therefore the monitoring of the thermometric values inside the wells was carried out while the circuit was switched off. All monthly temperature data of the four wells were compared with the May data of well 1, as it was still affected by the temperature variations induced during the thermal response test (GRT) carried out on 15 April 2021. Based on the temperature data, it was possible to extrapolate the experimental thermal conductivity curve of the stratigraphic succession. In addition, with the use of computational thermal simulation, the alteration of the undisturbed thermal field of the ground under the action of probe-soil geo-exchange was reconstructed. Subsequently, the comparison of the annual climatic data recorded by the meteorological stations in the C.R. Casaccia with the temperatures measured directly by the optical fibres made it possible to determine the depth to which solar radiation is detected in the four wells. The equivalent thermal resistance values of the ground heat exchanger were calculated, and the functioning of the plant, its components, control, and monitoring instruments were also described.

Keywords: Vertical geothermal probes, GRT (Ground Response Test), DiTeSt Optical fibres, Temperature monitoring.

Indice

INTRODUZIONE	7
1. PROFILI DI TEMPERATURA	8
1.1. TEMPERATURE MISURATE DURANTE IL GROUND RESPONSE TEST (GRT)	8
1.2. TEMPERATURE MISURATE NEI QUATTRO POZZI DAL 1° MAGGIO AL 31 DICEMBRE 2021	10
1.2.1. Pozzo 1	10
1.2.2. Pozzo 2	11
1.2.3. Pozzo 3	13
1.2.4. Pozzo 4	14
2. SUCCESSIONE LITOSTRATIGRAFICA DI DETTAGLIO	19
2.1. CORRELAZIONE TERMICO-STRATIGRAFICA	21
2.2. ESTRAPOLAZIONE DELLA CURVA DI CONDUCIBILITÀ TERMICA	22
2.3. DETERMINAZIONE ANALITICA DELLA CURVA DI CONDUCIBILITÀ TERMICA	25
3. TEMPERATURE: DATI ED ELABORAZIONI	30
3.1. CONFRONTO TRA TEMPERATURA DELL'ARIA E TEMPERATURA NEI POZZI	30
3.2. TEMPERATURA DEL TERRENO CALCOLATA E MISURATA	33
3.2.1. <i>Temperature del terreno nelle condizioni di progetto</i>	41
3.2.2. <i>Andamento della temperatura negli strati superficiali del terreno e determinazione dei corrispondenti flussi termici</i>	43
4. CALCOLO DELLE RESISTENZE TERMICHE	47
4.1. CALCOLO DELLA RESISTENZA TERMICA EQUIVALENTE DELLO SCAMBIATORE A TERRENO (R_B)	47
4.2. CALCOLO DELLE RESISTENZE TERMICHE EFFICACI DEL TERRENO	48
5. ASSEMBLAGGIO DEL CIRCUITO DI PROVA	51
5.1. COMPONENTI DELL'IMPIANTO	51
5.2. STRUMENTI DI CONTROLLO	58
5.3. SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DELL'IMPIANTO	61
5.4. CONTROLLO E MONITORAGGIO DELL'IMPIANTO	64
6. CONCLUSIONI	68
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	69

INTRODUZIONE

Durante il terzo anno del progetto, l'attenzione si è concentrata sulla caratterizzazione termica del campo geosonde e sul sistema di monitoraggio e acquisizione dati. Come descritto in un rapporto tecnico precedente (RT/2023/23/ENEA), il campo geosonde è stato realizzato a circuito chiuso, configurazione a doppia U, con una disposizione verticale.

A causa dei ritardi nell'approvvigionamento dei componenti per la pandemia da COVID-19, l'assemblaggio del circuito di prova non è stato completato nei tempi previsti inizialmente. Tuttavia, per ridurre il ritardo, si è deciso di misurare le temperature all'interno dei pozzi a circuito spento e confrontare quindi i dati con quelli del pozzo 1 relativi al mese di maggio, in quanto il terreno era ancora influenzato dalle sollecitazioni causate dal test di risposta termica condotto un mese prima.

Inoltre, al fine di ottenere dati termometrici precisi per ciascun litotipo incontrato durante il sondaggio, è stata effettuata una valutazione aggiuntiva sulle carote ottenute dal sondaggio geognostico del pozzo 1, conservate nelle apposite cassette catalogatrici.

L'analisi della temperatura del terreno a diverse profondità nel corso del tempo e della diffusività termica media dei diversi litotipi ha mostrato che fino a una profondità di 14 m, tutti i pozzi risentono delle fluttuazioni stagionali delle temperature. Tuttavia, dai dati misurati tramite fibre ottiche, si è osservato che la temperatura si stabilizza già tra gli 8 e i 10 m di profondità, raggiungendo un valore medio di circa 19 °C. Questa differenza potrebbe essere causata dalla risalita di fluidi caldi verso la superficie.

Inoltre, sono stati calcolati i flussi termici superficiali nei pozzi, considerando i valori di conducibilità termica di ciascun litotipo e le differenze di temperatura tra le diverse formazioni geologiche. Il valore più elevato di flusso termico è stato riscontrato nel pozzo 3 a una profondità di 10 m. La resistenza termica equivalente dello scambiatore di calore del terreno è stata determinata come la somma delle resistenze dovute al fluido di circolazione nelle sonde geotermiche e al materiale di riempimento dei pozzi.

Attualmente, l'assemblaggio del circuito di prova è in fase di completamento e sono state installate le componenti principali dell'impianto, tra cui le linee di distribuzione, la componentistica idraulica e gli strumenti di controllo e monitoraggio. Lo schema impiantistico riguarda solo il lato sonde e il lato chiller e non prevede alcun collegamento all'utilizzatore finale, al fine di simulare il comportamento termico del terreno e caratterizzare il serbatoio termico nel corso delle stagioni.

1. PROFILI DI TEMPERATURA

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

Il test di risposta termica (*Ground Response Test*, GRT) è stato avviato il 12 aprile 2021 nel pozzo 1 per valutare la risposta termica del terreno, sottoposto a sollecitazione termica, e quindi poterne determinare le proprietà termotecniche, quali temperatura indisturbata, conducibilità termica (λ) e resistenza termica della sonda (R_b), considerata tra la parete del foro e il fluido di circolazione.

La prova, della durata di 72 ore, è stata eseguita imponendo al sistema sonda geotermica-terreno un flusso termico (generato con resistenze elettriche) 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 acquifere.

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/m·K). Accertata la natura vulcanica delle litologie presenti nel sottosuolo, è stata stimata una capacità termica volumica pari a 2,6 MJ/(m³·K). Il dato di resistività termica della sonda geotermica, indice della qualità dell'accoppiamento terreno-malta, è pari a 0,1204 m·K/W, valore considerato ottimo. Durante l'esecuzione del test di risposta termica è stata effettuata la misurazione contemporanea della temperatura ogni 2 m nei quattro pozzi. Il pozzo 1 raggiunge temperature molto elevate rispetto agli altri pozzi, con una media di 31,41 °C lungo il profilo verticale (Tabella 1). Al contrario, i profili di temperatura dei pozzi 2, 3 e 4, 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 – Figura 1), mostrano che questi non vengono minimamente influenzati dal test, confermando la correttezza della distanza reciproca scelta (9 metri, 12 m soltanto tra i pozzi 3 e 4) e l'assenza di fenomeni di circuitazione termica.

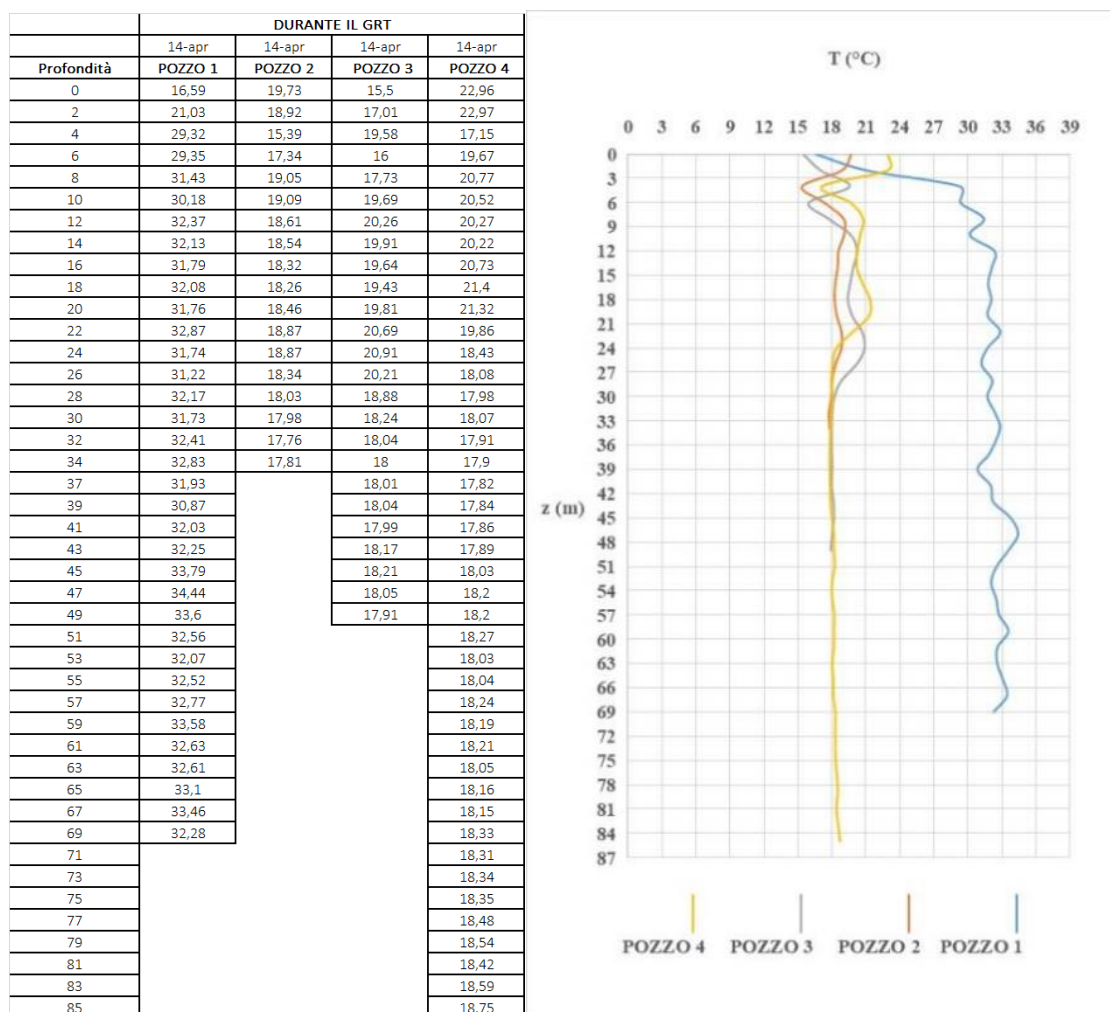


Tabella 1: Dati e profili di temperatura (°C) in ogni pozzo durante il *Ground Response Test* (GRT) nel pozzo 1

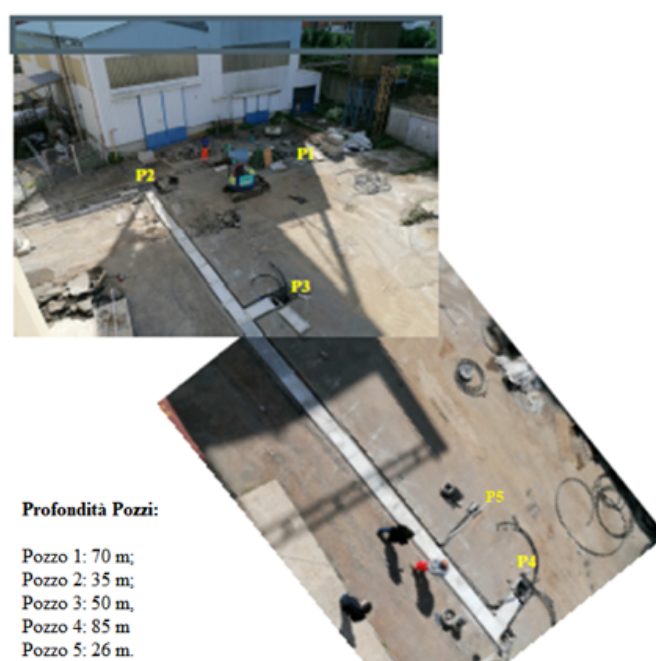


Figura 1: Vista dall'alto del campo geosonde e ubicazione dei pozzi geotermici con le relative profondità

1.2. Temperature misurate nei quattro pozzi dal 1° maggio al 31 dicembre 2021

1.2.1. Pozzo 1

La Tabella 2 riporta le temperature medie mensili misurate nel pozzo 1 dal 1° maggio al 31 dicembre 2021, mentre la Figura 2 mostra l'andamento della temperatura in funzione della profondità nello stesso intervallo temporale. Si può notare che l'influenza dovuta all'irraggiamento solare perde di importanza già a profondità limitata (< 10 m). Vedremo nel seguito che il pozzo 1 si comporta in maniera diversa rispetto agli altri tre, poiché è soggetto al fenomeno di ombreggiamento da parte di un edificio adiacente che limita l'irraggiamento solare diretto.

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

Tabella 2: Temperature (°C) medie mensili misurate nel pozzo 1 (periodo: maggio-dicembre 2021)

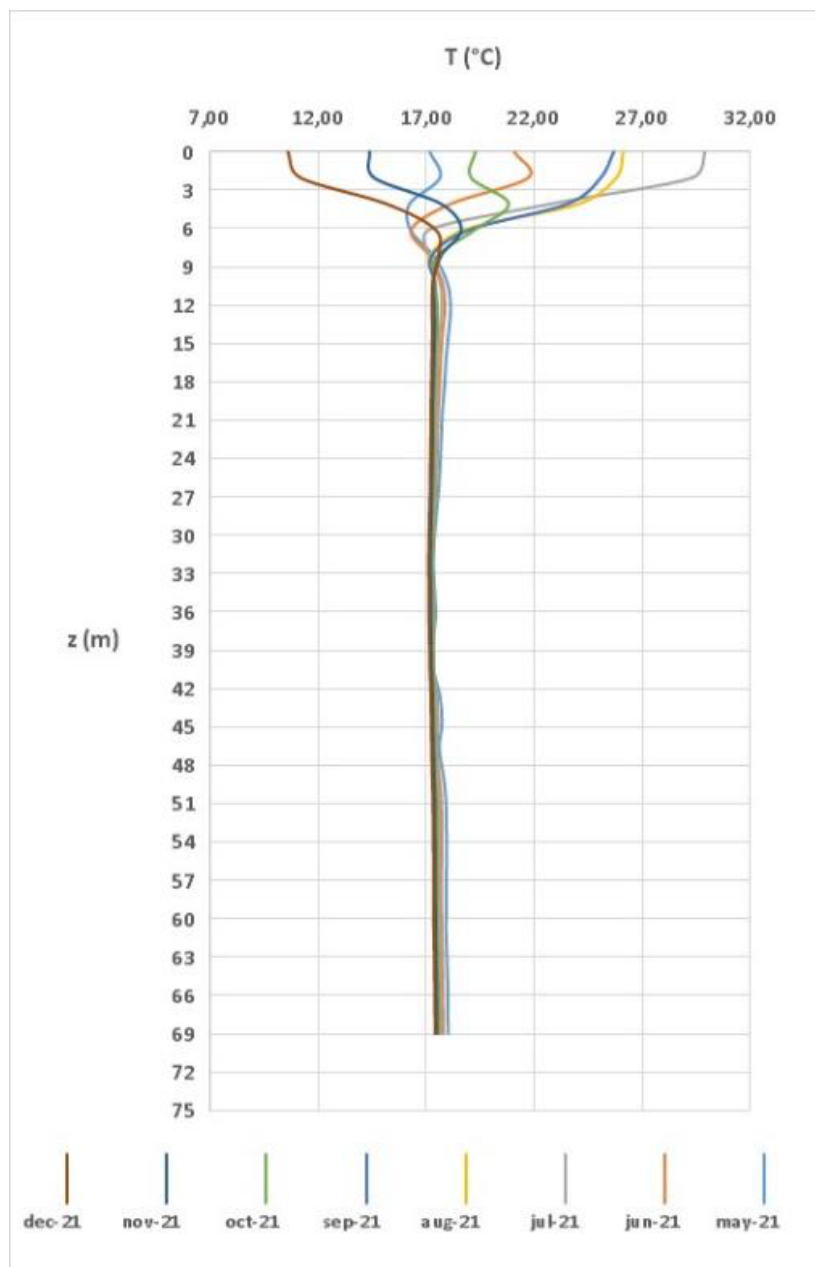


Figura 2: Profilo di temperatura nel pozzo 1. Curve medie mensili relative al periodo maggio-dicembre 2021

1.2.2. Pozzo 2

In Tabella 3 sono riportate le temperature medie mensili misurate nel pozzo 2 dal 1° maggio al 31 dicembre 2021. La Figura 3, analogamente alla precedente, mostra l'andamento della temperatura in funzione della profondità nel periodo considerato. 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.

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

Tabella 3: Temperature (°C) medie mensili misurate nel pozzo 2 (periodo: maggio-dicembre 2021)

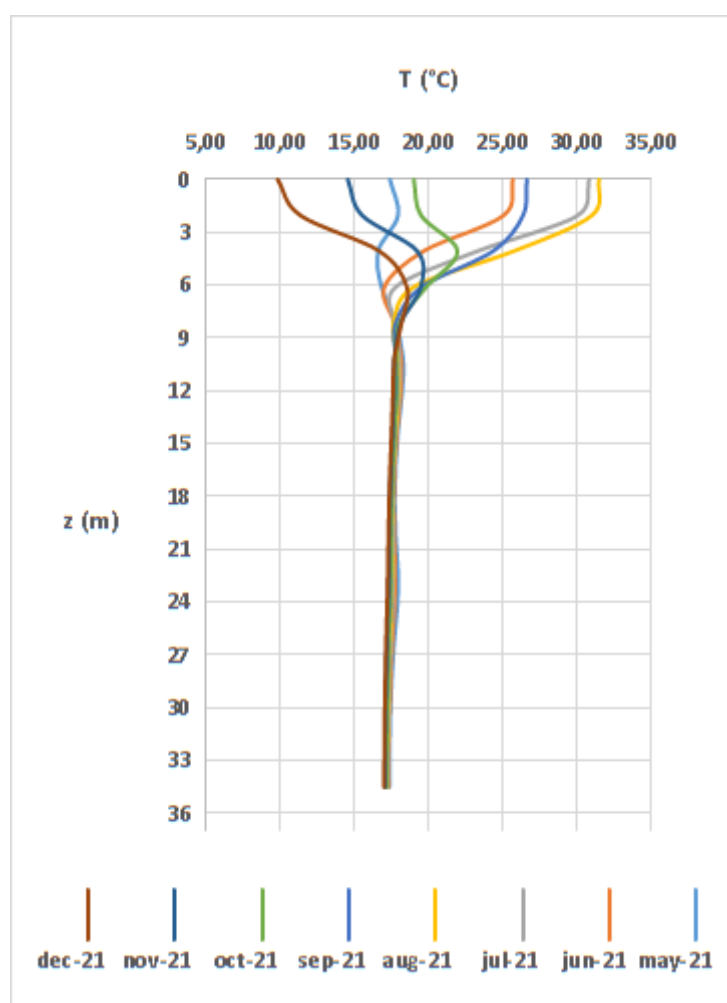


Figura 3: Profilo di temperatura nel pozzo 2. Curve medie mensili relative al periodo maggio-dicembre 2021

1.2.3. Pozzo 3

Nella Tabella 4 sono riportate le temperature medie mensili misurate nel pozzo 3 dal 1° maggio al 31 dicembre 2021. In Figura 4 è mostrato l'andamento della temperatura in funzione della profondità nello stesso intervallo temporale. La temperatura sul piano campagna, riferita ad 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 (dicembre), in cui la temperatura superficiale è circa 1° C più elevata rispetto a quanto misurato al pozzo 2. Queste evidenze si spiegano considerando l'ubicazione del pozzo sul piazzale e il maggiore soleggiamento cui è sottoposto rispetto agli altri due pozzi esaminati.

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

Tabella 4: Temperature (°C) medie mensili misurate nel pozzo 3 (periodo: maggio-dicembre 2021)

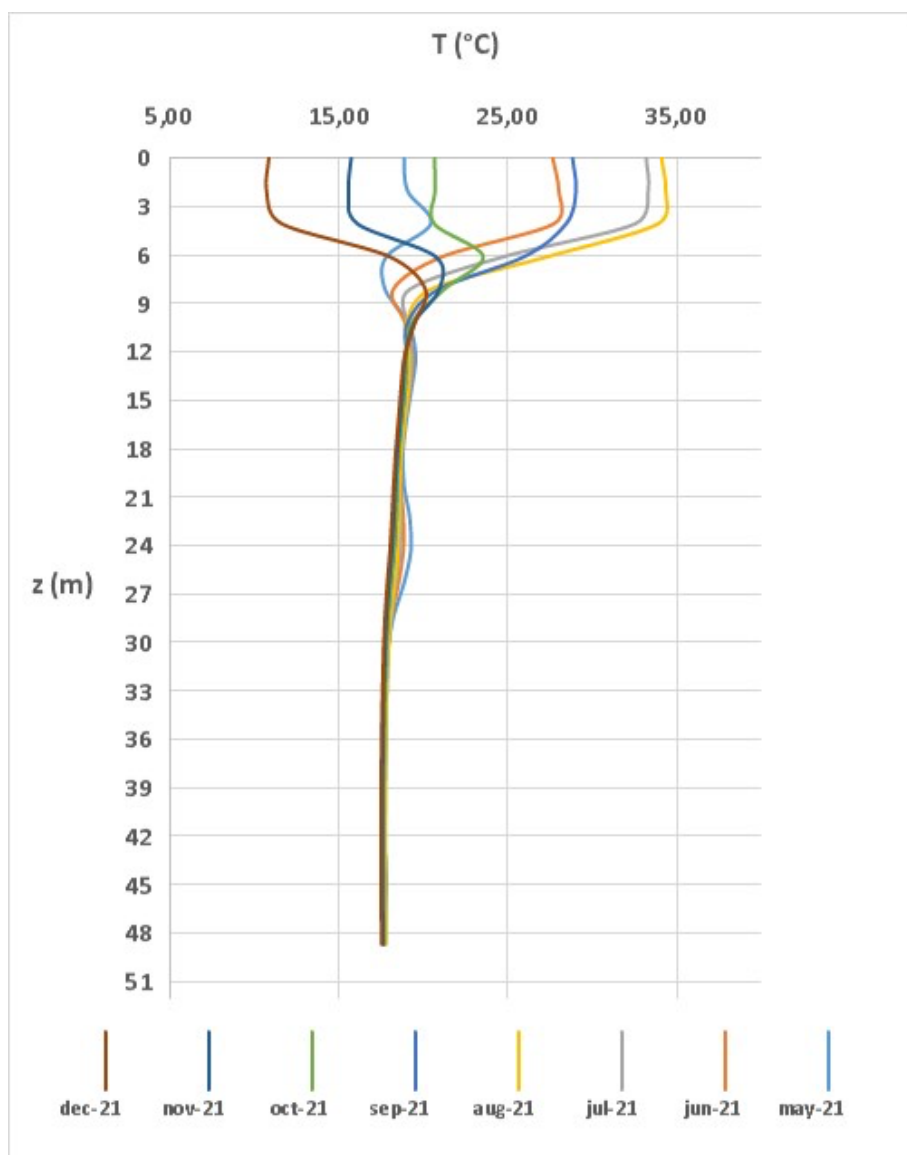


Figura 4: Profilo di temperatura nel pozzo 3. Curve medie mensili relative al periodo maggio-dicembre 2021

1.2.4. Pozzo 4

Nella Tabella 5 sono riportate le temperature medie mensili misurate nel pozzo 4 dal 1° maggio al 31 dicembre 2021. In Figura 5 è mostrato l'andamento della temperatura in funzione della profondità nello stesso intervallo temporale. 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 sia di fenomeni di ombreggiamento da parte degli edifici antistanti il piazzale, sia della presenza di vegetazione.

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

Tabella 5: Temperature (°C) medie mensili misurate nel pozzo 4 (periodo: maggio-dicembre 2021)

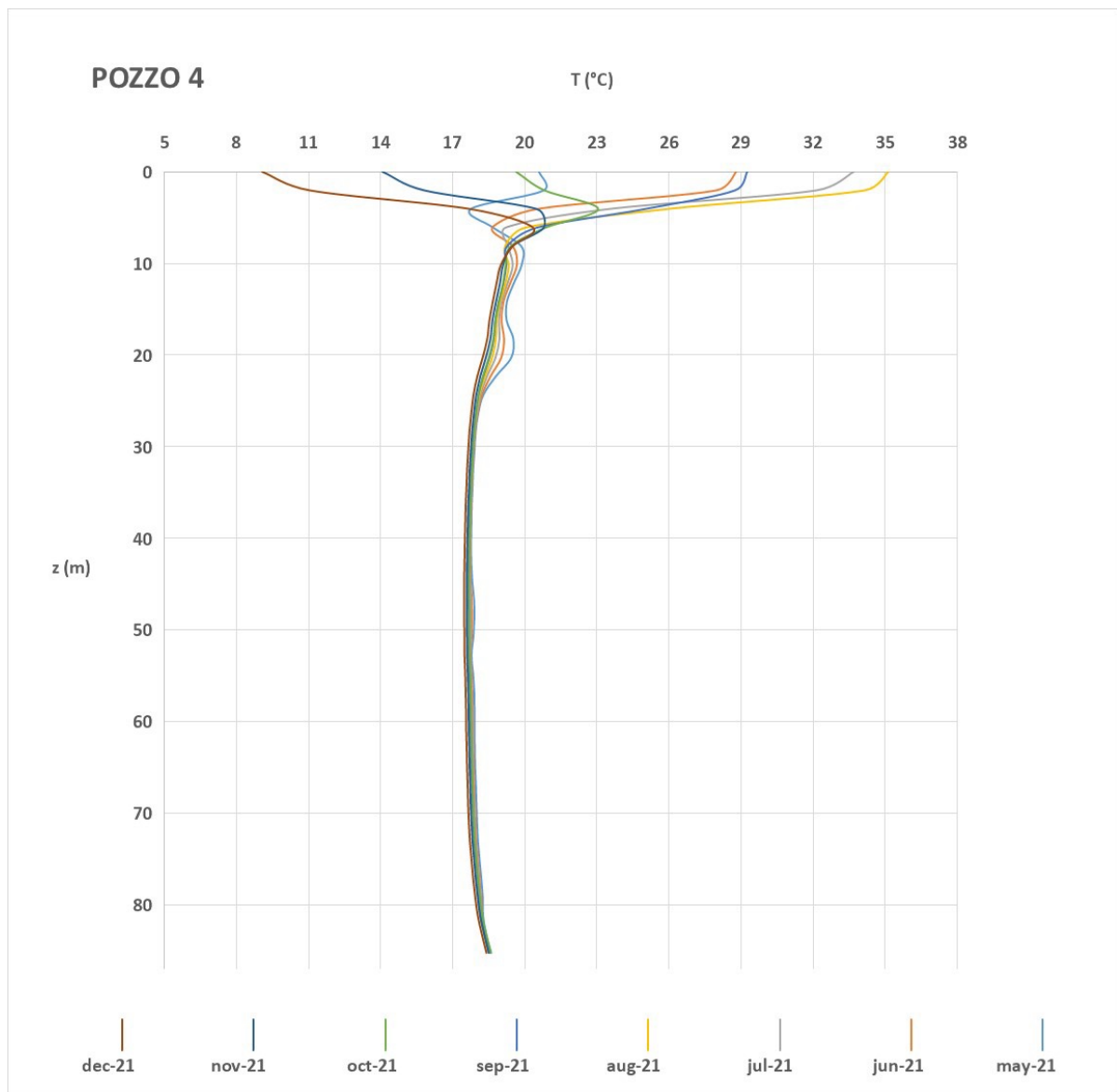


Figura 5: Profilo di temperatura nel pozzo 4. Curve medie mensili relative al periodo maggio-dicembre 2021

Infine, in Tabella 6 sono riportate le medie delle temperature medie mensili (limitatamente al periodo maggio-dicembre 2021) in funzione della profondità nei quattro pozzi e – soltanto per il pozzo 1 – i valori della temperatura media mensile relativi a maggio 2021. I profili di temperatura dei quattro pozzi (Figura 6) mostrano un andamento regolare e possono essere considerati come valori di riferimento in condizioni di tipo stazionario, ossia in assenza di sollecitazione termica indotta. Al contrario, il profilo di temperatura riferito al mese di maggio per il pozzo 1 evidenzia la risposta termica del terreno in funzione del GRT effettuato soltanto 15 giorni prima.

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. Il pozzo 1 e il pozzo 2 mostrano un andamento molto simile tra loro: d'altra parte sono situati a una distanza reciproca di solo 9

m, si trovano alla stessa quota topografica e sono caratterizzati dal medesimo assetto litostratigrafico.

Profondità	POZZO 1		POZZO 2	POZZO 3	POZZO 4
		may-21			
0	19,31	17,19	20,48	22,19	22,02
2	19,40	17,66	20,81	22,28	22,36
4	19,19	16,26	20,35	22,45	21,14
6	17,75	16,28	18,46	21,77	19,89
8	17,37	17,35	17,93	19,80	19,46
10	17,51	17,98	17,94	19,23	19,33
12	17,58	18,15	17,91	19,16	19,14
14	17,55	18,05	17,76	19,00	18,93
16	17,49	17,94	17,63	18,78	18,81
18	17,45	17,87	17,55	18,59	18,81
20	17,41	17,77	17,53	18,51	18,65
22	17,39	17,72	17,55	18,53	18,32
24	17,37	17,66	17,49	18,45	18,07
26	17,34	17,60	17,39	18,23	17,94
28	17,30	17,49	17,31	17,97	17,86
30	17,26	17,39	17,25	17,83	17,80
32	17,24	17,35	17,22	17,75	17,76
34	17,27	17,42	17,20	17,70	17,73
37	17,28	17,45		17,68	17,69
39	17,27	17,34		17,66	17,67
41	17,30	17,37		17,65	17,66
43	17,39	17,66		17,65	17,65
45	17,42	17,75		17,68	17,65
47	17,40	17,62		17,67	17,67
49	17,47	17,81		17,67	17,68
51	17,53	17,93			17,67
53	17,54	17,95			17,65
55	17,55	17,98			17,69
57	17,54	17,95			17,72
59	17,55	17,95			17,73
61	17,56	17,93			17,74
63	17,58	17,97			17,76
65	17,60	18,01			17,77
67	17,61	18,01			17,80
69	17,63	18,04			17,82
71					17,85
73					17,88
75					17,95
77					18,02
79					18,10
81					18,18
83					18,33
85					18,53

Tabella 6: Medie delle temperature (°C) medie mensili misurate nei quattro pozzi (periodo: maggio-dicembre 2021). Per il pozzo 1 sono riportate anche le temperature medie mensili relative a maggio 2021 (cfr Tabella 2)

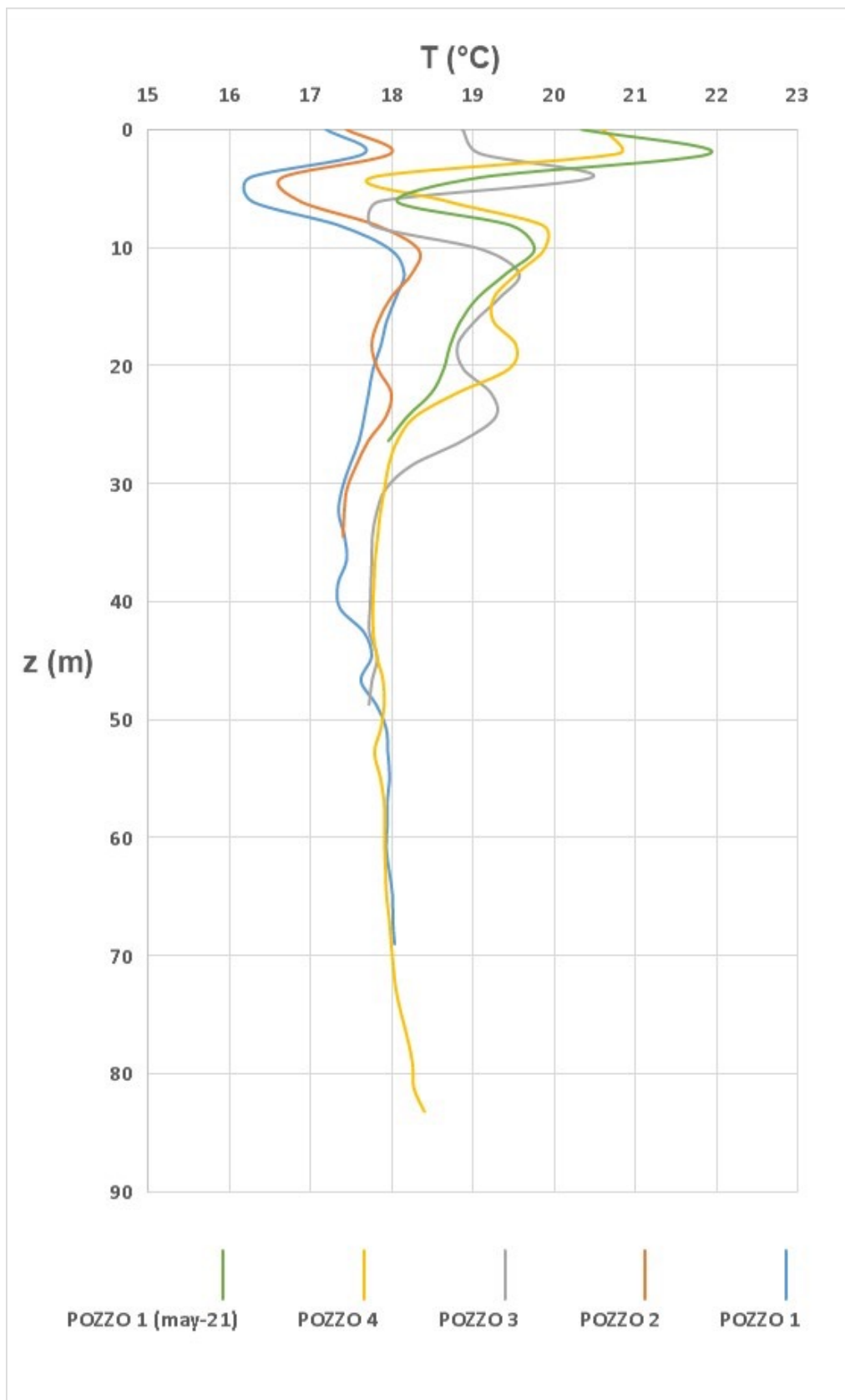


Figura 6: Profili di temperatura dei quattro pozzi costruiti con le medie delle temperature medie mensili misurate nel periodo maggio-dicembre 2021. Per confronto è riportato anche il profilo di temperatura del pozzo 1, costruito utilizzando le temperature medie mensili relative a maggio 2021

2. SUCCESSIONE LITOSTRATIGRAFICA DI DETTAGLIO

Per una correlazione puntuale tra l'andamento dei valori di temperatura nei quattro pozzi e le litologie presenti si è reso necessario un ulteriore esame 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: 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 < 2 mm). Pertanto, il valore di conducibilità è fortemente dipendente dal tipo di clasto contenuto nel deposito, dall'evento eruttivo e dal contenuto in fluidi.

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

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

Tabella 7: Successione litostratigrafica di dettaglio, ricostruita con il sondaggio geognostico. Le distanze riportate nella colonna di destra sono espresse in metri

2.1. Correlazione termico-stratigrafica

Nella Figura 7 è mostrato l'andamento della temperatura in funzione della profondità nei quattro pozzi, riferito al maggio 2021. Si ribadisce che il pozzo 1 è indicativo della risposta termica di ogni litologia, in quanto risente ancora della sollecitazione termica indotta con il GRT. E poiché la temperatura del sottosuolo è influenzata da fattori climatici, topografici, geologici e idrogeologici, 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 l'eventuale presenza di falde acquifere forniscono allo scambio termico tra il terreno e le sonde geotermiche [1] [2].

In generale, i tufi con argillificazione presentano 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 ha una conducibilità termica molto elevata e tende a raffreddarsi velocemente, permettendo un maggiore geoscambio tra terreno e sonda.

Poiché l'andamento della temperatura è condizionato dalle variazioni climatiche stagionali, si è deciso di non considerare i primi 10 m di terreno. I profili termici dei pozzi 2, 3 e 4 in Figura 7 possono essere considerati in regime stazionario e sono indicativi dei valori di conducibilità termica delle litologie presenti.

Da 14 a 19 m di profondità, il tufo sabbioso presenta un'intercalazione a matrice argillosa (spessore 2,5 m) a cui corrisponde minore conducibilità termica e maggiore inerzia termica del terreno, in quanto il calore ha difficoltà a disperdersi lateralmente. Successivamente, fino a 22 m, il tufo mostra granulometria più grossolana, con un maggiore scambio di calore tra sonda e terreno. Sotto al tufo, stratigraficamente, si trova la lava 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, evidenza 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. Nei limi sabbiosi (a profondità maggiori di 82 m), in prossimità del letto della falda (argille), le temperature sono più alte alla base e si risente del flusso geotermico terrestre. Qui l'inerzia termica della falda principale è variabile e dipende dal movimento della massa d'acqua, dalla sua direzione e dai fenomeni di miscelazione, sicuramente maggiori verso l'alto stratigrafico.

In particolare, relativamente alla correlazione termico-stratigrafica si è trovato che i pozzi 1 e 2 giacciono alla stessa quota, il pozzo 3 correla circa 1 m più in basso mentre la correlazione del pozzo 4 è evidente soltanto risalendo di quota di circa 3 m. Questa evidenza potrebbe indicare che il pozzo 3 giace in corrispondenza di una paleoincisione, successivamente colmata dai depositi vulcanici.

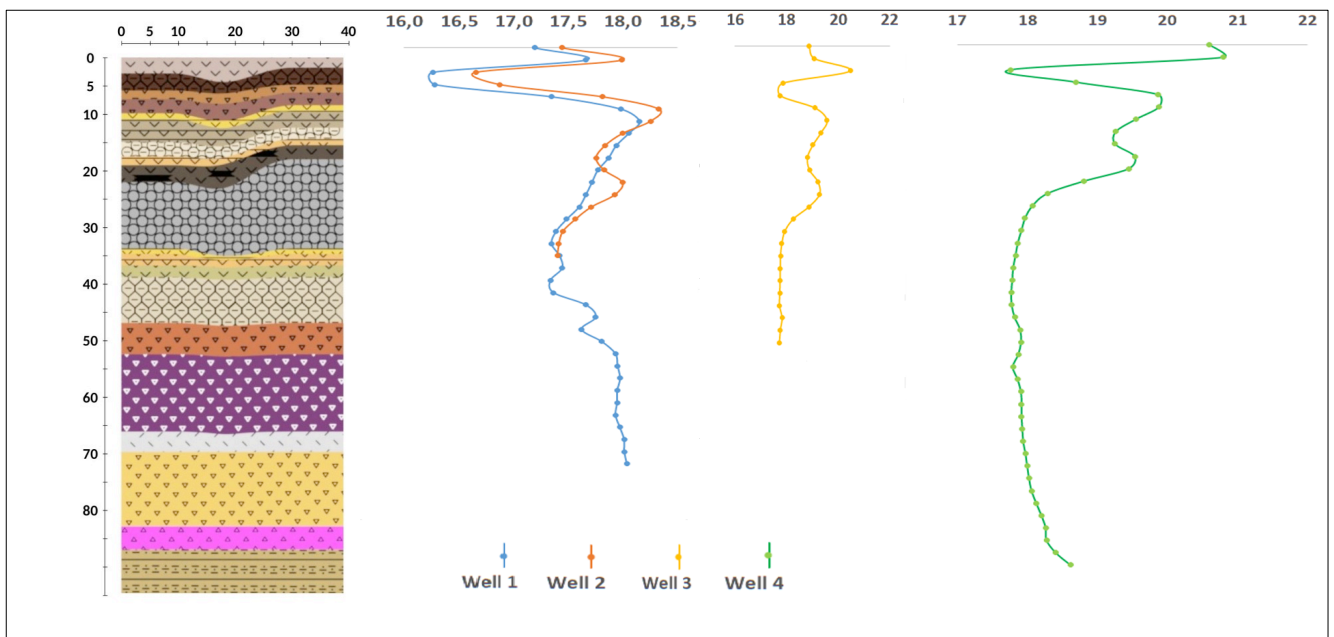


Figura 7: Correlazione termico-stratigrafica tra i quattro pozzi

2.2. Estrapolazione della curva di conducibilità termica

L'analisi di dettaglio delle carote del sondaggio geognostico, l'accurato studio della letteratura relativa alle litologie incontrate in sondaggio e l'andamento rilevato nel profilo verticale di temperatura nel pozzo 1 (riferito al maggio 2021) hanno permesso di estrapolare i valori di conducibilità termica di ogni litologia in funzione della profondità. Tra le due curve c'è un rapporto di proporzionalità inverso: terreni poco conduttivi presentano un'inerzia termica maggiore in quanto il calore non riesce a dissiparsi; 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 (Figura 8). Il valor medio dei dati di conducibilità termica – estrapolato in funzione dei dati di temperatura misurati con le fibre ottiche – è pari a $1,20 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (Tabella 8), dato che può essere considerato accettabile in quanto è in linea con il valore determinato durante il GRT ($1,21 \text{ W/m}\cdot\text{K}$).

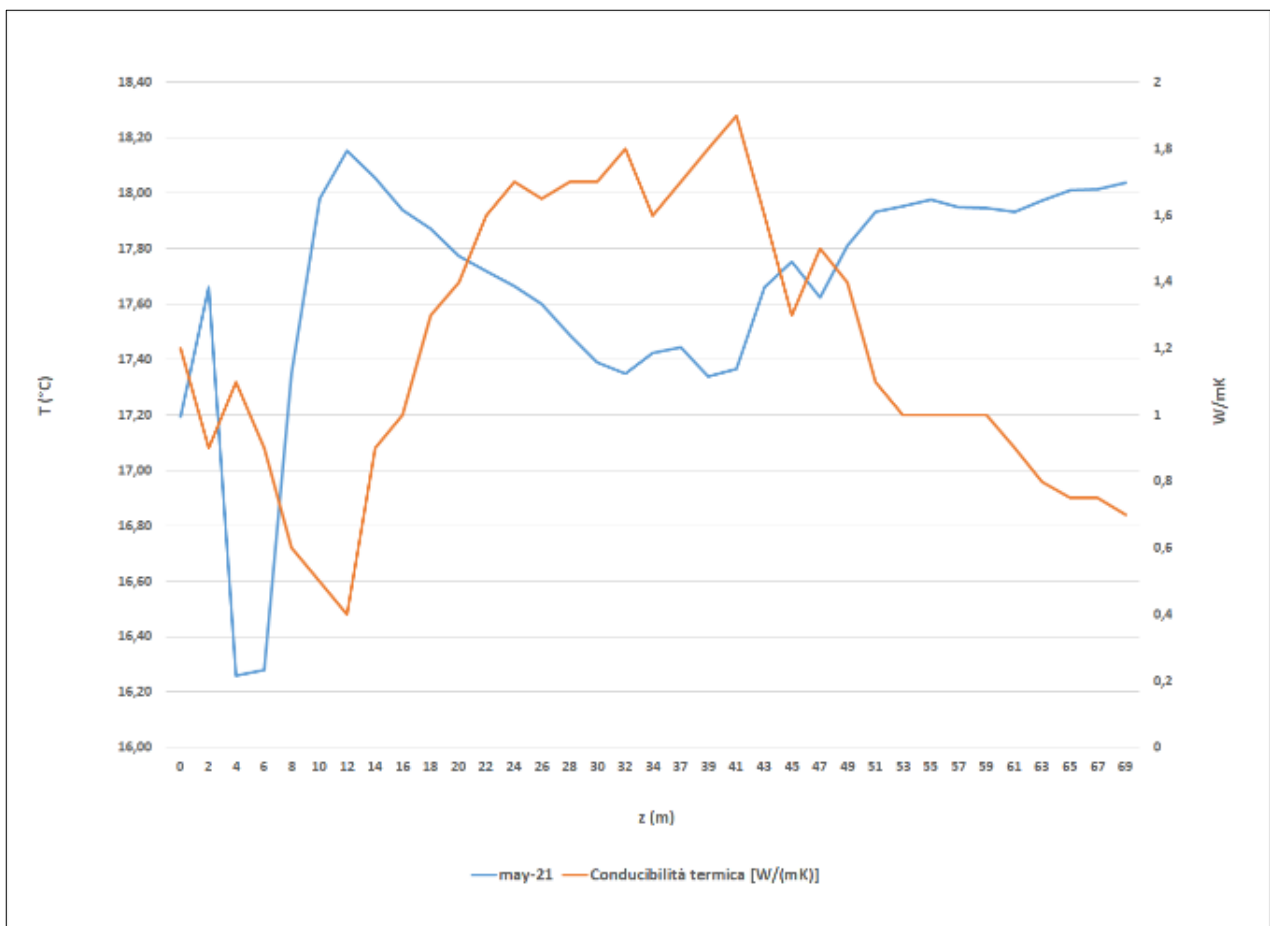


Figura 8: Correlazione tra profilo di temperatura e conducibilità termica (W/m·K)

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

Tabella 8: Valori di conducibilità termica (W/m·K) estrapolati

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 conducibilità 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 9A). L'altezza di ogni strato è uguale alle quote di misurazione della temperatura da parte 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 conducibilità 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 fornita dal GRT ($2,6 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$). Viene quindi creato un mesh del dominio bidimensionale con grandezza degli elementi pari a 1 m, che permette di ottenere un ottimo grado di rappresentazione del sistema (Figura 9B).

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 10).

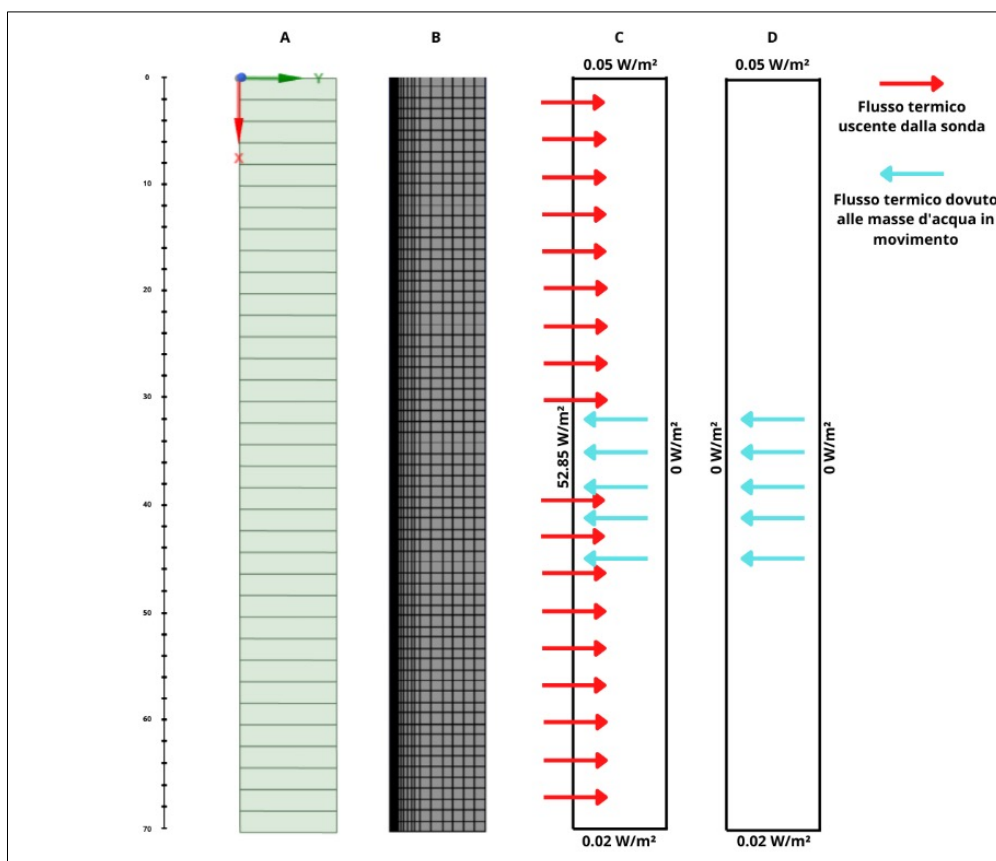


Figura 9: A) modello geometrico stratigrafico; B) *mesh*; C) condizioni al contorno “Periodo 1”; D) condizioni al contorno “Periodo 2”

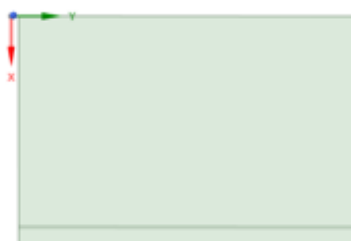


Figura 10: Dettaglio della configurazione dell'asse di simmetria

Con riferimento al *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 11).

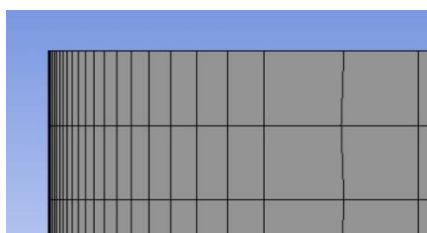


Figura 11: Dettaglio dell'infittimento in prossimità dell'interfaccia sonda-terreno

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

Per le condizioni al contorno è necessario fare la 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 9C). Per il Periodo 2, invece, si pone il flusso lungo la sonda costante e pari a zero (Figura 9D).

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 (IF Timestep < 74, $52,85 \text{ [W m}^2]$, $0 \text{ [W m}^2]$), che fornisce valori diversi se la condizione impostata è verificata o no. 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 ($17,67 \text{ }^\circ\text{C}$). 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 estrapolati (Tabella 8); successivamente, questi sono stati iterati fino ad ottenere una sovrapposizione con la curva di temperatura misurata il 1° maggio 2021 (Tabella 9).

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	1,116666667

Tabella 9: Valori di conducibilità termica (W/m·K) calcolati analiticamente

La sovrapposizione delle due curve non si verifica nell'intervallo 24-43 m di profondità (Figura 12) 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 stimato un valore di portata termica equivalente sottratta pari a circa 3,5 W/m².

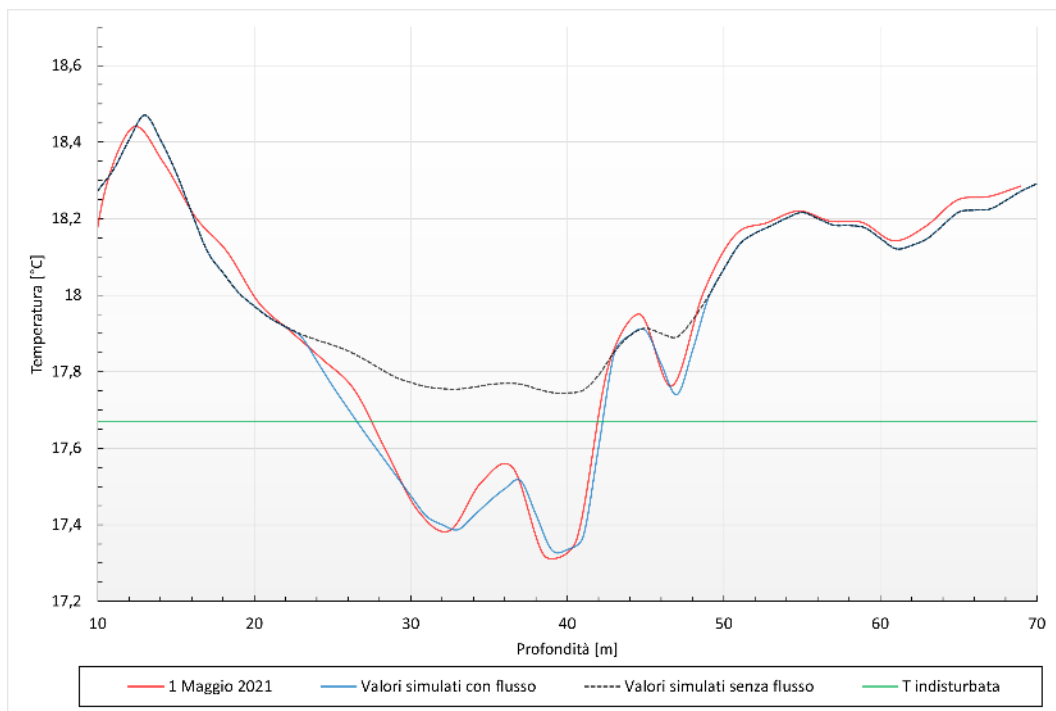


Figura 12: Simulazione della conducibilità termica

3. TEMPERATURE: DATI ED ELABORAZIONI

3.1. Confronto tra temperatura dell'aria e temperatura nei pozzi

Per i dati di temperatura dell'aria, relativi al 2021, sono stati utilizzati quelli rilevati a 10 m di altezza dalle stazioni meteorologiche automatiche ubicate all'interno del C.R. ENEA-Casaccia (Tabella 10). Da notare che in tutto il periodo considerato la temperatura non ha mai raggiunto valori negativi.

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	6,98	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	16,37	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

Tabella 10: Temperature (°C) a 10 m misurate dalle stazioni meteo del C.R. ENEA-Casaccia (anno 2021)

Il 12 agosto è stato il giorno più caldo (30,48 °C) e il 14 febbraio quello più freddo del 2021 (1,77 °C). Per entrambi i giorni è disponibile la misura della temperatura ogni due metri nei pozzi 2, 3 e 4 (Tabella 11 e Figura 13).

Si nota innanzitutto che a partire dai 10 m circa di profondità dal piano campagna tutti e tre i pozzi non risentono più delle variazioni stagionali di temperatura. 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 evidenzia valori di temperatura leggermente più alti rispetto al pozzo 2, rispettivamente 10,20 °C e 34,31 °C. Come previsto, data l'ubicazione sul piazzale, il pozzo 4 risulta essere quello più sensibile alle variazioni stagionali, 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).

Profondità (m)	pozzo 2	pozzo 3	pozzo 4	pozzo 2	pozzo 3	pozzo 4
	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

Tabella 11: Temperature (°C) misurate nei pozzi 2, 3 e 4 nel giorno più caldo e in quello più freddo del 2021

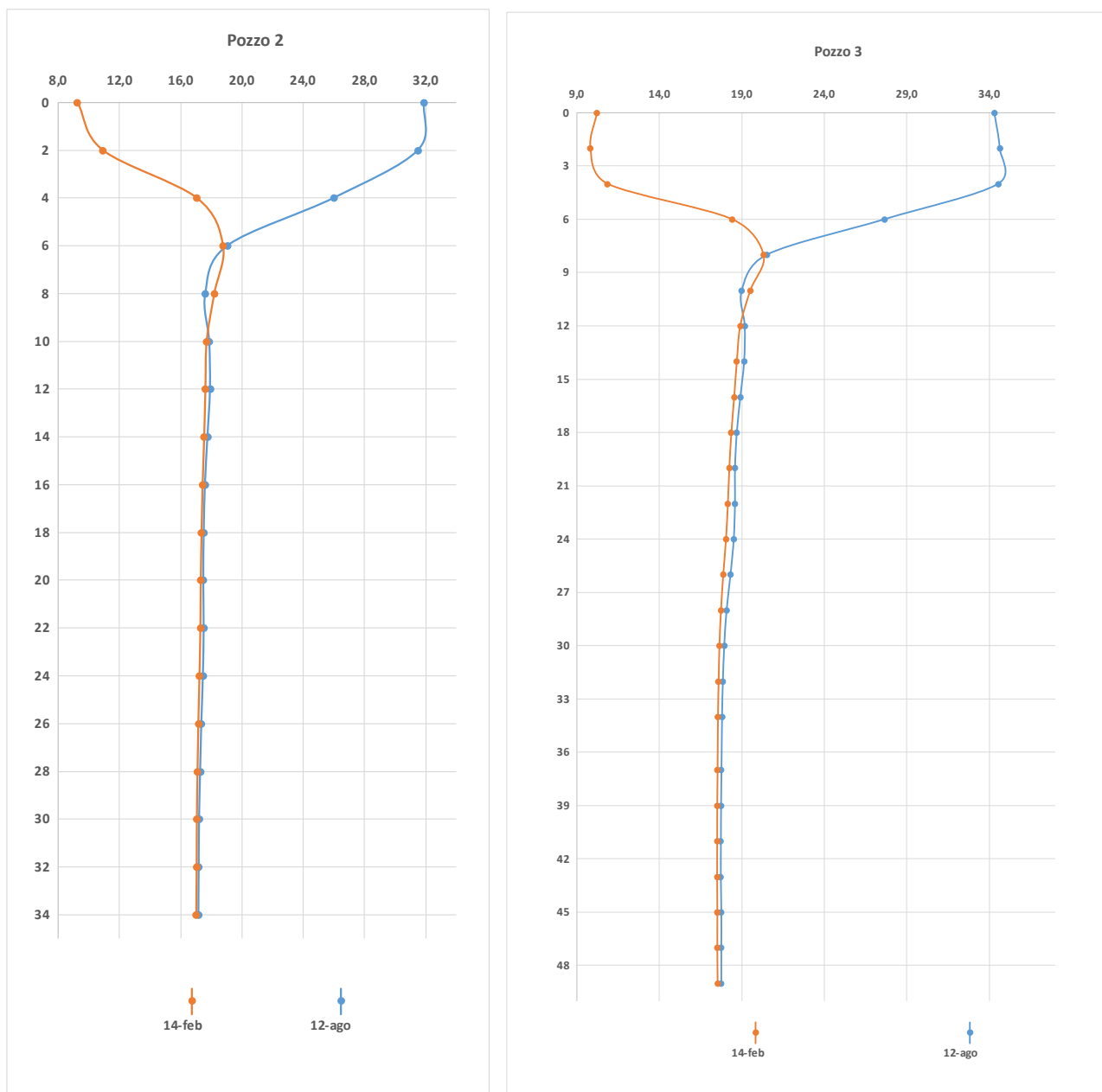


Figura 13: Profilo di temperatura (°C) nel giorno più caldo e in quello più freddo del 2021 (pozzi 2 e 3)
(continua)

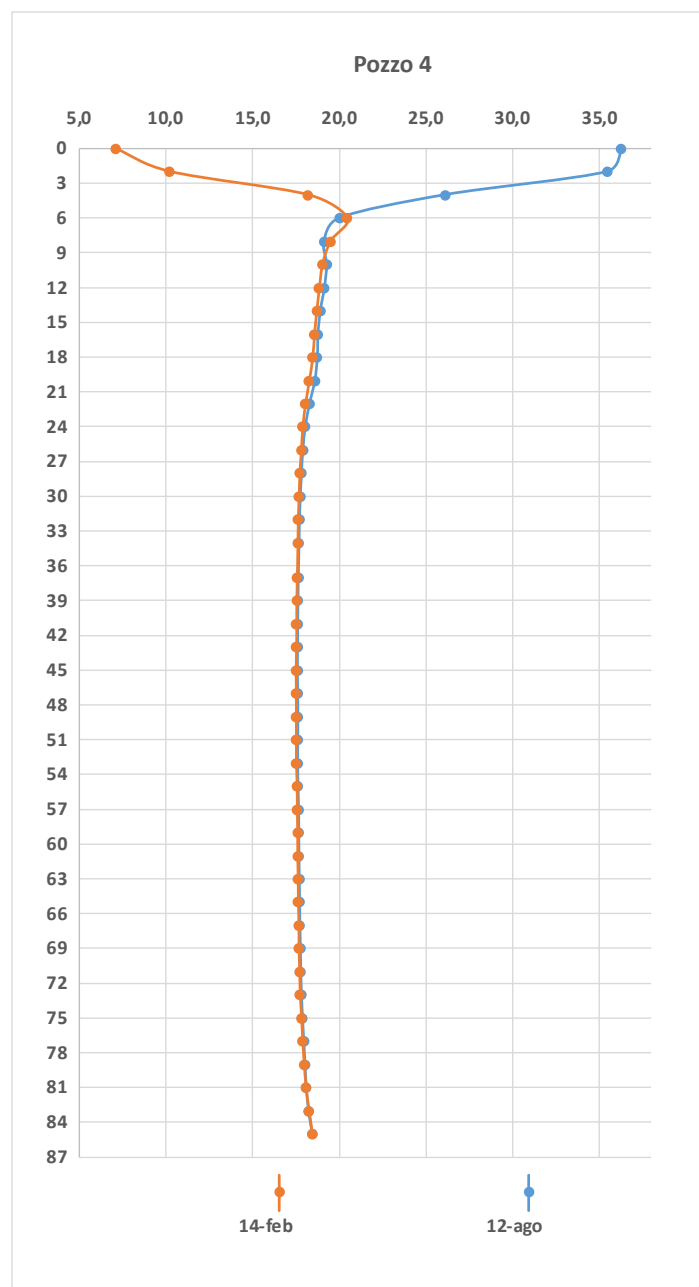


Figura 13: Profilo di temperatura (°C) nel giorno più caldo e in quello più freddo del 2021 (pozzo 4)

3.2. Temperatura del terreno calcolata e misurata

Ai fini del calcolo, la temperatura del terreno varia in funzione della profondità e del periodo dell'anno considerato, tenendo conto delle seguenti ipotesi:

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

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

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

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];
- $A_{\theta s}$ 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 (m²/giorno).

La grandezza θ_M è valutabile come il valore medio annuo della temperatura dell'aria nel sito considerato. Anche la grandezza $A_{\theta s}$ 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 (Tabella 10), il 12 agosto è stato il giorno più caldo del 2021 (30,48 °C) e il 14 febbraio quello più freddo (1,77 °C).

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

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

La diffusività termica media per ogni livello stratigrafico è data dal rapporto tra la conducibilità termica estrapolata per ogni litotipo e la capacità termica volumica media (2,6 MJ/(m³·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/m·K];
- C è la capacità termica volumica [MJ/(m³·K)]

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

Tabella 13: Diffusività termica media calcolata ogni due metri di profondità

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 esterna annuale: 15,60 °C;
- ampiezza di oscillazione dell'onda termica: 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).

Profondità (m)	Giorni dall'inizio del 2021									
	1° gen	30 gen	19 feb	10 apr	30 mag	19 lug	7 set	27 ott	16 dic	31 dic
	0	30	50	100	150	200	250	300	350	365
2	3,45	0,55	0,79	8,44	21,06	29,89	28,78	18,50	6,20	3,47
3	4,17	2,00	2,53	9,98	21,34	28,71	26,96	17,31	6,47	4,19
4	4,92	3,37	4,11	11,30	21,48	27,57	25,33	16,33	6,82	4,93
5	5,67	4,64	5,56	12,43	21,51	26,48	23,88	15,52	7,22	5,69
6	6,42	5,83	6,87	13,39	21,44	25,44	22,59	14,88	7,67	6,43
7	7,16	6,93	8,05	14,19	21,31	24,46	21,45	14,37	8,14	7,17
8	7,88	7,94	9,11	14,86	21,12	23,54	20,44	13,97	8,63	7,88
9	8,57	8,86	10,06	15,41	20,89	22,69	19,56	13,68	9,13	8,57
10	9,22	9,70	10,90	15,85	20,63	21,90	18,80	13,47	9,62	9,22
11	9,84	10,47	11,65	16,21	20,34	21,18	18,13	13,33	10,10	9,84
12	10,43	11,16	12,31	16,49	20,04	20,51	17,56	13,25	10,57	10,43
13	10,97	11,78	12,89	16,70	19,74	19,90	17,07	13,22	11,02	10,97
14	11,48	12,33	13,40	16,85	19,44	19,35	16,66	13,23	11,45	11,47
15	11,94	12,83	13,84	16,96	19,13	18,85	16,31	13,27	11,85	11,94
16	12,37	13,26	14,22	17,03	18,84	18,40	16,01	13,34	12,23	12,37
18	13,12	13,99	14,82	17,07	18,29	17,64	15,57	13,53	12,92	13,12
20	13,74	14,55	15,26	17,02	17,79	17,04	15,29	13,75	13,50	13,73
22	14,23	14,96	15,56	16,91	17,35	16,58	15,12	14,00	13,99	14,23
24	14,63	15,27	15,75	16,77	16,98	16,22	15,04	14,24	14,39	14,62

Tabella 14: Temperatura (°C) del terreno calcolata a diverse profondità, in funzione del tempo, dalle misure di temperatura esterna dell'aria

L'effetto delle fluttuazioni climatiche stagionali legate alla temperatura esterna dell'aria è evidente fino a circa 14 m di profondità dal piano campagna (Figura 14). 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 dalla superficie.

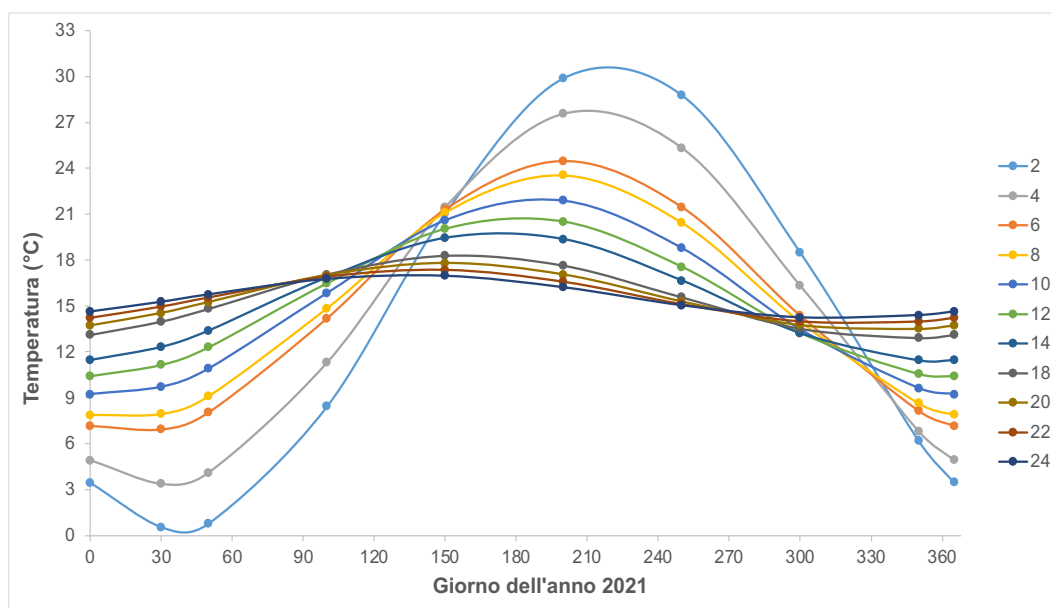


Figura 14: Temperatura del terreno calcolata a diverse profondità, nel corso del 2021, a partire dalle misure di temperatura esterna dell'aria

Sono stati messi a confronto i dati di temperatura del terreno, calcolata a diverse profondità nel periodo giugno-dicembre 2021 (Tabella 15), con le temperature effettivamente misurate nel medesimo intervallo temporale dalle fibre ottiche nel pozzo 4 (Tabella 16). È stato scelto il pozzo 4 perché, rispetto agli altri pozzi, risente meno di fenomeni di ombreggiamento ed è quindi il più freddo in inverno e il più caldo d'estate.

Profondità (m)	1° giu	1° lug	1° ago	1° set	1° ott	1° nov	1° dic	31 dic
	151	181	212	243	273	304	334	365
2	21,31	27,50	30,63	29,59	24,86	17,47	9,79	3,47
3	21,55	26,82	29,19	27,78	23,18	16,38	9,56	4,19
4	21,66	26,12	27,83	26,15	21,72	15,49	9,46	4,93
5	21,67	25,40	26,56	24,69	20,45	14,77	9,47	5,69
6	21,58	24,67	25,38	23,37	19,36	14,20	9,56	6,43
7	21,43	23,96	24,29	22,20	18,43	13,77	9,73	7,17
8	21,22	23,27	23,28	21,17	17,63	13,44	9,94	7,88
9	20,97	22,60	22,36	20,25	16,97	13,21	10,20	8,57
10	20,69	21,96	21,52	19,44	16,41	13,06	10,48	9,22
11	20,40	21,35	20,76	18,74	15,94	12,97	10,78	9,84
12	20,09	20,78	20,07	18,12	15,56	12,94	11,09	10,43
13	19,78	20,24	19,45	17,59	15,26	12,95	11,41	10,97
14	19,46	19,74	18,90	17,13	15,02	13,00	11,73	11,47
15	19,16	19,28	18,40	16,74	14,83	13,07	12,04	11,94
16	18,86	18,85	17,96	16,41	14,69	13,17	12,34	12,37
18	18,29	18,11	17,23	15,90	14,53	13,41	12,90	13,12
20	17,79	17,49	16,67	15,55	14,48	13,68	13,41	13,73
22	17,35	17,00	16,25	15,33	14,50	13,95	13,85	14,23
24	16,97	16,60	15,95	15,20	14,58	14,21	14,23	14,62
26	16,65	16,29	15,73	15,13	14,68	14,46	14,55	14,93
28	16,39	16,06	15,58	15,11	14,79	14,67	14,81	15,16

Tabella 15: Temperatura (°C) del terreno calcolata a diverse profondità (periodo giugno-dicembre 2021)

Profondità (m)	1° giu	1° lug	1° ago	1° set	1° ott	1° nov	1° dic	31 dic	Media
	151	181	212	243	273	304	334	365	
0	24,27	34,92	35,97	31,04	27,22	17,73	8,41	10,62	23,77
2	24,46	32,54	34,67	30,45	26,70	18,73	11,56	11,67	23,85
4	18,99	22,42	25,39	25,25	24,61	21,80	18,96	16,91	21,79
6	18,63	18,96	19,75	20,23	20,82	20,98	20,53	20,14	20,01
8	19,69	19,43	19,20	19,21	19,36	19,54	19,44	19,59	19,43
10	19,81	19,60	19,40	19,26	19,23	19,21	19,00	19,06	19,32
12	19,49	19,35	19,25	19,13	19,11	19,08	18,84	18,85	19,14
14	19,21	19,08	19,01	18,91	18,93	18,92	18,68	18,69	18,93
16	19,15	19,00	18,88	18,79	18,78	18,78	18,54	18,55	18,81
18	19,31	19,04	18,85	18,73	18,71	18,69	18,46	18,47	18,78
20	19,20	18,88	18,71	18,56	18,54	18,50	18,26	18,26	18,61
22	18,70	18,50	18,39	18,29	18,28	18,27	18,04	18,05	18,31
24	18,30	18,20	18,15	18,07	18,09	18,10	17,88	17,90	18,09
26	18,11	18,06	17,99	17,94	17,98	17,99	17,77	17,79	17,96
28	18,01	17,96	17,90	17,86	17,90	17,91	17,70	17,72	17,87

Tabella 16: Temperatura (°C) del terreno misurata con le fibre ottiche a diverse profondità nel pozzo 4 (periodo giugno-dicembre 2021)

Per una migliore comprensione delle reciproche differenze tra le temperature ottenute, i dati delle Tabelle 15 e 16 sono stati graficati in Figura 15 e Figura 16, rispettivamente. Osservando la Figura 15, l'andamento della temperatura in funzione della profondità, riferita al periodo giugno-dicembre 2021, rispecchia quanto visto in precedenza, raggiungendo una stabilità di circa 15 °C oltre i 18 m di profondità. Al contrario, le temperature effettivamente misurate con le fibre ottiche, nello stesso periodo, evidenziano un comportamento del tutto diverso (Figura 16): dai 6 m di profondità sembrerebbe non risentirsi più delle fluttuazioni climatiche stagionali, e la curva tende ad appiattirsi già a partire da 8-10 m, con una temperatura di circa 19 °C. Alla stessa quota, tenendo conto delle sole variazioni climatiche stagionali, la temperatura si attesta a circa 16 °C. Questa differenza di circa 3 °C in più potrebbe essere dovuta alla risalita di fluidi caldi verso la superficie (idrotermalismo).

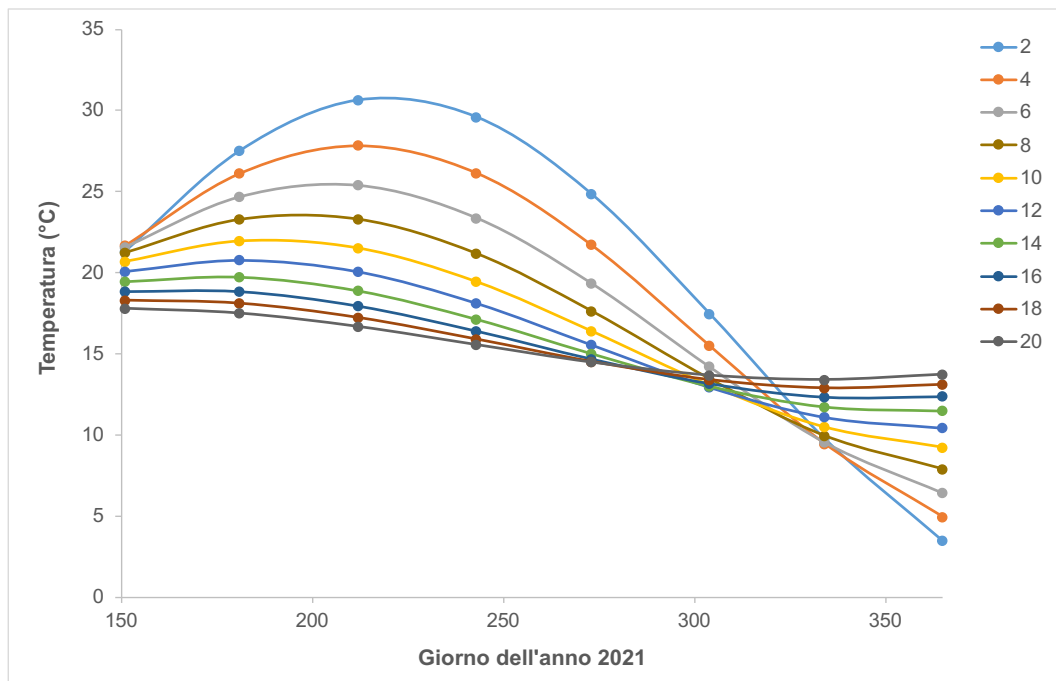


Figura 15: Temperatura del terreno calcolata a diverse profondità (periodo giugno-dicembre 2021)

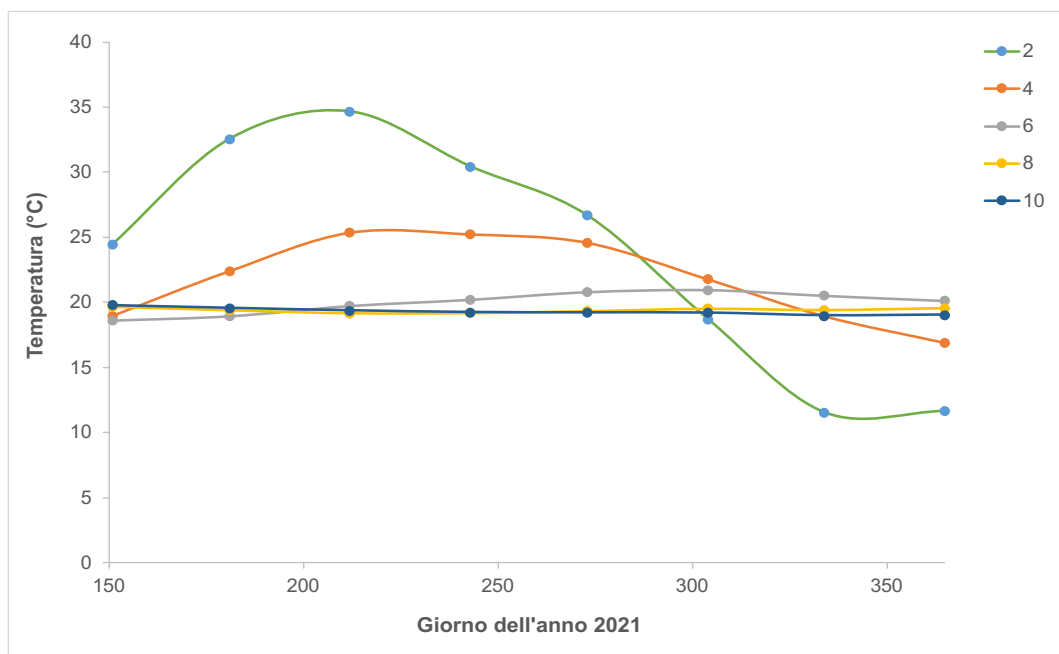


Figura 16: Temperatura del terreno misurata con le fibre ottiche a diverse profondità nel pozzo 4 (periodo giugno-dicembre 2021)

Allo scopo di verificare tale ipotesi, può essere utile osservare anche i profili di temperatura dei pozzi 1, 2 e 3, misurata con le fibre ottiche sempre nello stesso periodo (Figura 17a-c).

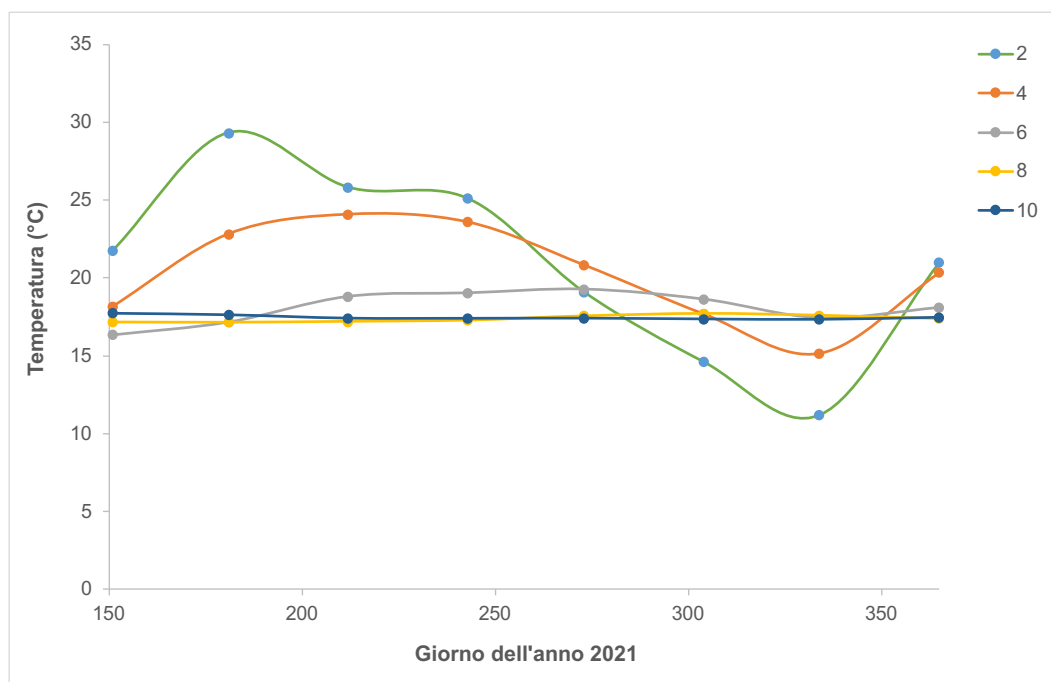


Figura 17a: Temperatura del terreno misurata con le fibre ottiche a diverse profondità nel pozzo 1 (periodo giugno-dicembre 2021)

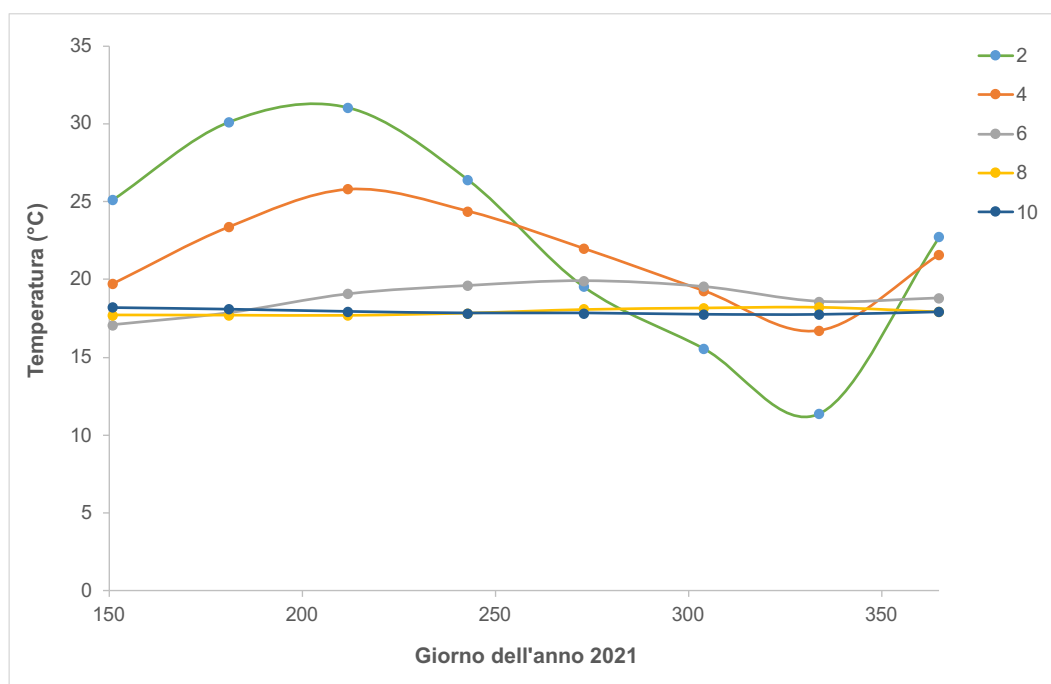


Figura 17b: Temperatura del terreno misurata con le fibre ottiche a diverse profondità nel pozzo 2 (periodo giugno-dicembre 2021)

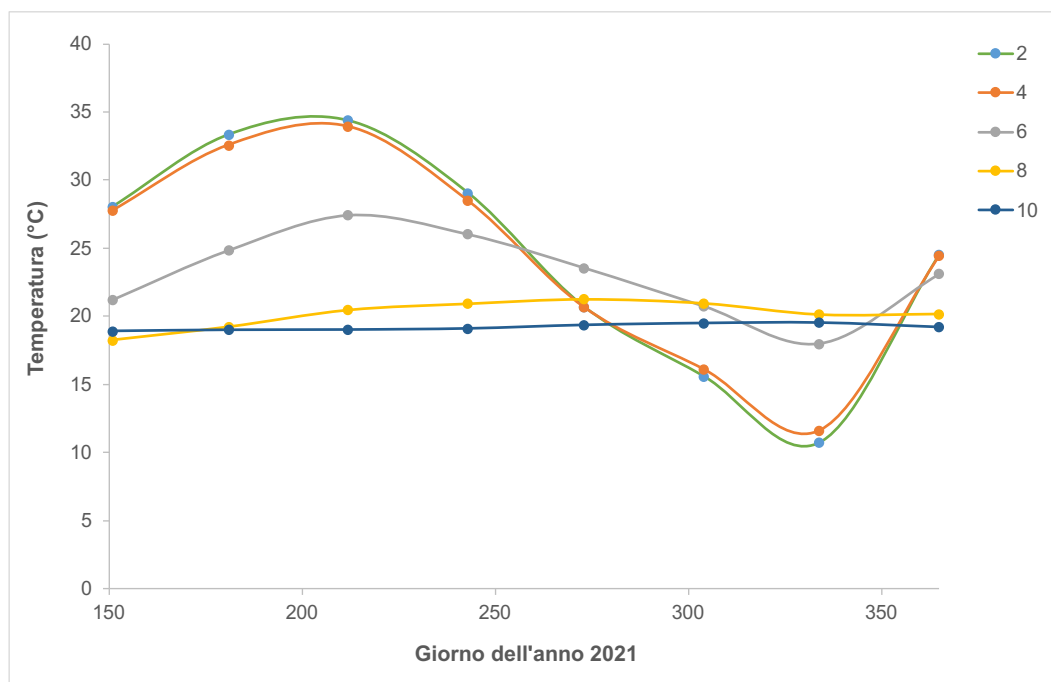


Figura 17c: Temperatura del terreno misurata con le fibre ottiche a diverse profondità nel pozzo 3 (periodo giugno-dicembre 2021)

La Figura 17a-c mostra anche in questo caso la stabilizzazione della temperatura alla profondità di 8-10 m in tutti e tre i pozzi considerati. Nel pozzo 1, la temperatura media registrata in corrispondenza di tale intervallo 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 entro la falda basale, che, infiltrandosi nelle lave fratturate raggiungono 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.

3.2.1. 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 di quello 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 equazioni di seguito riportate:

- 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), equazione (3):

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

- Determinazione della temperatura adimensionale $\theta'(d, T_0 + 224)$ del terreno nella stagione di raffrescamento in corrispondenza del giorno $T_0 + 224$ in cui si verifica il massimo di temperatura dell'aria esterna (12 agosto), equazione (4):

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

Si procede quindi al calcolo delle temperature medie mensili. In particolare, occorre calcolare le temperature del terreno minima ($\theta_{S,L}$ equazione 5) e massima ($\theta_{S,H}$ equazione 6) nelle condizioni di picco a partire dai valori precedentemente determinati:

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

$$\theta_{S,H} = \theta_g (dT_0 + 224) \cdot A_{\theta,S} + \theta_M \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6)$$

dove:

- θ_M è pari a 15,60 °C;
- $A_{\theta,S}$ 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 17, la minima e massima temperatura dell'anno nel giorno di progetto si rileva a 2 m di profondità dal piano campagna.

Profondità (m)	Temperatura giorno più freddo (14 Febbraio 2021)
2	0,56
3	2,25
4	3,79
5	5,21
6	6,51
7	7,68
8	8,74
9	9,69
10	10,54
11	11,31
12	11,98
13	12,58
14	13,10
15	13,56
16	13,96
18	14,60
20	15,07
22	15,41
24	15,63
26	15,78
28	15,86

Profondità (m)	Temperatura giorno più caldo (12 Agosto 2021)
2	25,67
3	23,94
4	22,44
5	21,12
6	19,98
7	19,00
8	18,16
9	17,44
10	16,84
11	16,34
12	15,92
13	15,58
14	15,30
15	15,09
16	14,92
18	14,70
20	14,61
22	14,60
24	14,65
26	14,72
28	14,82

Tabella 17: Temperatura (°C) del terreno a profondità crescenti nel giorno più freddo e più caldo del 2021

3.2.2. Andamento della temperatura negli strati superficiali del terreno 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 18 sono state messe a confronto le temperature dei pozzi, da giugno a dicembre 2021, alla 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.

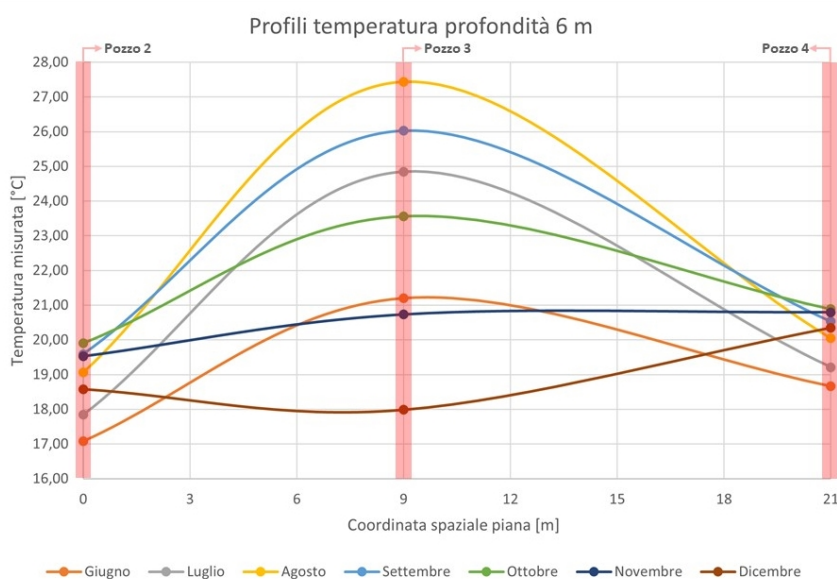


Figura 18: Andamento della temperatura mensile alla profondità di 6 m, in coordinata spaziale piana, nei pozzi 2, 3 e 4

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 il pozzo 3 sia situato in corrispondenza di un *hot spot*, in cui la risalita di fluidi caldi è più marcata rispetto ai pozzi adiacenti ed è maggiormente osservabile nei mesi estivi siccitosi perché non mascherata dall'effetto di diluizione (in questo caso da intendersi come raffreddamento) da parte delle acque meteoriche.

Dal confronto con i grafici relativi a profondità via via crescenti (Figure 19-21) è possibile osservare come questa evidenza si mitighi gradualmente fino ad annullarsi completamente a 12 m dalla superficie (Figura 21), probabilmente a causa della diffusione del calore nel terreno circostante svolta dalle acque calde in risalita dal sottosuolo.

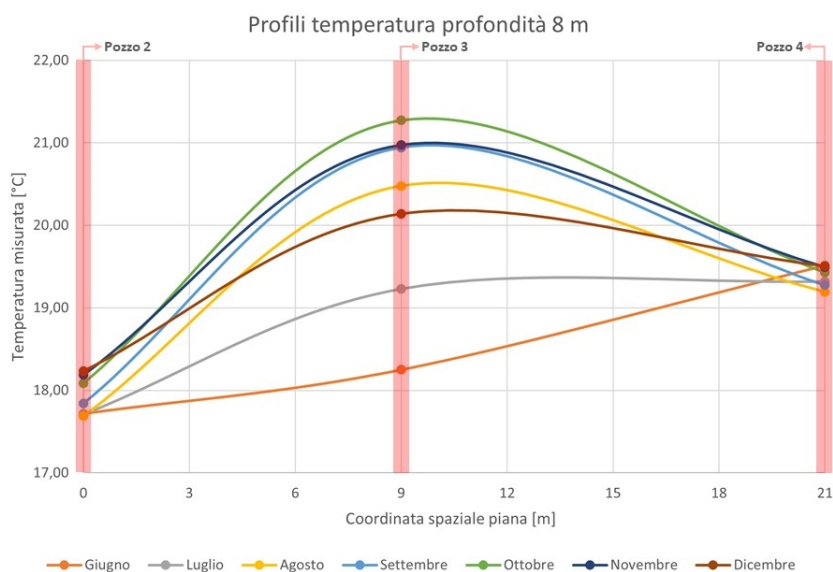


Figura 19: Andamento della temperatura mensile alla profondità di 8 m, in coordinata spaziale piana, nei pozzi 2, 3 e 4

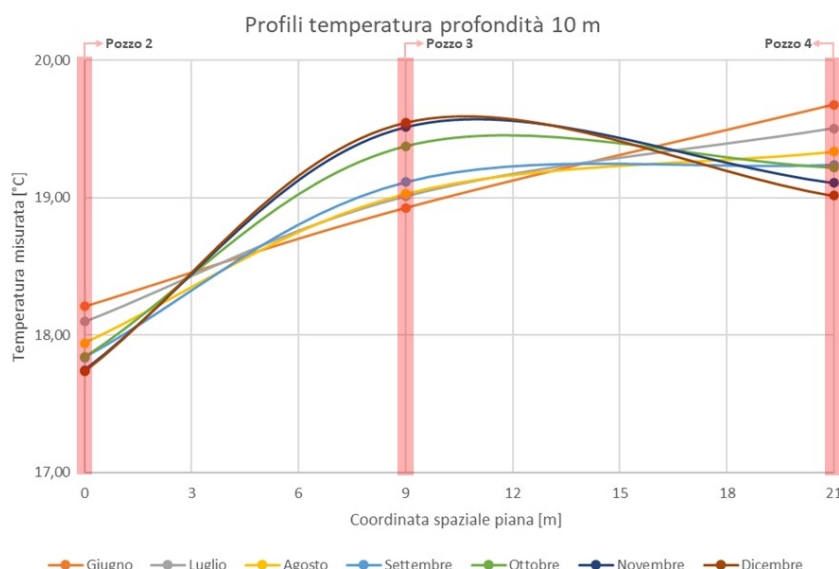


Figura 20: Andamento della temperatura mensile alla profondità di 10 m, in coordinata spaziale piana, nei pozzi 2, 3 e 4

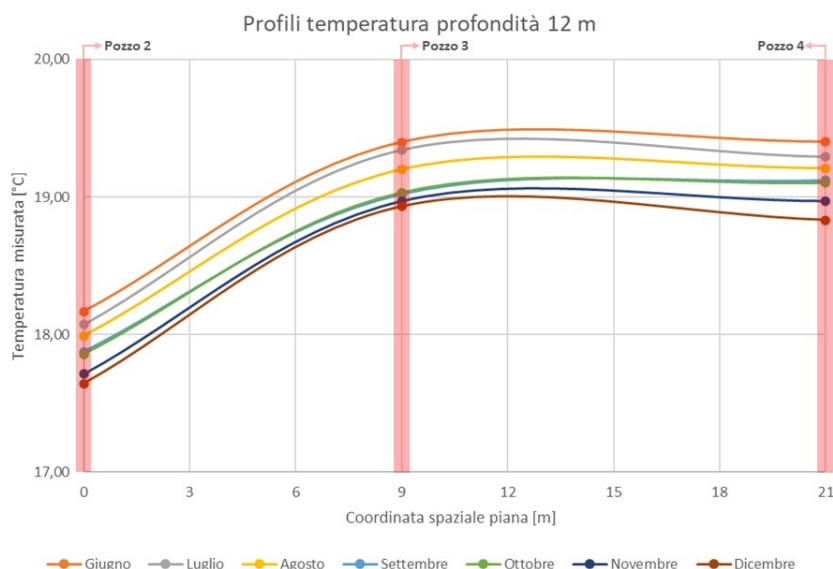


Figura 21: Andamento della temperatura mensile alla profondità di 12 m, in coordinata spaziale piana, nei pozzi 2, 3 e 4

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 – data la prossimità dell’edificio della torre vapore – 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’aumentare 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 18).

Profondità	Pozzo 2	Pozzo 3	Pozzo 4
da 0 a 6 m	1,26	0,44	1,26
fino a 10 m	0,53	1,79	0,42
da 12 a 22 m	0,04	0,08	0,10

Tabella 18: Valori dei flussi superficiali [W/m²] calcolati nei pozzi 2, 3 e 4

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 W/m². Alla stessa profondità il flusso termico calcolato per il pozzo 3 è nettamente inferiore (0,44 W/m²) per via della mitigazione dei due flussi (0,82 W/m²), 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.

4. CALCOLO DELLE RESISTENZE TERMICHE

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

La resistenza termica equivalente della sonda geotermica relativa all'interfaccia tra fluido termovettore e parete della perforazione (R_b) è data 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 .

Quindi:

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

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 [$W/(m \cdot K)$];
- h_i : coefficiente di scambio termico per convezione all'interno del tubo [$W/(m^2 \cdot K)$];
- N : numero dei tubi che compongono lo scambiatore di calore. Per scambiatore *single* U è pari a 2; per lo scambiatore *double* 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 rivestimento del foro (casing).

La Tabella 19 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 il fluido termovettore e la parete della perforazione, pari a 0,0328 m·K/W.

d_e	0,032	m
d_i	0,026	m
h_i	1.864	W/m ² K
$\lambda_{polietilene}$	0,38	W/mK
N_{tubi}	4	
R_{pp}	0,023395	

λ_{gr}	1,2	W/mK
D_b	0,15	m
d_e	0,032	m
D	0,072	m
R_{gr}	0,009452	

Tabella 19: Calcolo dei valori di R_{pp} e R_{gr} per il caso studio

4.2. 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 a 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]:

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

dove:

- α_g : diffusività del terreno [m^2/s];
- T: 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 il flusso termico scambiato con il terreno si stabilizzi. 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 di 0,25 giorni (Tabella 20).

Tipo impulso	Simbolo	Giorni	Durata impulso
annuale	T_1	3650	10 anni
mensile	T_2	30	1 mese
giornaliero	T_f	0,25	6 ore

Tabella 20: Tipo e durata dei tre impulsi

In funzione della durata dei 3 impulsi sono stati definiti i 3 numeri di Fourier (12), (13) e (14):

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

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

$$Fo_f = \frac{4\alpha g T_f}{Db^2} \quad (14)$$

Per ogni numero di Fourier ricavato con le relazioni (12), (13) e (14) 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 21).

Fo₁	215,1111
Fo₂	1,777778
Fo_f	26170,67

Tabella 21: Calcolo dei tre numeri di Fourier per il caso studio

Successivamente, è stato calcolato il valore di G-Factor e i relativi valori delle resistenze termiche equivalenti (Tabella 22).

G₁	0,508034	R_{ga}	0,300772
G₂	0,144513	R_{gm}	0,300431
G_f	0,871968	R_{gd}	0,119432

Tabella 22: Calcolo dei tre G-Factor e delle tre resistenze termiche equivalenti (annuale, mensile e giornaliera)

5. ASSEMBLAGGIO DEL CIRCUITO DI PROVA

Per la difficoltà a reperire parte della componentistica dell'impianto, causata dalla situazione pandemica, 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. Le tubazioni di raccordo, dalle sonde geotermiche alla centrale termica, sono in polietilene DN32, PN16. I vantaggi sono legati essenzialmente al costo contenuto, alla durata e alla facilità di posa. Inoltre, essendo dello stesso materiale delle sonde geotermiche, non è necessaria un'interfaccia particolare per il raccordo dei componenti. Nella centrale termica sono state utilizzate tubazioni in rame, preferibile rispetto al materiale plastico per il minor ingombro delle saldature e per la maggiore flessibilità di utilizzo. Anche i due collettori, di mandata e di ritorno, a 8 diramazioni, sono in rame.

5.1. Componenti dell'impianto

Le componenti costitutive dell'impianto sono:

- 2 collettori, ciascuno a 8 diramazioni 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 22a,b), e con regolatori di portata sul circuito di mandata alle sonde geotermiche (Figura 23).
- 8 valvole per regolazione di portata (IMI Hydronic Engineering - STAD DN10-50, PN25) sul collettore di mandata alle sonde geotermiche (Figura 24). 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 22: a) Valvole a sfera per intercettazione sul collettore di ritorno dalle sonde; b) Particolare della valvola a sfera



Figura 23: Valvole di regolazione della portata (collettore di mandata alle sonde geotermiche)



Figura 24: Dettaglio della valvola di regolazione della portata

- Chiller e pompa di circolazione (Figura 25): 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. 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, direttamente accoppiati a motori a rotore esterno con grado di protezione IP44. 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 blocco porta, fusibili, filtro antidisturbo, teleruttore compressore e teleruttore pompa. È 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 il funzionamento dell'unità in raffreddamento fino a temperature dell'aria esterna di -20 °C.

Il circuito frigorifero è realizzato in tubo di rame e include: filtro disidratatore, valvola d'espansione e pressostato di alta a riarmo manuale. Il circuito idraulico è realizzato in tubo di rame e 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.



Figura 25: Veduta d'insieme del chiller e della pompa di circolazione integrata

In Tabella 23 sono riportati i dati tecnici generali, mentre nella Tabella 24 i dati elettrici del chiller (modello 61) e della pompa di circolazione. Da notare (Figura 26) che per una portata d'acqua pari a 0,73 l/s corrisponde una prevalenza utile della pompa di circolazione pari a 123 kPa.

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 23: Dati tecnici generali 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% ----->									

Tabella 24: Dati elettrici del chiller (modello 61) e della pompa di circolazione

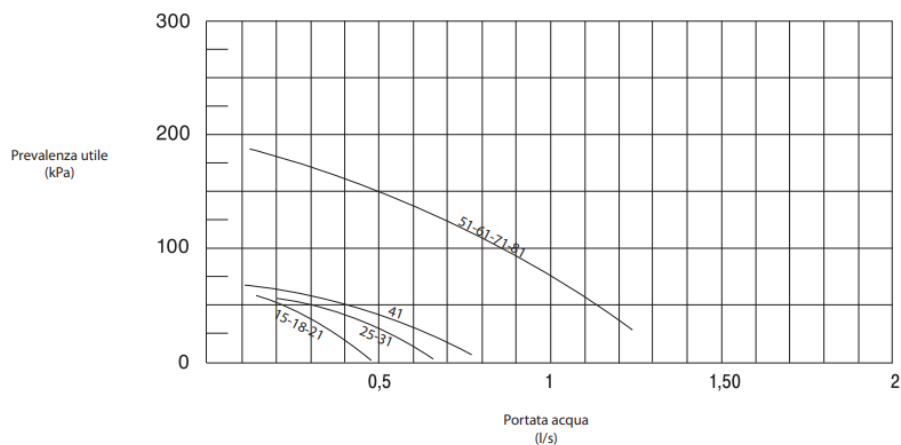


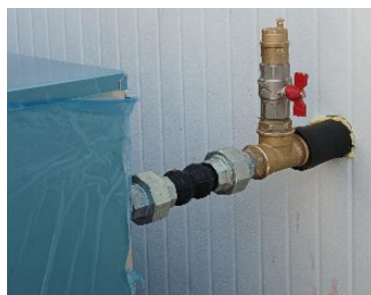
Figura 26: Curva di prevalenza utile della pompa in funzione della portata

Per impedire la formazione di ghiaccio sia negli scambiatori dei refrigeratori sia nei serbatoi, si prevede di utilizzare, nel circuito, una miscela di acqua e glicole etilenico. L'impiego di miscele a basso punto di congelamento produce una variazione delle principali caratteristiche termodinamiche delle unità. In Tabella 25 sono riportati i parametri relativi alla percentuale in peso di glicole etilenico.

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

Tabella 25: Valori di alcuni parametri in funzione della percentuale in peso di glicole etilenico nella miscela

- Giunti antivibranti (Figura 27a,b): sono giunti in gomma, posizionati immediatamente a contatto con il chiller, che limitano la propagazione delle vibrazioni indotte dalle macchine in movimento, evitando stress meccanici alle tubazioni e riducendo il rumore.



a)



b)

Figura 27: a) giunto antivibrante collegato al chiller, b) particolare del giunto antivibrante

- Serbatoio di accumulo (Figura 28): cilindrico verticale, coibentato, con capienza di 500 L e fornito con fori filettati per tubazioni di impianto e accessori. Come riportato nello schema di Figura 29, presenta 2 accessi per le tubazioni (A) lungo la parete verticale 3 accessi per sonde di misura (P), sempre lungo la parete verticale, a diverse altezze per garantire l'omogeneità della misura. Sulla testa è presente il foro per la valvola di sfiato (sf) dell'aria. Il serbatoio dispone anche di 3 fori per il posizionamento di altrettanti riscaldatori elettrici a resistenza (R), della potenza di 15 kW totali.



Figura 28: Serbatoio di accumulo da 500 L installato

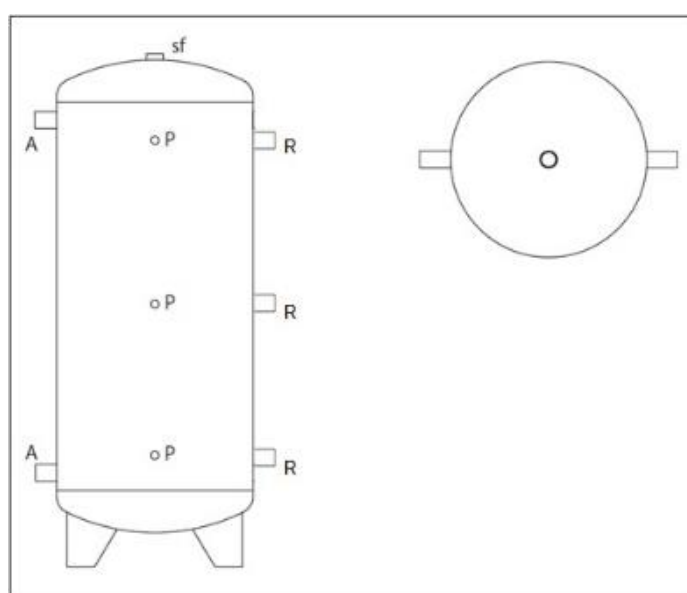


Figura 29: Schema del serbatoio di accumulo con uscite per componenti e tubazioni

- 3 riscaldatori elettrici (Figura 30): a immersione, con termostato di regolazione e di sicurezza, ognuno di 5 kW di potenza e con alimentazione trifase (400 V) in corrente alternata e frequenza 50/60 Hz. Sono utilizzati come fonte ausiliaria di riscaldamento all'interno di bollitori o serbatoi di accumulo. Prodotti da Cordivari®.

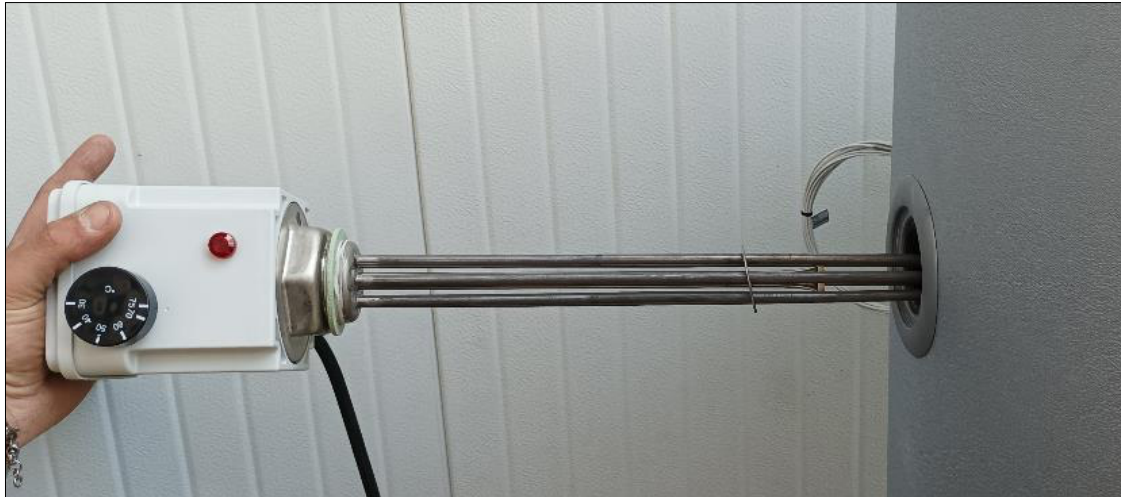


Figura 30: Riscaldatore elettrico a resistenza, da inserire nel serbatoio di accumulo

- Vaso di espansione (Figura 31): 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. Il campo di applicazione è compreso tra -10 e 100 °C.

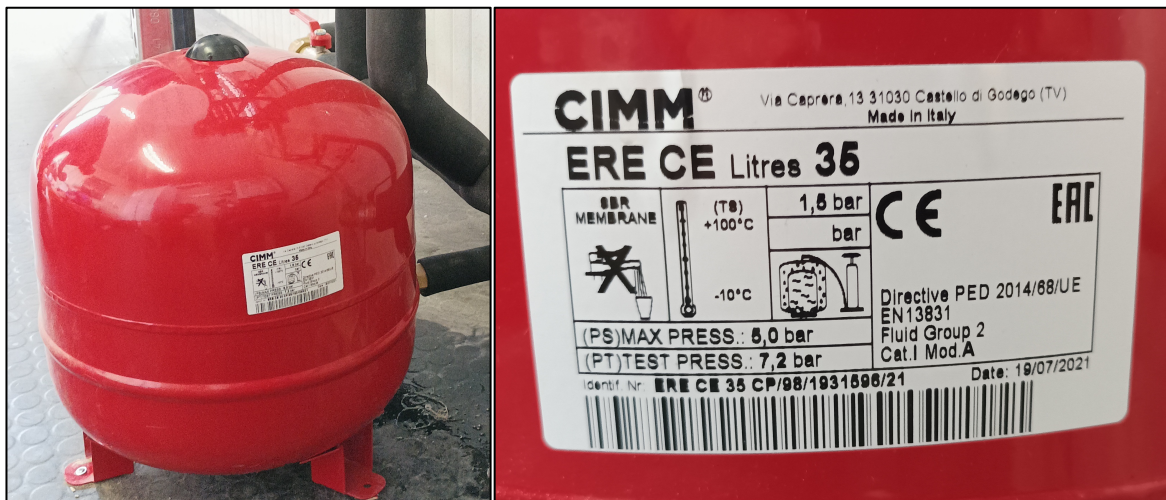


Figura 31: Vaso di espansione. A destra, particolare dell'etichetta con le specifiche tecniche

5.2. Strumenti di controllo

- 8 sensori di portata DN15 e 1 sensore di portata DN25 sul collettore di ritorno dalle sonde (Figura 32a,b): sono misuratori di portata elettromagnetici. Nelle Tabelle 26 e 27 sono riportati i valori del flusso minimo, nominale e massimo, riferiti rispettivamente al sensore DN15 e al sensore DN25. La portata totale richiesta dall'impianto è $2 \text{ m}^3/\text{h}$, e per ogni coppia occorre una portata di $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$. Gli 8 sensori di portata DN15 sono collocati su ciascun ramo di ritorno dalle sonde e ognuno assicura una portata massima del flusso pari a $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ (Figura 33a). Il flussimetro DN25 è ubicato sul ramo uscente dal collettore di ritorno dalle sonde e consente un flusso massimo di $3 \text{ m}^3/\text{h}$ (Figura 33b). Risultano tutti appropriati alle esigenze dell'impianto.

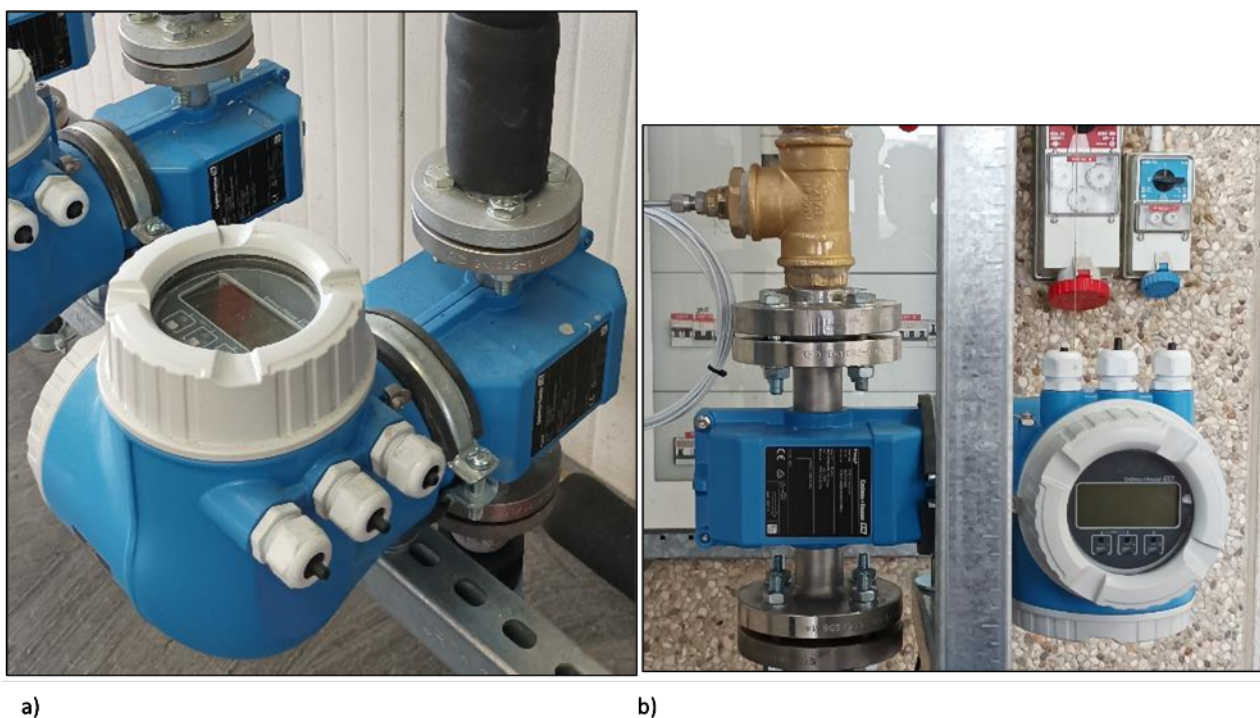


Figura 32: a) misuratore di portata DN15, b) misuratore di portata DN25

		Flusso minimo	Flusso nominale	Flusso massimo	Unità
Portata richiesta <i>i</i>		0.25	0.5	1.5	m ³ /h
Velocità <i>i</i>		0.393	0.786	2.358	m/s
Errore di misura Volume	<i>i</i> <input checked="" type="radio"/>	0.75	0.63	0.54	%
Errore di misura vol. maggiore precisione	<i>i</i> <input type="radio"/>	0.71	0.45	0.28	%
Numero di Reynolds <i>i</i>		928	5 288	25 925	

Tabella 26: Valori di flusso minimo, nominale e massimo del sensore di portata DN15

		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> <input checked="" type="radio"/>	0.83	0.61	0.55	%
Errore di misura vol. maggiore precisione	<i>i</i> <input type="radio"/>	0.85	0.42	0.31	%
Numero di Reynolds <i>i</i>		1 160	9 914	32 406	

Tabella 27: Valori di flusso minimo, nominale e massimo del sensore di portata DN25

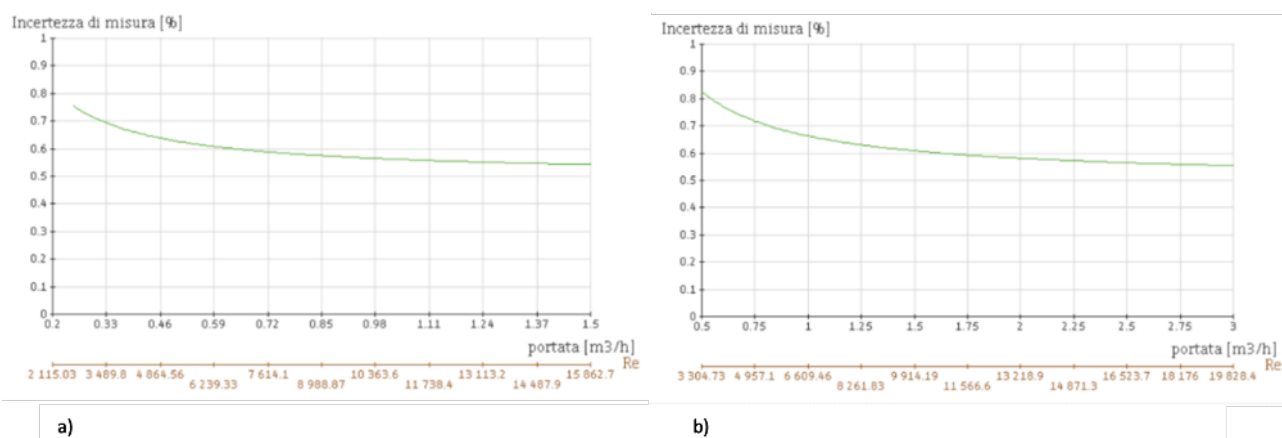


Figura 33: Incertezza di misura (%) in funzione della portata (m³/h): **a)** DN15, **b)** DN25

- Sensori di temperatura (Figura 34): 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). Le PT100 misurano temperature nel range compreso tra -50 e 600 °C, con un'accuratezza di $\pm 0,2$ °C. Il valore restituito dalla sonda è di tipo elettrico e varia tra 4 e 20 mA. Prodotti da Metron s.r.l.

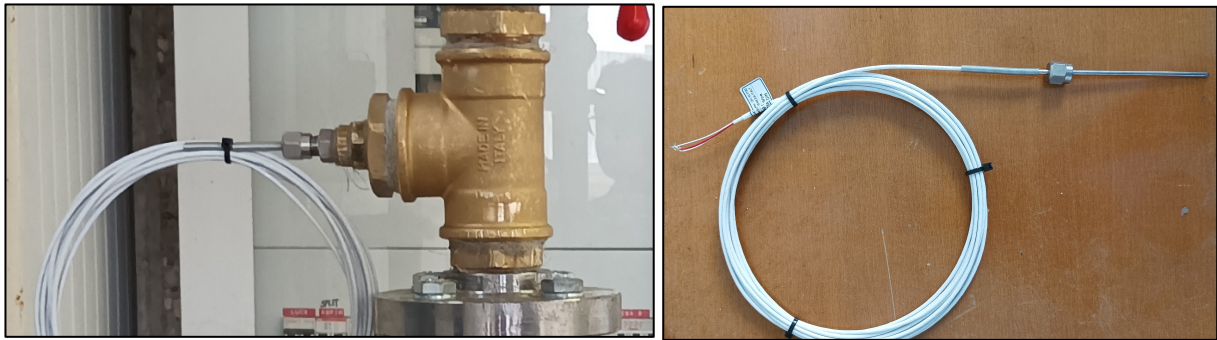


Figura 34: Sensore di temperatura PT100

- Sensori di pressione (Figura 35): tipo NAT 8252, 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 ÷ 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. Prodotti da Trafag AG.



Figura 35: Sensore di pressione tipo NAT 8252

- 2 valvole miscelatrici DN32 con attuatore (Figura 36): i miscelatori compatti a perdita ridotta ESBE (DN32) sono realizzati in leghe speciali di ottone. 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.

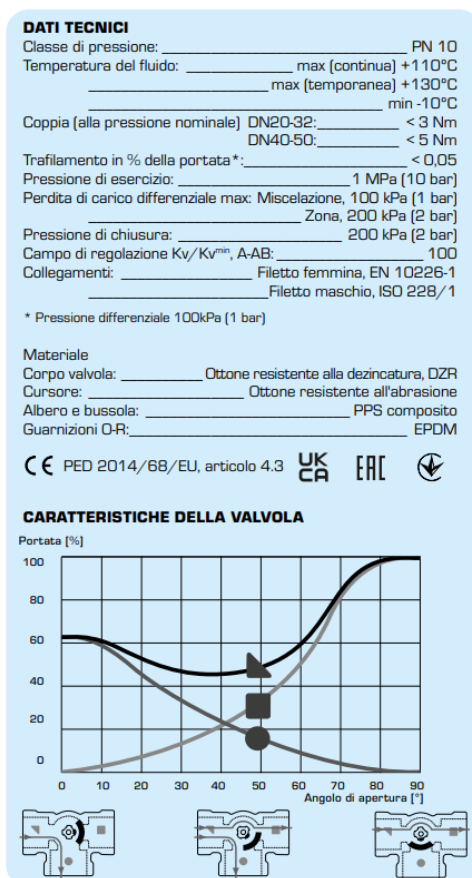


Figura 36: A sinistra, valvola miscelatrice con attuatore; a destra, targhetta con i dati tecnici e le caratteristiche delle valvole miscelatrici installate

5.3. Schema di funzionamento dell'impianto

Di seguito viene fornita la descrizione in dettaglio dello schema dell'impianto (Figura 37) e del suo funzionamento in opera (Figure 38 e 39).

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. All'uscita, un sensore di temperatura 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: 1) fluire direttamente nel collettore di mandata al circuito sonde; oppure, 2) 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 in ingresso 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 comanda la seconda elettrovalvola di miscelazione che a sua volta 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.

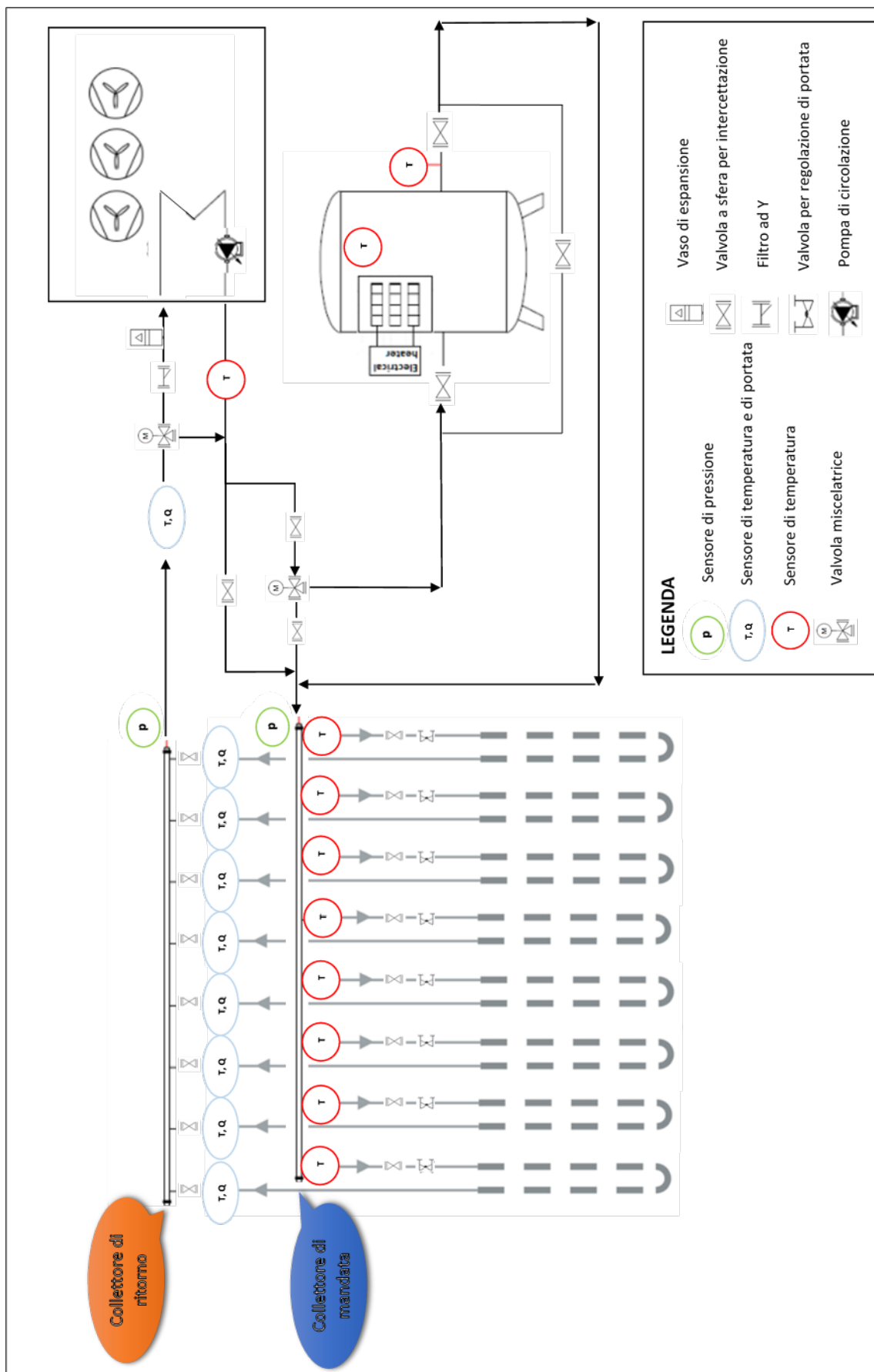


Figura 37: Schema dell'impianto realizzato



Figura 38: Collegamento delle sonde geotermiche ai due collettori e sensori di controllo



Figura 39: Chiller, serbatoio e collegamento delle sonde geotermiche ai due collettori

5.4. Controllo e monitoraggio dell'impianto

I sensori installati sull'impianto verranno collegati a schede di acquisizione (National Instruments) per convertire il segnale elettrico in dati di misura, monitorabili in ambiente LabVIEW. Sarà anche possibile gestire le componenti dell'impianto per il controllo di flusso e temperatura: in particolare, le resistenze del serbatoio di accumulo e la pompa di circolazione attraverso delle schede relay, e il chiller e le valvole miscelatrici tramite segnali elettrici modulabili. In uno chassis dedicato (vedi più sotto, Figura 44) saranno alloggiare le seguenti schede:

- NI 9216 (Figura 40): modulo di input di temperatura C Series PT100 RTD (*Resistance Temperature Detector*) a 8 canali, 400 S/s aggregato. Ogni scheda ha alloggiamenti sufficienti per alimentare e leggere i dati di 8 sonde PT100 contemporaneamente. Poiché sono presenti 21 sensori di temperatura, è stata prevista l'installazione di 3 schede.



Figura 40: Scheda Analog Input Temperatura NI 9216

- **NI 9208** (Figura 41): modulo di input di corrente C Series a 16 canali, 500 S/s, ± 20 mA. È 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 essendo possibile alimentare direttamente dalla scheda i sensori sopra citati, è stata prevista un'alimentazione esterna.



Figura 41: Scheda Analog Input NI 9208

- **NI 9265** (Figura 42): modulo di output di corrente C Series a 4 canali, per l'interfaccia e il controllo di attuatori degli attuatori delle valvole di miscelazione. 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. Il modulo NI 9265 richiede alimentazione esterna e include una barriera a doppio isolamento a terra per la sicurezza e per l'isolamento dal rumore.



Figura 42: Scheda Analog Output NI 9265

- NI 9485 (Figura 43): modulo digitale C Series a 8 canali, relay SSR per lo switch di segnali di tensione fino a 60 VDC/30 Vrms e corrente di switch fino a 750 mA per canale (1,2 A su 4 canali). Permette la connessione diretta a un'ampia gamma di dispositivi industriali come motori, attuatori e dispositivi DC. La scheda relay è utilizzata per controllare il comando di accensione del chiller e della pompa di circolazione.



Figura 43: Scheda Relay NI 9485

- cDAQ-9178 (Figura 44): chassis CompactDAQ USB-c a 8 slot. Progettato per sistemi di misura con sensori portatili, ha dimensioni compatte e 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. Le schede National Instruments precedentemente descritte saranno collegate allo chassis e controllate tramite un PC in ambiente LabVIEW.



Figura 44: Chassis di alimentazione e collegamento delle schede NI

6. 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 effettuata 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 e presenza di eventuali eteropie laterali. 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 paleoincisione, 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) questi equivalgono all'incirca 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 i pozzi, delle fluttuazioni climatiche stagionali. Tuttavia, elaborando i dati misurati nei 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 risalita di fluidi caldi 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 compresa tra 6 e 10 m ($1,79 \text{ W/m}^2$).

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

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
www.enea.it

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati
marzo 2024