

CARATTERIZZAZIONE TERMICA DEI SINGOLI LIVELLI STRATIGRAFICI PER L'OTTIMIZZAZIONE DEL DESIGN DI SONDE GEOTERMICHE TRAMITE ETRT RIPETUTI

Giorgia DALLA SANTA

Università degli Studi di Padova – Dipartimento ICEA, Dipartimento di Geoscienze
giorgia.dallasanta@unipd.it

Philippe PASQUIER

Polytechnique Montréal (Canada), Dept. of Civil, Geological and Mining Engineering
philippe.pasquier@polymtl.ca

Luca SCHENATO

Research Institute for Geo-Hydrological Protection, National Research Council CNR
luca.schenato@irpi.cnr.it

Antonio GALGARO

Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Geoscienze
antonio.galgaro@unipd.it

Sommario

Nell'iter di progettazione di sistemi a circuito chiuso a pompa di calore geotermica per la climatizzazione degli edifici, il sottosuolo locale si configura come il fattore invariante. E' quindi necessario valutare con precisione la sua capacità di scambio termico, che dipende principalmente dalla sequenza stratigrafica e dalle caratteristiche delle falde acquifere. Il metodo tradizionalmente utilizzato, chiamato Thermal Response Test (TRT) eseguito in una sonda pilota, fornisce un unico valore di conducibilità termica equivalente su tutta la profondità, senza riuscire a distinguere e localizzare livelli stratigrafici capaci di uno scambio termico più efficiente. Per superare questo limite, recentemente sono stati compiuti notevoli sforzi atti a differenziare il profilo verticale della conducibilità termica dei diversi livelli stratigrafici. Tra gli altri, è stato sviluppato un metodo innovativo detto Enhanced Thermal Response Test (ETRT), che utilizza cavi in fibra ottica ibrida (formati da un fascio di fibre ottiche e alcuni fili di rame) inseriti nel terreno. In questo modo, i cavi in fibra ottica permettono di misurare l'andamento della temperatura nel tempo lungo tutto il cavo con elevata precisione spaziale e temporale, mentre i fili di rame vengono utilizzati per stimolare termicamente il terreno.

Questo lavoro presenta il risultato ottenuto da una serie di ETRT effettuate tramite un cavo ibrido di fibra ottica inserito in un pozzo profondo 125 m situato a Padova, nella Pianura Padana, eseguito in supporto alla progettazione di un campo sonde geotermico. Il sondaggio a carotaggio continuo ha definito la stratigrafia come una successione continua di depositi alluvionali non consolidati di spessore molto limitato, che sono stati raggruppati in 15 diverse unità granulometriche. Sono stati eseguiti tre successivi test in stagioni diverse sollecitando termicamente il terreno e misurando in continuo la temperatura del suolo lungo tutta la profondità del pozzo, con una risoluzione spaziale di 1 m. Oltre al confronto tra le misure eseguite, è stato utilizzato un nuovo approccio di analisi dei dati misurati, che utilizza una regressione lineare multipla per distinguere la conducibilità termica di ogni singola unità granulometrica. Inoltre, i valori di conducibilità termica ottenuti con questo metodo sono stati confrontati e discussi considerando i risultati del TRT tradizionale e i valori di conducibilità termica ricavati da misure dirette effettuate su campioni. Nonostante l'elevata complessità del contesto geologico trattato, caratterizzato da livelli molto sottili, l'elevata ripetibilità dei risultati ottenuti dimostra l'affidabilità del metodo di misura utilizzato e del metodo analitico proposto.

1. Sistemi GSHP e caratterizzazione termica del sottosuolo: TRT e misure dirette

Il dimensionamento del campo sonde è il fattore chiave nella progettazione dei sistemi di climatizzazione degli edifici a pompa di calore geotermica GSHP. La lunghezza totale degli scambiatori e la disposizione spaziale delle sonde del camposonde influisce sulle prestazioni energetiche della pompa di calore e può modificare significativamente il costo dell'investimento iniziale, che attualmente rappresenta uno dei fattori che più significativamente contrastano l'utilizzo su vasta scala di questo tipo di sistemi di climatizzazione (Banks, 2008). Le proprietà termiche del sottosuolo, insieme alla temperatura indisturbata del terreno, sono i parametri principali necessari per calcolare la lunghezza totale degli scambiatori di calore a terra, tali da soddisfare le richieste termiche di riscaldamento e raffrescamento dell'edificio. E' quindi necessario valutare in modo corretto, soprattutto le proprietà termiche del sottosuolo in sito, in modo da dimensionare correttamente il camposonde. È chiaro che se la lunghezza totale degli scambiatori a terra è sottodimensionata, si avrà una minore efficienza energetica della pompa di calore e di conseguenza un maggiore consumo di elettricità. D'altro canto, se la capacità di scambio termico complessivo è sottostimata, verrà richiesta una maggiore lunghezza totale degli scambiatori, con costi di installazione inutilmente più elevati.

Il tasso di scambio termico nel terreno dipende dalle condizioni operative del sistema e dai contesti geologici locali e, quindi, (I) dalle proprietà termiche (conducibilità a capacità termica) dei singoli livelli della successione stratigrafica, (II) dalle condizioni idrogeologiche e dal flusso delle acque sotterranee, (III) dalla temperatura indisturbata del terreno e dal gradiente geotermico locale e (IV) dalla resistenza termica dello scambiatore di calore (Chiasson et al., 2000).

Attualmente, esistono due metodi principali per valutare le proprietà termiche del sottosuolo per dimensionare un campo sonde geotermico: (I) il Test di Risposta Termica o Thermal Response Test (TRT) eseguito in sito e (II) la stima della conducibilità termica di ciascun livello stratigrafico, eseguita associando a ciascun materiale identificato nella sequenza stratigrafica locale i valori di conducibilità termica riportati nelle linee guida e calcolando poi il valore medio sulla verticale (ASHRAE, 2011; VDI, 2010). Ogni livello geologico, infatti, contribuisce allo scambio termico in modo diverso, a seconda delle sue proprietà termiche, che dipendono dalla distribuzione granulometrica e della composizione mineralogica del materiale ma anche dello stato di consolidamento e della porosità nonché della profondità della falda, del contenuto d'acqua e della saturazione (ad esempio, la sabbia quarzosa compatta e satura presenta il valore di maggiore conducibilità termica tra i sedimenti, mentre le argille hanno valori molto bassi). E' chiaro che, in caso di presenza di flusso idrico sotterraneo capace di rinnovare continuamente la sorgente termica che scambia calore con la sonda, il contributo di tipo advettivo fornito allo scambio termico, che dipende dallo spessore dell'acquifero, dalla sua portata e capacità di ricarica, può raggiungere valori molto significativi, che possono risultare preponderanti rispetto al solo contributi di tipo conduttivo (Beier et al., 2011; Chiasson et al., 2000; Dehkordi e Schincariol, 2014).

I TRT vengono eseguiti in una sonda di prova seguendo procedure specifiche ben standardizzate (ASHRAE, 2011) a partire da Gehlin (2002). In una prima fase del TRT, viene misurata la temperatura dell'acqua in essa precedentemente contenuta e quindi in equilibrio termico con il terreno, ottenendo quindi la temperatura indisturbata del sottosuolo. In una seconda fase, l'acqua viene riscaldata a carico termico costante e continuamente ricircolata nella tubazione a circuito chiuso inserita nel terreno, misurando in continuo la sua temperatura di ingresso e di uscita dal terreno. I risultati ottenuti forniscono il valore di resistenza termica della sonda e la conducibilità termica equivalente del sistema. Essi sono interpretati attraverso il modello di Sorgente Lineare Infinita (ILS) (Signorelli et al., 2007; Beier et al., 2011): l'andamento della temperatura media del fluido termovettore tra l'ingresso e l'uscita dalla sonda geotermica è rappresentata in funzione del logaritmo naturale del tempo, ottenendo una relazione lineare la cui pendenza k è legata alla conducibilità termica equivalente del terreno (λ_{eq}) mediante la seguente equazione:

$$\lambda_{eq} = \frac{q'}{4 \cdot \pi \cdot k} \quad (1)$$

dove q' è il tasso costante di iniezione/estrazione di calore per unità di lunghezza del BHE. Pertanto, la conducibilità termica equivalente fornita dal TRT è rappresentativa dell'intero sistema sonda-terreno e tiene conto della stratigrafia nel suo complesso, nonché delle condizioni idrogeologiche locali, della temperatura indisturbata. Tuttavia, l'esecuzione di un TRT è piuttosto costosa e nella maggior parte dei Paesi è strettamente richiesta dalle autorità responsabili del processo di autorizzazione solo per i sistemi GSHP di elevata potenza.

Quando si progettano sistemi GSHP di dimensioni più contenute, per il condizionamento di singoli edifici residenziali, spesso il TRT non viene eseguito. In questi casi, avendo a disposizione la successione stratigrafica locale, è possibile stimare un valore equivalente della Conduttività Termica (CT) del terreno utilizzando i valori indicati per ciascuna litologia nelle più importanti linee guida internazionali (ASHRAE, 2011; VDI, 2010). Una recente pubblicazione mette a confronto i valori proposti dalla VDI con quelli presenti in più di altre 50 pubblicazioni (Dalla Santa et al., 2020). La CT equivalente di tutta la sequenza stratigrafica può quindi essere calcolata come valore medio di quella tipica di ciascun deposito, ponderata sullo spessore del deposito stesso. Questo approccio è economico e rapido, ma trascura completamente il possibile contributo advettivo allo scambio termico tra BHE e il terreno circostante negli acquiferi. Inoltre, è affetto da diverse incertezze legate all'attribuzione del corretto valore di CT a ciascun deposito (Dalla Santa et al., 2020), dato che le tabelle sono organizzate per classi litologiche (per le rocce) e granulometriche (per i sedimenti), ma le proprietà termiche presentano una variabilità significativa anche nell'ambito della stessa classe, poiché dipendono dalla percentuale relativa dei diversi minerali componenti, dalla porosità/densità, dalla struttura e dalla tessitura, del grado di saturazione e del contenuto d'acqua. L'efficacia di questo metodo quindi dipende dall'ambiente geologico e dalla situazione idrogeologica locale (vedi Galgaro et al., 2021).

Per una valutazione delle proprietà termiche più di dettaglio del sito specifico, esse possono anche essere determinate sperimentalmente attraverso misura diretta su campioni prelevati in sito con strumenti appositi, sebbene anche in questo modo si riescano a misurare solo i valori di CT e diffusività termica, che caratterizzano la sola conduzione.

Pertanto, sebbene i TRT convenzionali forniscono un'unica CT equivalente e, di conseguenza, le proprietà termiche degli singoli livelli stratigrafici siano indistinguibili, nella stessa sequenza stratigrafica strati diversi potrebbero avere comportamenti termici molto diversi, principalmente a causa della presenza e dell'intensità del flusso di acque sotterranee, o della granulometria e della composizione mineralogica (si pensi ad un acquifero compreso tra due livelli di argilla impermeabile o ad un bedrock dolomitico rispetto al deposito di copertura superficiale). Pertanto, l'identificazione dei diversi contributi allo scambio termico forniti da ogni singolo livello stratigrafico può ottimizzare la progettazione degli scambiatori aiutando a determinare la miglior combinazione di lunghezza del singolo scambiatore e numero di scambiatori, in modo da ottenere il massimo scambio termico al minor costo iniziale di perforazione e installazione, che aumenta all'aumentare della profondità del foro. Infatti, se la CT degli strati più profondi è significativamente più basso di quelli meno profondi, si potrebbe ottenere un progetto migliore installando un numero maggiore di fori più corti o viceversa. Per superare questa limitazione, si sta sviluppando l'utilizzo di fibre ottiche, che permettono il rilevamento della temperatura distribuita con un'elevata risoluzione spaziale e temporale.

2. Materiali e Metodi

2.1 Enhanced Thermal Response Test

Il cavo in fibra ottica permette di registrare le variazioni della distribuzione della temperatura lungo tutta la profondità mentre nel tubo scambiatore viene eseguito il TRT tradizionale; in questo modo si osserva il trasferimento di calore nel sottosuolo in modo differenziale sulla verticale a seconda delle caratteristiche del livello stratigrafico e il conseguente innalzamento e successivo decadimento della temperatura, ottenendo così un Test di Risposta Termica Distribuita (DTRT), capace di fornire le

proprietà termiche del singolo livello stratigrafico. Le prime sperimentazioni sono state realizzate inserendo le fibre ottiche negli stessi tubi scambiatori (Sellwood et al. 2015, Vélez Márquez et al. 2018) o cementate nelle speciali *grout* (Mascarin et al., 2022) di sigillatura del foro (Cao et al. 2018). In alternativa, come nel caso in esame, si può utilizzare un cavo ibrido, che integra le fibre ottiche con fili elettrici riscaldanti così, oltre alla modalità passiva, il cavo ibrido può essere utilizzato in modalità attiva per eseguire un Enhanced Thermal Response Test (ETRT) (Wilke et al., 2020). In questo caso, il cavo stesso sollecita termicamente il terreno tramite la somministrazione di una corrente elettrica costante nei cavi di rame, che induce una potenza di riscaldamento uniforme su tutta la verticale e, allo stesso tempo, il comportamento termico transitorio del terreno circostante la sonda geotermica viene misurato con continuità spaziale attraverso le fibre ottiche utilizzando un interrogatore basato sull'analisi dei segnali retrodiffusi Raman Stokes e anti Stokes (vedi Schenato, 2017). L'interrogatore qui utilizzato è di AP sensing, fornisce una ripetibilità della misura di temperatura di circa 0,35°C, mentre la accuratezza assoluta è di 1°C.

2.2 Il sito test e le campagne di misura

Come descritto in Dalla Santa et al. (2022), il sito test si trova nel centro storico medievale della città di Padova, in Pianura Padana. Qui, un complesso monastico medioevale è stato convertito nel nuovo campus universitario dell'Università di Padova attraverso un profondo intervento di ristrutturazione. Il complesso è composto da aule didattiche, uffici, auditorium e una vasta biblioteca dedicata alla conservazione di centinaia di libri antichi di storia, filosofia e arti, con un volume totale pari a 61500 m³. Questo è uno dei siti dimostrativi del progetto EU Horizon 2020 denominato Geo4Civhic, sull'applicazione di sistemi geotermici a bassa entalpia nella ristrutturazione di edifici storici.

Il campo sonde è costituito da oltre 60 sonde a doppia U di 120 m installati nei 4 chiostri. Il cavo ibrido in fibra ottica è stato installato nel pozzo di monitoraggio centrale, a distanza di 1 m dalla BHE più vicina (lunga 120 m) dove è stato eseguito il TRT tradizionale, fino alla profondità di 125 m. L'installazione consiste in un cavo ibrido in fibra ottica multimodale, che incorpora 4 fili di rame e 5 fibre ottiche, calato nel pozzo dopo la perforazione. Il cavo dispiegato è lungo 276 m in totale, di cui 248 m sono sigillati nel pozzo in una configurazione ad anello (124 verso l'alto e 124 verso il basso, a causa di un leggero riempimento del pozzo).

La sequenza stratigrafica locale fornita dal carotaggio continuo è composta da una continua alternanza di depositi non consolidati di piccolo spessore, come rappresentato in Figura 1. I campioni sono stati classificati presso il Laboratorio di Geotecnica dell'Università di Padova eseguendo anche analisi della composizione mineralogica. Inoltre, sulle carote sono state eseguite più di 80 misure dirette di CT. A marzo 2018, novembre 2018 e giugno 2019 sono state condotte tre campagne di ETRT in modalità attiva, per misurare il profilo di CT verticale: dopo mezz'ora di rilevamento della temperatura indisturbata del sottosuolo, è stata applicata una sollecitazione termica nei cavi di rame per la durata di 5 giorni, seguiti da 5 giorni di rilassamento termico, mentre la temperatura del suolo veniva registrata in continuo lungo tutta la profondità del pozzo, con una risoluzione spaziale di 1 m. Durante la fase di riscaldamento, la potenza è stata compresa tra 3700 (a marzo e novembre 2018) e 4000 W a giugno 2019, con alcune fluttuazioni provocate dall'utilizzo dell'energia elettrica del cantiere.

3. Risultati e discussione

I dati di temperatura misurata nel tempo con la risoluzione spaziale di 1m, ottenuti durante le singole campagne di misura, sono stati elaborati singolarmente per ciascun livello stratigrafico applicando la ILS, e poi confrontati tra loro, come rappresentato in Figura 1a. Per ogni livello è stata calcolata la resistenza termica del pozzo R_b , rappresentata in Figura 1b, anch'essa variabile a seconda della penetrazione del *grout* nei singoli livelli. I dettagli dei metodi analitici di trattamento dati sono riportati in Dalla Santa et al. (2022). Risulta un buon accordo tra i valori ottenuti dalle singole

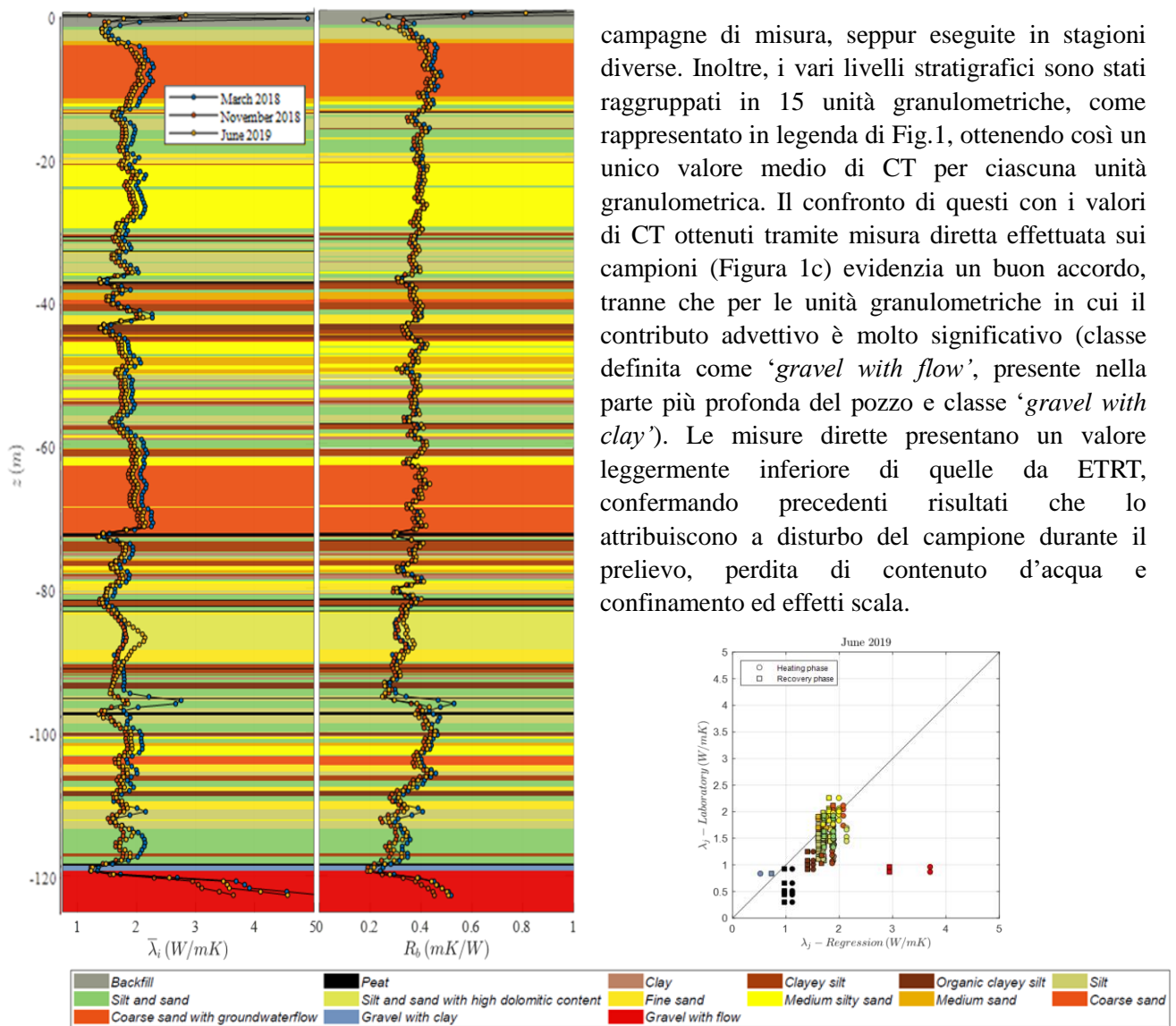


Fig. 1 Conducibilità termica (λ) e resistenza termica del pozzo (R_b) calcolate per i singoli livelli stratigrafici ottenuta elaborando i dataset delle singole campagne di misura. Nel riquadro, confronto tra i valori di CT ricavati dalla campagna ETRT di giugno 2019 e da misure dirette sui campioni (da Dalla Santa et al., 2022)

4. Conclusioni

Nonostante il complesso contesto geologico, costituito da una continua alternanza di sottili depositi non consolidati, gli output ottenuti hanno evidenziato i seguenti risultati significativi:

- (I) Il metodo proposto, basato sulla regressione lineare multipla, è stato in grado di identificare la CT anche per unità granulometriche molto più sottili rispetto all'intervallo di campionamento di 1 m, ed ha dimostrato una buona ripetibilità, dato che i tre set di dati acquisiti in tre stagioni sono stati elaborati separatamente e hanno fornito valori di CT e resistenza del pozzo molto simili;
- (II) il buon accordo tra valori di CT ottenuti e la successione stratigrafica, evidenzia il buon funzionamento del metodo analitico applicato ai singoli livelli stratigrafici.
- (III) Inoltre, il metodo si dimostra capace di catturare l'influenza del flusso delle acque sotterranee e delle differenze nella composizione mineralogica dei singoli strati;
- (IV) Il confronto con i dati di conducibilità termica ottenuti da misure dirette eseguite sulle carote conferma che la maggior parte delle misure di laboratorio sottostimano la conducibilità termica in situ,

come già osservato in lavori precedenti.

Al contrario dei TRT tradizionali quindi, le misure ETRT, sfruttando la misura di temperatura a fibra ottica, forniscono una rappresentazione spazialmente differenziata del comportamento termico del sottosuolo lungo la verticale con un'elevata risoluzione spaziale, permettendo così di distinguere la CT e la resistenza termica della sonda per ciascun livello stratigrafico. L'identificazione dei diversi contributi allo scambio termico forniti da ciascun livello può ottimizzare la progettazione di scambiatori di calore a terreno, supportando la valutazione della lunghezza migliore per il singolo scambiatore, in modo da ottenere il massimo scambio termico al minor costo iniziale. In questo caso, ad esempio, una maggiore lunghezza dello scambiatore ad intercettare l'acquifero profondo caratterizzato da una CT equivalente (quindi comprensiva del contributo convettivo) che raggiunge i $5\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ avrebbe permesso uno scambio termico molto più efficiente.



GEO4CIVHIC project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement No. 792355

Bibliografia

- ASHRAE, "ASHRAE handbook: HVAC applications - Geothermal Energy." Heating, Ventilating and Air-Conditioning Applications, SI Edition., vol. 34, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA, US (2011). Chapter 34.
- Beier R. A., Smith M. D., Spitler J. D. (2011). "Reference data sets for vertical borehole ground heat exchanger models and thermal response test analysis". *Geothermics*, 40(1), 79-85.
- Cao, D., Shi, B., Loheide II, S. P., Gong, X., Zhu, H. H., Wei, G., and Yang, L. (2018). "Investigation of the influence of soil moisture on thermal response tests using active distributed temperature sensing (A-DTS) technology." *Energy Build.*, 173, 239-251.
- Chiasson A.D., Rees S.J., Spitler J.D. (2000). "A preliminary assessment of the effects of groundwater flow on closed-loop ground source heat pump systems". Oklahoma State Univ- Stillwater. OK (US).
- Dalla Santa G., Galgaro A., Sassi R., Cultrera M., Scotton P., Mueller J., Bertermann D., Mendrinis D., Pasquali R., Perego R., Pera S., Di Sipio E., Cassiani G., De Carli M., Bernardi A. (2020). "An updated ground thermal properties database for GSHP applications". *Geothermics*, 85, 101758.
- Dalla Santa G., Pasquier P., Schenato L., Galgaro A. (2022). "Repeated ETRTs in a Complex Stratified Geological Setting: High-Resolution Thermal Conductivity Identification by Multiple Linear Regression". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 148(4), 04022007.
- Dehkordi S. E., Schincariol R. A. (2014). "Effect of thermal-hydrogeological and borehole heat exchanger properties on performance and impact of vertical closed-loop geothermal heat pump systems". *Hydrogeology Journal* 22 (1), 189–203. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1060-6>
- Galgaro A., Dalla Santa G., Zarrella, A. (2021). "First Italian TRT database and significance of the geological setting evaluation in borehole heat exchanger sizing". *Geothermics*, 94, 102098.
- Gehlin S. (2002). "Thermal Response Test: method, development and evaluation". PhD Thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
- Mascarin L., Garbin E., Di Sipio E., Dalla Santa G., Bertermann D., Artioli G., Bernardi A., Galgaro A. (2022). "Selection of backfill grout for shallow geothermal systems: Materials investigation and thermo-physical analysis". *Construction and Building Materials*, 318, 125832.
- Schenato, L. (2017). "A review of distributed fiber optic sensors for Geo-Hydrological applications." *Appl. Sci.*, 7(9), 896. <https://doi.org/10.3390/app7090896>.
- Sellwood S., Hart D., Bahr J. (2015). "Evaluating the use of in-well heat tracer tests to measure borehole flow rates." *Ground Water Monit. Remediat.*, 35 (4), 85–94. <https://doi.org/10.1111/gwmmr.12134>
- Signorelli S., Bassetti S., Pahud D., Kohl T. (2007). "Numerical evaluation of thermal response tests". *Geothermics*, 36(2), 141-166.
- Vélez Márquez M. I., Raymond J., Blessent D., Philippe M., Simon N., Bour O., Lamarche, L. (2018). "Distributed thermal response tests using a heating cable and fiber optic temperature sensing." *Energies*, 11 3059.
- Wilke S., Menberg K., Steger H., Blum P. (2020). "Advanced thermal response tests: A review." *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 119, 109575. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109575>