

**MINISTERO
DELLE INFRASTRUTTURE E DELLA MOBILITÀ SOSTENIBILI
STRUTTURA TECNICA DI MISSIONE**




COMUNE DI TORINO



**METROPOLITANA AUTOMATICA DI TORINO
LINEA 2 – TRATTA POLITECNICO – REBAUDENGO**

**PROGETTAZIONE DEFINITIVA
Lotto generale: Politecnico - Rebaudengo**


| | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|----|----|----|---|-----|-----|---|------|------|-----------------------------|------|------------|
| PROGETTO DEFINITIVO | |  INFRA.TO <i>infrastrutture per la mobilità</i> | | | | | | | | | | INFRATRASPORI S.r.l. | | |
| DIRETTORE PROGETTAZIONE Responsabile integrazione discipline specialistiche | IL PROGETTISTA | | | | | | | | | | | | | |
| Ing. R. Crova Ordine degli Ingegneri della Provincia di Torino n. 6038S | Ing. F. Azzarone Ordine degli Ingegneri della Provincia di Torino n. 12287J | RELAZIONE SUGLI ASPETTI AMBIENTALI RELATIVI ALLE GEOSTRUTTURE ENERGETICHE | | | | | | | | | | SCALA | DATA | |
| | | ELABORATO | | | | | | | | REV. | | | | |
| | | | | | | | | | | Int. | Est. | | | |
| BIM MANAGER Geom. L. D'Accardi | | MT | L2 | T1 | A0 | D | AMB | GEN | R | 012 | 0 | 1 | - | 24/03/2023 |

AGGIORNAMENTI

Fg. 1 di 1

| REV. | DESCRIZIONE | DATA | REDATTO | CONTROLLATO | APPROVATO | VISTO |
|------|---|----------|---------|-------------|------------|----------|
| 0 | EMISSIONE | 21/12/21 | SAi | P.Merafina | P.Merafina | R. Crova |
| 1 | Emissione finale a seguito di verifica preventiva | 10/10/22 | SAi | P.Merafina | P.Merafina | R. Crova |
| 2 | Revisione a seguito di richiesta di integrazioni PAUR (Fase di Adeguatezza) | 27/03/23 | SAi | P.Merafina | P.Merafina | R. Crova |
| - | - | - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - | - | - |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----------|----|----|-----------|------------|---------|----------|----|----|-----------|------------|---|--|--|--|--|--|--|
| <table border="1"> <tr> <td>LOTTO 0</td> <td>CARTELLA</td> <td>16</td> <td>32</td> <td>MTL2T1A0D</td> <td>AMBGENR012</td> </tr> </table> | | | | | | LOTTO 0 | CARTELLA | 16 | 32 | MTL2T1A0D | AMBGENR012 | STAZIONE APPALTANTE DIRETTORE DI DIVISIONE INFRASTRUTTURE E MOBILITÀ Ing. R. Bertasio RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO Ing. A. Strozziro | | | | | | |
| LOTTO 0 | CARTELLA | 16 | 32 | MTL2T1A0D | AMBGENR012 | | | | | | | | | | | | | |


| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

INDICE


| | | |
|------------|--|-----------|
| 1. | PREMESSA | 6 |
| 1.1 | GENERALITÀ | 6 |
| 1.2 | SINTESI DEI PARERI EMESSI DAGLI ENTI IN FASE DI APPROVAZIONE DEL PFTE | 6 |
| 2. | LE GEOSTRUTTURE ENERGETICHE | 10 |
| 3. | VALUTAZIONE DEI POTENZIALI IMPATTI | 13 |
| 3.1 | ASPETTI GENERALI | 13 |
| 3.2 | INTERFERENZA CON IMPIANTI PREESISTENTI | 15 |
| 3.3 | ZONA DI ALTERAZIONE DOVUTA ALL'ATTIVAZIONE TERMICA DELLA LINEA 2 | 38 |
| 4. | AZIONI DI MITIGAZIONE | 41 |
| 5. | MONITORAGGIO | 42 |
| 5.1 | ASPETTI GENERALI | 42 |
| 5.2 | INDICAZIONI SPECIFICHE | 43 |
| 6. | CONCLUSIONI | 50 |
| 7. | BIBLIOGRAFIA | 52 |
| 8. | ALLEGATI | 55 |

INDICE DELLE FIGURE

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 1. | Esempio di palo (sx) e diaframma energetico (dx). | 11 |
| Figura 2. | Schematizzazione del funzionamento di una galleria energetica per il riscaldamento e condizionamento degli edifici. | 11 |
| Figura 3. | Esempio di ZAT generati da 10 anni di funzionamento di alcuni impianti geotermici a circuito aperto GWHP nella città di Torino (da Barla et al., 2018). | 15 |

| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

- Figura 4. Localizzazione degli impianti geotermici censiti di interesse per la Linea 2 della metropolitana 19
- Figura 5. Mappa termica del dominio del modello numerico al termine della stagione invernale alla profondità del tratto in C&C della ML2 (Politecnico di Torino, 2023). 22
- Figura 6. Mappa termica del dominio del modello numerico al termine della stagione invernale alla profondità del tratto in TBM della ML2 (Politecnico di Torino, 2023). 23
- Figura 7. Mappa termica del dominio del modello numerico al termine della stagione estiva alla profondità del tratto in C&C della ML2 (Politecnico di Torino, 2023). 24
- Figura 8. Mappa termica del dominio del modello numerico al termine della stagione estiva alla profondità del tratto in TBM della ML2 (Politecnico di Torino, 2023). 25
- Figura 9. Area di Torino a Nord della Barriera di Milano, con indicazione del tracciato di Linea 2 e dell'impianto geotermico nr. 23. In planimetria è indicata la traccia delle sezioni A-A' e B-B' (Politecnico di Torino, 2023). 26
- Figura 10. Sezione A-A': mappa di temperatura al termine della stagione invernale del quarto anno di attivazione termica della ML2. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5 (Politecnico di Torino, 2023). 27
- Figura 11. Sezione A-A': mappa di temperatura al termine della stagione estiva del quarto anno di attivazione termica della ML2. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore 5 (Politecnico di Torino, 2023). 27
- Figura 12. Sezione B-B': mappa della temperatura alla fine della stagione invernale del quarto anno di attivazione termica della ML2. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5 (Politecnico di Torino, 2023). 28
- Figura 13. Sezione B-B': mappa di temperatura al termine della stagione estiva del quarto anno di attivazione termica della ML2. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5 (Politecnico di Torino, 2023). 28
- Figura 14. Inquadramento dell'area di Torino circostante al tracciato tra la stazione Verona e Mole-Giardini Reali. In planimetria sono indicate la traccia delle sezioni C-C' e D-D' e l'ubicazione gli impianti geotermici nr. 22, 24 e 35 (Politecnico di Torino, 2023). 29
- Figura 15. Sezione C-C': mappa di temperatura al termine della stagione di riscaldamento del quarto anno di attivazione termica della ML2, con indicazione del plume termico dell'impianto nr. 24. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5 (Politecnico di Torino, 2023). 30
- Figura 16. Sezione C-C': mappa di temperatura al termine della stagione estiva del quarto anno di attivazione termica della ML2. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5 (Politecnico di Torino, 2023). 30
- Figura 17. Sezione D-D': ZAT causata a valle della Linea 2 dall'attivazione termica della geostruttura e a monte dall'impianto geotermico nr. 22. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5 (Politecnico di Torino, 2023). 31

| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

- Figura 18. Sezione D-D': mappa di temperatura al termine della stagione estiva del quarto anno di attivazione termica della ML2. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5 (Politecnico di Torino, 2023). 32
- Figura 19. Inquadramento dell'area del centro urbano di Torino circostante al tracciato della Linea 2, tra via Po e la stazione Porta Nuova. In planimetria sono indicate la traccia delle sezioni E-E' e F-F' e l'ubicazione degli impianti geotermici nr. 9, 16, 25, 31, 33 (Politecnico di Torino, 2023). 33
- Figura 20. Sezione E-E': mappa della temperatura circostante la tratta di Linea 2 al termine della stagione invernale del quarto anno di attivazione. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5. 34
- Figura 21. Sezione E-E': mappa della temperatura circostante la tratta di Linea 2 al termine della stagione estiva del quarto anno di attivazione. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5. 34
- Figura 22. Sezione F-F': mappa delle temperature al termine della stagione invernale del quarto anno di attivazione. In figura sono indicati i plumi termici dovuti agli impianti nr. 25 e 31. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5. 35
- Figura 23- Sezione F-F': mappa delle temperature al termine della stagione estiva del quarto anno di attivazione. In figura sono indicati i plumi termici dovuti agli impianti nr. 25 e 31. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5. 35
- Figura 24. Sezione E-E': mappa della temperatura circostante la tratta di Linea 2 al termine della stagione invernale del quarto anno di attivazione. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5. 36
- Figura 25. Sezione G-G': mappa delle temperature al termine dell'attivazione nella stagione invernale del quarto anno di simulazione. In figura sono indicati i plumi termici dovuti agli impianti nr. 11 e 14, entrambi del Politecnico di Torino. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5 (Politecnico di Torino, 2023). 37
- Figura 26. Sezione G-G': mappa delle temperature al termine dell'attivazione nella stagione invernale del quarto anno di simulazione. In figura sono indicati i plumi termici dovuti agli impianti nr. 11 e 14, entrambi del Politecnico di Torino. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5. (Politecnico di Torino, 2023) 37
- Figura 27. Zona di alterazione termica per la tratta di ML2 considerata nel presente studio. La linea nera tratteggiata delimita il confine entro il quale le variazioni di temperatura superano 1°C (Politecnico di Torino, 2023). 40
- Figura 28. Mappa con indicazione dei piezometri ad oggi attrezzati per il monitoraggio in continuo del livello piezometrico e della temperatura dell'acqua di falda. 48
- Figura 29. Mappa con l'ubicazione dei piezometri integrativi utilizzabili per il monitoraggio della temperatura dell'acqua di falda con misure periodiche manuali. 49



| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

Figura 30. Mappa con l'ubicazione dei piezometri utilizzabili per il monitoraggio dei parametri chimico-fisici e microbiologici dell'acqua di falda. 50

INDICE DELLE TABELLE

| | | |
|------------|---|----|
| Tabella 1. | Lista degli acronimi utilizzati nel presente documento. | 9 |
| Tabella 2. | Elenco degli impianti geotermici a circuito aperto di interesse. | 16 |
| Tabella 3. | Caratteristiche dei piezometri attrezzati per il monitoraggio in continuo del livello piezometrico e della temperatura dell'acqua di falda. | 43 |
| Tabella 4. | Lista dei piezometri integrativi per il monitoraggio della temperatura dell'acqua di falda con misure periodiche manuali. | 44 |
| Tabella 5. | Lista dei piezometri da cui effettuare i campionamenti per il monitoraggio dei parametri chimico-fisici dell'acqua di falda. | 46 |

| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

1. PREMESSA

1.1 Generalità


La presente relazione si inserisce nell'ambito dell'affidamento della progettazione definitiva della Linea 2 della Metropolitana - Tratta Politecnico-Rebaudengo, disciplinato dal Contratto tra la Città di Torino e la società Infratrasporti.TO s.r.l., ed ha per oggetto l'analisi degli aspetti ambientali riferiti alle geostrutture energetiche che saranno attivate a seguito della realizzazione delle opere sotterranee. In particolare, sulla base dei dati disponibili, dei risultati provenienti dalle indagini eseguite nel corso della progettazione definitiva, delle esperienze pregresse e dei dati bibliografici, si valuteranno le eventuali anomalie e interferenze indotte dall'attivazione termica della galleria e delle opere strutturali ad essa annesse, proposte in progetto.

Nello sviluppo della presente fase progettuale sono state condotte indagini in situ ed in laboratorio per definire i parametri geotermici necessari per la caratterizzazione dei terreni interessati dalle opere e partendo dall'analisi delle caratteristiche plano-altimetriche delle opere previste, delle modalità costruttive, della caratterizzazione idrogeologica dei terreni presenti lungo il tracciato, dei relativi parametri termo-idraulici e delle tipologie strutturali attivabili termicamente (gallerie realizzate con TBM o metodologia "Cut & Cover") sono state individuate le tratte omogenee sulla base delle quali è stato possibile definire, mediante specifici modelli numerici accoppiati termo idraulici, le potenze termiche prodotte.

La presente relazione, riporta le indagini aggiornate, le considerazioni scaturite dall'analisi dei nuovi dati di monitoraggio e le prime indicazioni fornite dal modello numerico tridimensionale a grande scala, elaborato dal Politecnico di Torino nell'ambito della convenzione stipulata fra INFRA.TO e lo stesso Ateneo, che ha preso in considerazione tutti gli elementi interessati dall'opera: attivazione termica delle opere strutturali della linea 2, impianti geotermici esistenti (dati aggiornati a dicembre 2022), condizioni litologiche, geologiche, idrogeologiche aggiornate sulla base delle prove in situ TRT (Thermal Response Test) eseguite nell'ambito del Progetto Definitivo per ottenere il valore di conduttività termica dei terreni adibiti all'installazione degli impianti geotermici a bassa entalpia.

1.2 Sintesi dei pareri emessi dagli Enti in fase di approvazione del PFTE

Con la presente relazione si intende esplicitare le considerazioni sviluppate in seguito alle osservazioni emerse in fase di specificazione dei contenuti della VIA, ai sensi del D.lgs. 152/2006 e s.m.i. e dell'art. 14, comma 3 della Legge 241/1990 s.m.i., relativa alla Linea 2 della Metropolitana di Torino e opere connesse. Di seguito si riportano le richieste dei vari enti coinvolti in Conferenza dei Servizi e le relative tematiche oggetto di approfondimento con il richiamo ai paragrafi della presente relazione dove tali argomenti sono stati trattati.

| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

Allegato 1 e 2 alla Determina Dirigenziale 2248 del 14 luglio 2020 - Verbale Riunione dell'Organo Tecnico Comunale


... per quanto riguarda gli approfondimenti in materia di utilizzo ai fini geotermici delle opere strutturali, oltre agli approfondimenti di tipo idrogeologico dettagliati nei pareri pervenuti (in particolare da parte della Regione e della Città Metropolitana), prevedere prove termiche per la caratterizzazione dei materiali attraversati e prove TRT (thermal response test), propedeutiche all'allestimento del modello di simulazione numerica. Inoltre si richiede l'acquisizione dei dati sulle sonde a circuito aperto e chiuso esistenti per valutare le interazioni dell'opera sull'efficienza degli impianti esistenti.

Nel corso della progettazione definitiva sono state effettuate delle prove specifiche quali le TRT e prove termiche su terreni in laboratorio, ampiamente descritte nella Relazione Caratterizzazione termo-idraulica dei terreni (MTL2T1A0DGTRCOMR002), per la definizione dei parametri da utilizzare nello sviluppo dell'analisi numeriche. Lo studio condotto ha tenuto conto delle informazioni disponibili aggiornate a dicembre 2022, come meglio specificato al paragrafo 3.2 della presente relazione, in ottemperanza alla richiesta da parte della Regione Piemonte, formulata nell'ambito della conferenza dei servizi sulla Variante urbanistica n. 333 al PRGC, di cui alla determina dirigenziale della Città di Torino, atto DD 5168 del 26/10/2022 inerente alla verifica di Assoggettabilità alla fase di VAS (Valutazione Ambientale Strategica).

Allegato 3 alla Determina Dirigenziale 2248 del 14 luglio 2020 – Parere Città Metropolitana.

“Si ritiene comunque necessario che vengano valutate eventuali interferenze con impianti esistenti e/o in corso di realizzazione della stessa tipologia nell'area limitrofa agli interventi oggetto del progetto in questione. In tali valutazioni dovrà essere tenuto conto anche delle eventuali conseguenze termiche dovute all'attraversamento della galleria dell'acquifero ed all'utilizzo della stessa quale fonte energetica alternativa tramite i concii termici. Dovrà essere effettuata, a parere di questa Direzione, una previsione dell'evoluzione nel tempo della diffusione del caldo/freddo nella falda, simulandone l'ampiezza, la durata e la modalità di propagazione, attraverso l'utilizzo di uno strumento capace di eseguire simulazioni in regime transitorio al fine di effettuare una simulazione numerica dell'evoluzione del plume termico (o bolla termica) conseguente alle alterazioni termiche previste (reimmersioni, concii, etc). Tali simulazioni dovranno essere relative almeno al primo e al terzo anno di funzionamento.

Nel corso dell'anno 2022 la società Infratrasporti.TO s.r.l. e il Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica (DISEG) del Politecnico di Torino hanno stipulato un contratto di ricerca attuativo di accordo quadro relativo a “Studio relativo all'attivazione termica della galleria della nuova linea 2 della Metropolitana di Torino e alle interferenze con le infrastrutture in superficie”. Come anticipato al punto precedente, nell'ambito di tale studio è stata condotta la modellazione 3D agli elementi finiti con accoppiamento termo-idraulico, alla scala della città, che ha tenuto conto delle informazioni disponibili aggiornate a dicembre 2022 e relative agli impianti geotermici esistenti nell'intorno dell'area di intervento (a circuito aperto e chiuso) in ottemperanza

| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

alla richiesta da parte della Regione Piemonte formulata nell'ambito della conferenza dei servizi sulla Variante urbanistica n. 333 al PRGC. Le considerazioni che emergono dallo studio condotto con i dati disponibili sopra descritti, sono sintetizzate nei paragrafi 3.2 e 3.3 della presente relazione.

Allegato 9 alla Determina Dirigenziale 2248 del 14 luglio 2020 – Regione Piemonte


“Utilizzo strutture a scopi geotermici

43. Il merito all'ipotesi prevista dal progetto dell'utilizzo per scopi geotermici delle strutture dell'opera, il progetto definitivo dovrà includere quanto segue:

- *descrizione della modalità di trasferimento dell'energia termica sottratta all'acquifero ai possibili ricettori esistenti;*
- *alla luce della revisione della carta piezometrica come richiesta al punto 41, predisporre una modellizzazione che individui l'estensione della fascia di alterazione della temperatura di falda verso est cioè a valle idrogeologico dell'opera, ponendo in evidenza la presenza di utenze geotermiche situate nella fascia individuata;*
- *programmazione di un sistema di monitoraggio, per tutta la tratta interessata sia dalla realizzazione del sistema geotermico che dalla presenza della falda superficiale, costituito da un numero adeguato di piezometri, impostati nell'acquifero superficiale, acquifero interessato dalla costruzione dell'opera, ed esteso in un intorno tale da coprire tutta la fascia individuata dalla modellazione numerica al fine di monitorare:*
 - *l'estensione del plume termico stagionale;*
 - *l'interazione tra l'alterazione termica della falda e la variazione delle specie chimiche e batteriologiche disciolte definendo le tempistiche delle determinazioni qualitative.*

In sede di progetto definitivo dovranno essere attentamente valutate le interazioni con altre utenze già autorizzate con particolare riguardo all'alterazione della temperatura di falda che l'impianto in oggetto andrà a causare e che potrebbe modificare l'efficienza di impianti analoghi già in funzione a valle dello stesso.


Il lavoro svolto nella fase di sviluppo del progetto definitivo ha definito in modo puntuale le modalità di trasferimento dell'energia termica ai possibili ricettori, si rimanda pertanto agli elaborati di progetto definitivo. Come già accennato in precedenza è stata condotta la modellazione numerica 3D agli elementi finiti con accoppiamento termo-idraulico, alla scala della città che tiene conto dei dati aggiornati a dicembre 2022. Si rimanda ai paragrafi 3.2 e 3.3 della presente relazione che riassumono le considerazioni in merito a tale tematica.

| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

Sulla base delle richieste emerse in fase di scoping nella presente fase progettuale sono stati realizzati gli interventi necessari per l'attuazione di un sistema di monitoraggio così come descritto al paragrafo 5 della presente relazione.

Tabella 1. Lista degli acronimi utilizzati nel presente documento.

| Acronimi | Definizioni |
|-----------------|---|
| PFTE | Progetto di fattibilità tecnico-economica |
| GWHP | Groundwater Heat Pump System: impianti geotermici a bassa entalpia a circuito aperto |
| GSHP | Ground Source Heat Pump System: impianti geotermici a bassa entalpia a circuito chiuso |
| ZAT | Zona di Alterazione Termica: zona di disturbo nel sottosuolo causata dai GWHP e dai GSHP |
| BHE | Borehole Heat Exchanger: sinonimo di GSHP ovvero impianto geotermici a bassa entalpia a circuito chiuso |
| ML2 | Linea 2 della Metropolitana di Torino |

| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

2. LE GEOSTRUTTURE ENERGETICHE

Per geostrutture energetiche si intende quell'insieme di opere geotecnico-strutturali, come ad esempio una fondazione o una galleria, capaci di coniugare in un unico elemento la duplice finalità di stabilità strutturale e di scambio di calore con il terreno circostante (Barla et al. 2016). Agli elementi costruttivi dell'opera geotecnica sono accoppiati sistemi a circuito chiuso in grado di assorbire il calore dal terreno con cui sono a contatto e di trasferirlo alla relativa pompa di calore grazie alla quale verrà successivamente utilizzato.

Le geostrutture energetiche non necessitano di elementi specifici nel sottosuolo per il solo sfruttamento geotermico, riducendo notevolmente i costi iniziali di costruzione rispetto a un impianto geotermico tradizionale. I vantaggi rispetto a quest'ultimo sono rappresentati dal fatto che non è richiesto lo scavo di trincee o pozzi in cui installare le sonde geotermiche e, inoltre, si rende possibile la realizzazione di impianti geotermici anche in zone altamente antropizzate dove finora, data la limitata disponibilità di spazio, non era di fatto possibile installarli.

Tra le geostrutture energetiche rientrano opere geotecniche quali fondazioni superficiali o profonde, dispositivi di ancoraggio, paratie e rivestimenti di gallerie.

L'utilizzo di geostrutture energetiche è cominciato dagli anni '80, con primi esempi di piastre di fondazione. In seguito, l'utilizzo è stato esteso ad altri elementi geostretturali quali pali di fondazione e paratie. Il successo di queste tipologie di opere è ampiamente documentato da casi studio reperibili in letteratura, che fanno riferimento a opere costruite in particolare in Austria, Germania, Regno Unito e Svizzera (Brandl, 2006; Adam e Markiewicz, 2009; Laloui e Di Donna 2013; Barla e Perino, 2015; Soga e Rui, 2016; Barla e Di Donna, 2018).

La costruzione di elementi strutturali in calcestruzzo armato quali scambiatori di calore, in sostituzione dei tradizionali impianti geotermici, è particolarmente conveniente non solo dal punto di vista economico, giacché, come già accennato, consente di sintetizzare in un unico elemento esigenze strutturali ed energetiche, ma anche dal punto di vista fisico, poiché il calcestruzzo è un materiale caratterizzato da buona conducibilità termica e capacità di immagazzinamento del calore. Quest'aspetto giustifica che il calcestruzzo, a tutti gli effetti, possa essere assunto come uno scambiatore di calore (Brandl 2006). A livello costruttivo l'attivazione termica degli elementi strutturali in cemento armato avviene attraverso la disposizione di un circuito di tubazioni in materiale polietilenico a elevata densità, fissati alla gabbia di armatura prima del getto di calcestruzzo. Quest'accorgimento costruttivo permette di avere all'interno dell'elemento strutturale in opera un circuito chiuso entro cui fluisce il liquido termovettore, in genere costituito da una soluzione acquosa salina o antigelo (glicole). A titolo di esempio nella Figura 1 sono riportati i casi di un palo e di un diaframma energetico in cui il circuito assorbente è connesso alle gabbie di armatura.



Figura 1. Esempio di palo (sx) e diaframma energetico (dx).

Tra le differenti tipologie di geostrutture energetiche rivestono particolare importanza ai fini del presente lavoro le gallerie energetiche. Nelle gallerie energetiche l'idea è sfruttare il rivestimento per sopperire al duplice ruolo strutturale e di scambio di calore con il sottosuolo circostante. In particolare, l'interesse verso tale applicazione è giustificato dal fatto che le superfici a contatto con il serbatoio geotermico sono nettamente superiori, come ordine di grandezza, alle tipologie di geostrutture menzionate nel precedente paragrafo. Una visione schematica di funzionamento di tale tipologia di geostruttura energetica è riportata nella Figura 2, in cui si può osservare che il calore scambiato dal rivestimento della galleria con il sottosuolo circostante può essere portato in superficie a scopi di riscaldamento e condizionamento civile.

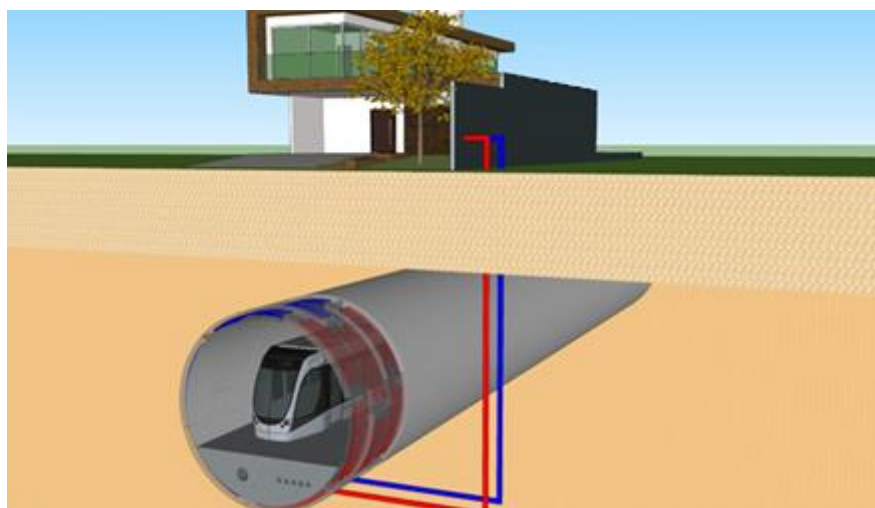




Figura 2. Schematizzazione del funzionamento di una galleria energetica per il riscaldamento e condizionamento degli edifici.

| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

Nel caso di gallerie/opere sotterranee realizzate con tecnica di scavo tra paratie in diaframmi (Cut & Cover), la possibilità di attivazione termica risiede nell’attrezzare i diaframmi di sostegno degli scavi ed eventualmente il solettone di fondo con il circuito di tubi scambiatori. In pratica la tecnologia non si differenzia da quella adottata per realizzare diaframmi energetici nel caso di scavi urbani e/o opere di fondazione e sostegno, per i quali esistono già diversi studi o realizzazioni reali documentate (Amis et al. 2010, Sterpi et al. 2014, Bourne Webb et al. 2016, Di Donna et al. 2016, Barla et al. 2018).

Di particolare rilevanza ai fini del presente lavoro sono gli studi condotti al Politecnico di Torino dal 2013 ad oggi con particolare riferimento alla realizzazione di un campo sperimentale di galleria energetica nel prolungamento Sud della Linea 1 della Metropolitana di Torino (Barla et al. 2019). Quest’ultimo rappresenta il primo caso di applicazione della tecnologia in Italia e il più documentato al mondo con riferimento al comportamento termomeccanico dei rivestimenti.

Con particolare riferimento alle opere in progetto le geostrutture energetiche saranno della tipologia concio energetico e diaframma energetico. Il concio energetico tipo ENERTUN® sarà utilizzato come scambiatore in tutte le tratte realizzate in TBM della linea 2, nella configurazione Ground. Il concetto di diaframma energetico troverà invece applicazione in alcune tratte di gallerie realizzate in C&C, in corrispondenza delle stazioni di linea e del Deposito-Officina Rebaudengo.

| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

3. VALUTAZIONE DEI POTENZIALI IMPATTI

3.1 Aspetti generali

L'interferenza tra differenti impianti geotermici a bassa entalpia presenti nel sottosuolo riveste particolare importanza nelle aree urbane ove, in spazi limitati, possono essere presenti numerosi impianti per lo sfruttamento geotermico del calore presente nel sottosuolo (Fry, 2009; Lo Russo et al. 2012; 2014; Barla et al. 2018; Baralis, 2020). Tali impianti possono essere ricompresi in due categorie principali:


- Impianti a circuito aperto (GWHP), ovvero impianti che nel circuito primario scambiano sia acqua e sia calore con il sottosuolo;
- Impianti a circuito chiuso (GSHP), ovvero impianti che nel circuito primario scambiano soltanto calore con il sottosuolo.

Una particolare tipologia di GSHP è costituita dalle Geostrutture Energetiche, descritte nel precedente capitolo, tra le quali ricade l'intervento previsto con la realizzazione della Linea 2 della metropolitana di Torino.

Qualsiasi impianto geotermico determina in linea di principio una zona di disturbo che si sviluppa intorno ai punti di re-iniezione dell'acqua utilizzata nel circuito primario negli impianti a circuito aperto o attorno alla sonda o al campo sonde nel caso di circuito chiuso. La portata e la temperatura di iniezione (relativamente alle GWHP) o la temperatura di scambio della sonda (per i GSHP) sono inoltre altamente variabili nel tempo poiché seguono istantaneamente la richiesta energetica degli edifici con cui devono scambiare calore. Di conseguenza la zona di disturbo può subire anch'essa variazioni spazio-temporali notevoli e complesse che si possono propagare anche a distanza dal punto di disturbo, in particolare laddove sia presente un gradiente di falda all'interno del sottosuolo. In questi casi si genera un plume termico che, in combinazione con la sovrapposizione di effetti di più impianti contigui, può generare quella che viene definita una Zona di Alterazione Termica (ZAT).

Riguardo alla previsione dell'andamento spazio-temporale delle ZAT esiste un interesse crescente sia nella comunità scientifica sia da parte degli Enti deputati al controllo delle risorse idriche sotterranee in quanto queste anomalie termiche possono comportare un'alterazione del potenziale di scambio termico associata ad un peggioramento del rendimento degli impianti geotermici esistenti (Epting & Huggenberger, 2013; Herbert et al., 2013; Barla et al. 2018). Inoltre, le acque sotterranee sono spesso utilizzate in molti paesi come fonte di acqua potabile, quindi la protezione e la conservazione delle loro caratteristiche chimico-fisiche e microbiologiche deve essere assicurata sia sul breve che sul lungo periodo.

L'impatto termico causato dall'installazione e dall'attivazione di uno o più impianti geotermici, ovvero l'andamento e l'estensione della ZAT, può quindi essere ricostruito attraverso il ricorso a

| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

simulazioni numeriche accoppiate termo-idrauliche basate sul metodo degli elementi finiti (Lo Russo et al, 2012; 2014; Barla et al. 2015; Barla et al. 2018). Il dominio computazionale utilizzato deve essere sufficientemente esteso in modo da ricomprendere tutti gli elementi che possono assumere un ruolo a livello di scambio termico e altresì per minimizzare gli effetti di distorsione lungo i bordi del modello stesso. In generale da questo punto di vista modelli tridimensionali (3D) sono da preferirsi in quanto consentono di valutare l'interazione tra i differenti impianti in maniera spazialmente continua e a differenti profondità. La modellazione della ZAT inoltre richiede la necessità di tenere in conto il transitorio temporale del flusso di calore in un mezzo costituito da una fase solida (terreno) ed una fase liquida (acqua di falda) attraverso le equazioni di conservazione della massa e dell'energia. A sua volta la fase liquida può essere interessata da un gradiente e da un flusso sotterraneo che risponde in questo caso alla Legge di Darcy.

L'utilizzo di queste simulazioni numeriche trova spazio anche all'interno di metodologie più articolate per la valutazione e per la gestione complessiva delle risorse geotermiche superficiali in ambito urbano come, ad esempio, la metodologia proposta da Baralis (2020) e denominata ROGER. Questa metodologia non utilizza soltanto la modellazione numerica ma integra al suo interno anche modelli semi-analitici avanzati rivolti alla quantificazione accurata del potenziale geotermico del sottosuolo.

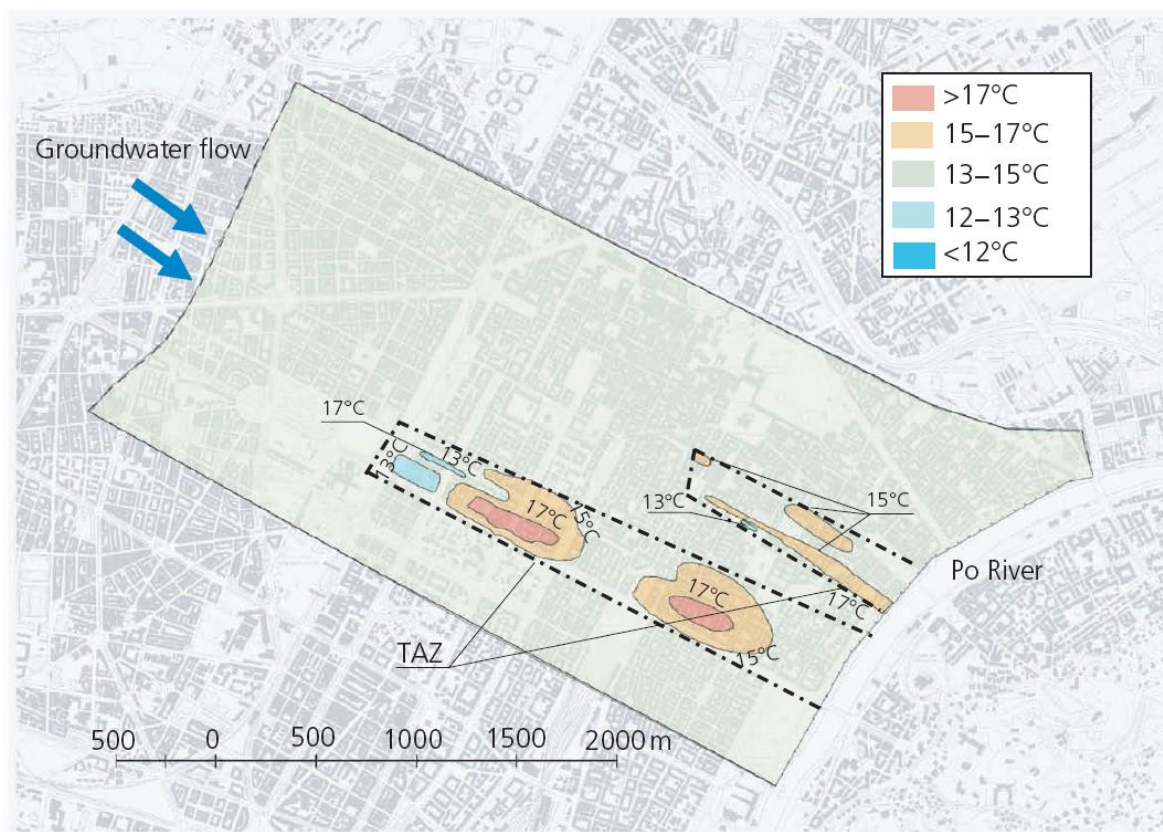



Figura 3. Esempio di ZAT generati da 10 anni di funzionamento di alcuni impianti geotermici a circuito aperto GWHP nella città di Torino (da Barla et al., 2018).

L'applicazione delle simulazioni numeriche consente quindi di ricostruire con buona precisione l'estensione della ZAT nel tempo e nello spazio in relazione alle differenti tipologie di impianti (a circuito aperto, a circuito chiuso e geostrutture energetiche) presenti nell'area di interesse. Un esempio della definizione delle ZAT relativa all'attivazione di alcuni impianti geotermici a circuito aperto nella città di Torino viene mostrata nella Figura 3 (Barla et al. 2018). Tale studio, ulteriormente approfondito in Baralis (2020) ha messo in luce come la concentrazione di impianti geotermici (prevalentemente a circuito aperto) presenti nell'area centrale della città di Torino stia generando una zona di alterazione termica lungo una direttrice ortogonale al fiume Po, con innalzamenti di temperatura compresi all'interno dei +/- 2°C rispetto alle condizioni naturali indisturbate.

3.2 Interferenza con impianti preesistenti

L'interferenza tra differenti impianti geotermici presenti nel sottosuolo riveste particolare importanza soprattutto nelle aree urbane ove, in spazi limitati, possono essere presenti numerosi impianti per lo sfruttamento geotermico del calore presente ed è già stata oggetto di numerosi

| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

studi (Fry, 2009; Lo Russo et al. 2012, 2014; Barla et al., 2018; Baralis, 2020). L'interesse crescente al riguardo, sia da parte degli Enti deputati al controllo delle risorse idriche sotterranee che da parte della comunità scientifica, è giustificato dal fatto che queste anomalie termiche possono comportare un'alterazione del potenziale di scambio termico a cui è associato un peggioramento del rendimento degli impianti geotermici (Epting & Huggenberger, 2013; Herbert et al., 2013; Barla et al. 2018).

Ai fini di valutare le potenziali interferenze derivanti dall'attivazione termica del rivestimento della galleria della metropolitana con impianti geotermici esistenti è stato necessario procedere dapprima ad un censimento degli impianti presenti nell'area di interesse.

Per ciò che concerne i dati relativi agli impianti a circuito aperto, esistono informazioni detenute da parte degli enti territoriali competenti per le pratiche autorizzative, relativamente invece gli impianti a circuito chiuso vi è una minore disponibilità dei dati. Da questo punto di vista sembra tuttavia plausibile che gli impianti a circuito chiuso siano comunque ancora relativamente poco numerosi anche considerato che il settore di mercato specifico sia di fatto ancora in una fase embrionale in Italia. Sono inoltre molto limitate le realtà operanti in tale settore a livello locale e spesso le stesse non dispongono di un registro delle perforazioni eseguite e comunque non sono correlate alle potenze installate (Fracastoro e Crocetta, 2012).

Per la raccolta delle informazioni sugli impianti geotermici esistenti nell'area del dominio si è fatto riferimento al Catasto delle derivazioni, pozzi e sorgenti della Città Metropolitana di Torino, consultabile online al sito dell'ente (web GIS: <http://www.webgis.csi.it/derivb/gedeone.do>). Sono anche stati utilizzati i dati emersi dal censimento dei fabbricati adiacenti alla nuova linea effettuato da InfraTo nell'ambito delle attività di progettazione definitiva. Per gli impianti a circuito aperto, autorizzati, attivi e non attivi, e per quelli in fase di istruttoria presenti nelle vicinanze della Linea 2 della Metropolitana di Torino nella tratta Politecnico-Rebaudengo, Infra.To ha formulato una specifica richiesta di accesso agli atti alla Città Metropolitana di Torino, Servizio Risorse Idriche – Acque Meteoriche in data 28.10.2022, Prot. RC/Pv n. 11357. La Città Metropolitana in data 5.12.2022 ha trasmesso i dati relativi agli impianti richiesti.

Complessivamente nell'area urbana di Torino oggetto di studio sono stati censiti 35 impianti geotermici tra cui 33 a circuito aperto (elencati nella Tabella 2) e 2 a circuito chiuso (34 – Congregazione San Filippo Neri e 35 – Via Carlo Alberto 3). La Figura 6 mostra la posizione dei pozzi di presa e restituzione degli impianti a circuito aperto e le sonde degli impianti a circuito chiuso.

Tabella 2. Elenco degli impianti geotermici a circuito aperto di interesse.

| Numero | Denominazione |
|--------|---|
| 1 | FABBRICA IMMOBILIARE |
| 2 | CONDOMINIO PALAZZO MARTINI DI CIGALA SAVOIA 7 |




CITTA' DI TORINO

**Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta:
Politecnico – Rebaudengo**

Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle
geostrutture energetiche

MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2

| Numero | Denominazione |
|--------|--|
| 3 | CONDOMINIO VIA LAGRANGE 12 (EX. BUILDING) |
| 4 | CONDOMINIO IL GIRASOLE (IMMOBILIARE RIBAUDDO) |
| 5 | REALE IMMOBILI |
| 6 | IMMOBILIARE OPORTO |
| 7 | INTESA SAN PAOLO |
| 8 | TIKAL R.E. FUND - SAI INVESTIMENTI SGR |
| 9 | SAN CARLO 1973 |
| 10 | FONDAZIONE MUSEO DELLE ANTICHITÀ EGIZIE DI TORINO |
| 11 | POLITECNICO DI TORINO (1) |
| 12 | POLITECNICO DI TORINO (2) |
| 13 | POLITECNICO DI TORINO (3) |
| 14 | POLITECNICO DI TORINO (4) |
| 15 | OGR-CRT S.C.P.A. |
| 16 | CONDOMINIO PALAZZO BARBAROUX (EX SECAP) |
| 17 | CITTÀ METROPOLITANA DI TORINO |
| 18 | CONDOMINIO PALAZZO VILLA (ATTUALE TITOLARE LARO) |
| 19 | COMPAGNIA SAN PAOLO |
| 20 | CONDOMINIO QUADRATO |
| 21 | VALFRÈ DI BONZO ANDREA |
| 22 | PICCOLA CASA DELLA DIVINA PROVIDENZA - COTTOLENGO |
| 23 | IMMOBILIARE DIORAMA SRL |
| 24 | COOPERATIVA SOCIALE BIOS |
| 25 | CONDOMINIO NUOVO PALAZZO SAN CARLO C/O STUDIO GOTRO (EX NEXITY) |
| 26 | COLLEGIO UNIVERSITARIO DI TORINO RENATO EINAUDI |
| 27 | CONDOMINIO PIAZZA BERNINI 2 / CSO TASSONI 2 (ATTUALE TITOLARE IMMOBILIARE BERNINI) |
| 28 | CONDOMINIO 25 VERDE |
| 29 | GIACOSA 38 SRL |
| 30 | SANTANDER CONSUMER BANK |
| 31 | PRIMULA COSTRUZIONI SRL |
| 32 | ERSEL IMMOBILIARE |

| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

| Numero | Denominazione |
|--------|-----------------|
| 33 | SOCIETÀ CARLINA |

Nella Figura 4 si riporta uno stralcio planimetrico con l'indicazione degli impianti censiti nell'area di interesse.

I dati di interesse presi in analisi per gli impianti sono:

- informazioni anagrafiche e il periodo di utilizzo annuale dell'impianto;
- localizzazione degli impianti;
- caratteristiche e numero dei pozzi;
- descrizione delle portate;
- descrizione delle temperature;
- dati riferiti al sito di natura geologica e idrologica;
- disponibilità dei dati di monitoraggio e loro specifiche.

Analizzando i progetti di utilizzazione della risorsa idrica risulta preponderante l'impiego degli impianti sia in modalità di riscaldamento invernale sia in modalità di raffrescamento estivo.

Focalizzando poi l'attenzione sulla dimensione degli impianti risulta interessante notare come prevalgano gli impianti a circuito aperto con potenze installate medio-basse, in genere composti da uno o, più raramente, due pozzi di presa e da altrettanti pozzi di reimmissione dell'acqua in falda. Soltanto l'impianto geotermico identificato al n° 7, a servizio del nuovo centro direzionale Intesa San Paolo SpA, costituito da 9 pozzi di presa ed altrettanti pozzi di restituzione, risulta di potenza e dimensioni elevate.

L'analisi dei dati previsti di funzionamento degli impianti a circuito aperto sotto il profilo delle temperature porta infine a evidenziare come la maggior parte degli impianti prevedano di operare con variazioni di temperatura entro 6-7° C e solo in pochi casi si prospettino differenziali termici maggiori. Questo anche in virtù della temperatura dell'acqua di falda, generalmente assunta (e misurata) tra i 14 e i 15° C che porta con tali salti termici a raggiungere i limiti autorizzativi imposti in genere dalle autorità preposte.

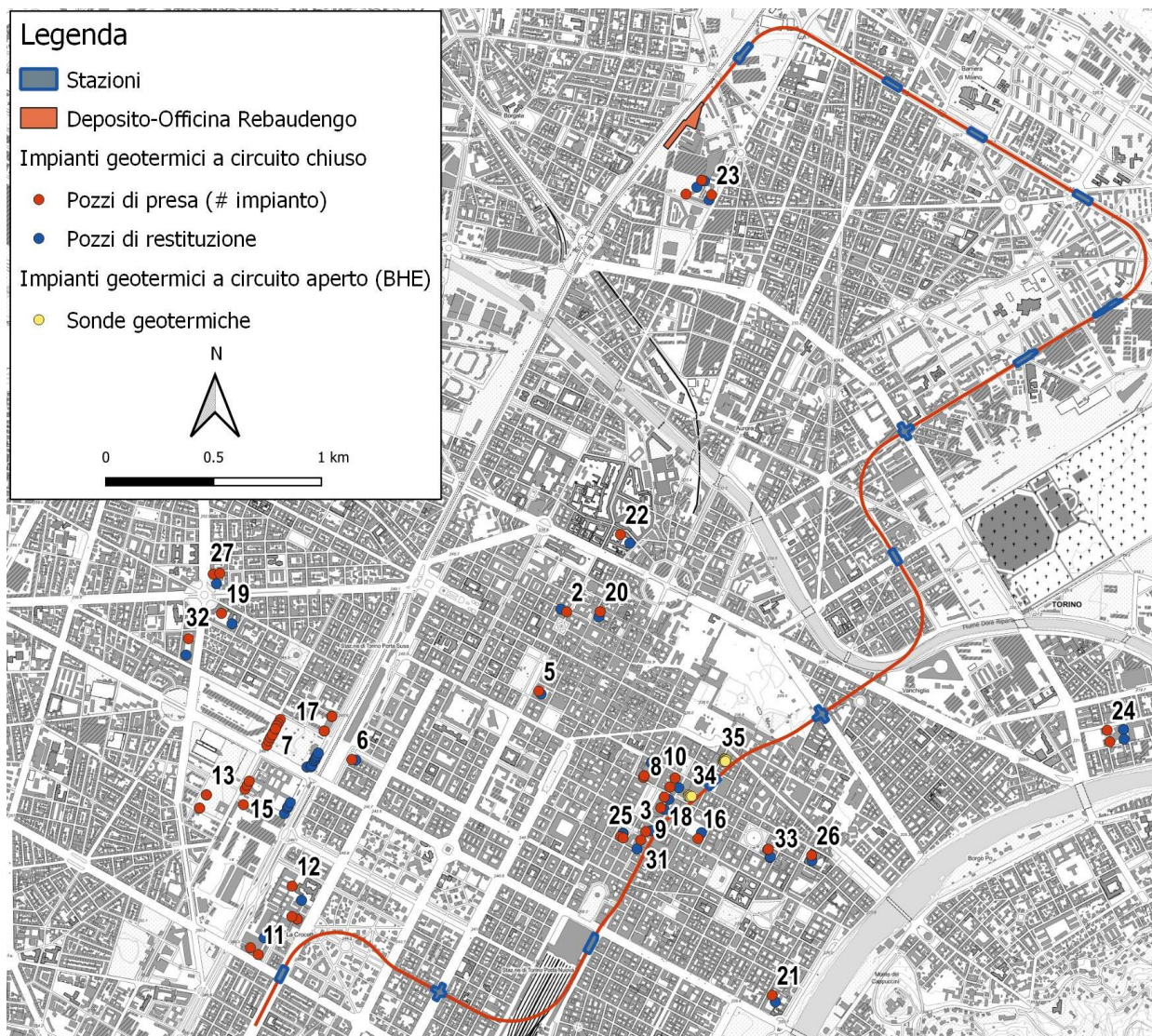



Figura 4. Localizzazione degli impianti geotermici censiti di interesse per la Linea 2 della metropolitana

La maggior parte degli impianti si trovano a monte da un punto di vista idrogeologico rispetto al tracciato della ML2. Soltanto 7 impianti a circuito aperto (numero 14, 16, 21, 24, 26, 29 e 33 da Tabella 2) sono invece collocati a valle del tracciato. Si ricorda a questo proposito che la direzione monte-valle è determinata sulla base del gradiente della falda e della conseguente direzione del flusso di quest'ultima che nell'area di studio risulta in linea generale in direzione del Fiume Po. In questa situazione si può venire a creare un'interferenza da parte degli impianti preesistenti, ed in particolare gli impianti a circuito aperto, nei confronti della galleria della ML2 attivata termicamente.

| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

Per completezza di trattazione, nelle immediate vicinanze della galleria ma comunque a monte di quest'ultima sono altresì presenti gli impianti a circuito chiuso 34 e 35. L'impianto 34 realizzato per la climatizzazione del complesso dell'Oratorio e del Complesso Monumentale di San Filippo Neri è formato da 5 sonde BHE realizzate fino ad una profondità di 120 m da p.c. mentre l'impianto 35 è formato da 7 sonde BHE anch'esse spinte fino ad una profondità di 120 m. Entrambi i campi sonde risultano collocati ad una distanza compresa tra 15 e 30 m dall'estradosso della galleria. In merito alla possibile interferenza causata dall'attivazione termica della galleria della Linea 2, quest'ultima appare molto limitata nonostante la prossimità tra le strutture sia poiché la collocazione delle sonde risulta idraulicamente a monte della galleria, sia per il limitato spessore del plume termico determinato dall'attivazione della galleria, leggermente superiore al diametro stesso dell'opera (10-15 m) rispetto alla profondità complessiva delle sonde (120 m).

Le entità sopradescritte costituiscono gli utenti attivi, in quanto utilizzano direttamente il calore proveniente dal terreno o dalla falda. Causa d'impatto termico e idraulico sono però anche le strutture antropiche (utenti passivi), rappresentate in ambito urbano prevalentemente dalle infrastrutture sotterranee, dagli edifici e dai parcheggi interrati. Si è dunque portata avanti un'indagine per censire gli edifici presenti nell'area di interesse, classificandoli sulla base del numero di piani sotterranei, distinguendo le strutture ad uno, due o più piani sotterranei e valutando la profondità rispetto al piano campagna. I dataset contenenti le informazioni riguardo il numero di livelli sotterranei e la geometria degli edifici singoli e/o degli aggregati sono stati ottenuti dal database BDTRE. Un ragionamento analogo è stato adottato per i parcheggi sotterranei (32 nell'area di studio), la cui geometria è stata riprodotta guardando i documenti di progetto della municipalità di Torino, associando ad ognuno la pertinente profondità. Le informazioni raccolte sono anche state verificate e integrate mediante controlli in loco. I parcheggi pertinenziali sono invece stati inclusi nei piani interrati degli edifici di pertinenza.

Nel dominio di studio, infine, sono anche state incluse alcune porzioni delle infrastrutture sotterranee rilevanti esistenti quali il passante ferroviario e la Linea 1 della metropolitana, oltre, evidentemente, alla Linea 2 sulla base della geometria del progetto definitivo.

Nelle Figure 5 e 7 viene rappresentata l'alterazione termica ad una profondità di 25 m da p.c., ovvero nella porzione di terreno maggiormente influenzata dalla galleria realizzata in TBM, al termine della stagione invernale e di quella estiva rispettivamente mentre nelle Figure 6 e 8 viene riportata la medesima alterazione invernale ed estiva alla profondità maggiormente influenzata dalla realizzazione dei diaframmi (10 m).

Dall'analisi complessiva degli impianti autorizzati risultano possibili interferenze di tipo inter-impianto nel centro storico oltre che nella zona di Porta Susa, interessata dal grande impianto a servizio del centro direzionale di Intesa San Paolo SpA e da impianti collocati idrogeologicamente a valle dello stesso. A titolo di approfondimento si riportano alcuni dettagli dei risultati della modellazione numerica, con riferimento ad alcune zone specifiche e di particolare interesse per le possibili interferenze.

| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

La prima area presa in considerazione è quella attorno al deposito Rebaudengo, lungo una sezione A-A' tracciata nella direzione del flusso di falda (Figura 25). L'andamento delle temperature nel sottosuolo ottenute al termine del calcolo numerico e corrispondenti al termine della stagione invernale sono mostrate nella Figura 26. È possibile vedere come a seguito dell'attivazione termica dei pannelli del deposito si venga a generare un plume termico che si estende in direzione valle principalmente nel terreno sottofalda. Il terreno nelle immediate vicinanze dei pannelli si raffredda per effetto dell'estrazione di calore da parte dei diaframmi energetici e, sottofalda, il raffreddamento si estende per circa un centinaio di metri. Proseguendo verso valle, si vede l'influenza dei cicli di attivazione termica precedenti (stagione estiva e invernale ancora precedente). Si nota anche un plume termico simile, ma più modesto, prodotto dalla galleria in prossimità della stazione Cimarosa-Tabacchi. La Figura 27, invece, riporta l'andamento delle temperature lungo la medesima sezione A-A' al termine della successiva stagione estiva di attivazione. Il riscaldamento del terreno a ridosso dei diaframmi del deposito è evidente, in particolare per le profondità sotto falda e il plume termico si sovrappone a quello dovuto al raffreddamento invernale della stagione appena terminata in Figura 26.

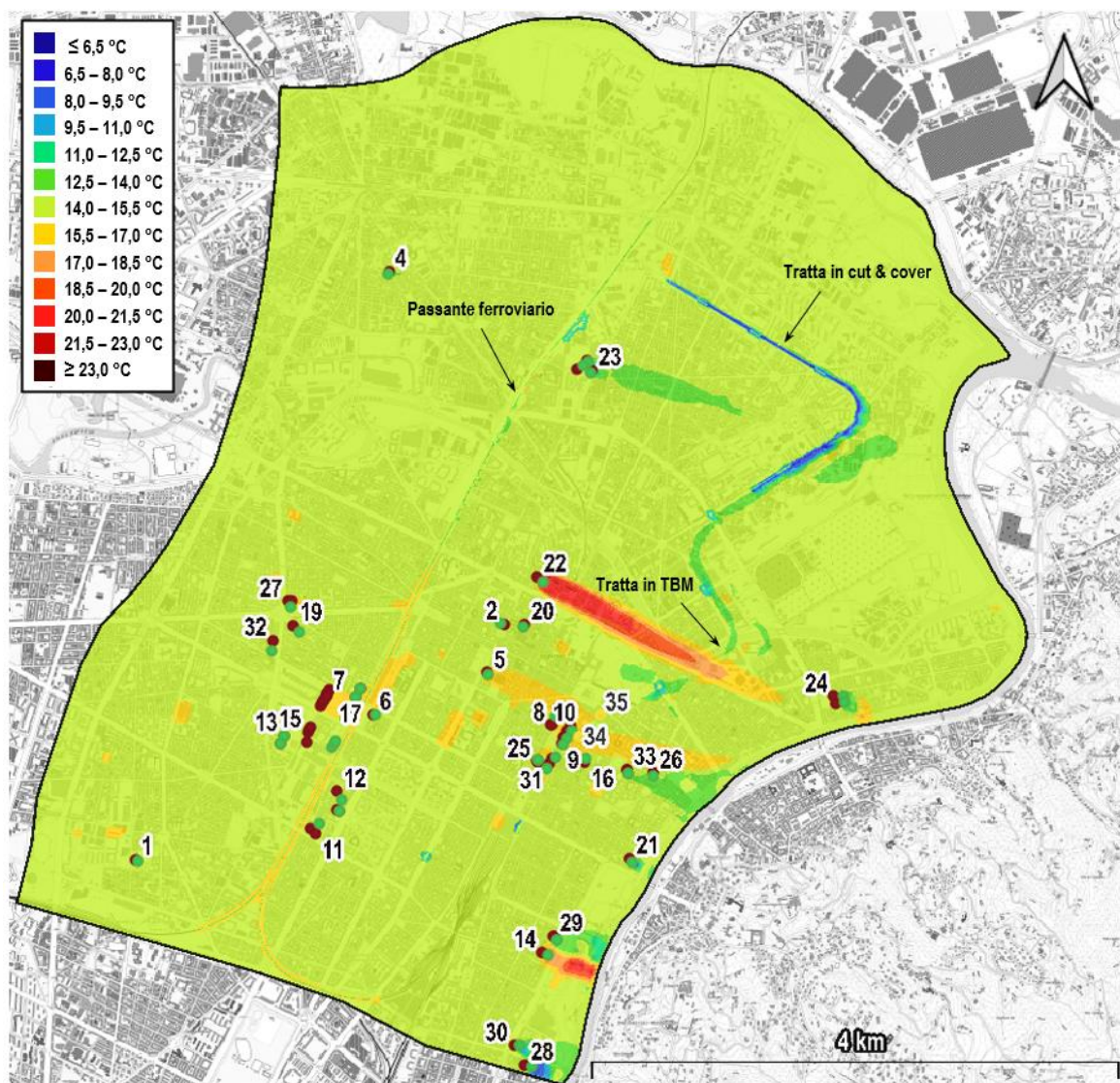


Figura 5. Mappa termica del dominio del modello numerico al termine della stagione invernale alla profondità del tratto in C&C della ML2 (Politecnico di Torino, 2023).

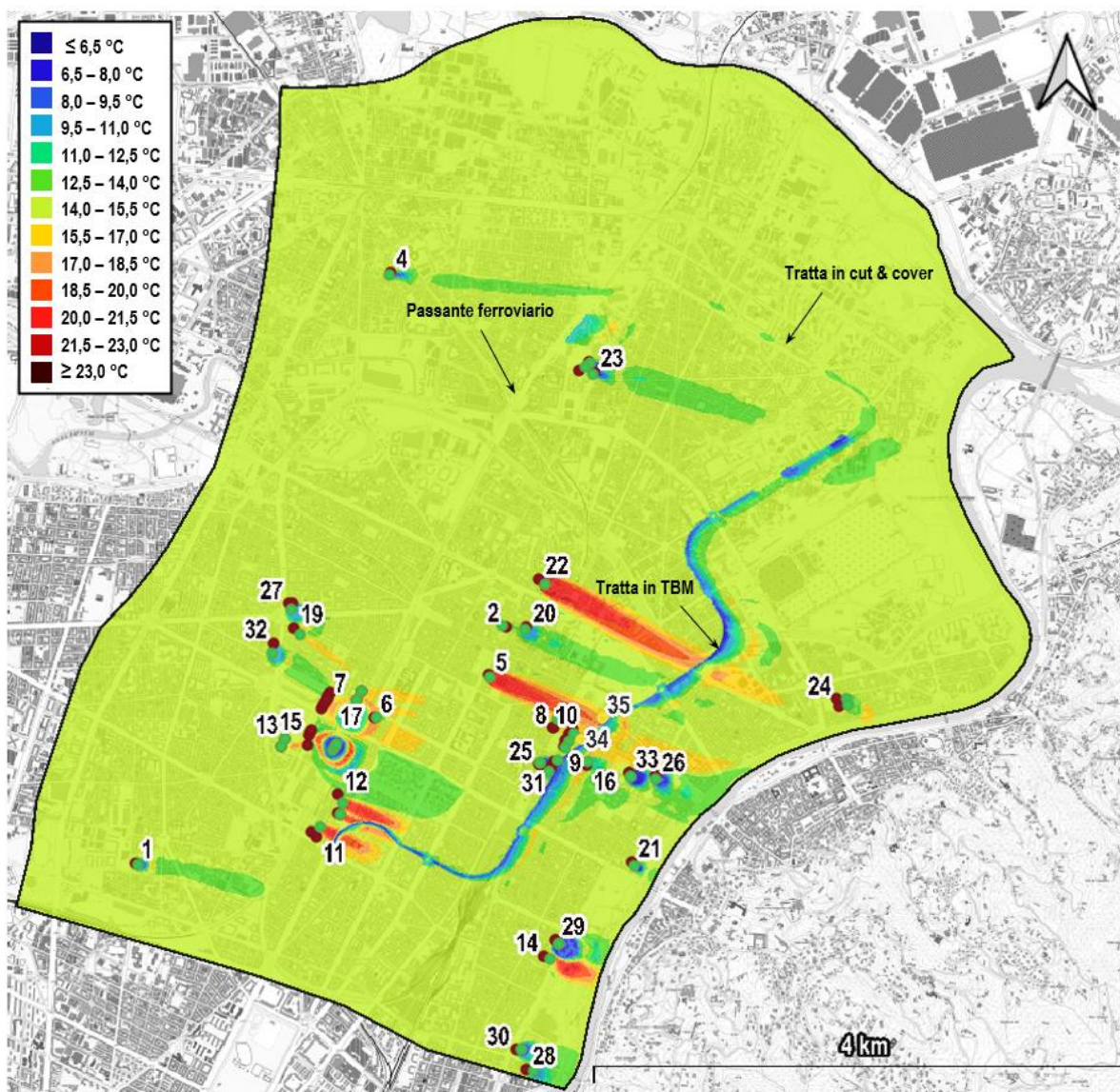


Figura 6. Mappa termica del dominio del modello numerico al termine della stagione invernale alla profondità del tratto in TBM della ML2 (Politecnico di Torino, 2023).

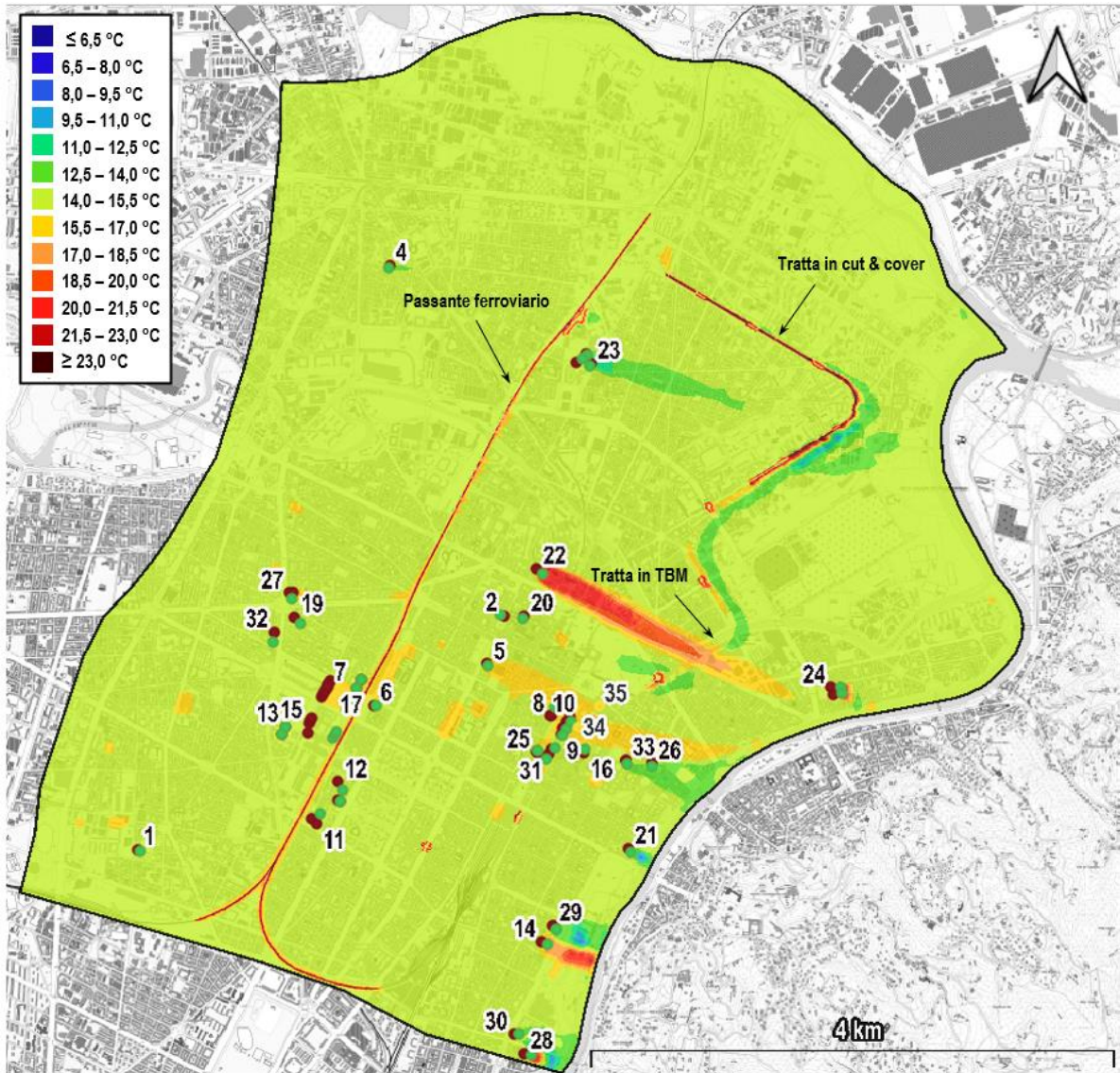


Figura 7. Mappa termica del dominio del modello numerico al termine della stagione estiva alla profondità del tratto in C&C della ML2 (Politecnico di Torino, 2023).

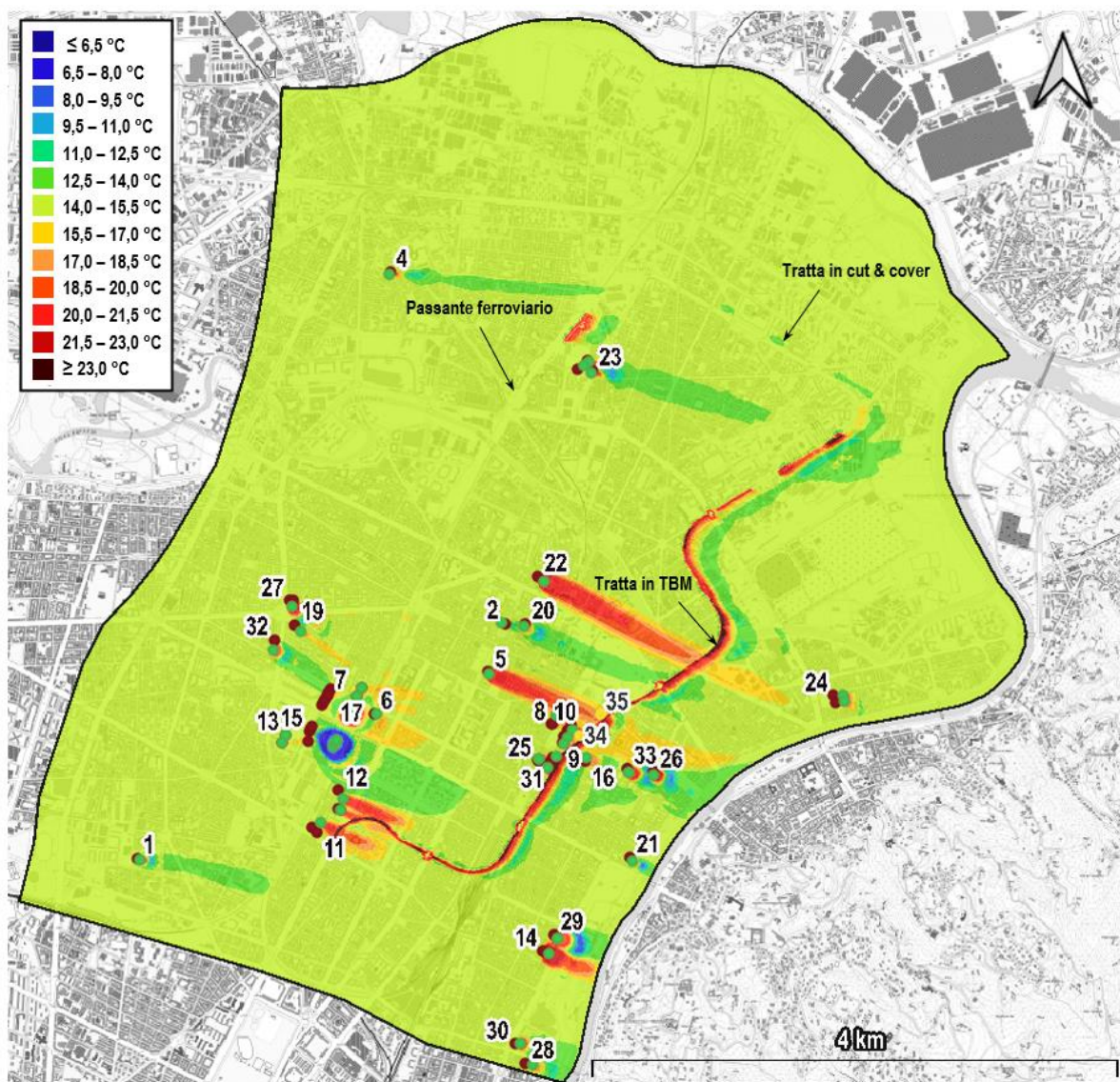


Figura 8. Mappa termica del dominio del modello numerico al termine della stagione estiva alla profondità del tratto in TBM della ML2 (Politecnico di Torino, 2023).

A titolo di approfondimento della possibile interferenza tra l'attivazione della Linea 2 e gli impianti geotermici preesistenti si riportano alcuni dettagli dei risultati della modellazione numerica, con riferimento ad alcune zone di particolare interesse.

La prima area presa in considerazione è quella attorno al deposito Rebaudengo, lungo una sezione A-A' tracciata nella direzione del flusso di falda come mostrato nella Figura 9.



L'andamento delle temperature nel sottosuolo ottenute al termine del calcolo numerico e corrispondenti al termine della stagione invernale sono mostrate nella

Figura 10. È possibile vedere come, a seguito dell'attivazione termica dei pannelli del deposito, si venga a generare un plume termico che si estende in direzione valle principalmente nel terreno sottofalda. Il terreno nelle immediate vicinanze dei pannelli si raffredda per effetto dell'estrazione di calore da parte dei diaframmi energetici e, sottofalda, il raffreddamento si estende per circa un centinaio di metri. Proseguendo verso valle, si vede l'influenza dei cicli di attivazione termica precedenti (stagione estiva e invernale ancora precedente).

Si nota anche un plume termico simile, ma più modesto, prodotto dalla galleria in prossimità della stazione Cimarosa-Tabacchi. La Figura 11, invece, riporta l'andamento delle temperature lungo la medesima sezione A-A' al termine della successiva stagione estiva di attivazione. Il riscaldamento del terreno a ridosso dei diaframmi del deposito è evidente, in particolare per le profondità sotto falda e il plume termico si sovrappone a quello dovuto al raffreddamento invernale della stagione appena terminata.



Figura 9. Area di Torino a Nord della Barriera di Milano, con indicazione del tracciato di Linea 2 e dell'impianto geotermico nr. 23. In planimetria è indicata la traccia delle sezioni A-A' e B-B' (Politecnico di Torino, 2023).

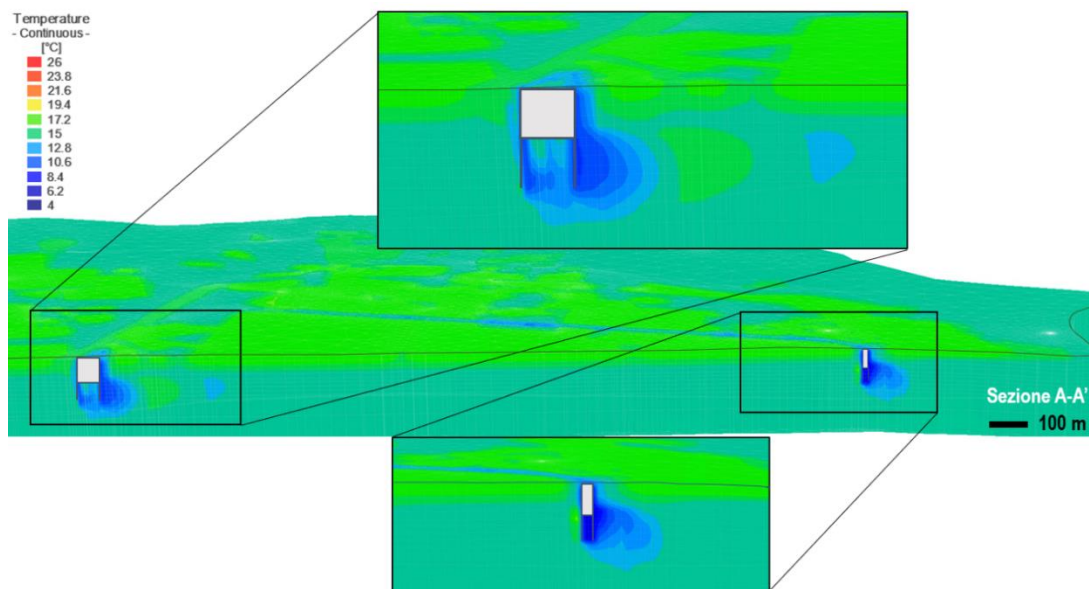


Figura 10. Sezione A-A': mappa di temperatura al termine della stagione invernale del quarto anno di attivazione termica della ML2. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5 (Politecnico di Torino, 2023).

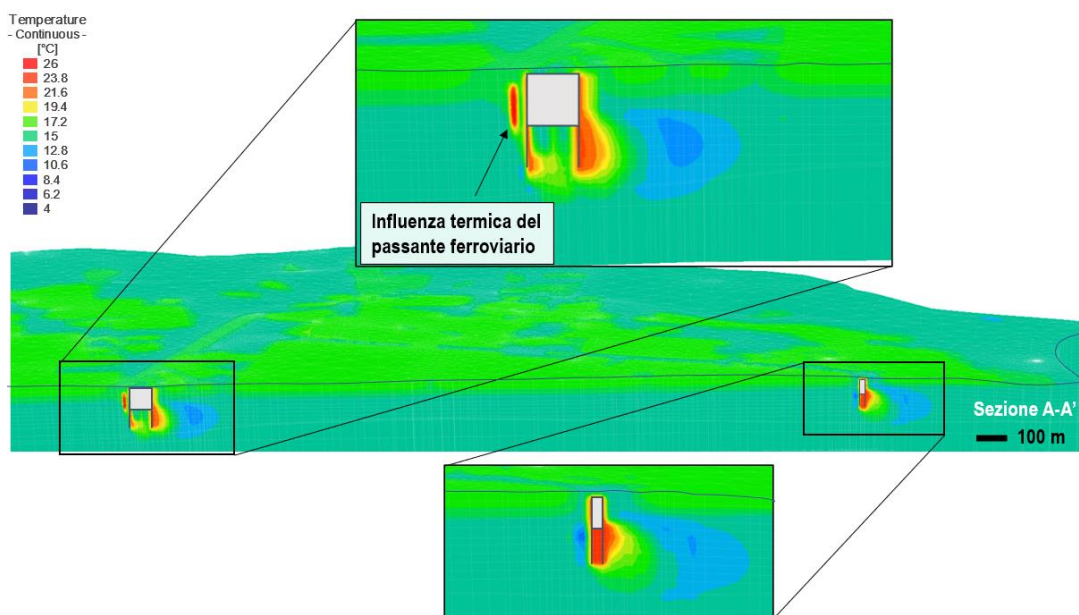


Figura 11. Sezione A-A': mappa di temperatura al termine della stagione estiva del quarto anno di attivazione termica della ML2. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore 5 (Politecnico di Torino, 2023).



La Figura 12, che riporta l'andamento delle temperature lungo la sezione B-B' che interseca l'impianto nr. 23 (la cui lunghezza del tratto finestrato è stata evidenziata in grigio in figura), mostra grossomodo lo stesso comportamento a valle della galleria in Cut&Cover a ridosso della stazione Cimarosa-Tabacchi mentre evidenzia il plume termico dell'impianto geotermico nr. 23, responsabile di una alterazione termica molto più pronunciata rispetto a quella dovuta all'attivazione della galleria. L'influenza al termine della stagione estiva successiva è mostrata in Figura 13 dove si nota il riscaldamento del terreno a ridosso dei diaframmi della galleria.

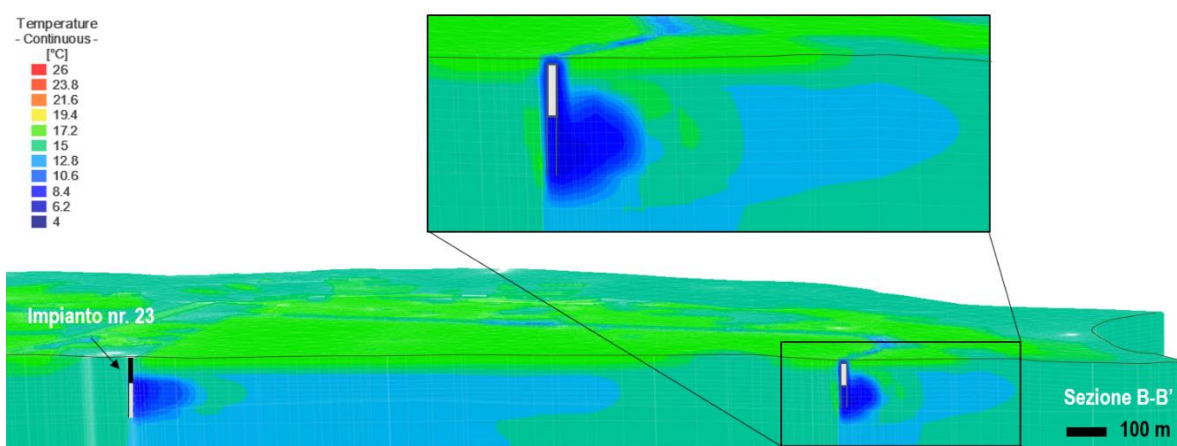


Figura 12. Sezione B-B': mappa della temperatura alla fine della stagione invernale del quarto anno di attivazione termica della ML2. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5 (Politecnico di Torino, 2023).

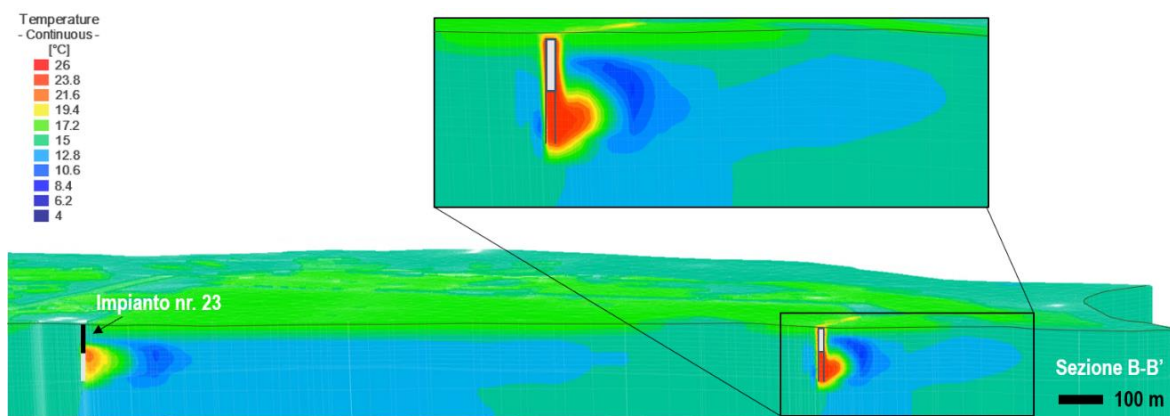


Figura 13. Sezione B-B': mappa di temperatura al termine della stagione estiva del quarto anno di attivazione termica della ML2. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5 (Politecnico di Torino, 2023).

Il tracciato della metropolitana in progetto si inizia ad approfondire dalla stazione Corelli, proseguendo verso Sud. Le successive due sezioni indagate, indicate nella Figura 14,



intersecano la linea di metropolitana nel tratto compreso tra le stazioni Verona e Mole-Giardini Reali.

Nella Figura 15 e nella Figura 16 e nella vengono mostrati per la sezione C-C' rispettivamente l'andamento delle temperature al termine della stagione invernale e al termine di quella estiva successiva (si noti che la lunghezza del tratto finestrato del pozzo dell'impianto 24 è stata evidenziata in grigio nelle figure). La zona alterata si prolunga verso valle, secondo l'inclinazione del flusso di falda. Lungo questa sezione risultano più evidenti i cicli di riscaldamento e raffreddamento stagionali, determinando una zona alterata termicamente alla profondità dell'asse della galleria che, in estate, arriva a superare i 200 m dall'estradosso della stessa.



Figura 14. Inquadramento dell'area di Torino circostante al tracciato tra la stazione Verona e Mole-Giardini Reali. In planimetria sono indicate la traccia delle sezioni C-C' e D-D' e l'ubicazione gli impianti geotermici nr. 22, 24 e 35 (Politecnico di Torino, 2023).

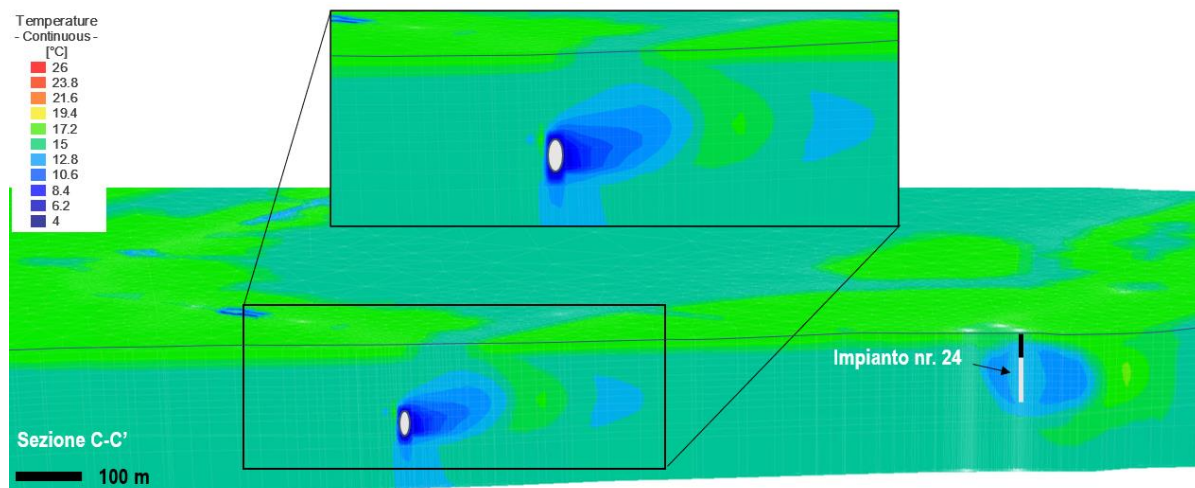


Figura 15. Sezione C-C': mappa di temperatura al termine della stagione di riscaldamento del quarto anno di attivazione termica della ML2, con indicazione del plume termico dell'impianto nr. 24. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5 (Politecnico di Torino, 2023).

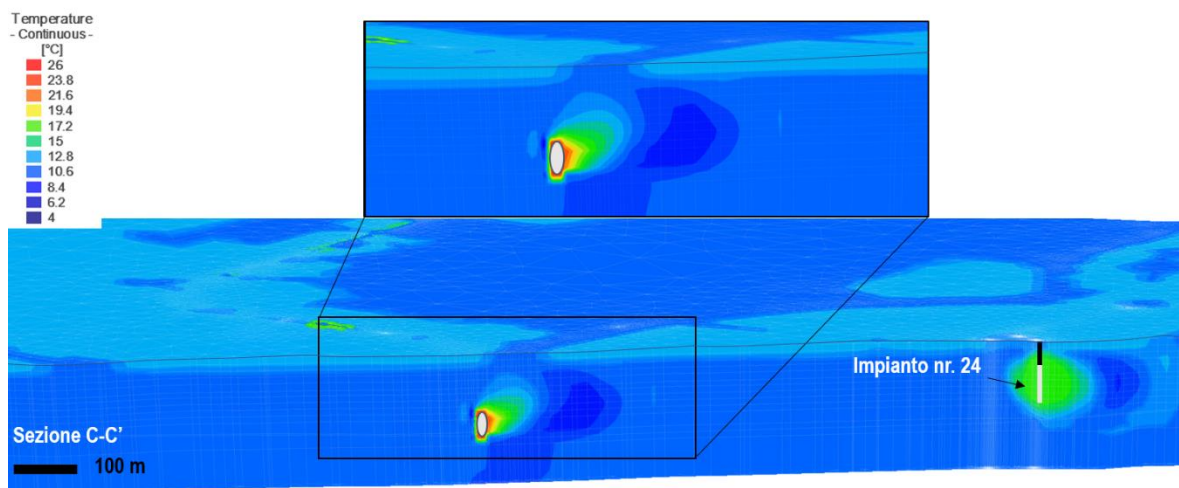


Figura 16. Sezione C-C': mappa di temperatura al termine della stagione estiva del quarto anno di attivazione termica della ML2. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5 (Politecnico di Torino, 2023).

Nel caso della sezione D-D' (Figura 17, in cui la lunghezza del tratto finestrato dell'impianto presente è stata evidenziata in grigio), situata leggermente più a Sud, si nota come la galleria della metropolitana sia investita dal plume termico proveniente dall'impianto nr. 22, ubicato a monte del tracciato ad una distanza di 1370 m. Dai dati a disposizione e dalle informazioni contenute nei documenti degli scarichi (disponibili al sito web della Città metropolitana di



Torino), l'impianto in esame è attivo ininterrottamente durante tutto il corso dell'anno per il solo uso di raffrescamento, immettendo acqua in falda alla temperatura costante di 21,5 °C. Questa condizione risulta particolarmente favorevole per l'estrazione di calore geotermico nel periodo invernale dai rivestimenti della galleria. La forma del plume termico intorno alla galleria è fortemente influenzata dal fatto che l'arco rovescio si intesta in formazioni scarsamente permeabili.

Nella Figura 18, rappresentante la stessa sezione D-D' al termine della successiva stagione estiva di attivazione, si vede ancora il plume termico importante dovuto all'impianto nr. 22 ubicato a monte del tracciato (funzionante con temperature allo scarico uguali a 21,5°C, come anticipato poc'anzi). In questo caso, anche la galleria della metropolitana ha l'effetto di riscaldare il terreno, pertanto gli effetti si sovrappongono. I valori elevati della temperatura del terreno a monte della Linea 2 dovuti al funzionamento continuo dell'impianto nr. 22 creano condizioni non propriamente favorevoli all'attivazione termica dell'opera nella stagione estiva, a differenza di quanto avviene nella stagione invernale.

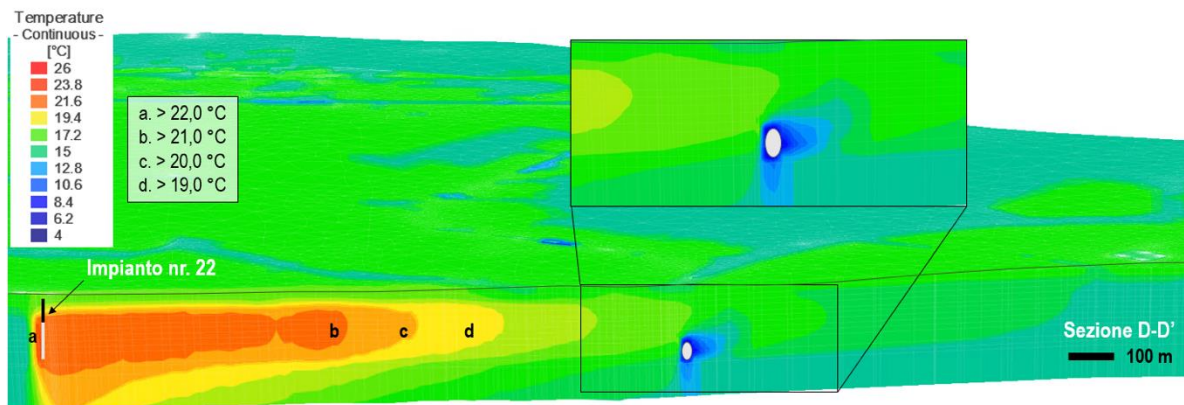


Figura 17. Sezione D-D': ZAT causata a valle della Linea 2 dall'attivazione termica della geostruttura e a monte dall'impianto geotermico nr. 22. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5 (Politecnico di Torino, 2023).

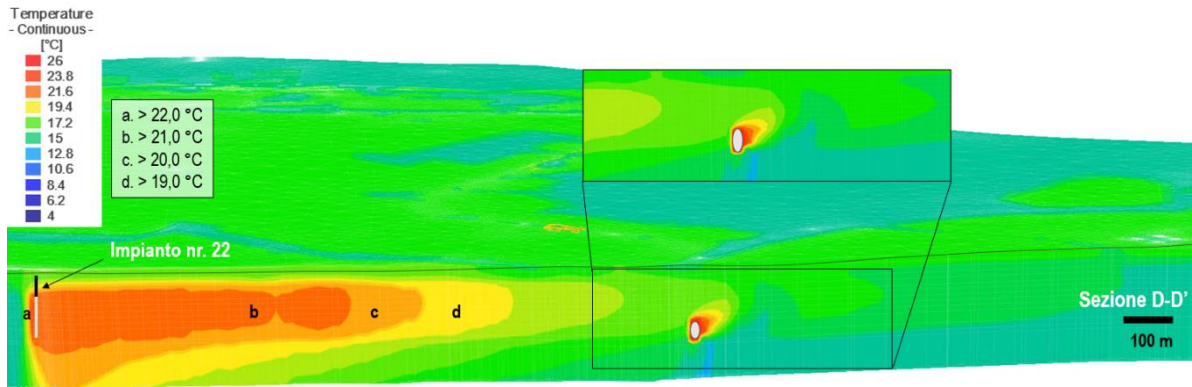


Figura 18. Sezione D-D': mappa di temperatura al termine della stagione estiva del quarto anno di attivazione termica della ML2. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5 (Politecnico di Torino, 2023).

L'area che presenta la maggiore alterazione termica è quella centrale dell'area urbana di Torino, da via Po fino alla stazione di Porta Nuova (Figura 19). Qui la Linea 2 attraversa un terreno le cui temperature sono fortemente influenzate dagli impianti geotermici esistenti e sono ben lontane dalle condizioni indisturbate di partenza della fase di calibrazione. Lungo la sezione E-E' (Figura 20), dove la lunghezza dei tratti finestrati dei pozzi degli impianti presenti è stata evidenziata in grigio), a monte della Linea 2, al termine della stagione invernale, la temperatura è influenzata dal funzionamento dell'impianto nr. 9, il quale agisce con una temperatura oscillante tra 14.5 e 21 °C durante l'anno, secondo i reali dati di monitoraggio (in particolare tra 14.5 e 19 °C nella stagione invernale). Proseguendo in direzione SE verso il fiume Po, il plume termico dovuto all'attivazione termica della metropolitana si sovrappone a quello degli impianti geotermici a circuito aperto presenti a valle (nr. 16 e nr. 33). La ZAT mostrata è in piccola parte il risultato dell'attivazione della ML2 e in gran parte del funzionamento degli impianti geotermici nr. 9, 16 e 33. Similmente nella Figura 21 viene mostrata la mappa termica nella sezione al termine della stagione successiva in cui i conchi energetici hanno riscaldato il terreno circostante. Questa conseguenza, dovuta all'attivazione termica estiva, viene in parte mascherata anche in questo caso dai plumi termici più ampi degli impianti presenti a valle e a monte dell'opera.



Figura 19. Inquadramento dell'area del centro urbano di Torino circostante al tracciato della Linea 2, tra via Po e la stazione Porta Nuova. In planimetria sono indicate la traccia delle sezioni E-E' e F-F' e l'ubicazione degli impianti geotermici nr. 9, 16, 25, 31, 33 (Politecnico di Torino, 2023).

Similmente la sezione F-F' (Figura 22, dove la lunghezza dei tratti finestrati degli impianti presenti è stata evidenziata in grigio) mostra i plumi termici causati dai pozzi geotermici presenti a monte della Linea 2, insieme a quello derivante dall'attivazione termica della galleria. A causa del funzionamento degli impianti a circuito aperto nr. 25 e 31, è difficile distinguere l'alterazione dovuta alla metropolitana. Si nota tuttavia che essa è caratterizzata da un'estensione in profondità inferiore a quella degli impianti geotermici a circuito aperto presenti nell'area. Al termine della stagione successiva di attivazione, ovvero quella estiva, la distinzione delle zone di alterazione dovute al funzionamento degli impianti nr. 25 e 31 e dei conchi energetici è, forse, più evidente e, di certo, agevolata dalla diversa estensione in profondità nel terreno (Figura 23).

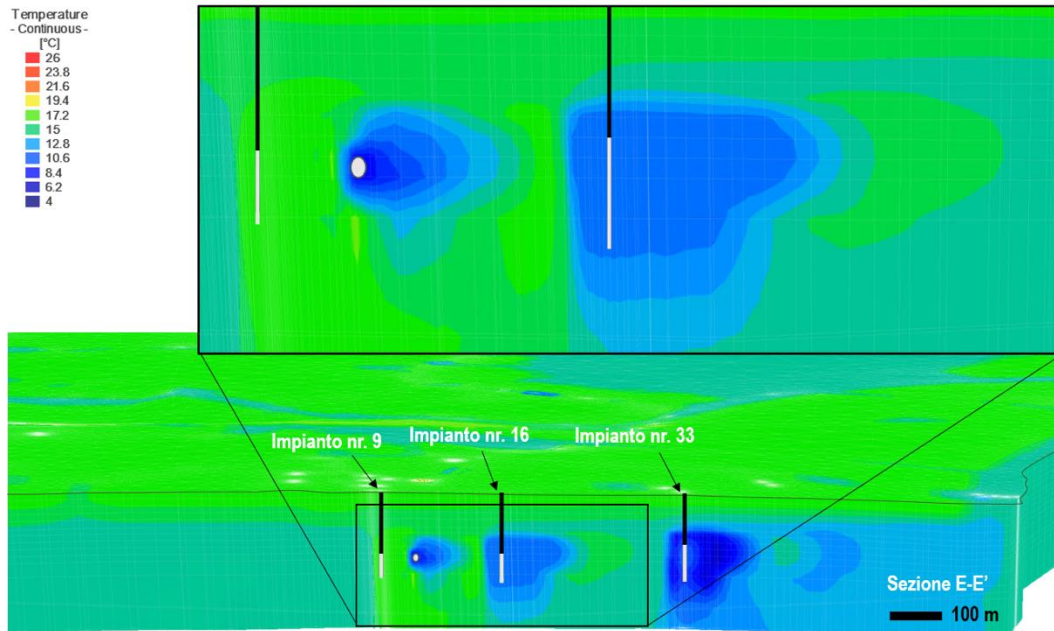


Figura 20. Sezione E-E': mappa della temperatura circostante la tratta di Linea 2 al termine della stagione invernale del quarto anno di attivazione. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5.

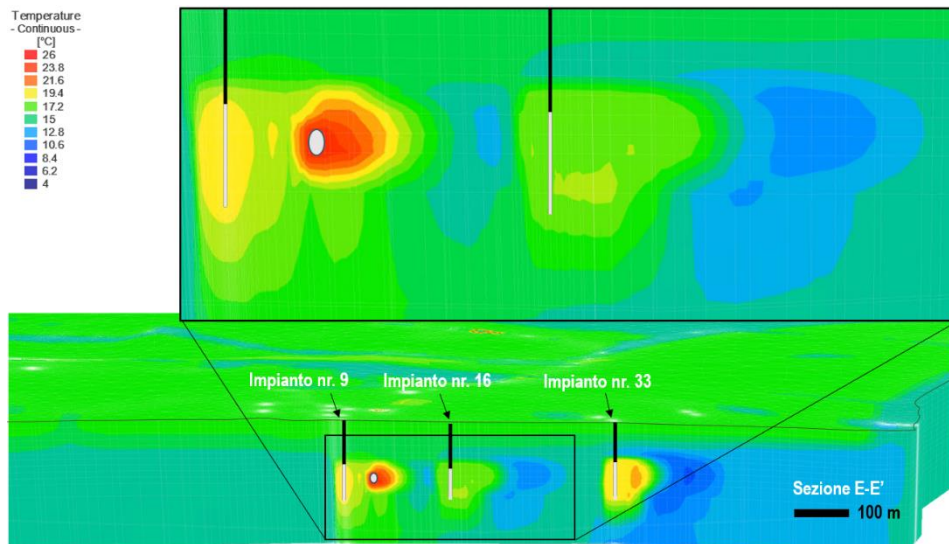


Figura 21. Sezione E-E': mappa della temperatura circostante la tratta di Linea 2 al termine della stagione estiva del quarto anno di attivazione. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5.

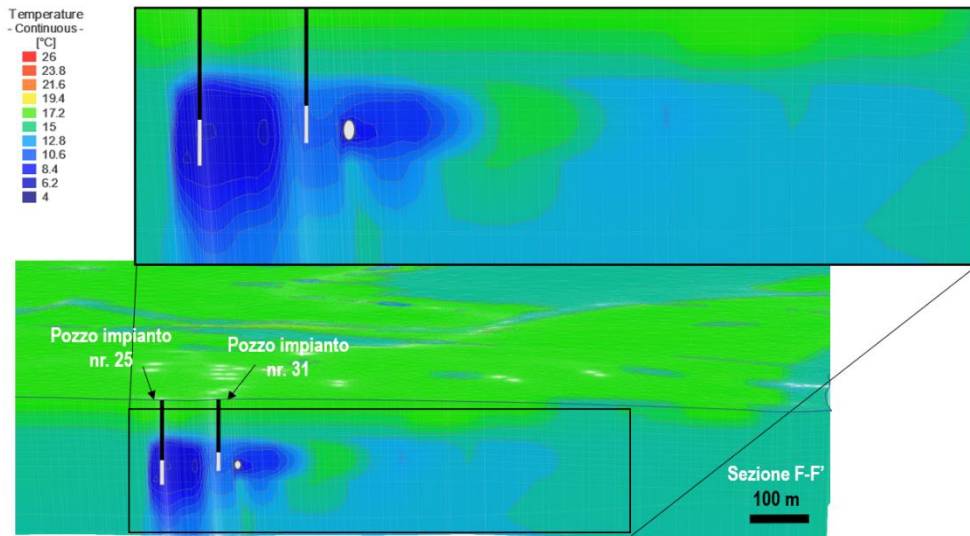


Figura 22. Sezione F-F': mappa delle temperature al termine della stagione invernale del quarto anno di attivazione. In figura sono indicati i plumi termici dovuti agli impianti nr. 25 e 31. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5.

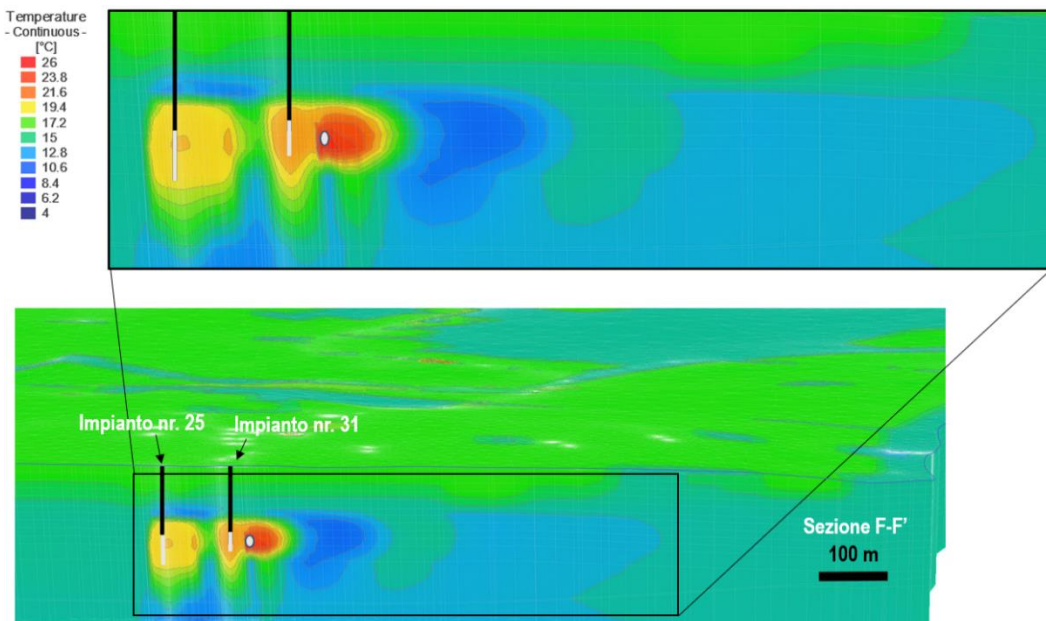


Figura 23- Sezione F-F': mappa delle temperature al termine della stagione estiva del quarto anno di attivazione. In figura sono indicati i plumi termici dovuti agli impianti nr. 25 e 31. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5.



Infine, per il tratto conclusivo a ridosso della stazione Politecnico mostrato nella Figura 24 il funzionamento dell'impianto geotermico nr. 11 risulta favorevole per lo sfruttamento energetico della galleria durante la stagione invernale. Infatti, secondo i documenti di progetto, le modalità di funzionamento dell'impianto nr.11 prevedono a partire dal 2022 che i pozzi geotermici siano adibiti al solo raffreddamento verso gli edifici pertinenti con temperature di scarico pari a 21,5 °C anche nel periodo invernale. Come documentato nella sezione G-G' (Figura 25, dove la lunghezza del tratto finestrato del pozzo dell'impianto è stata evidenziata in grigio), il plume termico dell'impianto nr. 11 è fortemente dominante sia a monte che a valle della galleria della metropolitana. L'alterazione termica nel terreno circostante è pertanto principalmente dovuta all'impianto stesso mentre l'effetto dell'attivazione termica della metropolitana risulta addirittura mitigante.

Poiché, come anticipato, l'impianto geotermico a circuito aperto nr. 11 del Politecnico di Torino agisce con un'elevata temperatura di scarico costante tutto l'anno, esso è quello che principalmente regola l'evoluzione termica del terreno ai lati della Linea 2 anche durante e al termine della stagione estiva di attivazione (Figura 26). A differenza del caso di attivazione invernale, tuttavia, le temperature maggiori di 20°C, presenti a monte della galleria metropolitana all'inizio dell'attivazione estiva, non risulterebbero così favorevoli per lo scambio di calore durante la stagione di raffreddamento.



Figura 24. Sezione E-E': mappa della temperatura circostante la tratta di Linea 2 al termine della stagione invernale del quarto anno di attivazione. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5.

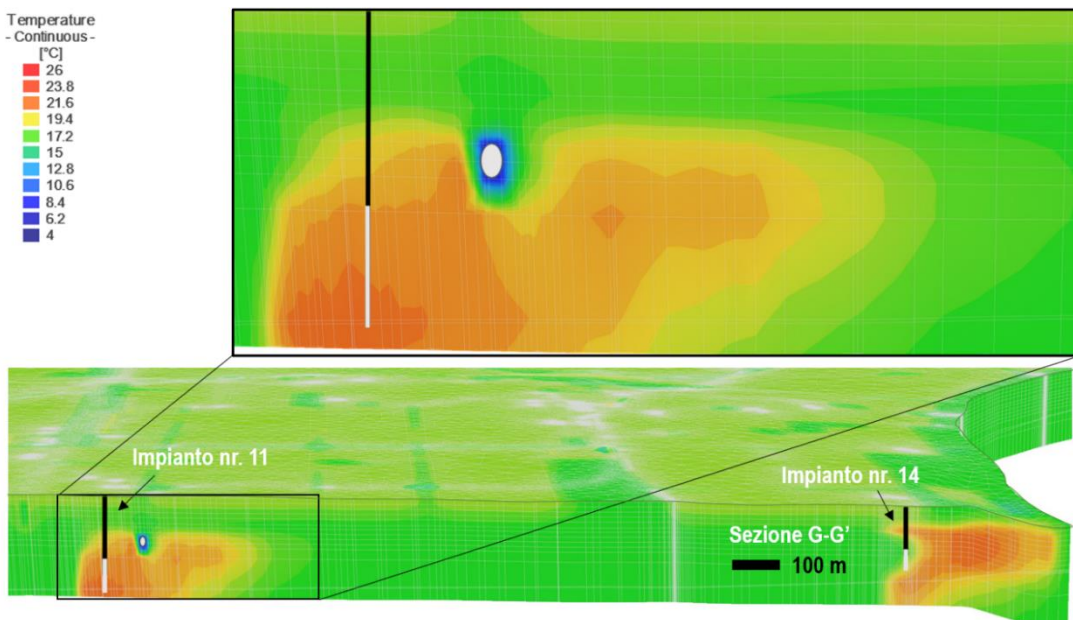


Figura 25. Sezione G-G': mappa delle temperature al termine dell'attivazione nella stagione invernale del quarto anno di simulazione. In figura sono indicati i plumi termici dovuti agli impianti nr. 11 e 14, entrambi del Politecnico di Torino. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5 (Politecnico di Torino, 2023).

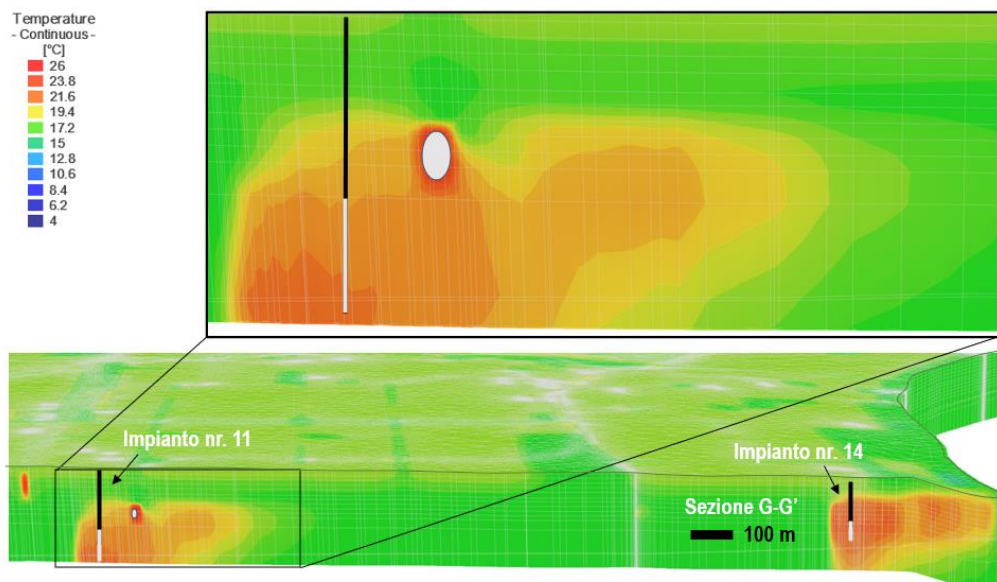



Figura 26. Sezione G-G': mappa delle temperature al termine dell'attivazione nella stagione invernale del quarto anno di simulazione. In figura sono indicati i plumi termici dovuti agli impianti

| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

nr. 11 e 14, entrambi del Politecnico di Torino. Per la visualizzazione in sezione 3D, all'asse verticale è stato applicato un fattore scala di 5. (Politecnico di Torino, 2023)

3.3 Zona di alterazione dovuta all'attivazione termica della Linea 2


Come anticipato nel capitolo precedente, la realizzazione di qualsivoglia impianto geotermico nel sottosuolo comporta la generazione di una zona di disturbo termico.

L'attivazione termica della galleria e degli edifici connessi (stazioni e deposito) comporta quindi nel sottosuolo circostante un'alterazione che è strettamente dipendente dalle modalità di gestione dell'impianto e dalle caratteristiche idrogeologiche dei terreni attraversati con particolare riguardo alla presenza o assenza di acqua nelle formazioni geologiche, all'eventuale flusso di falda e dalla direzione e dal gradiente di quest'ultimo. Al fine di stimare l'influenza generata dall'attivazione termica delle strutture di rivestimento della galleria della Linea 2, nel corso dell'anno 2022 la società Infratrasporti.TO s.r.l. e il Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica (DISEG) del Politecnico di Torino hanno stipulato un contratto di ricerca attuativo di accordo quadro relativo a "Studio relativo all'attivazione termica della galleria della nuova linea 2 della Metropolitana di Torino e alle interferenze con le infrastrutture in superficie". Nell'ambito di tale studio, sono state condotte analisi numeriche agli elementi finiti con accoppiamento termo idraulico che hanno anche permesso di determinare la diffusione del calore nel sottosuolo al contorno della galleria. I risultati delle analisi condotte confermano in linea generale quanto è stato determinato nell'ambito della precedente fase progettuale di PFTE, in particolar modo per l'individuazione dell'area di influenza termica di breve termine a monte e a valle della galleria rispettivamente per il periodo invernale e per il periodo estivo.

La modellazione numerica a scala urbana condotta dal Politecnico include tutti gli impianti a circuito aperto e a circuito chiuso esistenti censiti al Dicembre 2022 (in ottemperanza alla richiesta da parte della Regione Piemonte formulata nell'ambito della conferenza dei servizi sulla Variante urbanistica n. 333 al PRGC di cui alla DD 5168 del 26/10/2022 menzionata in premessa), le opere infrastrutturali principali (ML1, passante ferroviario, parcheggi interrati) oltre alla Linea 2 della metropolitana.

Nel seguito si riportano le considerazioni tratte sui modelli elaborati che integrano e dettagliano i risultati del PFTE.

Poiché la metropolitana è ubicata a profondità differenti lungo il tracciato, il suo impatto sulle temperature del terreno circostante è fortemente variabile in funzione della profondità e, soprattutto nel tratto realizzato in TBM, limitato a un tratto compreso tra calotta e arco rovescio della galleria. A tale scopo, per illustrare i risultati dello studio numerico a scala urbana, sono state prese in considerazione due diverse profondità d'interesse (10 e 25 m da piano campagna), una per la tratta in Cut&Cover e l'altra per la tratta in TBM ove l'effetto prodotto dalla metropolitana fosse massimo. Si sono estrapolati i risultati di temperatura all'interno di tutto il dominio in corrispondenza del termine delle ultime stagioni invernali ed estive e in

| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

corrispondenza dell'anno precedente la messa in funzione della geostruttura energetica (fine calibrazione).

La Figura 27, i cui stralci di dettaglio sono riportati altresì anche nelle Tavole 1-5 in allegato alla presente relazione, mostra con una linea tratteggiata nera una rappresentazione delle zone del terreno caratterizzate da una variazione di temperatura maggiore di 1 °C rispetto alle condizioni del terreno (già disturbate) precedenti l'attivazione della metropolitana. Queste aree possono essere quindi considerate coincidenti con la ZAT. L'area presenta evidentemente un tracciato parallelo a quello dell'infrastruttura e fortemente influenzato dall'andamento della circolazione idrica sotterranea. A monte idrografico della galleria, l'estensione della zona è sostanzialmente trascurabile e sempre inferiore a 50 m. A valle invece l'estensione è maggiore e raggiunge valori del centinaio di metri, con un valore massimo di circa 276 m dall'asse della galleria in corrispondenza della curva tra le stazioni Mole-Giardini Reali e Novara. La fascia dovuta all'attivazione termica della metropolitana in progetto è stata attribuita tenendo in considerazione i risultati più cautelativi tra quelli ottenuti alle due profondità d'interesse (10 m da p.c. per il tratto in C&C e 25 m da p.c. per il tratto in TBM) e al termine di entrambe le stagioni estiva e invernale. Di conseguenza a quote differenti la zona di disturbo sarà al più uguale o inferiore all'estensione alle due profondità di interesse precedentemente indicate.

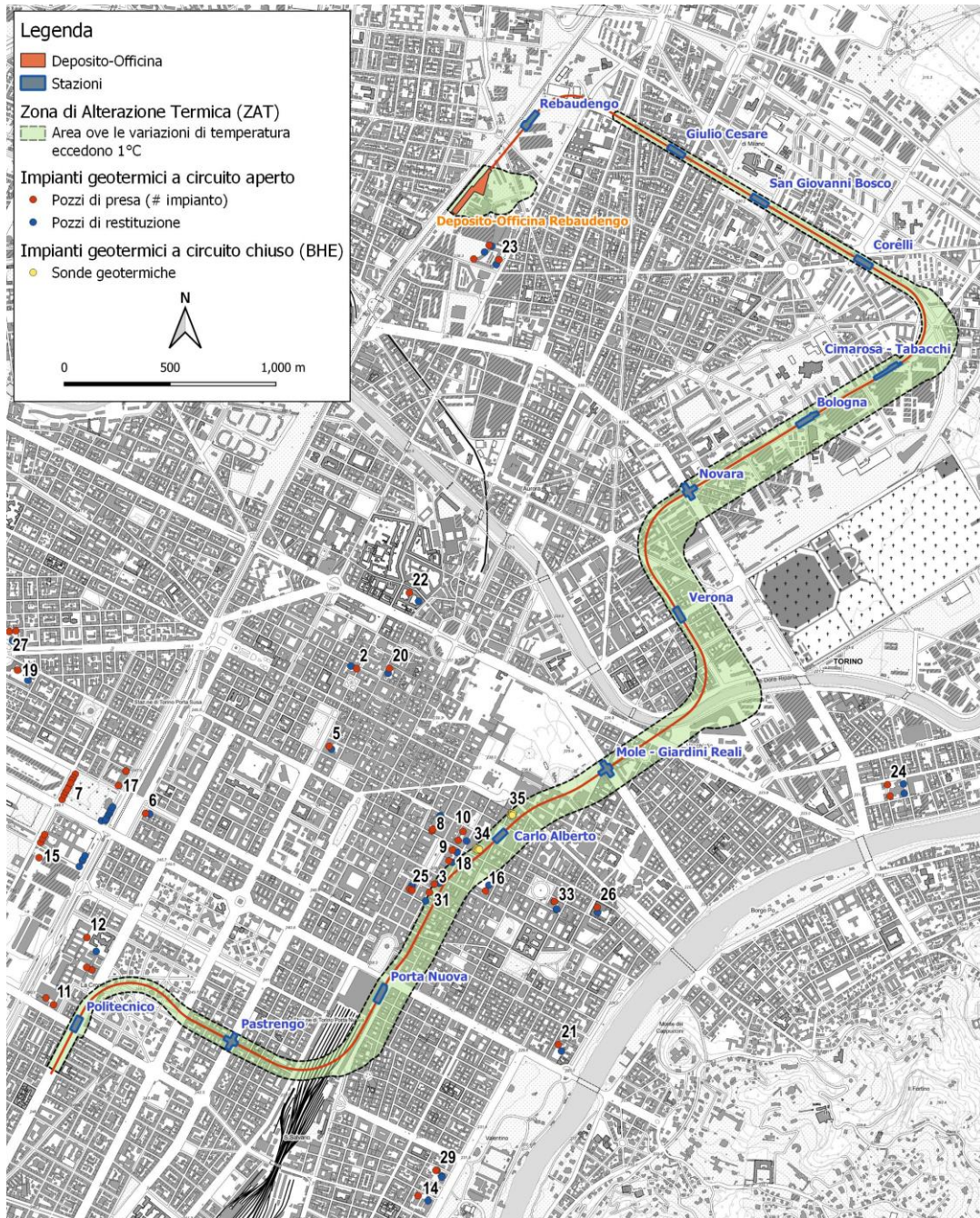



Figura 27. Zona di alterazione termica per la tratta di ML2 considerata nel presente studio. La linea nera tratteggiata delimita il confine entro il quale le variazioni di temperatura superano 1°C (Politecnico di Torino, 2023).

| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

4. AZIONI DI MITIGAZIONE


Come indicato nel precedente capitolo l'attivazione termica della galleria della ML2 porta in linea generale ad interferenze piuttosto limitate nei confronti degli impianti geotermici esistenti. Gli impatti potenziali riguarderanno le componenti acque sotterranee e sottosuolo, quest'ultimo limitatamente alla porzione più a diretto contatto con l'opera sotterranea.

La limitata interferenza che deriva dall'attivazione termica della ML2 è da imputarsi principalmente al fatto che tale attivazione può essere equiparata di fatto alla realizzazione di uno scambiatore di calore a circuito chiuso (GSHP) a sviluppo orizzontale. In questa modalità il sistema scambia soltanto calore con il terreno circostante mentre non viene reimmesso in falda alcun tipo di fluido con temperatura alterata, ovvero non vi è scambio di massa con l'acquifero. Di conseguenza la ZAT, corrispondente all'area con variazioni termiche comprese entro +/- 1° C che viene generata presenta un tracciato parallelo a quello dell'infrastruttura e fortemente influenzato dall'andamento della circolazione idrica sotterranea. A monte idrografico della galleria, l'estensione della zona è sostanzialmente trascurabile e sempre inferiore a 50 m. A valle invece l'estensione è maggiore e raggiunge valori del centinaio di metri, con un valore massimo di 276 m in corrispondenza della curva tra le stazioni Mole-Giardini Reali e Novara. Considerando il funzionamento alternato degli impianti estate-inverno, è necessario anche ricordare che i cicli di scarica (durante l'inverno) e ricarica (durante l'estate) del calore all'interno del terreno globalmente tendono a compensarsi e permettono così di diminuire il rischio di deriva termiche in riscaldamento o in raffreddamento delle porzioni di sottosuolo interferite dall'attivazione termica della galleria.

Sulla base dei concetti sopra espressi nella valutazione degli eventuali interventi di mitigazione in questo tratto dovranno comunque essere tenuti in considerazione due aspetti che si ritengono di particolare importanza:

1. Secondo le analisi svolte nell'ambito del presente livello progettuale, il tratto tra le stazioni di Porta Nuova e Carlo Alberto è risultato tra quelli caratterizzati da potenze termiche estraibili dal terreno più elevate;
2. La presenza di numerosi impianti geotermici sia a circuito aperto (GWHP) che a circuito chiuso (GSHP) a servizio di civili abitazioni e strutture commerciali evidenzia la presenza di una domanda di riscaldamento/raffrescamento non soddisfatta da reti di distribuzione territoriali rendendo di fatto fortemente appetibile l'utilizzo su larga scala della risorsa geotermica.

In considerazione di quanto sopra e a fronte dei potenziali minimi impatti sugli impianti esistenti si ritiene sufficiente come fattore di mitigazione specifico la possibilità di regolazione di ogni singola porzione dell'impianto geotermico della galleria della ML2. Da questo punto di vista gli impianti di circolazione del fluido termo-vettore all'interno dei conci prefabbricati saranno

| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

modulabili e si potrà quindi intervenire con la loro regolazione o con temporanee disattivazioni qualora il monitoraggio metta in evidenza comportamenti anomali.

Ulteriore azione che si potrà prevedere per la mitigazione dei potenziali impatti sarà quindi il monitoraggio dei principali parametri chimico-fisici delle acque di falda con particolare riguardo alla temperatura all'interno delle zone nelle quali si prevede lo sviluppo dell'alterazione causata dall'attivazione termica della galleria della ML2. La descrizione in dettaglio del sistema monitoraggio proposto viene fornita nel capitolo successivo.

5. MONITORAGGIO

5.1 Aspetti generali

In termini generali, tutte le analisi e le simulazioni che sono state condotte hanno evidenziato che le acque sotterranee rappresentano la matrice che potenzialmente potrà essere maggiormente impattata dall'attivazione termica della galleria della ML2. Il monitoraggio delle acque sotterranee dovrà quindi essere rivolto in particolare alla misura della possibile variazione del parametro principalmente impattato, ovvero la temperatura dell'acqua di falda. Contestualmente a tale parametro potranno essere altresì monitorati i parametri chimico-fisici e microbiologici principali che potrebbero essere a loro volta influenzati dalle variazioni di temperatura dell'acqua di falda nella quale sono disciolti.

Discorso a parte merita il monitoraggio dei livelli piezometrici che non risulta direttamente impattato dall'attivazione termica della galleria della ML2 quanto eventualmente dalle operazioni di scavo legate alla realizzazione della galleria medesima. L'attivazione termica della galleria avviene infatti per mezzo di un circuito chiuso, simile ad un BHE che non prevede alcun scambio di acqua con la falda circostante. A tal proposito, tuttavia, si è comunque ritenuto cautelativo comprendere nel sistema di monitoraggio anche la misura delle variazioni piezometriche per rilevare possibili correlazioni con le variazioni naturali di temperatura preesistenti alla realizzazione dell'opera.

Il monitoraggio dovrà essere condotto a partire dal periodo ante-operam per rilevare la situazione termica attuale del sottosuolo e dovrà proseguire durante la messa in funzione dell'impianto geotermico in galleria e nelle stazioni. A questo proposito è necessario sottolineare che la situazione termica del sottosuolo nell'area urbana della città di Torino presenta ad oggi già una serie di perturbazioni indotte dagli impianti geotermici esistenti. Il monitoraggio ante-operam è rivolto quindi in primis alla identificazione di tali anomalie termiche con particolare riguardo alla zona lungo il tracciato compresa tra le stazioni di Politecnico e Pastrengo e tra le stazioni di Porta Nuova e Carlo Alberto.




5.2 Indicazioni specifiche

Al fine di approfondire le variazioni a breve e a lungo termine di temperatura e del livello della falda per la progettazione definitiva delle opere sono stati attrezzati con sensori a lettura automatica continua una serie di piezometri distribuiti lungo il tracciato della ML2. Nella Tabella 3 è riportata la sintesi di tali piezometri con le relative caratteristiche e la tipologia di sensori ad oggi installati. L'ubicazione dei punti di misura è inoltre riportata nella Figura 28. In ciascun piezometro attrezzato per la misura continua della temperatura sono stati installati tre differenti sensori posti rispettivamente a differenti profondità nel tratto saturo al fine di identificare l'eventuale stratificazione termica della falda o plume termici che interessano specifiche porzioni della falda.

I punti riportati nella Tabella 3, considerata la serie storica di dati ad oggi disponibili, possono quindi costituire la base del sistema di monitoraggio ante-operam e post-operam che potrà - se necessario - essere successivamente integrato con l'inclusione di ulteriori punti di misura, in particolare della temperatura.

Tabella 3. Caratteristiche dei piezometri attrezzati per il monitoraggio in continuo del livello piezometrico e della temperatura dell'acqua di falda.

| Piezometro ID | Ubicazione | Anno Realizzazione | Tipologia | Diametro (mm) | Tipologia sensori | Profondità sensori T (m) |
|----------------|--------------------------------------|--------------------|-----------------|---------------|---|--------------------------|
| SP-D03 | Piazzale Duca d'Aosta | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 51 | Livello piezometrico e temperatura (digitali) | 22.0 – 27.0 – 33.0 |
| SP13 | Corso Vittorio Emanuele II | 2018 (PFTE) | Tubo aperto PVC | 102 | Livello piezometrico e temperatura (digitali) | 20.0 – 28.0 - 37.0 |
| SA-D14 | Via Fusinato | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 102 | Livello piezometrico e temperatura (digitali) | 16.0 – 20.0 – 23.0 |
| SP-D17 | Lungo Dora Siena | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 51 | Livello piezometrico e temperatura (digitali) | 12.0 – 17.0 – 23.0 |
| SA-D03 | Corso Duca d'Aosta/Corso G. Ferraris | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 102 | Livello piezometrico (corda vibrante) | - |
| SA-D05/ SP-D11 | Via Teofilo Rossi di Montelera | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 102 | Livello piezometrico (corda vibrante) | - |
| SP-D21 | Via Bologna | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 51 | Livello piezometrico (corda vibrante) | - |
| SP-D23 | Corso Novara/Via Bologna | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 51 | Livello piezometrico (corda vibrante) | - |
| SP-D24 | Via Pacini/Via Novara | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 51 | Livello piezometrico (corda vibrante) | - |
| SA-D12 | Via Bologna/Via Caresana | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 102 | Livello piezometrico (corda vibrante) | - |

| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

L'analisi dell'ubicazione dei piezometri evidenzia come tutte le verticali ricadano all'interno della ZAT descritta nei capitoli precedenti ed ottenuta dalla modellazione numerica a scala urbana condotta dal Politecnico di Torino. Sulla base dei risultati delle simulazioni l'area ove queste anomalie termiche appaiono più estese corrisponde alla zona centrale della città tra le stazioni Politecnico e Pastrengo, tra le stazioni di Porta Nuova e Carlo Alberto, tra le stazioni Mole-Giardini Reali e Verona e nella zona nord della città di Torino a valle del Deposito-Officina Rebaudengo.

In considerazione di quanto sopra, e sulla base delle informazioni ad oggi disponibili, si ritiene opportuno integrare il monitoraggio continuo mediante l'effettuazione di campagne manuali di misura con cadenza almeno semestrale della temperatura dell'acqua di falda in n. 22 tra i restanti piezometri realizzati per il PFTE ed il PD della ML2 e distribuiti lungo la tratta Politecnico-Rebaudengo. A titolo indicativo nella Tabella 4 e nella Figura 29 viene riportata una lista unitamente all'ubicazione dei piezometri integrativi che potranno essere utilizzati in tali campagne. Si sottolinea che i piezometri sopra indicati potranno essere sostituiti con altri strumenti posti in aree limitrofe qualora alcuni di essi non siano più accessibili o presentino caratteristiche manutentive non più idonee all'esecuzione delle misure.

Tabella 4. Lista dei piezometri integrativi per il monitoraggio della temperatura dell'acqua di falda con misure periodiche manuali.

| Piezometro ID | Ubicazione | Anno Realizzazione | Tipologia | Diametro (mm) | Profondità di misura T (m da p.c) |
|---------------|---|--------------------|-----------------|---------------|-----------------------------------|
| SA-D01 | Via Marco Polo/Corso Duca degli Abruzzi | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 102 | 22.0 – 24.0 – 28.0 |
| SP-D04 | Piazzale Duca d'Aosta | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 51 | 21.0 – 29.0 - 37.0 |
| SA-D03 | Corso Duca d'Aosta/Corso G. Ferraris | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 102 | 22.0 – 27.0 - 32.0 |
| SP-D07 | Via Pastrengo/Via Sacchi | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 51 | 18.0 – 27.0 - 36.0 |
| SP-D09 | Piazza Lagrange | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 51 | 18.0 – 25.0 - 32.0 |
| SA-D05/SP-D11 | Via Teofilo Rossi di Montelera | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 102 | 20.0 – 28.5 - 37.0 |
| SP-D12 | Via Maria Vittoria | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 51 | 20.0 – 26.0 - 32.0 |
| SP14 | Piazza Carlo Alberto | 2018 (PFTE) | Tubo aperto PVC | 76 | 19.0 - 26.0- 33.0 |
| SA-D06/SP-D14 | Via Verdi | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 102 | 19.0 – 25.5 - 32.0 |
| SA16 | Via Rossini/Corso San Maurizio | 2018 (PFTE) | Tubo aperto PVC | 102 | 14.0- 19.0 – 25.0 |
| SA25 | Corso regina Margherita | 2018 (PFTE) | Tubo aperto PVC | 102 | 12.0 – 14.0 |
| SA17 | Largo Regio Parco | 2018 (PFTE) | Tubo aperto PVC | 102 | 13.0 – 16.0 - 19.0 |
| SA-D09 | Via Pedrotti | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 102 | 13.0 – 22.0- 32.0 |




| Piezometro ID | Ubicazione | Anno Realizzazione | Tipologia | Diametro (mm) | Profondità di misura T (m da p.c) |
|---------------|-------------------------------|--------------------|-----------------|---------------|-----------------------------------|
| SA-D10 | Corso Novara/Via Bologna | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 102 | 19.0 – 25.5 - 32.0 |
| DIA-D10 | Largo Bologna/Via Ponchielli | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 51 | 14.0 – 17.0 – 22.0 |
| SP-D25 | Largo Bologna/Via Ponchielli | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 51 | 14.0 – 17.0 – 22.0 |
| SP19 | Piazzale Croce Rossa Italiana | 2018 (PFTE) | Tubo aperto PVC | 76 | 13.0 – 19.0 - 24.0 |
| SA-D15 | Via Gottardo | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 102 | 17.0 – 19.0 |
| SP-D29 | Via Gottardo | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 51 | 16.0 |
| SA-D20 | Via Gottardo | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 102 | 14.0 – 17.0 – 19.0 |
| SA-D21 | Corso Venezia | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 102 | 17.0 – 19.0 |
| SP-D37 | Corso Venezia | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 51 | 17.0 – 27.0 - 37.0 |

La temperatura dell'acqua di falda dovrà essere misurata in tre punti all'interno del tratto saturo direttamente all'interno del piezometro, attraverso un freatimetro dotato di sensore termometrico avente risoluzione minima di 0.1 °C. Le misure dovranno essere condotte rispettivamente circa 2 m al di sotto del livello statico dell'acqua, 2-3 m al di sopra del fondo del piezometro e circa in mezzeria tra i precedenti punti. Le misure dovranno partire dal periodo ante-operam in modo da ricostruire i valori "di bianco" di temperatura e dovranno protrarsi successivamente all'attivazione termica del rivestimento della galleria per un periodo pari almeno a 2 anni.

Successivamente alla attivazione termica della galleria sarà quindi necessario integrare la rete di monitoraggio con ulteriori 2-3 punti di misura posti a valle del tracciato, indicativamente nell'area compresa tra il centro città ed il fiume Po e 1-2 punti di misura posti a monte e distanti dal tracciato della ML2 al fine di avere un confronto continuo con la situazione termica indisturbata. Questi ulteriori punti di misura potranno corrispondere a piezometri realizzati ex-novo o in alternativa potranno coincidere con piezometri già installati per il monitoraggio del livello della falda freatica (ad es. piezometri ARPA, Città di Torino o di privati). Si ribadisce in questo senso che la condizione termica della falda definita come "indisturbata" non necessariamente equivale alla condizione di temperatura naturale in quanto nell'area urbana di Torino sono ad oggi attivi numerosi impianti geotermici a circuito aperto che scaricano acqua in falda ad una temperatura differente da quella di prelievo.

Per ciò che concerne la possibile variazione dei parametri chimici e microbiologici dell'acqua di falda al variare della temperatura, è necessario considerare che allo stato attuale delle conoscenze, i dati reperibili nella letteratura scientifica non sembrano nel complesso evidenziare variazioni significative a livello chimico e microbiologico collegabili ad incrementi o decrementi di temperatura simili a quelli causati dall'attivazione termica delle geostrutture energetiche della

| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

ML2 che nel caso specifico risultano compresi entro $\pm 5-6^{\circ}\text{C}$ (Bonte et al., 2011; 2013; Brielmann et al., 2009, Jesušek et al., 2013). Impatti apprezzabili ma comunque transitori sulla geochimica delle falde sono stati osservati solo in alcune applicazioni, come gli stoccaggi termici in acquifero (ATES, Aquifer Thermal Energy Storage), per le quali tuttavia le variazioni termiche sono pari a diverse decine di $^{\circ}\text{C}$ (Bonte et al., 2011; 2013).

È noto inoltre come la falda libera presente all'interno dei depositi fluvioglaciali della città di Torino da un punto di vista qualitativo si trovi già allo stato attuale in un forte stato di compromissione a causa dell'inquinamento diffuso da parte di solventi clorurati (ARPA, 2020). In conseguenza di ciò queste acque non risultano attualmente utilizzabili ad uso idropotabile. L'attivazione geotermica della galleria della ML2, essendo basata su un sistema a circuito chiuso, in condizioni di funzionamento normale non comporterà alcuno scambio di acqua con la falda e non potrà quindi modificare in alcun modo i parametri chimici, già comunque alterati, di tale acquifero. Si specifica inoltre che il fluido termovettore utilizzato all'interno delle tubazioni per lo scambio termico sarà costituito da una soluzione di acqua e fluido antigelo (glicole propilenico) in concentrazione non superiore al 15-20%. Il glicole propilenico risulta possedere una tossicità estremamente bassa ed una elevata biodegradabilità che, anche nel remoto caso di rottura delle tubazioni di scambio e possibile rilascio del fluido termovettore in falda, non comporterà impatti apprezzabili sulle acque sotterranee.

Al fine di escludere impatti sul chimismo e sulla microbiologia delle acque sotterranee si ritiene quindi sufficiente monitorare nel tempo la variazione di temperatura dell'acqua di falda secondo il programma di monitoraggio dettagliato sopra. Qualora si rilevino variazioni di temperatura superiori o inferiori al range di $\pm 6^{\circ}\text{C}$ rispetto alla temperatura iniziale, a titolo cautelativo si potrà effettuare un monitoraggio dei parametri chimico-fisici e microbiologici principali delle acque sotterranee in un intorno significativo dell'area dove è stata rilevata la variazione di temperatura al di fuori dei range attesi. Come già ricordato in precedenza sono già attualmente presenti nel sottosuolo della Città di Torino zone di alterazione termica generate dal funzionamento di alcuni impianti a circuito aperto ad oggi già attivi di cui si dovrà sempre tenere conto nella valutazione delle potenziali variazioni di temperatura potenziali legate all'attivazione termica della ML2.

I n.7 piezometri che potranno essere utilizzati per il monitoraggio dei parametri chimico-fisici e microbiologici dell'acqua di falda sono elencati nella Tabella 5 mentre la loro ubicazione è riportata nella Figura 30.

Tabella 5. Lista dei piezometri da cui effettuare i campionamenti per il monitoraggio dei parametri chimico-fisici dell'acqua di falda.

| Piezometro ID | Ubicazione | Anno Realizzazione | Tipologia | Diametro (mm) |
|---------------|---|--------------------|-----------------|---------------|
| SA-D01 | Via Marco Polo/Corso Duca degli Abruzzi | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 101 |
| SP-D09 | Piazza Lagrange | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 51 |



| Piezometro ID | Ubicazione | Anno Realizzazione | Tipologia | Diametro (mm) |
|---------------|--------------------------------|--------------------|-----------------|---------------|
| SA-16 | Via Rossini/Corso San Maurizio | 2018 (PFTE) | Tubo aperto PVC | 101 |
| SA-D10 | Corso Novara/Via Bologna | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 101 |
| SP19 | Piazzale Croce Rossa Italiana | 2018 (PFTE) | Tubo aperto PVC | 76 |
| SA-D16 | Via Sempione | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 101 |
| SA-D23 | Corso Venezia | 2021 (PD) | Tubo aperto PVC | 101 |

Si ritiene sufficiente un prelievo semestrale o annuale fintanto che la variazione di temperatura rimanga superiore o inferiore di $\pm 6^{\circ}\text{C}$ rispetto alla temperatura iniziale, da ripetersi sempre nello stesso periodo dell'anno al fine di rendere confrontabili le determinazioni analitiche da tutti i piezometri individuati nella tabella suddetta.

Qualora non sia possibile condurre il prelievo all'interno di queste verticali, potranno essere selezionati ulteriori piezometri in posizione limitrofa rispetto ai precedenti.

Il set analitico di base per l'analisi e la valutazione del chimismo delle acque di falda potrà prevedere la determinazione dei seguenti parametri fisici e dei seguenti analiti:

- pH;
- Conducibilità a 20°C ;
- Potenziale REDOX;
- Ossigeno disciolto;
- Calcio;
- Potassio;
- Sodio;
- Magnesio;
- Cloruri;
- Solfati;
- Nitrati;
- Fosfati.

Per quanto riguarda infine i parametri microbiologici, non essendo disponibili e note in letteratura indicazioni sulle variazioni di concentrazione di specifiche specie di microorganismi in relazione alle variazioni di temperatura attese (entro $\pm 5-6^{\circ}\text{C}$), si propone in questa fase di ricorrere ad un set di analisi microbiologico standard che consenta in generale di formulare un giudizio igienico-sanitario o di qualità di un'acqua. Tale analisi prevede la ricerca dei seguenti parametri:

- Batteri coliformi;



- Escherichia Coli;
- Enterococchi;
- Colonie a 36°C;
- Colonie a 22°C.

Si deve ricordare infine che la presenza di microorganismi all'interno di un acquifero è sempre fortemente dinamica sia nel tempo che nello spazio in quanto ogni specie ha un tempo di vita limitato, risente del trasporto ed è condizionata dall'intrinseco potere autodepurante dei livelli saturi. Di conseguenza il confronto tra le misure dei parametri microbiologici di bianco, ovvero pre-attivazione termica e le misure in caso di variazioni della temperatura superiori a $\pm 6^\circ\text{C}$ dovranno essere effettuate con estrema cautela ed i risultati analizzati in maniera critica.

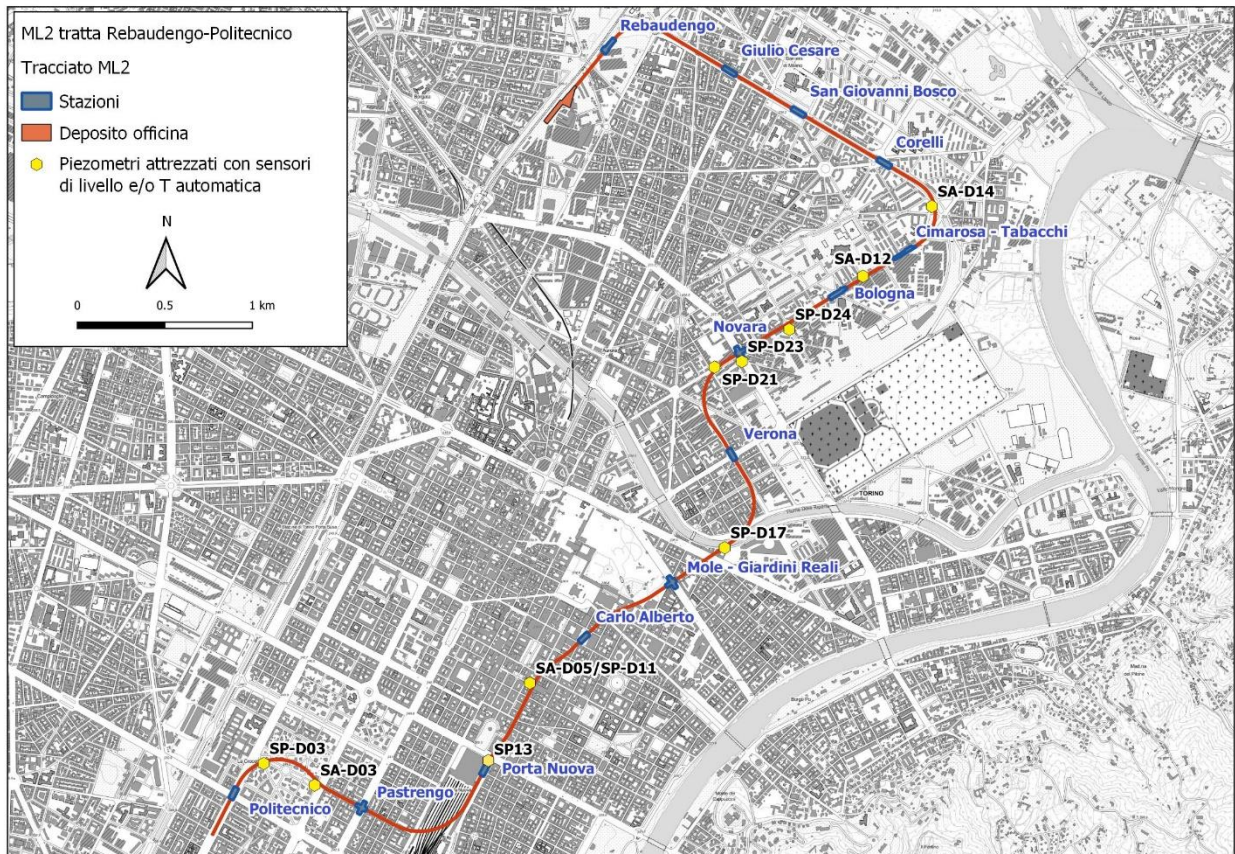


Figura 28. Mappa con indicazione dei piezometri ad oggi attrezzati per il monitoraggio in continuo del livello piezometrico e della temperatura dell'acqua di falda.

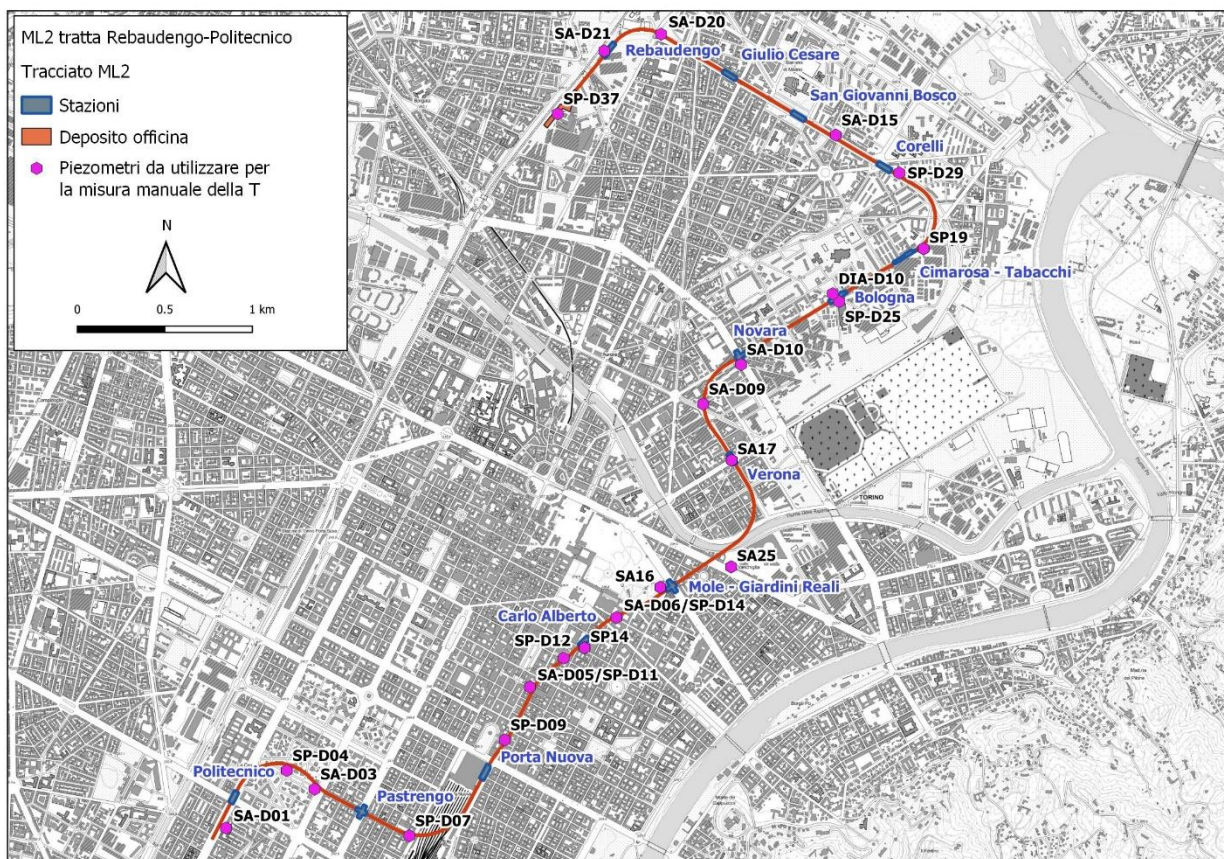


Figura 29. Mappa con l'ubicazione dei piezometri integrativi utilizzabili per il monitoraggio della temperatura dell'acqua di falda con misure periodiche manuali.

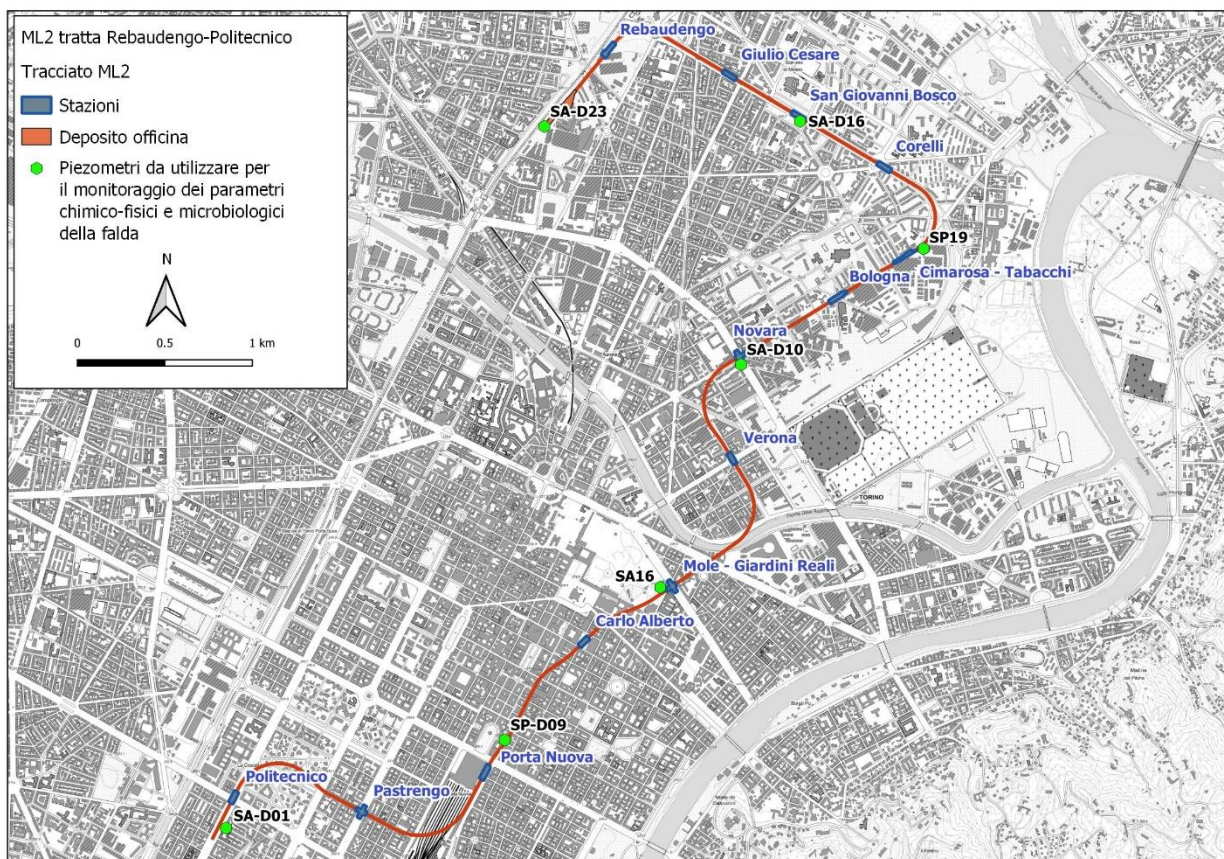



Figura 30. Mappa con l'ubicazione dei piezometri utilizzabili per il monitoraggio dei parametri chimico-fisici e microbiologici dell'acqua di falda.

6. CONCLUSIONI

La presente relazione ha trattato l'analisi dei principali aspetti ambientali connessi alle geostrutture energetiche che saranno integrate all'interno delle opere strutturali delle gallerie della ML2 nella tratta Rebaudengo-Politecnico.

Le considerazioni riguardanti l'estensione della fascia di alterazione termica generata dall'attivazione termica delle geostrutture energetiche e delle possibili interferenze con gli impianti esistenti deriva dai risultati del modello numerico a scala urbana implementato dal Politecnico di Torino sulla base dei dati aggiornati a dicembre 2022 in ottemperanza alla richiesta da parte della Regione Piemonte formulata nell'ambito della conferenza dei servizi sulla Variante urbanistica n. 333 al PRGC, di cui alla determina dirigenziale della Città di Torino, atto DD 5168 del 26/10/2022 inerente alla verifica di Assoggettabilità alla fase di VAS (Valutazione Ambientale Strategica).


| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

Sulla base delle analisi già condotte è stato possibile definire l'estensione delle zone di alterazione termica (ZAT) e le possibili interferenze con gli impianti geotermici preesistenti. La ZAT desunta dal modello numerico a scala urbana presenta un tracciato parallelo a quello dell'infrastruttura ed è fortemente influenzato dall'andamento della circolazione idrica sotterranea, ovvero dalla cadente piezometrica e dalla direzione di quest'ultima rispetto all'andamento del tracciato della galleria. A monte idrografico della galleria, l'estensione della ZAT è sostanzialmente trascurabile e sempre inferiore a 50 m, invece a valle idrografico la ZAT è maggiore e raggiunge valori del centinaio di metri, con un valore massimo di 276 m in corrispondenza della curva tra le stazioni Mole-Giardini Reali e Novara. Questa asimmetria è determinata dalla presenza di un gradiente idraulico marcato che tende a trasportare in maniera più efficiente l'alterazione termica verso le zone poste idrogeologicamente a valle della galleria.

La ZAT dovuta all'attivazione termica della metropolitana in progetto così calcolata è stata attribuita tenendo in considerazione i risultati più cautelativi tra quelli ottenuti alle due profondità d'interesse (per il tratto in C&C e TBM) e al termine di entrambe le stagioni estiva e invernale. Di conseguenza, essendo questi valori caratteristici delle profondità indagate, a quote differenti la zona di disturbo sarà al più uguale o inferiore alla precedente.

Complessivamente nell'area urbana di Torino oggetto di studio sono stati censiti 35 impianti geotermici tra cui 33 a circuito aperto e 2 a circuito chiuso (34 – Congregazione San Filippo Neri e 35 – Via Carlo Alberto 3). Dall'analisi complessiva degli impianti geotermici a circuito aperto (GWHP) autorizzati risultano possibili già allo stato attuale, ovvero senza l'attivazione termica delle strutture della Linea 2, interferenze di tipo inter-impianto sia nel centro storico della città di Torino oltre che nella zona della stazione ferroviaria di Porta Susa dove è presente un impianto di potenza e dimensioni elevate a servizio del nuovo centro direzionale Intesa San Paolo SpA, costituito da 9 pozzi di presa ed altrettanti pozzi di restituzione.

L'area dove sono state rilevate potenziali interferenze tra la galleria della ML2 e gli impianti esistenti risulta di fatto limitata ai tratti di linea compresi tra le stazioni di Politecnico e Pastrengo, tra le stazioni di Porta nuova e Carlo Alberto, tra le stazioni Mole-Giardini Reali e Verona e nella zona nord della città di Torino a valle del Deposito-Officina Rebaudengo. La maggior parte degli impianti geotermici tra i 35 censiti ed autorizzati dalla Città Metropolitana di Torino si trovano a monte da un punto di vista idrogeologico rispetto al tracciato della ML2. Soltanto 7 impianti a circuito aperto sono invece collocati a valle del tracciato e possono quindi essere più direttamente interessati dagli effetti dell'attivazione termica delle strutture della Linea 2 della metropolitana di Torino. Le distanze tra il tracciato e le opere di presa di tali impianti fanno comunque ritenere che l'eventuale interferenza che si potrà verificare può essere considerata di lieve o trascurabile entità. La limitata interferenza causata dall'attivazione termica della galleria della Linea 2 verso gli impianti preesistenti deriva dal fatto che il sistema adottato e progettato è assimilabile ad uno scambiatore di calore a circuito chiuso (GSHP) a sviluppo orizzontale. In questa modalità il sistema scambia soltanto calore con il terreno circostante mentre non viene reimmesso in falda alcun tipo di fluido con temperatura alterata.

| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

La modellazione condotta dal Politecnico di Torino ha quindi consentito di individuare con una buona approssimazione una fascia di alterazione della temperatura del sottosuolo che si verrà a generare a seguito dell'attivazione termica delle strutture della Linea 2 della metropolitana. Indicazioni sugli effetti generati da plumi termici di terzi sulla galleria, possono essere in qualche modo desunte dalle zone del modello ove, sin d'ora, è presente una concentrazione di impianti esistenti (come, ad esempio, l'area attorno a piazza Carlo Alberto). Tuttavia, al fine di definire in maniera rigorosa tali effetti sarebbe necessario condurre ulteriori analisi numeriche specifiche, finalizzate a simulare, in maniera parametrica, lo specifico ruolo di sorgenti termiche posizionate a diverse distanze dalla metropolitana e in corrispondenza di diverse aree.

Rispetto agli effetti dell'attivazione termica della galleria della Linea 2 della metropolitana, il modello numerico a scala urbana ha evidenziato una maggiore significatività delle interferenze inter-impianto legate ai pozzi di presa e restituzione attualmente già esistenti a monte della galleria. Tale condizione è stata comunque considerata nell'attività di calcolo della potenza termica estraibile dai rivestimenti della galleria.

7. BIBLIOGRAFIA

Adam, D. & Markiewicz, R. (2009), Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers, *Géotechnique*, 59(3), 229–236, ISSN 0016-8505, doi:10.1680/geot.2009.59.3.229.


ARPA, 2020. Studio propedeutico della definizione dei valori di fondo antropico per i solventi clorurati maggiormente presenti nelle acque sotterranee della Regione Piemonte. Elaborato 1 -Relazione Generale: Aspetti normativi e sintesi delle relazioni tecniche. Risorsa disponibile al sito <http://www.arpa.piemonte.it/news/studio-propedeutico-alla-definizione-dei-valori-di-fondo-antropico-dei-solventi-clorurati-maggiormente-presenti-nelle-acque-sotterranee-del-piemonte>, 24 pp.

Amis, T., Robinson, C., Wong, S. (2010). Integrating Geothermal Loops into the Diaphragm Walls of the Knightsbridge Palace Hotel Project, geotechnical challenges in urban regeneration, *Proceeding 11th DFI / EFC Int. Conf. London*. 10.


Baralis, M. (2020). Optimisation of geothermal resources in urban areas. PhD Thesis , Politecnico di Torino, 336 pp.

Barla, M., Di Donna, A., (2016). Conci energetici per il rivestimento delle gallerie. *Strade & Autostrade* 5, 2–5.

Barla, M., Di Donna, A., (2018). Energy tunnels: concept and design aspects. *Undergr. Sp.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.03.003>.

| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

- Barla, M., Di Donna, A., Baralis, M. (2018), City-scale analysis of subsoil thermal conditions due to geothermal exploitation, *Environmental Geotechnics*, pp. 1–11, ISSN 2051-803X, doi:10.1680/jenge.17.00087.
- Barla, M., Di Donna, A., Insana, A., 2019. A novel real-scale experimental prototype of energy tunnel. *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* 87, 1–14.
- Barla, M., Di Donna, A., Perino, A., 2016. Application of energy tunnels to an urban environment. *Geothermics* 61, 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.01.014>.
- Barla, G., Barla, M., Bonini, M., Debernardi, D., Perino, A., Antolini, F., Gilardi, M. (2015), 3D thermo-hydro modeling and real-time monitoring for a geothermal system in Torino, Italy, *Proceedings of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development: 2481-2486*, ISBN 978-0-7277-6067-8.
- Barla, M. & Perino, A. (2015), Energy from geo-structures: a topic of growing interest, *Environmental Geotechnics*, 2(1), 3–7, ISSN 2051-803X, doi:10.1680/envgeo.13.00106.
- Bonte, M., Boris M., van Breukelen, B.M., Stuyfzand, P.J. (2013). Temperature-induced impacts on groundwater quality and arsenic mobility in anoxic aquifer sediments used for both drinking water and shallow geothermal energy production, *Water Research*, 47(14), 5088-5100.
- Bonte, M., Stuyfzand, P.J. Hulsmann, A. van Beelen, P. (2011). Underground thermal energy storage: Environmental risks and policy developments in the Netherlands and European Union, *Ecology and Society*, 16 (2011).
- Bourne-Webb P.J., Freitas, T.M.B., Gonc, R.A.C. (2016). Thermal and mechanical aspects of the response of embedded retaining walls used as shallow geothermal heat exchangers, *Energy & Buildings* 125, 130–141. doi:10.1016/j.enbuild.2016.04.075.
- Brandl, H. (2006), Energy foundations and other thermo-active ground structures, *Géotechnique*, 56(2), 81–122, ISSN 0016-8505, doi:10.1680/geot.2006.56.2.81.
- Brielmann, H., Griebler, C., Schmidt, S. I., Michel, R., & Lueders, T. (2009). Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. *FEMS microbiology ecology*, 68(3), 273-286.
- Di Donna A., Cecinato, F., Loveridge, F., Barla, M. (2016). Energy performance of diaphragm walls used as heat exchangers, *Proc. Inst. Civ. Eng. - Geotech. Eng.* 1–14. doi:10.1680/jgeen.
- Epting, J., Händel, F. & Huggenberger, P. (2013) Thermal management of an unconsolidated shallow urban groundwater body. *Hydrology and Earth System Sciences* 17(5): 1851–1869, <https://doi.org/10.5194/hess-17-1851-2013>.

| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

Fry, V.A. (2009). Lessons from London: regulation of open-loop ground source heat pumps in central London. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydro-geology* 42, 325–334.

Herbert, A., Arthur, S. & Chillingworth, G. (2013) Thermal modelling of large-scale exploitation of ground source energy in urban aquifers as a resource management tool. *Applied Energy* 109: 94–103, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.005>.

Jesušek, A., Grandel, S., & Dahmke, A. (2013). Impacts of subsurface heat storage on aquifer hydrogeochemistry. *Environmental Earth Sciences*, 69(6), 1999-2012.

Laloui, L. & Di Donna, A. (2013), *Energy Geostructures*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ USA, ISBN 9781118761809, doi:10.1002/9781118761809.

Lo Russo, S., Taddia, G. & Verda, V. (2012) Development of the thermally affected zone (TAZ) around a groundwater heat pump (GWHP) system: a sensitivity analysis. *Geothermics*, 43: 66–74, <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2012.02.001>.

Lo Russo, S., Gnani, L., Rocca, E., Taddia, G., Verda V. (2014). Groundwater Heat Pump (GWHP) system modeling and Thermal Affected Zone (TAZ) prediction reliability: Influence of temporal variations in flow discharge and injection temperature, *Geothermics*, 51, 2014, 103-112.

Soga, K., Rui, Y. (2016). Energy geostructures, in: Rees, S.J. (Ed.), *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*. Woodhead 482 Publishing, pp. 185–221. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100311-4.00007-8>.

Sterpi D., Angelotti, A. Corti, D., Ramus, M. (2014). Numerical analysis of heat transfer in thermo-active diaphragm walls, *Numer. Methods Geotech. Eng.* (2014) 1043–1048.

| | |
|---|---|
|  CITTA' DI TORINO | Metropolitana di Torino – Linea 2 - Tratta: Politecnico – Rebaudengo |
| Relazione sugli aspetti ambientali relativi alle geostrutture energetiche | MTL2T1A0DAMBGENR012-0-2 |

8. ALLEGATI

Tavole grafiche

- Tavola n° 1 Planimetria individuazione zona di alterazione termica (ZAT) della Linea 2 della Metropolitana di Torino. Tratta Politecnico – Porta Nuova.
- Tavola n° 2 Planimetria individuazione zona di alterazione termica (ZAT) della Linea 2 della Metropolitana di Torino. Tratta Porta Nuova – Mole Giardini Reali.
- Tavola n° 3 Planimetria individuazione zona di alterazione termica (ZAT) della Linea 2 della Metropolitana di Torino. Tratta Mole Giardini Reali - Novara.
- Tavola n° 4 Planimetria individuazione zona di alterazione termica (ZAT) della Linea 2 della Metropolitana di Torino. Tratta Novara – Corelli.
- Tavola n° 5 Planimetria individuazione zona di alterazione termica (ZAT) della Linea 2 della Metropolitana di Torino. Tratta Corelli – Deposito Rebaudengo.



Legenda

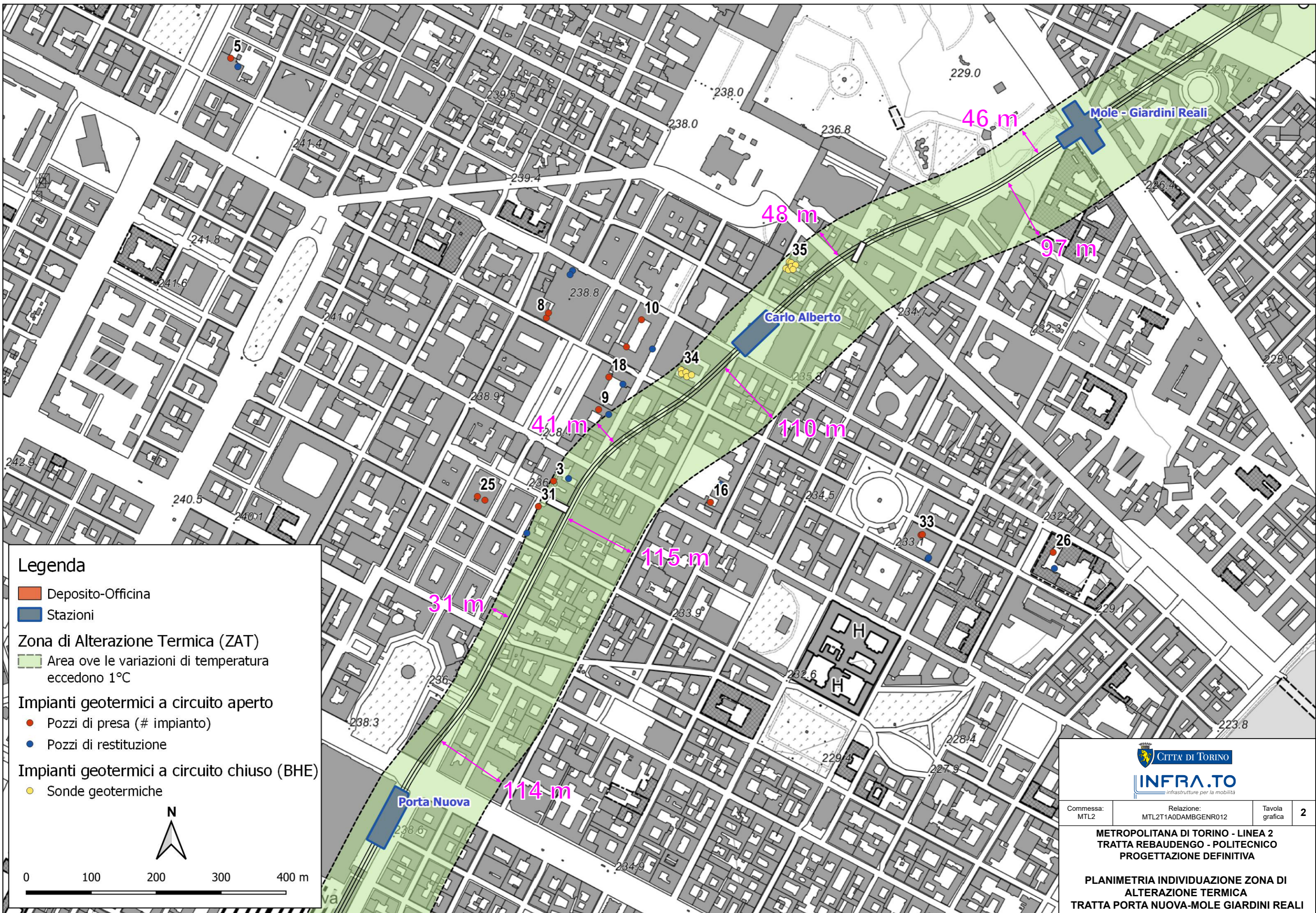
- Deposito-Officina
- Stazioni
- Zona di Alterazione Termica (ZAT)**
- Area ove le variazioni di temperatura eccedono 1°C
- Impianti geotermici a circuito aperto**
- Pozzi di presa (# impianto)
- Pozzi di restituzione
- Impianti geotermici a circuito chiuso (BHE)**
- Sonde geotermiche



| | | |
|-------------------|-----------------------------------|---------------------|
| Commissa: MTL2 | Relazione: MTL2T1A0DAMBGENR012 | Tavola grafica 1 |
|-------------------|-----------------------------------|---------------------|

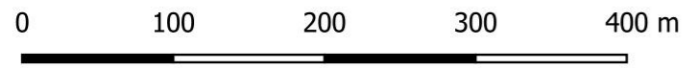
**METROPOLITANA DI TORINO - LINEA 2
TRATTA REBAUDENGO - POLITECNICO
PROGETTAZIONE DEFINITIVA**

**PLANIMETRIA INDIVIDUAZIONE ZONA DI
ALTERAZIONE TERMICA
TRATTA POLITECNICO-PORTA NUOVA**



Legenda

- Deposito-Officina
- Stazioni
- Zona di Alterazione Termica (ZAT)**
- Area ove le variazioni di temperatura eccedono 1°C
- Impianti geotermici a circuito aperto**
- Pozzi di presa (# impianto)
- Pozzi di restituzione
- Impianti geotermici a circuito chiuso (BHE)**
- Sonde geotermiche



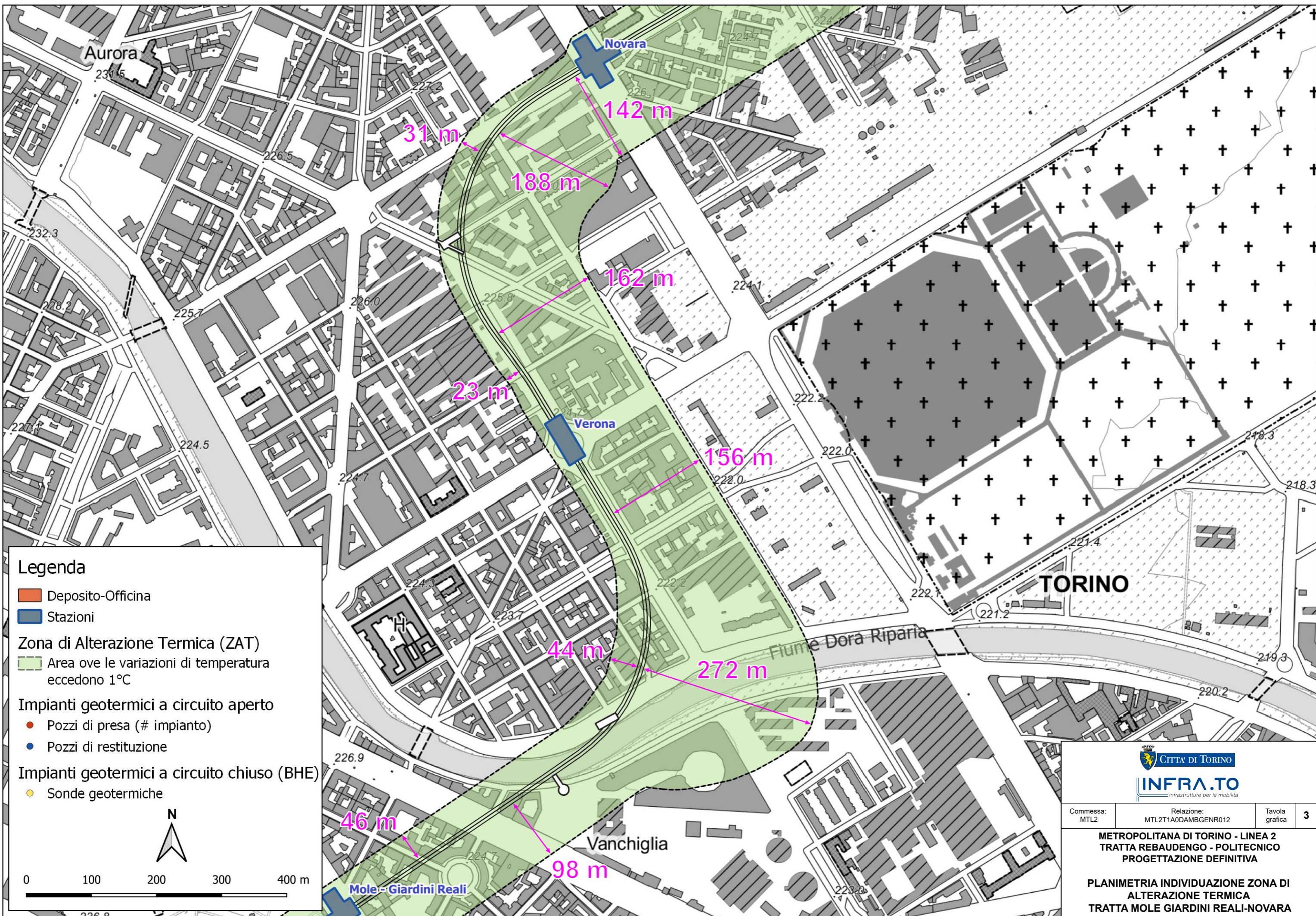
CITTA' DI TORINO

INFRA.TO
infrastrutture per la mobilità

| | | |
|-------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| Commissa: MTL2 | Relazione: MTL2T1A0DAMBGENR012 | Tavola grafica 2 |
|-------------------|-----------------------------------|----------------------------|

**METROPOLITANA DI TORINO - LINEA 2
TRATTA REBAUDENGO - POLITECNICO
PROGETTAZIONE DEFINITIVA**

**PLANIMETRIA INDIVIDUAZIONE ZONA DI
ALTERAZIONE TERMICA
TRATTA PORTA NUOVA-MOLE GIARDINI REALI**



CITTA' DI TORINO

INFRA.TO
infrastrutture per la mobilità

| | | |
|-------------------|-----------------------------------|---------------------|
| Commissa: MTL2 | Relazione: MTL2T1A0DAMBGENR012 | Tavola grafica 3 |
|-------------------|-----------------------------------|---------------------|

**METROPOLITANA DI TORINO - LINEA 2
TRATTA REBAUDENGO - POLITECNICO
PROGETTAZIONE DEFINITIVA**

**PLANIMETRIA INDIVIDUAZIONE ZONA DI
ALTERAZIONE TERMICA
TRATTA MOLE GIARDINI REALI-NOVARA**

Legenda

Deposito-Officina

Stazioni

Zona di Alterazione Termica (ZAT)

Area ove le variazioni di temperatura eccedono 1°C

Impianti geotermici a circuito aperto

Pozzi di presa (# impianto)

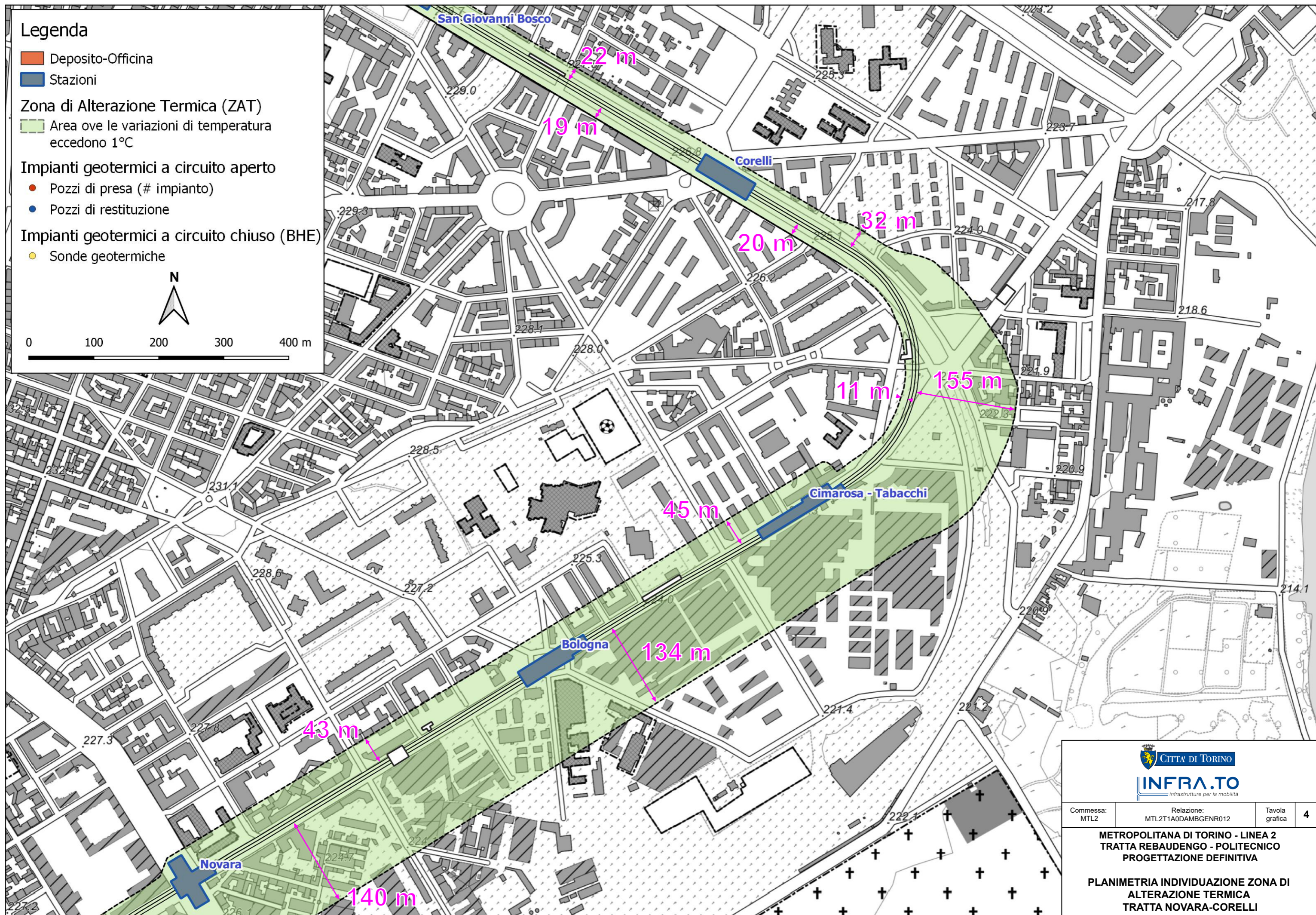
Pozzi di restituzione

Impianti geotermici a circuito chiuso (BHE)

Sonde geotermiche



0 100 200 300 400 m



CITTA' DI TORINO

INFRA.TO
infrastrutture per la mobilità

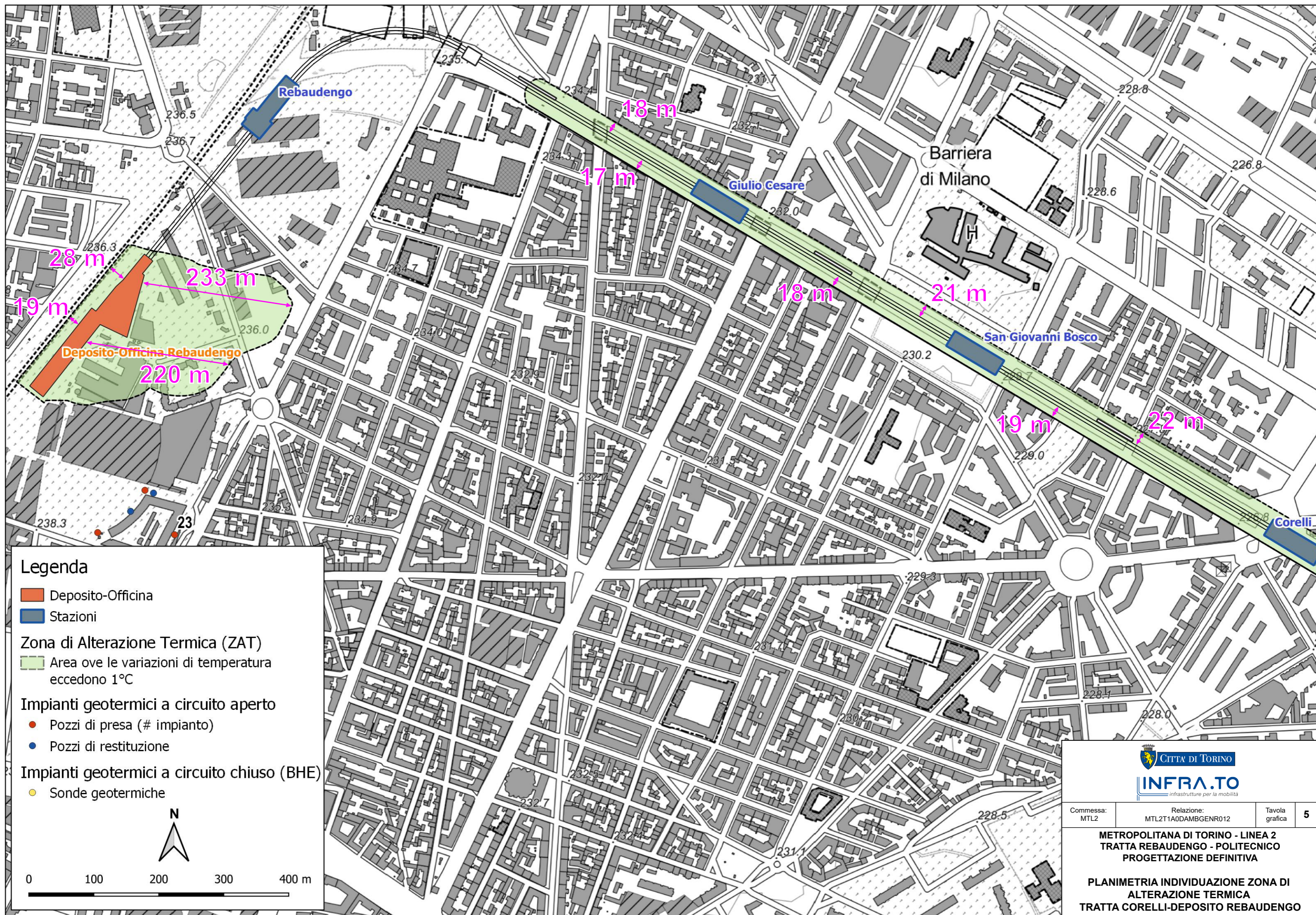
Commissa:
MTL2

Relazione:
MTL2T1A0DAMBGENR012

Tavola grafica
4

METROPOLITANA DI TORINO - LINEA 2
TRATTA REBAUDENGO - POLITECNICO
PROGETTAZIONE DEFINITIVA

PLANIMETRIA INDIVIDUAZIONE ZONA DI
ALTERAZIONE TERMICA
TRATTA NOVARA-CORELLI



Legenda

- Deposito-Officina
- Stazioni
- Zona di Alterazione Termica (ZAT)**
- Area ove le variazioni di temperatura eccedono 1°C
- Impianti geotermici a circuito aperto**
- Pozzi di presa (# impianto)
- Pozzi di restituzione
- Impianti geotermici a circuito chiuso (BHE)**
- Sonde geotermiche



| | | |
|---|-----------------------------------|----------------------------|
| | | |
| INFRA.TO <small>infrastrutture per la mobilità</small> | | |
| Commissa: MTL2 | Relazione: MTL2T1A0DAMBGENR012 | Tavola grafica 5 |
| METROPOLITANA DI TORINO - LINEA 2 TRATTA REBAUDENGO - POLITECNICO PROGETTAZIONE DEFINITIVA | | |
| PLANIMETRIA INDIVIDUAZIONE ZONA DI ALTERAZIONE TERMICA TRATTA CORELLI-DEPOSITO REBAUDENGO | | |