

Il potenziale geotermico a bassa entalpia nella Regione Piemonte

Relazione finale

COMMITTENTE:



REGIONE PIEMONTE
Direzione Ambiente, Energia e Territorio
Settore Sviluppo Energetico Sostenibile
Corso Regina Margherita 174
10152 - Torino

REDAZIONE:



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e
delle Infrastrutture (DIATI)
Gruppo di ricerca "Ingegneria degli Acquiferi"
Corso Duca degli Abruzzi 24
10129 - Torino
Tel. 011 0907735

Ogg.	Attività di studio del potenziale geotermico del sottosuolo regionale. Mappatura e valutazioni tecnico-economiche per lo sfruttamento della risorsa.		
Red.	Dr. Ing. Alessandro Casasso Ing. Bruno Piga Ing. Edoardo Ruffino	Responsabile scientifico	Prof. Ing. Rajandrea Sethi
File	RelGeotermia_POLITO_rev02.pdf	Rev. 02	Data 14/10/2021

Sommar

Premessa.....	V
Acronimi.....	VII
1 Introduzione	1
1.1 Impianti geotermici a pompa di calore	1
1.1.1 Pompa di calore	1
1.1.2 Tipologie impiantistiche.....	3
1.1.3 Sistema di emissione e distribuzione.....	3
1.2 Vantaggi delle pompe di calore.....	6
1.2.1 Vantaggi tecno-economici	6
1.2.2 Vantaggi ambientali	7
1.3 Potenziale geotermico a bassa entalpia	9
2 Valutazione del potenziale geotermico <i>closed-loop</i>	11
2.1 Il metodo G.POT	11
2.2 Input: proprietà termiche del terreno	16
2.2.1 Dati e studi disponibili	17
2.2.2 Metodologia.....	23
2.2.3 Risultati	24
2.3 Input: temperatura del terreno	27
2.3.1 Dati e studi disponibili	28
2.3.2 Metodologia.....	30
2.3.3 Risultati	31
2.4 Input: durata della stagione di riscaldamento	33
2.4.1 Dati e studi disponibili	33
2.4.2 Metodologia.....	34
2.4.3 Risultati	35
2.5 Potenziale geotermico: risultati e discussione.....	37
2.5.1 Mappa a scala regionale	37
2.5.2 Mappe di dettaglio in scala 1:500mila.....	41
2.5.3 Potenziale geotermico e popolazione	47
2.5.4 Significato tecno-economico del potenziale geotermico: un esempio	54
3 Analisi tecno-economica e ambientale	55
3.1 Casi studio	56
3.2 Analisi energetica	60

3.3	Definizione e quantificazione dei costi	63
3.3.1	Costi di installazione	63
3.3.2	Costi operativi	65
3.4	Incentivi	67
3.5	Parametri economici	67
3.5.1	Costo livellato dell'energia termica, LCOH	67
3.5.2	Tasso di sconto	68
3.5.3	Costo annuale	69
3.6	Sintesi dei risultati	69
3.6.1	Confronto dei valori di LCOH	69
3.6.2	Incidenza dei costi di installazione	72
3.6.3	Incidenza del potenziale geotermico sul LCOH	73
3.7	Valutazione delle emissioni di gas ad effetto serra e inquinanti	74
3.8	Integrazione con il servizio di raffrescamento	79
3.8.1	Impatto sul costo di investimento iniziale	79
3.8.2	Impatto sul valore del LCOH	84
3.8.3	Impatto sulle emissioni di gas serra e di inquinanti	86
4	Scenari di crescita	91
4.1	Analisi dei dati a disposizione	91
4.1.1	Pompe di calore geotermiche in Piemonte	91
4.1.2	Pompe di calore geotermiche in Italia e in altre Regioni	94
4.1.3	Pompe di calore in geotermiche in altri Paesi	97
4.2	Scenari ipotizzati	102
4.3	Analisi degli scenari	103
5	Conclusioni	107
A	Ipotesi generali e impianti solo riscaldamento	109
A.1	Proprietà termofisiche degli edifici simulati	109
A.2	Fabbisogno di riscaldamento	111
A.2.1	Edificio monofamiliare	111
A.2.2	Edificio multifamiliare	118
A.3	Energia in ingresso al sistema di generazione	124
A.4	Energia prodotta <i>extra situ</i> e acquistata	125
A.5	Costi di installazione	127
A.6	Costi unitari delle fonti energetiche	131
A.6.1	Gas naturale	131
A.6.2	Gas di petrolio liquefatto (GPL)	133

A.6.3	Gasolio	134
A.6.4	Biomassa	135
A.6.5	Energia elettrica	136
A.7	Spesa annuale per le fonti energetiche	141
A.8	Terminali di riscaldamento.....	143
A.9	Sistemi ibridi.....	145
A.10	Impianti fotovoltaici e autoconsumo	147
A.11	LCOH e spesa annuale: valori a confronto	149
A.11.1	Edificio monofamiliare	149
A.11.2	Edificio multifamiliare	152
A.11.3	Minimi, massimi e variazioni relative del LCOH.....	155
A.11.4	Spesa annuale complessiva	158
A.12	Emissioni di GHG e di inquinanti dell'aria	160
A.12.1	Edificio monofamiliare	160
A.12.2	Edificio multifamiliare	163
B	Impianti con riscaldamento e raffrescamento	166
B.1	Fabbisogno di raffrescamento	166
B.1.1	Edificio monofamiliare	166
B.1.2	Edificio multifamiliare	167
B.2	Energia in ingresso al sistema di generazione	168
B.3	Energia prodotta <i>extra situ</i> e acquistata.....	170
B.4	Costi di installazione.....	172
B.5	Spesa annuale per le fonti energetiche	174
B.6	LCOH e spesa annuale: valori a confronto	175
B.6.1	Edificio monofamiliare	175
B.6.2	Edificio multifamiliare	176
B.6.3	Minimi, massimi e variazioni relative del LCOH.....	178
B.6.4	Spesa annuale complessiva	180
B.7	Emissioni di GHG e di inquinanti dell'aria	181
B.7.1	Edificio monofamiliare	181
B.7.2	Edificio multifamiliare	182
C	Proprietà termiche delle formazioni litologiche del Piemonte	184
	Bibliografia	197

Premessa

La proposta di Piano Energetico Ambientale Regionale (PEAR), sviluppata nella legislatura 2014-2019 e assunta, con DGR n. 18-478 dell'8 novembre 2019, dalla nuova Amministrazione regionale, si pone l'obiettivo di orientare le politiche regionali verso quelle del pacchetto Clima Energia e di sostenere la filiera industriale e di ricerca del campo energetico.

Una parte rilevante del Piano riguarda la conoscenza delle potenzialità del territorio regionale in merito all'utilizzo delle fonti energetiche rinnovabili. Tale base conoscitiva è essenziale ai fini di comprendere come e in quale misura ciascuna fonte potrà contribuire al raggiungimento degli obiettivi fissati dal Piano Nazionale Integrato Energia e Clima (PNIEC) per la produzione da fonti energetiche rinnovabili nel 2030. In particolare, il PNIEC prevede il raggiungimento di una produzione termica annua di 400 ktep da parte delle pompe di calore, con un incremento del 135% rispetto alla produzione del 2015.

Il Settore Sviluppo Energetico Sostenibile (Direzione Ambiente, Energia e Territorio) diretto dalla Dott.ssa Silvia Riva, con nota prot. 13.170.10, 2/2020C/A1600A, ha richiesto al Politecnico di Torino lo sviluppo di uno strumento previsionale quantitativo che permetta di stimare quanta parte di tale obiettivo potrà essere soddisfatta sfruttando la fonte geotermica, per la climatizzazione degli edifici, sia invernale che estiva. Tale strumento si compone di tre parti principali:

1. Valutazione e mappatura del potenziale geotermico *closed-loop* disponibile sul territorio regionale.
2. Esecuzione di valutazioni economiche sulla convenienza (bilancio costi-benefici, diretti e indiretti) ad installare ed esercire sistemi geotermici *versus* l'installazione di impianti di climatizzazione più tradizionali alimentati a gasolio, GPL, pellet, legna da ardere e gas naturale.
3. Elaborazione di scenari di sviluppo della geotermia.

La presente relazione, che si compone di cinque capitoli, descrive il lavoro svolto e i risultati ottenuti.

Nel Capitolo 1 vengono introdotti gli impianti geotermici a pompa di calore, descrivendone le componenti principali, gli aspetti tecnici più importanti nell'ottica del loro utilizzo in edifici esistenti, i vantaggi tecno-economici ed ambientali e il concetto di potenziale geotermico a bassa entalpia.

Nel Capitolo 2 si descrive il metodo matematico "G.POT" (*Geothermal POTential*) utilizzato per la stima del potenziale geotermico *closed-loop*, i metodi utilizzati per stimare i parametri di input (proprietà termiche del terreno, temperatura del terreno, durata della stagione di riscaldamento) e i risultati ottenuti in termini di distribuzione spaziale del potenziale geotermico. Tali risultati, inoltre, sono disponibili in formato GIS.

Nel Capitolo 3 viene descritta l'analisi tecno-economica e ambientale, che è stata condotta tramite simulazioni energetiche di due edifici-tipo residenziali, date diverse condizioni climatiche e diversi livelli di isolamento termico. I risultati di tali simulazioni sono stati utilizzati per

dimensionare le componenti dell'impianto termico e stimare i costi d'installazione e operativi delle diverse ipotesi impiantistiche (pompa di calore geotermica o aerotermica, caldaia a gas, GPL, gasolio, pellet e legna). In questo modo è stato possibile ricavare il costo livellato dell'energia termica (*Levelized Cost of Heating*, LCOH) considerando l'intero ciclo di vita dell'impianto. Questa valutazione è stata successivamente estesa anche al raffrescamento tenendo conto che tali impianti, pur attualmente diffusi solo in una parte minoritaria degli edifici (13.3% nel 2013, secondo l'ISTAT) è in crescita a causa del cambiamento climatico e delle mutate esigenze di comfort.

Nel Capitolo 4 vengono descritti gli scenari di crescita del numero di impianti geotermici closed-loop installati a partire dai dati a disposizione e relativi al Piemonte, all'Italia e anche ad altri Paesi (questi ultimi, ai fini di individuare gli andamenti tipici delle tendenze di crescita in mercati più maturi del nostro).

Nel Capitolo 5 sono riportate le conclusioni dello studio.

Il presente studio è stato svolto dal gruppo di ricerca di Ingegneria degli Acquiferi, coordinato dal Prof. Rajandrea Sethi, avvalendosi della collaborazione dei seguenti ricercatori:

- Dr. Ing. Alessandro Casasso: elaborazioni dati e redazione del Capitolo 2 relativo alla stima e alla mappatura del potenziale geotermico closed-loop, supervisione dell'attività di analisi tecno-economica e ambientale delle tecnologie di riscaldamento (Capitolo 3) e dell'elaborazione degli scenari di crescita della geotermia in Piemonte (Capitolo 4), supervisione alla redazione della relazione finale;
- Ing. Edoardo Ruffino: elaborazioni e redazione del Capitolo 3 relativo all'analisi tecno-economica e ambientale delle tecnologie di riscaldamento;
- Ing. Bruno Piga: elaborazione degli scenari di crescita della geotermia in Piemonte e redazione del relativo Capitolo 4, supporto alle attività di mappatura del potenziale geotermico e di analisi tecno-economica.

Per il Settore Sviluppo Energetico Sostenibile della Regione Piemonte, diretto dalla Dott.ssa Silvia Riva, hanno collaborato con proposte ed osservazioni l'Ing. Silvia Bonapersona, l'Arch. Giovanni Nuvoli e il Dott. Filippo Baretta. Si ringrazia, inoltre, il Dott. Mauro Falco (Regione Piemonte - Settore Tutela delle Acque) e il Dott. Michele Morelli (ARPA Piemonte) per i dati forniti e il Prof. Bartolomeo Vigna (Politecnico di Torino – DIATI) per i suoi suggerimenti.

Acronimi

AC	<i>Alternating Current</i> (“Corrente alternata”)
ACS	Acqua Calda Sanitaria
ANIT	Associazione Nazionale Isolamento Termico e Acustico
ARPA	Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale
BAU	<i>Business As Usual</i> (“Situazione corrente”)
BTP	Buono del Tesoro Poliennale
CIT	Catasto Impianti Termici
COP	<i>Coefficient Of Performance</i> (“Coefficiente di prestazione”)
CTI	Comitato Termotecnico Italiano
D.I.	Decreto interministeriale
D.L.	Decreto-legge
D.Lgs.	Decreto legislativo
D.M.	Decreto ministeriale
D.P.R.	Decreto del Presidente della Repubblica
ΔT	Differenza di temperatura
EER	<i>Energy Efficiency Ratio</i> (“Rapporto di efficienza energetica”)
EMRP	<i>Equity Market Risk Premium</i>
EN	Standard normativo europeo
ENEA	Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile
GG	Gradi Giorno
GHG	<i>Greenhouse Gases</i> (“Gas ad effetto serra”)
GME	Gestore del Mercato Elettrico
GPL	Gas di Petrolio Liquefatti
GSE	Gestore dei Servizi Energetici
GWP	<i>Global Warming Potential</i> (“Potenziale di riscaldamento globale”)
INAIL	Istituto Nazionale per l’Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro
IRES	Imposta sul Reddito delle Società
IRPEF	Imposta sul Reddito delle Persone Fisiche

IRS	<i>Interest Rate Swap</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (“Organizzazione internazionale per la normazione”)
I.V.A.	Imposta sul Valore Aggiunto
L.	Legge
LCOE	<i>Levelized Cost of Energy</i> (“Costo livellato dell’energia”)
LCOH	<i>Levelized Cost of Heat</i> (“Costo livellato del calore”)
MGP	Mercato del Giorno Prima
NPV	<i>Net Present Value</i> (“valore attuale netto”)
PdC	Pompa di Calore
PEAR	Piano Energetico Ambientale Regionale
PRQA	Piano Regionale per la Qualità dell’Aria
PUN	Prezzo Unico Nazionale
RSG	Registro regionale delle Sonde Geotermiche
UGT	<i>Undisturbed Ground Temperature</i> (“Temperatura indisturbata del terreno”)
UNI	Ente nazionale italiano di unificazione
WACC	<i>Weighted Average Cost of Capital</i> (“Costo medio ponderato del capitale”)

1 Introduzione

In questo capitolo vengono introdotti alcuni concetti di base utili alla comprensione del lavoro svolto. Nel Paragrafo 1.1 si descrivono le componenti e i principali parametri operativi degli impianti geotermici a pompa di calore. Nel Paragrafo 1.2, invece, si presentano i vantaggi economici e ambientali delle pompe di calore, con particolare riferimento a quelle geotermiche. Infine, nel Paragrafo 1.3 viene introdotto il concetto di potenziale geotermico a bassa entalpia.

1.1 Impianti geotermici a pompa di calore

1.1.1 Pompa di calore

La pompa di calore è una macchina operatrice che trasferisce energia termica, prelevata da una “sorgente termica” a bassa temperatura, ad un “pozzo termico” a più alta temperatura. Il secondo principio della termodinamica afferma che tale scambio di calore richiede necessariamente un apporto energetico, che può essere fornito tramite il lavoro meccanico di un compressore (ciclo a compressione di vapore) o tramite scambio termico (ciclo ad assorbimento). Le pompe di calore a compressione di vapore rappresentano la netta maggioranza degli impianti installati e presenti in commercio: pertanto, si è scelto di fare riferimento esclusivamente a questa tipologia all’interno del presente studio.

Una pompa di calore può funzionare in modalità “riscaldamento” o “raffrescamento” a seconda dell’effetto utile ricercato: nel primo caso la cessione di calore al “pozzo caldo”, rappresentato dai terminali di riscaldamento dell’edificio o dal serbatoio di acqua calda sanitaria; nel secondo il calore sottratto dalla “sorgente fredda”, rappresentata dai terminali di raffrescamento. L’efficienza energetica della pompa di calore è data dal rapporto tra l’effetto utile e l’energia assorbita per compiere il processo (ovvero l’energia elettrica consumata). Nel caso in cui l’effetto ricercato sia il riscaldamento, tale parametro è definito coefficiente di prestazione (COP, dall’inglese *Coefficient of performance*):

$$COP = \frac{Q_{HP,riscaldamento}}{E_{HP}} \quad (1.1)$$

dove $Q_{HP,riscaldamento}$ rappresenta la quantità di calore ceduta al pozzo caldo e E_{HP} la quantità di energia elettrica richiesta dal compressore. Considerando la temperatura del pozzo caldo (T_{calda}) e quella della sorgente fredda (T_{fredda}) è possibile evidenziare che il COP è sempre minore o uguale all’inverso del rendimento di un ciclo di Carnot:

$$COP \leq \frac{T_{calda}}{T_{calda} - T_{fredda}} \quad (1.2)$$

Nel caso di raffrescamento, l’indice di prestazione assume la denominazione *Energy Efficiency Ratio* (EER, in italiano “Rapporto di efficienza energetica”) ed è definito come:

$$EER = \frac{Q_{HP,raffrescamento}}{E_{HP}} \quad (1.3)$$

dove $Q_{HP,raffrescamento}$ rappresenta la quantità di calore assorbito dalla sorgente fredda. In questo caso:

$$EER \leq \frac{T_{fredda}}{T_{calda} - T_{fredda}} \quad (1.4)$$

Una pompa di calore, schematizzata in forma semplificata nel blocco centrale della Figura 1.1, è costituita da quattro componenti:

- Evaporatore;
- Compressore;
- Condensatore;
- Valvola di laminazione o di espansione.

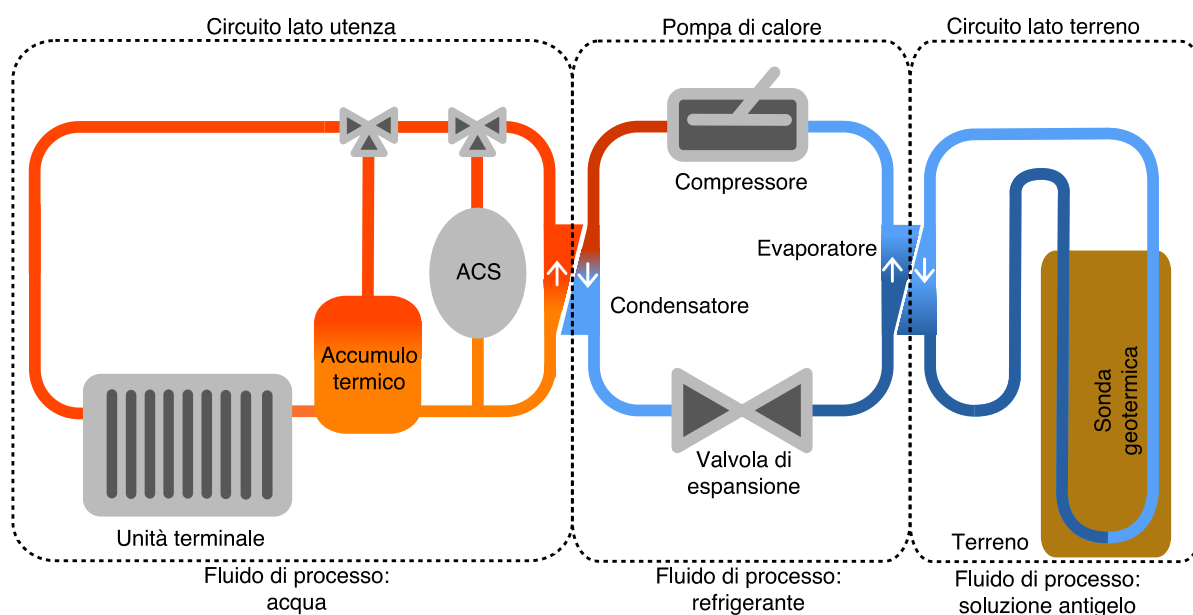


Figura 1.1 – Funzionamento di un sistema di riscaldamento a pompa di calore a circuito chiuso.

Passando attraverso l'evaporatore, il refrigerante assorbe calore dalla sorgente a bassa temperatura aumentando così il proprio volume specifico attraverso una trasformazione isoterma. Il compressore incrementa la temperatura e la pressione del vapore uscito dall'evaporatore, prima che esso giunga nel condensatore, dove il vapore compresso cede il calore latente di evaporazione, trasformandosi in liquido caldo. A questo punto il fluido viene espanso dalla valvola di laminazione, così da diminuire sia la pressione sia la temperatura con l'obiettivo di poter ottenere nuovamente l'evaporazione e continuare il ciclo.

Lo schema in Figura 1.1 inquadra la pompa di calore all'interno del sistema di riscaldamento, composto anche dalla sorgente esterna (il blocco di destra) e dall'impianto di distribuzione ed

emissione (il blocco di sinistra). In modalità di raffreddamento, condensatore ed evaporatore si invertono e scambiano calore, rispettivamente, con la sorgente esterna e con l'impianto di distribuzione ed emissione.

1.1.2 Tipologie impiantistiche

Come accennato, un elemento fondamentale dell'impianto è la sorgente esterna da cui la pompa assorbe calore (in regime di riscaldamento) o lo cede (raffreddamento). Essa è anche uno degli aspetti che più differenziano le pompe di calore. Le più comuni sono quelle che utilizzano l'aria come sorgente esterna, per questo chiamate "aerotermiche", e quelle che utilizzano il terreno, pertanto dette "geotermiche". Queste ultime, infine, si possono differenziare in due grandi categorie: a circuito chiuso (*closed loop*) e a circuito aperto (*open loop*). I sistemi *closed loop*, come quello rappresentato in Figura 1.1, operano lo scambio termico con il terreno attraverso la circolazione di un fluido termovettore all'interno di un circuito idraulico chiuso (da cui la definizione "closed loop"). Il fluido termovettore è solitamente una soluzione di acqua e altri componenti antigelo, quali, ad esempio, il glicole etilenico o quello propilenico.

I sistemi *open loop* operano lo scambio termico direttamente sull'acqua estratta dalla falda idrica, che viene generalmente reiniettata nello stesso acquifero dopo lo scambio termico con l'evaporatore (in modalità riscaldamento) o il condensatore (raffreddamento). Il circuito è quindi aperto, da cui la definizione "open loop". In alcuni casi anche gli impianti che scambiano calore con acque superficiali (fiume, lago, mare) sono detti "a circuito aperto", tuttavia non sono definibili come "geotermici".

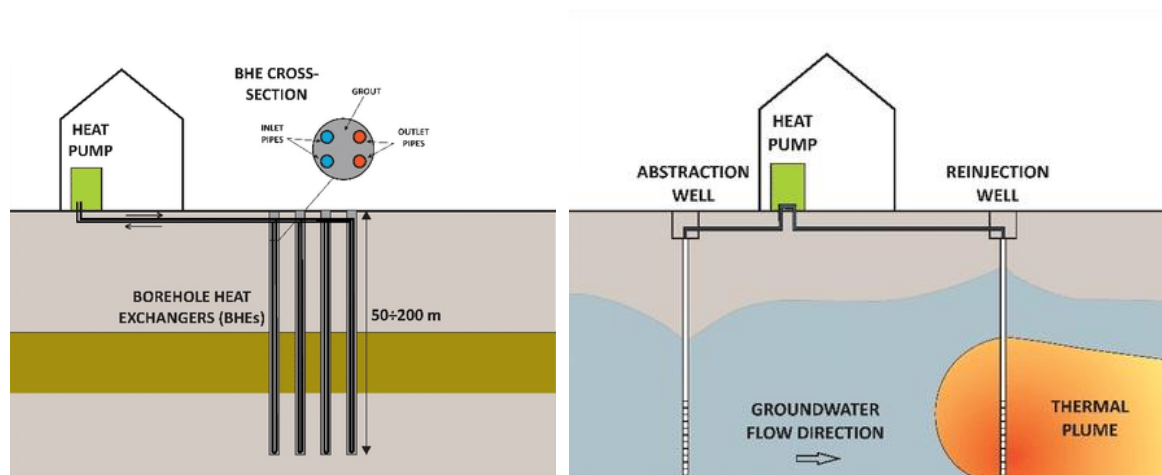


Figura 1.2 – Sistema geotermico *closed loop* (a sinistra) ed *open loop* (a destra) [1].

1.1.3 Sistema di emissione e distribuzione

Per effettuare il riscaldamento o il raffreddamento di un edificio, la pompa di calore generalmente scambia calore con un sistema di distribuzione e di emissione. Il sistema di distribuzione è basato sulla circolazione di un fluido di processo (acqua in un impianto idronico o aria in uno aerulico) per trasferire calore dallo scambiatore lato pompa di calore (condensatore

o evaporatore, a seconda che si lavori in riscaldamento o in raffrescamento) a quello lato ambiente da riscaldare o raffreddare, ossia il sistema di emissione.

Una pompa di calore generalmente non riesce a riscaldare il fluido di processo lato utenza oltre a 50-55 °C¹. Nel caso di impianto idronici, pertanto, è necessario valutare attentamente quale sia l'unità terminale di emissione con cui si trova a lavorare. Le tre tipologie principali di terminali idronici sono il pannello radiante, il ventilconvettore e il radiatore.

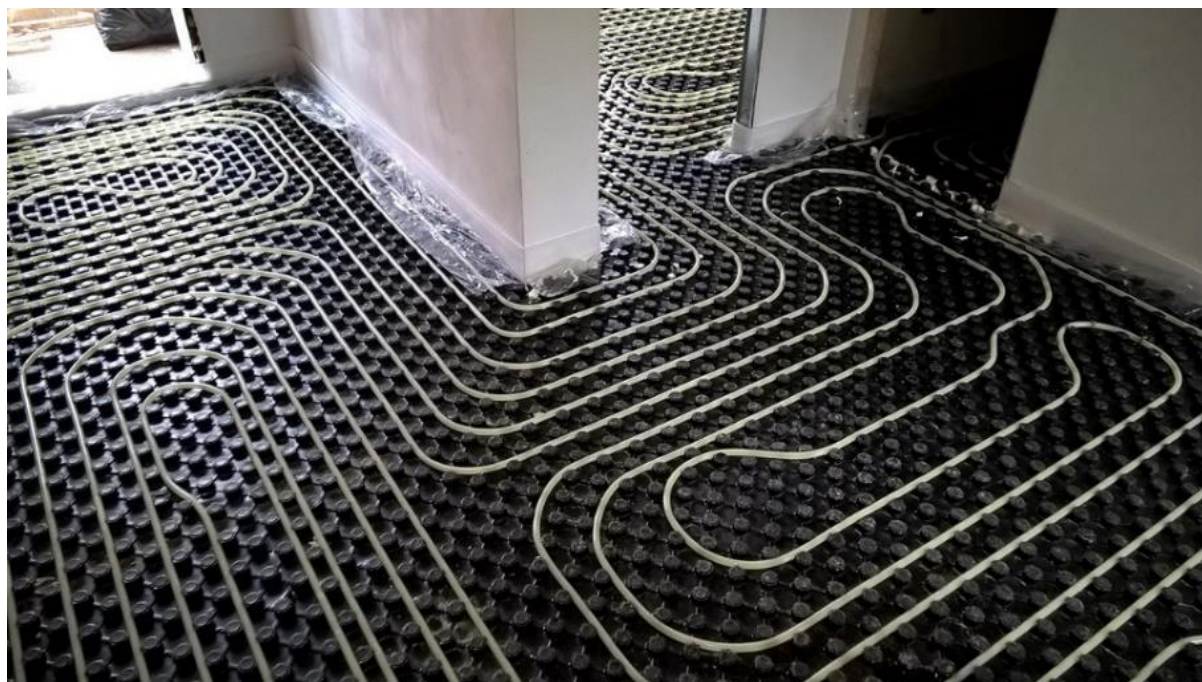


Figura 1.3 – Posa in opera di pannelli radianti [2].

Il pannello radiante è basato sulla circolazione dell'acqua in un sistema di tubazioni che si sviluppa all'interno dell'involucro opaco verticale o orizzontale delimitante l'ambiente da riscaldare (o da raffreddare). Può essere a pavimento, a soffitto o a parete, ma in tutti e tre i casi il calore trasportato dal fluido di processo viene diffuso in ambiente principalmente tramite il fenomeno dell'irraggiamento. Ciò permette, insieme al fatto che le tubazioni sono distribuite sull'intera superficie (sia essa la parete, il soffitto o il pavimento), di ottenere una distribuzione di temperature omogenea all'interno della stanza da climatizzare e di lavorare a basse temperature e con moti convettivi trascurabili. Di conseguenza, il pannello radiante è il sistema che, se ben dimensionato, fornisce il miglior comfort termico possibile per gli occupanti. Inoltre, come i ventilconvettori, i pannelli radianti permettono di effettuare anche il raffrescamento, specialmente con la tipologia a soffitto che presenta una minor inerzia termica di quelli a pavimento o a parete. In ogni caso, l'inerzia termica di questa tecnologia, soprattutto per la versione a pavimento nella quale le tubazioni sono circondate dal massetto,

¹ Sono stati sviluppati anche modelli ad alta temperatura (fino a 80°C), ma utilizzano due stadi, cioè due pompe di calore in serie, con un rendimento molto più basso oppure non rappresentano un prodotto adatto per gran parte delle installazioni a causa del prezzo eccessivamente elevato.

è molto più elevata rispetto ai ventilconvettori o ai radiatori. Questa caratteristica può rappresentare un vantaggio, se sfruttata per utilizzare il massetto stesso come accumulo termico, oppure uno svantaggio, se si desidera un rapido transitorio di riscaldamento o raffreddamento. Un altro sicuro svantaggio, invece, è la necessità di interventi molto invasivi nel caso di installazione in un edificio esistente, dovendo procedere alla rimozione delle piastrelle (o del parquet) e del massetto: va però tenuto in considerazione il vantaggio, in questo caso, di poter recuperare l'utilizzo libero di una percentuale rilevante della superficie dell'abitazione grazie alla rimozione dei terminali a parete (siano essi radiatori o ventilconvettori).

Il ventilconvettore, invece, scambia calore con l'ambiente attraverso la convezione forzata operata da una ventola che soffia su una "batteria" nella quale scorre l'acqua del sistema di distribuzione. Questo meccanismo crea moti convettivi all'interno dell'ambiente climatizzato, causando un'evidente asimmetria termica e costringendo a impostare una temperatura dell'aria più alta di quella dell'ambiente da riscaldare, aspetti che possono contribuire a diminuire il comfort termico percepito dagli occupanti. Allo stesso tempo, però, i ventilconvettori garantiscono un'inerzia termica molto bassa e, quindi, rapidi transitori di accensione e spegnimento. Possono, inoltre, lavorare efficacemente anche al fine di raffreddare e possono essere installati con successo in interventi di ristrutturazione energetica in edifici che adottano i radiatori.



Figura 1.4 – Esempio di ventilconvettore [3].



Figura 1.5 – Esempio di radiatore [4].

Anche i radiatori, a dispetto di ciò che possa suggerire il nome, funzionano principalmente con il meccanismo della convezione che però, a differenza dei ventilconvettori, non è forzata ma naturalmente indotta dai gradienti di temperatura che si formano nell'ambiente riscaldato. Essendo solitamente disposti sulle pareti perimetrali, riescono comunque a stabilire una buona simmetria termica. Sono la tipologia di terminale più diffusa nel parco edilizio italiano e sono stati progettati e installati per lavorare con caldaie ad alta temperatura. Ne consegue che il loro accoppiamento con una pompa di calore in seguito a riqualificazione energetica non è sempre fattibile, ma dev'essere valutato attentamente in relazione ai carichi termici dell'edificio, come si vedrà in seguito. In questo studio, e in particolare nel Capitolo 3, è stata considerata l'installazione di pompe di calore in presenza di radiatori proprio perché si tratta della tipologia nettamente preponderante nel patrimonio edilizio regionale e nazionale. Nel caso, invece, si ipotizzasse di introdurre anche la funzione di raffrescamento, è stata considerata l'ipotesi di sostituire i radiatori con ventilconvettori.

1.2 Vantaggi delle pompe di calore

Le pompe di calore presentano vantaggi economici e ambientali, che di seguito vengono brevemente descritti. Si rimanda al Capitolo 3 e alle Appendici per un'analisi più dettagliata di questi aspetti.

1.2.1 Vantaggi tecno-economici

Gli impianti termici in pompa di calore presentano costi di installazione più elevati rispetto alle tipologie convenzionali, in particolare rispetto alle caldaie a combustibili fossili (metano, GPL, gasolio). I costi operativi sono però molto inferiori e quindi, sotto opportune condizioni, è possibile recuperare il maggiore investimento iniziale nell'arco di alcuni anni.

Analizzando le varie tipologie di pompa di calore, il vantaggio della tipologia geotermica risiede nel fatto che tali impianti hanno un rendimento più elevato rispetto alle pompe di calore ad aria, in quanto la sorgente termica (il terreno) è caratterizzato da una temperatura più alta rispetto all'aria durante l'inverno e più bassa durante l'estate. Il valore del COP delle pompe di calore che sfruttano una sorgente geotermica è pertanto generalmente più alto (pari a circa 4-5 kWh_t/kWh_e) rispetto a quello degli impianti che scambiano calore con l'aria (circa 3-4 kWh_t/kWh_e) [5] e ciò porta a dei costi operativi più bassi. Un ulteriore vantaggio della tipologia geotermica rispetto a quella aerotermica è, soprattutto nei climi più freddi e umidi, l'assenza di problemi relativi alla formazione di brina. In presenza di temperature attorno agli 0 °C (in particolare, sotto i 5 °C) e di elevata umidità relativa, infatti, il vapore acqueo presente nell'aria in prossimità dell'evaporatore condensa e può congelare attorno ai tubi della batteria dello scambiatore. Questo problema, detto "brinamento", riduce rapidamente la sua capacità di scambio termico e può essere risolto solo invertendo il ciclo della pompa di calore: si estrae calore dall'edificio per poter sciogliere il ghiaccio formatosi sull'evaporatore, ma ciò incrementa in modo significativo i consumi elettrici e diminuisce il comfort degli occupanti. Di conseguenza, l'assenza di problemi di brinamento è un significativo fattore a favore delle pompe di calore geotermiche.

Il costo di investimento per una pompa di calore geotermica è legato non solo alla pompa di calore, ma anche all'installazione delle sonde geotermiche. Un impianto geotermico a sonde verticali per una villetta monofamiliare costa circa 20000-25000 euro, circa il doppio rispetto ad una pompa di calore ad aria [6]. Pertanto la convenienza economica delle pompe di calore geotermiche rispetto alle altre tecnologie dipende in ultima analisi da molteplici fattori tra cui la tipologia d'impianto (circuito aperto o circuito chiuso), la tipologia di terreno (più o meno conduttivo), l'entità del fabbisogno termico dell'edificio (maggiore è il fabbisogno, maggiore è il margine di risparmio sui costi operativi), il costo dell'energia elettrica e dei combustibili (gas naturale, gasolio, legna) con i quali la pompa di calore si confronta [7].

1.2.2 Vantaggi ambientali

L'utilizzo di una pompa di calore geotermica in sostituzione di un impianto con caldaia a gas naturale o gasolio può portare a significative riduzioni delle emissioni di CO₂ in atmosfera. A seconda del mix energetico utilizzato per la produzione di energia elettrica, infatti, le pompe di calore geotermiche possono ridurre le emissioni di gas serra nell'atmosfera fino a oltre il 70% rispetto ai sistemi di riscaldamento convenzionali [7]–[9]. Un altro vantaggio delle pompe di calore geotermiche consiste nella totale assenza di emissioni inquinanti *in loco*, dovuta al fatto che non è necessaria alcuna combustione di sostanze fossili in situ.

Grazie alle alte efficienze l'utilizzo di pompe di calore geotermiche riduce inoltre il consumo di energia primaria rispetto ai sistemi di riscaldamento convenzionali. Come riportato in Figura 1.6, considerando un COP medio pari a 3.5 e 4.5 rispettivamente per le pompe di calore ad aria e geotermiche, le emissioni di CO₂ equivalente per la produzione di 1 kWh termico si riducono del 71 e 77% rispetto alle emissioni di una caldaia a gas a condensazione, mentre il consumo di energia primaria si riduce del 30 e 45%.

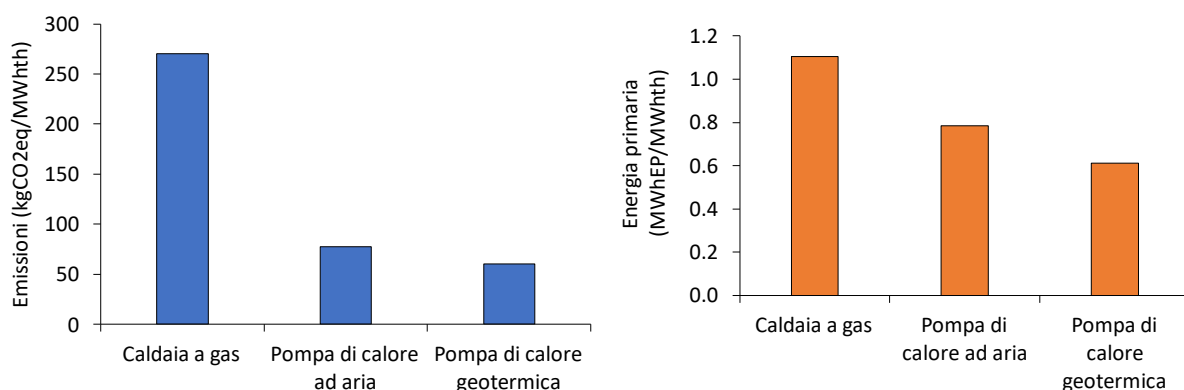


Figura 1.6 – Confronto tra le emissioni di CO₂ equivalente e del consumo di energia primaria per una caldaia a gas, una pompa di calore aerotermica e una geotermica (rendimento caldaia a condensazione: 0.95, fattore di emissione per l'energia elettrica in Italia nel 2019: 277 gCO₂eq/kWh_e) [10], [11].

L'utilizzo delle pompe di calore elettriche abbatte completamente le emissioni inquinanti *in situ* quali gli ossidi di zolfo (SO_x) e azoto (NO_x), il monossido di carbonio e il particolato che si generano con la combustione di gas naturale, gasolio e legna. Nonostante non producano emissioni inquinanti *in situ*, nel caso delle pompe di calore elettriche è però necessario considerare le emissioni inquinanti legate alla produzione di energia elettrica, che ovviamente dipendono dal *mix* energetico adottato. Secondo una recente pubblicazione, è possibile ottenere una riduzione delle emissioni di NO_x del 75% con l'utilizzo di una pompa di calore geotermica in luogo di una caldaia a gas [12].

Le pompe di calore rappresentano, inoltre, una valida alternativa alle caldaie a biomassa in un contesto urbano. Infatti, la combustione di biomasse come cippato e pellet genera emissioni elevate di inquinanti atmosferici (NO_x e SO₂) e particolato che in città si accumulano rapidamente a causa dell'elevata densità degli impianti e contribuiscono in maniera considerevole all'inquinamento dell'aria rappresentando una potenziale minaccia per la salute [13], [14]. Oltre a ciò, l'utilizzo di caldaie a biomassa su larga scala in ambiente urbano risulta problematico a causa delle grandi quantità di combustibile che è necessario stoccare.

In contesto urbano le pompe di calore geotermiche portano dei vantaggi ulteriori rispetto alle pompe di calore ad aria, legati alla possibilità di installare le macchine in locali interni isolati acusticamente. Ovviamente questo non è possibile per le pompe di calore che utilizzano l'aria come sorgente esterna di calore, in quanto devono essere necessariamente installate all'esterno, contribuendo all'inquinamento acustico. Questa problematica è particolarmente rilevante al crescere della scala dell'impianto.

Per questi motivi le pompe di calore geotermiche rappresentano un'efficace alternativa sostenibile per l'implementazione di impianti di riscaldamento e raffrescamento su larga scala. È necessario notare, tuttavia, che l'impiego delle pompe di calore contribuisce all'effetto serra non soltanto mediante le emissioni legate al consumo di energia elettrica, ma anche a causa delle perdite di fluido refrigerante, che rappresentano fino al 10% delle emissioni totali nel caso in cui il fluido utilizzato sia R-134a [15]. L'Unione Europea ha affrontato il problema con l'introduzione della direttiva europea *F-Gas*, che mira a sostituire la maggioranza dei fluidi

frigoriferi ad elevato GWP (*Global Warming Potential*) con fluidi alternativi a basso impatto. Inoltre, l'impatto sul riscaldamento globale legato al consumo di energia elettrica è destinato a diminuire ulteriormente con l'aumento della penetrazione delle energie rinnovabili nel mix energetico di produzione elettrica.

1.3 Potenziale geotermico a bassa entalpia

Il potenziale geotermico di un'area rappresenta l'energia termica teoricamente estraibile dal sottosuolo in maniera continuativa e sostenibile.

Per quanto riguarda le risorse geotermiche a media (90-150 °C) e alta entalpia (>150 °C), che vengono sfruttate per la produzione di energia elettrica, l'obiettivo è quello di estrarre dal sottosuolo la maggior potenza termica possibile (e quindi produrre la maggior potenza elettrica possibile) senza causare una eccessiva riduzione della temperatura e della pressione del fluido geotermico (vapore o liquido). L'esplorazione delle risorse geotermiche di questo tipo avviene tramite complessi studi geologici, idrogeologici e geofisici per la localizzazione precisa dei serbatoi termici e la determinazione della loro estensione e del loro potenziale geotermico [16]. L'obiettivo è quindi quello di produrre la massima quantità di energia elettrica avendo come vincolo, al di là delle ovvie esigenze di tutela dell'ambiente, la capacità della rete di trasmettere l'energia prodotta.

Lo sfruttamento della risorsa a bassa entalpia (temperature del sottosuolo significativamente inferiori a 90 °C) segue, invece, un approccio differente, poiché l'energia termica viene scambiata con il sottosuolo per soddisfare esclusivamente le esigenze del sito. Pertanto, in questo caso vengono valutati altri parametri per la fattibilità tecno-economica degli impianti:

- il numero e la lunghezza delle sonde necessari a soddisfare il fabbisogno termico, che dipendono dalle proprietà termiche del terreno;
- la portata d'acqua massima estraibile da un pozzo, per gli impianti *open loop*, che dipende dalle proprietà idrauliche dell'acquifero;
- la prossimità di altri impianti nelle vicinanze, per evitare interferenze e/o impatti termici cumulativi sul sottosuolo nelle aree urbane.

I fattori sopra elencati contribuiscono a determinare la convenienza economica e la fattibilità tecnica degli impianti geotermici a bassa entalpia. Per la tipologia a circuito chiuso, sulla quale si è focalizzato questo studio, un impianto installato su un terreno di bassa conducibilità termica richiederà un numero di sonde superiore rispetto ad un impianto di pari potenza installato su un terreno più conduttivo. Tale differenza può influenzare in modo significativo la fattibilità economica (costo totale delle perforazioni) e tecnica (superficie necessaria per le sonde). La valutazione del potenziale geotermico a circuito chiuso del sottosuolo (detto anche "potenziale di geoscambio") in una vasta area è pertanto fondamentale per fornire utili indicazioni per la pianificazione di impianti geotermici da parte di privati, aziende e pubbliche amministrazioni e, quindi, per lo sviluppo del settore geotermico a bassa entalpia.

2 Valutazione del potenziale geotermico *closed-loop*

In questo capitolo viene presentata la stima del potenziale geotermico closed-loop presentando metodologia, dati di input e risultati. Nel Capitolo 2.1 viene dapprima descritto il metodo matematico G.POT (*Geothermal POTential*), sviluppato da Casasso e Sethi (2016, [17]), che permette di calcolare il potenziale geotermico a partire da una serie di dati di input fra i quali alcuni sono specifici del sito di installazione: le proprietà termiche (conducibilità e capacità termica) del terreno (descritte nel Capitolo 2.2), la temperatura indisturbata del terreno (Capitolo 2.3) e la durata della stagione di riscaldamento (Capitolo 2.4). Di questi parametri è stata assegnata la distribuzione dei valori (mappatura) su tutto il territorio, mentre per tutti gli altri dati di input sono stati utilizzati valori uniformi.

I risultati della mappatura sono presentati nel Capitolo 2.5 e sono disponibili in formato GIS.

2.1 Il metodo G.POT

Il potenziale geotermico a bassa entalpia a circuito chiuso è stato definito da Casasso e Sethi (2016, [17]) come “la quantità di calore che è possibile estrarre dal terreno (o immettere nel terreno) in una stagione di riscaldamento (o raffrescamento), con una sonda di determinata lunghezza, rispettando un criterio di temperatura minima (o massima) del fluido termovettore”. Questa definizione si basa, da un punto di vista concettuale, sulle più comuni metodologie di progettazione quali il metodo di Eskilson [18] implementato nel software EED [19] oppure il metodo ASHRAE [20] adottato anche dalla norma italiana UNI 11466:2012 [21]. Tali metodi permettono di calcolare la lunghezza di sonde necessaria per soddisfare un determinato carico termico rispettando criteri di temperatura minima/massima del fluido.

Come rappresentato in Figura 2.1, il metodo G.POT considera un carico termico semi-sinusoidale di sola estrazione (o sola immissione) di calore, con una durata del ciclo pari a t_c e un successivo periodo di “riposo” pari a $t_y - t_c$ (con t_y pari a 365 giorni). L’andamento scelto si basa su due assunzioni:

- Il carico termico di riscaldamento o di raffrescamento è proporzionale alla differenza fra la temperatura da mantenere all’interno dell’edificio (*set point*) e la temperatura esterna dell’aria (Figura 2.2);
- La temperatura dell’aria durante l’anno ha un andamento approssimabile con una sinusoidale (Figura 2.3).

Il carico termico per unità di lunghezza $q(t)$ [W/m], di periodicità annuale, viene ripetuto per un certo numero di cicli durante il tempo di esercizio (t_s) e determina nel terreno un’alterazione termica variabile nel tempo.

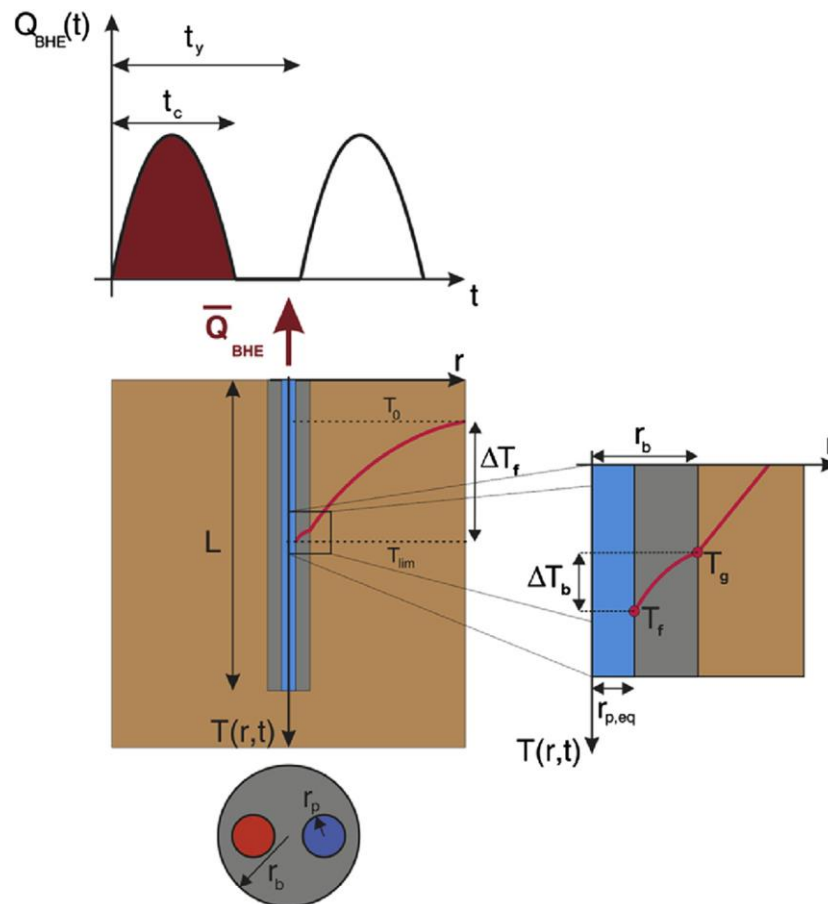


Figura 2.1 – Schema concettuale del metodo G.POT: carico termico descritto da una curva semi-sinusoidale (in alto) la cui area (in marrone scuro) è pari al potenziale geotermico $\bar{Q}_{BHE}$; rappresentazione in sezione (in basso a sinistra; zoom in basso a destra) del terreno e della sonda (zona grigia) di raggio r_b e profondità L ; andamento delle temperature dal valore indisturbato T_0 (a distanza infinita dalla sonda) al valore T_g ($r = r_b$) sulla parete della sonda, al valore T_f (fluido, media fra mandata e ritorno). Fonte: Casasso e Sethi, 2016 [17].

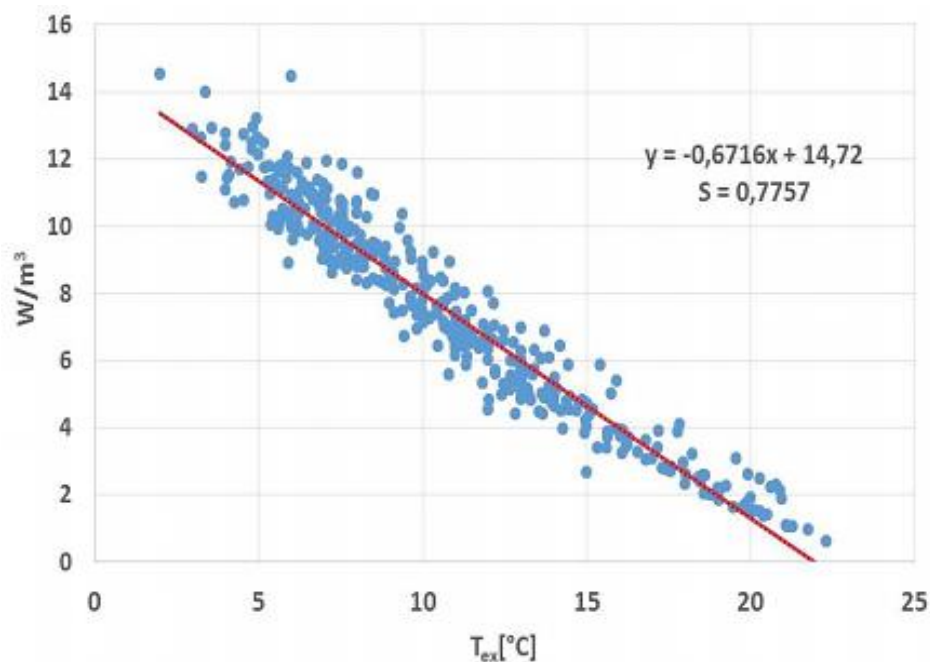


Figura 2.2 – Correlazione fra temperatura esterna e fabbisogno termico (firma energetica) per un edificio [22].

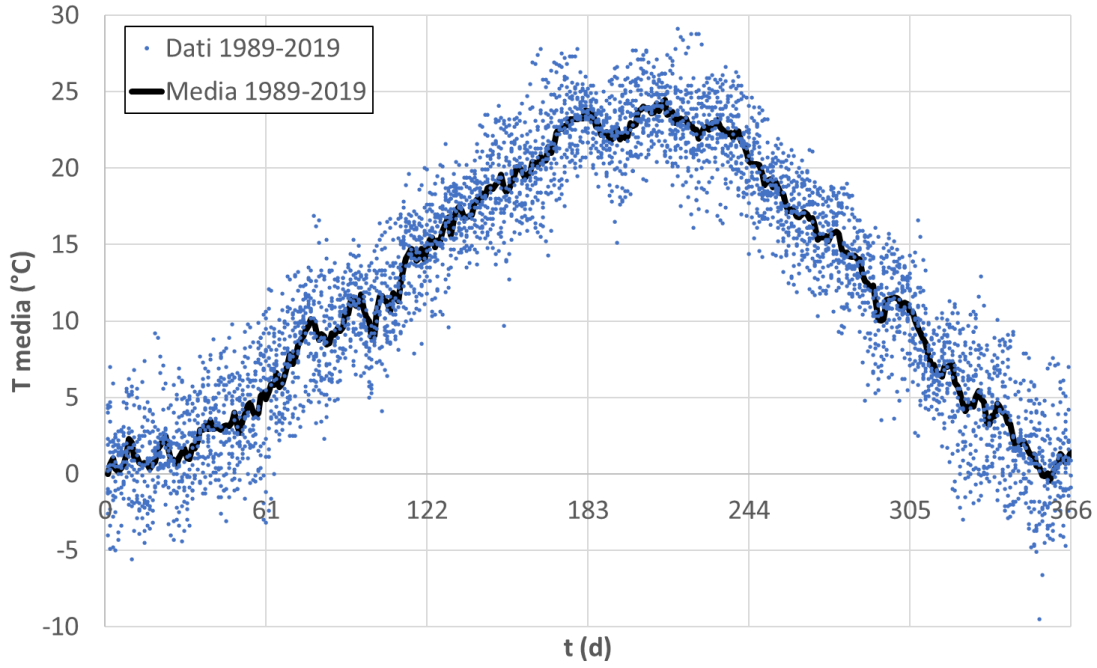


Figura 2.3 – Andamento delle temperature presso la stazione meteorologica ARPA “Diano d’Alba fraz. Abelloni” [23].

L’alterazione termica nel terreno circostante la sonda $\Delta T(r, t)$ viene calcolata con un modello matematico semplificato, basato sull’applicazione della sorgente lineare infinita [24]. In particolare, viene calcolata l’alterazione massima $\Delta T_{g,max}(r = r_b)$ della temperatura nel terreno, che viene raggiunta sull’interfaccia tra la sonda e il terreno stesso, ad una distanza $r = r_b$. A questa alterazione termica si aggiunge il salto termico fra la parete della sonda e la temperatura (media fra mandata e ritorno T_f) del fluido termovettore. Questo salto termico è proporzionale al carico termico per unità di lunghezza q (W/m) e alla resistenza termica della sonda R_b (mK/W). La temperatura media del fluido termovettore non deve superare un valore minimo (o massimo) T_{lim} , partendo da un valore iniziale T_0 che è pari alla temperatura indisturbata del terreno: il salto termico $T_0 - T_{lim}$ rappresenta quindi il margine a disposizione per l’estrazione di calore (con $T_{lim} < T_0$) o l’immissione di calore (con $T_{lim} > T_0$). Il potenziale geotermico Q_{BHE} (MWh/y) è espresso dalla seguente formula:

$$Q_{BHE} = \frac{0.071 \cdot (T_0 - T_{lim}) \cdot \lambda \cdot L \cdot t'_c}{-0.619t'_c \cdot \log(u'_s) + (0.532t'_c - 0.962) \cdot \log(u'_c) - 0.455t'_c - 1.619 + 4\pi\lambda \cdot R_b} \quad (2.1)$$

dove T_0 [°C] è la temperatura indisturbata del sottosuolo, T_{lim} [°C] è la temperatura limite del fluido termovettore (minima se la valutazione è effettuata per riscaldamento e massima se effettuata per il raffreddamento), λ (Wm⁻¹K⁻¹) è la conducibilità termica del terreno, L (m) è la lunghezza della sonda, R_b (mKW⁻¹) è la resistenza termica della sonda.

Vi sono poi tre parametri adimensionali:

$$t'_c = t_c/t_y \quad (2.2)$$

$$u'_c = \frac{r_b^2}{4 \cdot \frac{\lambda}{\rho c} \cdot t_c} \quad (2.3)$$

$$u'_s = \frac{r_b^2}{4 \cdot \frac{\lambda}{\rho c} \cdot t_s} \quad (2.4)$$

dove r_b (m) è il raggio della perforazione della sonda geotermica, t_c (s) è la durata del ciclo di carico (cioè la stagione di riscaldamento/raffrescamento), $t_y = 3.1536 \cdot 10^7$ s è la durata di un anno, λ (Wm⁻¹K⁻¹) è la conducibilità termica, ρc (Jm⁻³kg⁻¹) è la capacità termica, t_s (s) è la durata del ciclo di vita della sonda.

I dati di input si dividono quindi in due categorie:

- Dati omogenei su tutto il territorio mappato, che in questo lavoro sono stati così attribuiti:
 - Raggio della sonda: $r_b = 7.5 \cdot 10^{-2}$ m;
 - Durata del ciclo di vita dell'impianto: $t_s = 50$ anni = $1.58 \cdot 10^9$ s;
 - Resistenza termica della sonda: $R_b = 0.08$ mK/W;
 - Lunghezza della sonda: $L = 100$ m;
 - Temperatura limite del fluido termovettore: $T_f = -2^\circ\text{C}$;
- Dati eterogenei sul territorio mappato, che devono essere attribuiti sulla base di caratteristiche sito-specifiche:
 - Conducibilità termica λ (Wm⁻¹K⁻¹) e capacità termica ρc (Jm⁻³K⁻¹), per i quali si rimanda al Capitolo 2.2;
 - Temperatura indisturbata del terreno T_0 (°C), si veda il Capitolo 2.3;
 - Durata della stagione di riscaldamento t_c (s), si veda il Capitolo 2.4.

Per ulteriori approfondimenti sul metodo G.POT si rimanda alla pubblicazione originale di Cassasso e Sethi [17], disponibile su richiesta agli autori.

Di seguito in Figura 2.4 si riporta invece un esempio di utilizzo del metodo G.POT nella mappatura del potenziale geotermico *closed-loop* della Valle d'Aosta, effettuata all'interno del progetto GRETA (*near-surface Geothermal REsources in the Territory of the Alpine space*) [25], finanziato dal programma europeo INTERREG – Alpine Space e coordinato dalla *Technische Universitaet Muenchen*, nel quale il Politecnico di Torino ha collaborato come leader del *Work Package* sulla mappatura del potenziale geotermico a bassa entalpia.

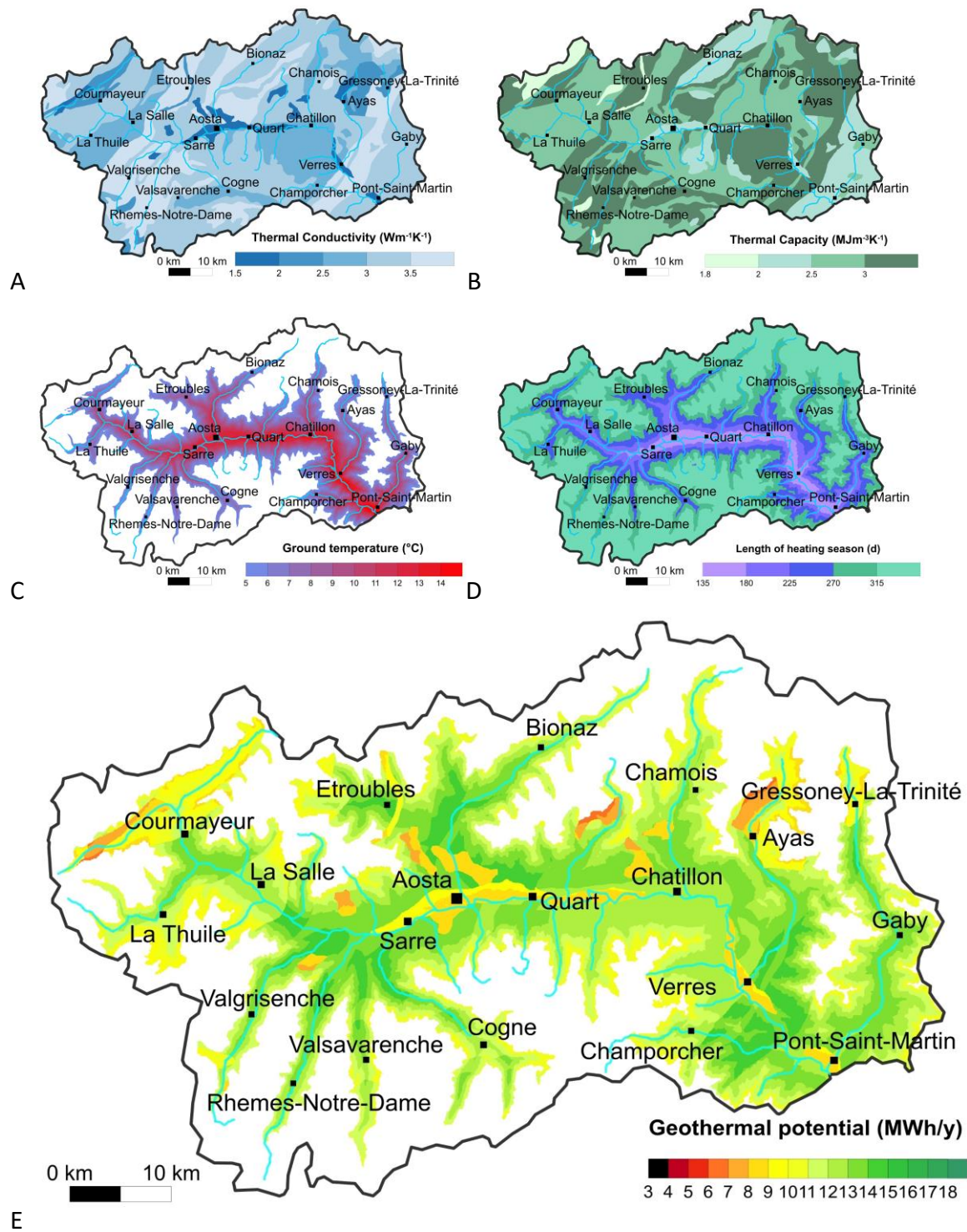


Figura 2.4 – Esempio di mappatura del potenziale geotermico nella Regione Valle d'Aosta per una sonda di lunghezza pari a 100 m, effettuato con il metodo G.POT. In alto si osservano le distribuzioni spaziali dei quattro input: conducibilità termica (A), capacità termica (B), temperatura del sottosuolo (C) e durata della stagione di riscaldamento (D). In basso si riporta la distribuzione di potenziale geotermico risultante (E). Fonte: Casasso et alii, 2018 [25].

2.2 Input: proprietà termiche del terreno

La conducibilità termica è la grandezza fisica che misura l'attitudine di una sostanza a trasmettere il calore attraverso la conduzione termica, secondo la legge di Fourier:

$$\phi = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.5)$$

L'unità di misura è il W/(mK) e quindi la conducibilità termica λ rappresenta il flusso di calore ϕ (W/m²) che attraversa la superficie di un corpo in presenza di un gradiente termico unitario, ovvero $\frac{dT}{dx} = 1K/m$.

Nel caso di una sonda geotermica, maggiore è la conducibilità termica del terreno che la circonda, minore sarà l'alterazione termica che esso subisce in presenza di una estrazione o immissione di una certa potenza termica e, di conseguenza, minore sarà la lunghezza di sonda necessaria per scambiare una certa potenza termica rispettando un certo criterio di alterazione termica massima.

La capacità termica è invece la grandezza fisica che definisce il rapporto fra il calore scambiato da un corpo e la variazione di temperatura che ne consegue:

$$\rho c = \frac{Q}{\Delta T} \quad (2.6)$$

La capacità termica di un terreno è il prodotto fra la sua densità ρ (kg/m³) e il suo calore specifico c (J/(kgK)). L'unità di misura della capacità termica ρc è quindi il J/(m³K).

Un materiale ad elevata capacità termica assorbe e rilascia calore con variazioni di temperatura più limitate: ad esempio, l'acqua ha una capacità termica maggiore rispetto alla sabbia secca ($4.2 \cdot 10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$ a fronte di circa $1.5 \cdot 10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$) e, per questo, subisce escursioni termiche molto più ridotte nell'arco della giornata.

Il rapporto fra conducibilità e capacità è detto diffusività termica:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (2.7)$$

La diffusività termica ha come unità di misura m²/s ed esprime la capacità di un corpo di trasmettere più o meno rapidamente la variazione di temperatura.

Le proprietà termiche del terreno – conducibilità termica λ e capacità termica ρc – sono state assegnate su tutto il territorio regionale basandosi sulla cartografia geologica e idrogeologica disponibile, secondo il metodo descritto nei paragrafi seguenti.

2.2.1 Dati e studi disponibili

Modalità di misura

La conducibilità e la capacità termica di un terreno possono essere misurati con diversi metodi che si basano tutti sull'imposizione di un flusso termico o una potenza termica nota e sull'osservazione delle temperature in determinate posizioni.

Le prove di caratterizzazione possono essere in laboratorio o in situ.

Le prove di laboratorio possono essere condotte con quattro tipologie di strumentazione: *needle probe* (Figura 2.5), *plate probe* (Figura 2.6), *guarded plate* (Figura 2.7) e *Thermal Conductivity Scanner* (Figura 2.8). Tutte queste prove di caratterizzazione permettono di ottenere sia la conducibilità sia la capacità termica, ad eccezione della tipologia *guarded plate* che permette di misurare la sola conducibilità termica. Per approfondimenti sulle metodiche di misura dei parametri termici in laboratorio si rimanda alla bibliografia in materia [26]–[30].

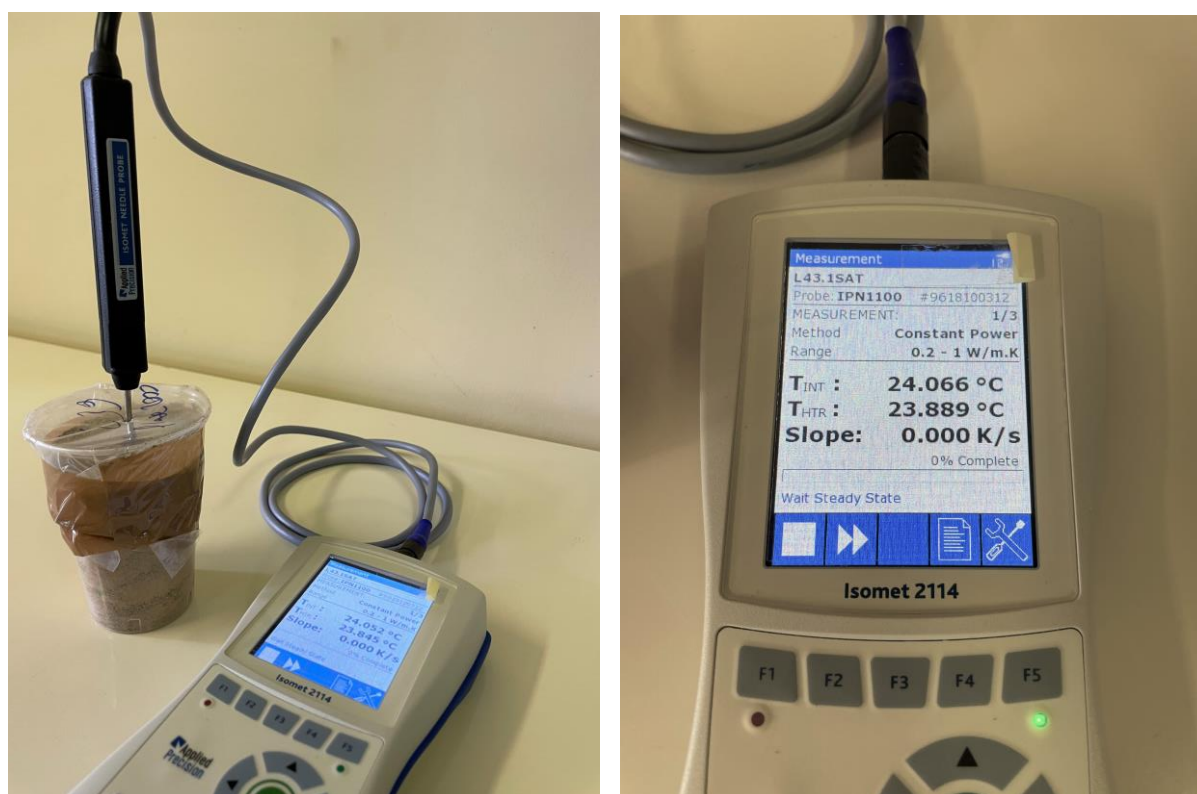


Figura 2.5 – Misurazione della conducibilità/capacità termica con la sonda needle probe Isomet 2114 in dotazione al Politecnico di Torino - DIATI.



Figura 2.6 – Misurazione della conducibilità/capacità termica con la sonda plate probe Isomet 2114 in dotazione al Politecnico di Torino - DIATI.

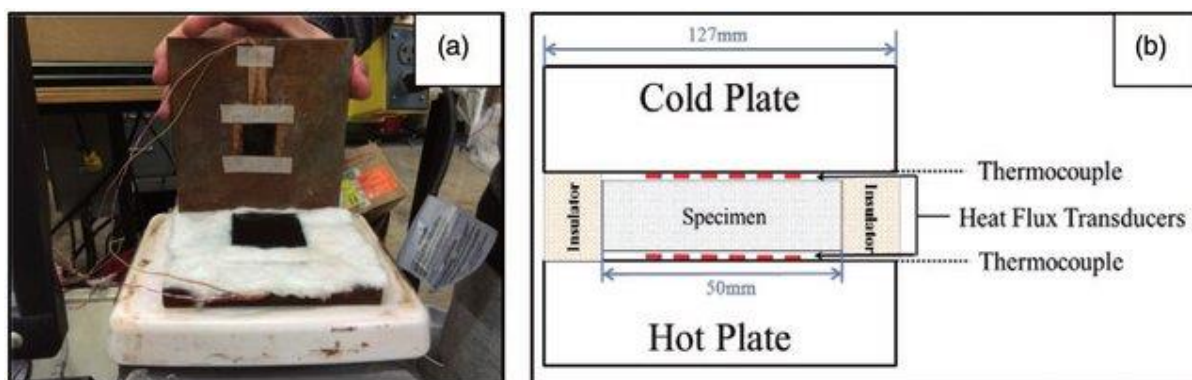


Figura 2.7 – Misurazione della conducibilità termica di un campione di polietilene rinforzato con nanocompositi con uno strumento di tipo “guarded plate”. Fonte: Xu et al, 2015 [31].



Figura 2.8 – Misurazione della conducibilità e della capacità termica di un campione di roccia con un Thermal Conductivity Scanner (TCS). Fonte: progetto GRETA – Alpine Space [32].

Le prove di caratterizzazione in laboratorio permettono di ottenere una buona precisione di misurazione e di caratterizzare le differenti litologie attraversate da una sonda geotermica. Tuttavia, i campioni di terreno possono essere alterati e quindi non rappresentativi delle reali condizioni di campo e sono inoltre presenti degli effetti di scala della conducibilità termica [27]. Per questo motivo, verso la fine degli anni 90 è stato sviluppato un test in situ noto come *Thermal Response Test* (TRT) o anche *Ground Response Test* (GRT). I pionieri in questo campo furono l'americano Jeffrey Spitler e la svedese Signhild Gehlin, che svilupparono i primi pionieristici macchinari (Figura 2.9) [33].

Il TRT si basa sullo scambio di una potenza termica nota (e, per quanto possibile, costante) con una sonda geotermica, e nella misurazione delle temperature del fluido termovettore della sonda, per un periodo di 48-72 ore. Dall'interpretazione della curva della temperatura media fra il tubo di mandata e quello di ritorno (Figura 2.10) si ricavano due parametri: la conducibilità termica del terreno λ (W/(mK)) e la resistenza termica della sonda R_b (mK/W). La capacità termica del terreno, invece, non può essere calcolata con questo test ma viene assegnata da dati di letteratura.



Figura 2.9 – I primi macchinari per l'effettuazione dei Thermal Response Test sviluppati dall'americano Spitler (a sinistra) e dalla svedese Gehlin (a destra). Fonte: Spitler e Gehlin, 2015 [33].

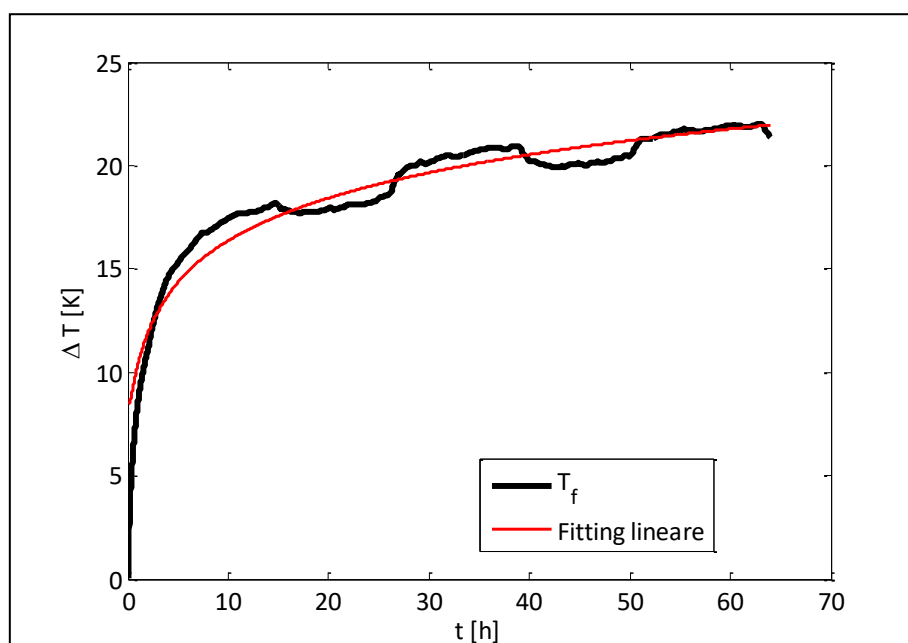


Figura 2.10 – Interpretazione di un thermal response test (TRT): confronto fra la curva della temperatura media mandata-ritorno (in nero) e la curva di fitting con sorgente lineare infinita (rosso). Si osserva l'effetto della variazione giorno-notte della potenza termica fornita dalla resistenza elettrica, che dipende dalle variazioni della tensione di rete. Fonte: elaborazione propria su TRT svolto presso l'Università di Urbino (2011).

Proprietà termiche delle litologie

La letteratura scientifica che riporta dati di proprietà termiche di rocce e terreni (in particolare la conducibilità termica) è piuttosto vasta e le fonti sono spesso difficilmente comparabili tra loro. Sono quindi particolarmente utili i lavori di review di letteratura che riassumono gli intervalli di valori per ciascuna litologia.

La normativa tedesca VDI 4640 (2015, [34]) fornisce alcuni valori guida, che sono stati ripresi dalla normativa italiana UNI 11466:2012 [23], senza però riportare le fonti degli intervalli di valori forniti.

Più recentemente, il progetto CHEAP-GSHPs ha prodotto un database di valori di conducibilità e capacità termica (Dalla Santa et alii, 2020 [35]) che integra il risultato di una vasta review di letteratura e di oltre 400 misure di laboratorio su campioni di rocce e sedimenti [35].

Cartografia geologica Piemonte

Nel 2017 è stata pubblicata la nuova Carta Geologica del Piemonte in scala 1:250000, frutto della collaborazione fra l'Istituto di Geoscienze e Georisorse – IGG del CNR, del Dipartimento di Scienze della Terra - DST dell'Università di Torino e del Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture - DIATI del Politecnico di Torino. La cartografia è scaricabile, insieme alle informazioni complete sulla sua realizzazione, dal sito di ARPA Piemonte [36] ed è descritta in un articolo scientifico pubblicato sul "Journal of Maps" (Piana et alii, 2017 [37]).

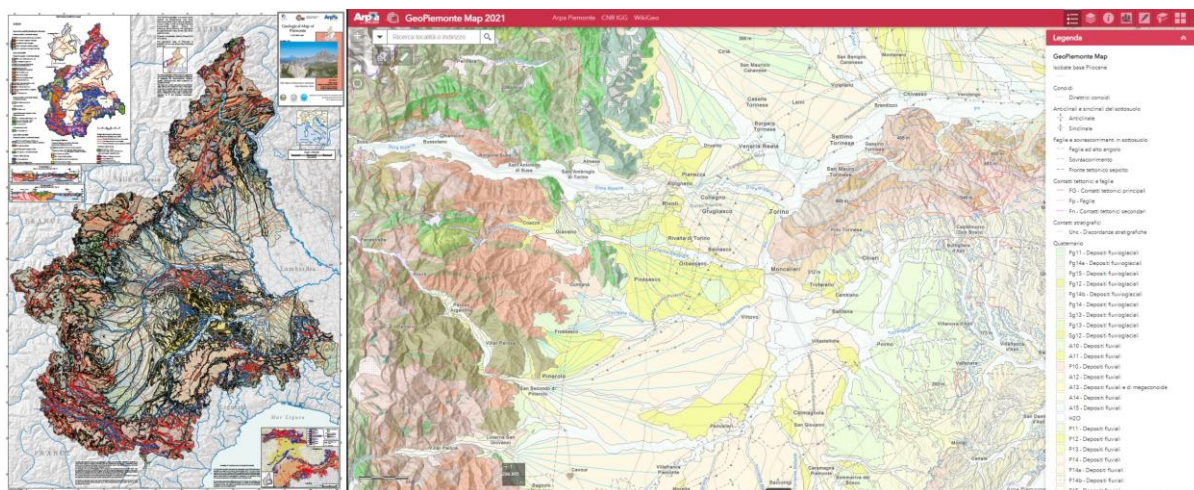


Figura 2.11 – Carta geologica del Piemonte in scala 1:250000. Visualizzazione della carta completa (a sx) e dettaglio sul web GIS di ARPA Piemonte (a dx).

Piano di Tutela delle Acque della Regione Piemonte

Il Piano di Tutela delle Acque (Regione Piemonte, 2007 [38]) è lo strumento di pianificazione generale delle risorse idriche nel territorio regionale, in attuazione della Direttiva 2000/60/CE (*Water framework directive*). Alla base del PTA vi è una accurata ricognizione delle risorse idriche superficiali (fiumi e laghi) e sotterranee (acquifero superficiale e profondo), per le quali sono state prodotte monografie e dataset georiferiti.

Questa ricognizione si basa su numerosi lavori precedenti, tra i quali la Carta idrogeologica schematica della Regione Piemonte in scala 1:250mila (Lo Russo e Civita, 2004 [39]) riportata in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, lo studio "Idrogeologia della Pianura Piemontese" (Bove et al., 2005 [40]) e i progetti di monitoraggio PRISMAS (Progetto Interregionale Sorveglianza e Monitoraggio delle Acque Sotterranee), PRISMAS II e TANARO [41], [42]. Altri studi hanno riguardato aree più ristrette del Piemonte, come lo "Studio e valutazione della vulnerabilità intrinseca delle acque sotterranee" (Civita et al., 2005 [43]).

Ai fini della caratterizzazione dei parametri termici del sottosuolo è rilevante la mappatura dei livelli dell'acquifero superficiale e della soggiacenza di falda, che determina la suddivisione fra una zona vadosa con conducibilità e capacità termica più basse e una zona saturata con valori più elevati. Come si osserva in Figura 2.11, in gran parte del territorio regionale la soggiacenza di falda è inferiore ai 10 m e solo in poche zone, soprattutto pedemontane, raggiunge valori più elevati.

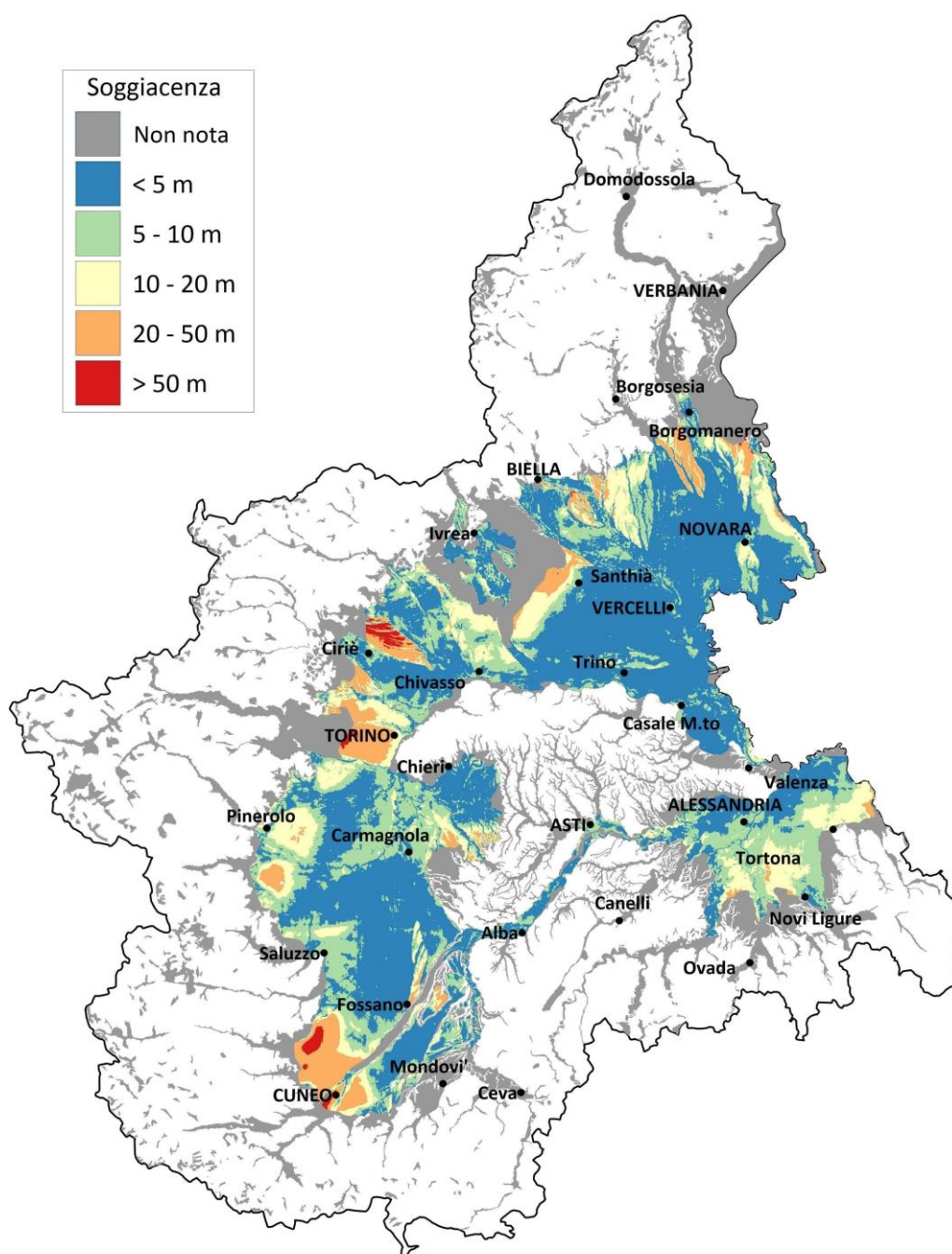


Figura 2.12 – Mappatura della soggiacenza della falda superficiale (PTA Piemonte, 2007 [38]) e delle aree coperte da depositi sedimentari del Quaternario (in grigio, da Carta Geologica del Piemonte 1:250k [36]).

2.2.2 Metodologia

Per l'assegnazione delle proprietà termiche del sottosuolo nei primi 100 metri di profondità è stato seguito il criterio dell'associazione dei valori con la litologia riportata nella Carta Geologica del Piemonte in scala 1:250000. Tale metodologia è ampiamente utilizzata nelle mappature di larga scala, là dove non è possibile ricreare una stratigrafia tridimensionale del sottosuolo [28], [44].

Sono state distinte due tipologie di sottosuolo, per le quali si è adottato un procedimento di assegnazione differente:

- Litologie del substrato roccioso (rocce metamorfiche, vulcaniche e sedimentarie): le proprietà termiche dipendono sostanzialmente dalla mineralogia e dalle condizioni della roccia (condizioni di formazione, grado di metamorfismo ecc.), e in misura molto minore dal contenuto d'acqua. Per queste litologie, quindi, si è ritenuto opportuno assegnare un valore di letteratura, indipendentemente dal contenuto d'acqua;
- Depositi del Quaternario: per i depositi sedimentari, la principale differenza è fra le proprietà del sedimento saturo (più conduttivo e con capacità termica maggiore) e del sedimento secco. Per questo motivo si è operata la seguente distinzione:
 - Nelle aree degli acquiferi principali della Regione, per i quali è disponibile la mappatura della soggiacenza di falda, sono stati assegnati valori differenziati a seconda della classe di soggiacenza come riportato in Tabella 2.1;
 - Per le altre aree, per le quali non sono noti i dati di soggiacenza della falda, sono stati assegnati valori di conducibilità e capacità termica utilizzati abitualmente in letteratura per le litologie sedimentarie.

Per l'assegnazione dei valori di conducibilità e capacità termica in funzione della soggiacenza si è tenuto conto della differenza fra i sedimenti saturi e quelli secchi [34], [35] assegnando:

- Per i sedimenti saturi: $\lambda_{wet} = 2.4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $(\rho c)_{wet} = 2.5 \cdot 10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$
- Per i sedimenti secchi: $\lambda_{dry} = 0.5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $(\rho c)_{dry} = 1.5 \cdot 10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$

Nota quindi la soggiacenza d , su una profondità di 100 metri (ossia la lunghezza ipotizzata della sonda), la conducibilità e la capacità termica sono date dalla media pesata sullo spessore dello strato di sedimenti secchi (d) e di quelli saturi ($100 - d$):

$$\lambda = \frac{d \cdot \lambda_{dry} + (100 - d) \cdot \lambda_{wet}}{100} \quad (2.8)$$

$$\rho c = \frac{d \cdot (\rho c)_{dry} + (100 - d) \cdot (\rho c)_{wet}}{100} \quad (2.9)$$

I valori sono stati assegnati in base agli intervalli di soggiacenza utilizzati nella mappa del PTA riportata in Figura 2.12. Per ciascun intervallo i parametri λ e ρc riportati in Tabella 2.1 sono stati calcolati utilizzando il valore medio di soggiacenza (es. 5 m per l'intervallo <10 m; 15 m per l'intervallo 10-20 m). Per l'intervallo di soggiacenza >50 m è stato utilizzato il valore

relativo alla soggiacenza 50 m: dall'analisi dei *Thermal Response Test* disponibili in letteratura, infatti, si è osservato che anche per soggiacenze molto elevate non vengono misurati valori di conducibilità termica inferiori a $1.4\text{--}1.5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ [45, pag. 61].

Tabella 2.1 – Valori di conducibilità termica (λ) e capacità termica (ρc) assegnati per le litologie sedimentarie, al variare della soggiacenza.

Soggiacenza di falda (m)	Conducibilità termica $\lambda \text{ (Wm}^{-1}\text{K}^{-1}\text{)}$	Capacità termica $\rho c \text{ (MJ}\cdot\text{m}^{-3}\text{K}^{-1}\text{)}$
<10 m	2.31	2.45
10 – 20 m	2.12	2.35
20 – 50 m	1.74	2.15
> 50 m	1.45	2
Non specificata	2.02	2.3

Le litologie rocciose del substrato riportate nella Carta Geologica 1:250000 sono state associate a valori di letteratura di conducibilità e capacità termica utilizzando la classificazione per unità litologiche (colonna “LITHO_UNIT”) e quella per litologia (“LITHOLOGY”). In Appendice C si riporta la tabella con i valori assegnati nelle 315 unità litologiche distinte, che varia tra $1.43 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (andesite) e $5.18 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (quarzite).

2.2.3 Risultati

Di seguito si riportano le mappe dei valori stimati dei parametri termici del terreno.

La conducibilità termica (Figura 2.13) presenta una forte eterogeneità spaziale nel territorio piemontese, con i valori massimi ($5.18 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) relativi alle quarziti presenti nelle Alpi Cozie, seguiti a una certa distanza dalle dolomiti ($3.58 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) e dalle peridotiti ($3.50 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$).

I valori minimi (circa $1.4\text{--}1.8 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) sono invece osservati principalmente in zone nelle quali la soggiacenza di falda è particolarmente elevata (il settore sud-ovest della Pianura Cuneese; gli altipiani di Fossano e del Beinale, il conoide fluvioglaciale su cui poggia l'area urbana torinese e, più a nord, il conoide della Vauda; gli anfiteatri morenici di Ivrea, del Verbano e dell'Orta) e in presenza di rocce sedimentarie poco conduttive come i gessi, presenti in alcune aree del Monferrato.

La capacità termica (Figura 2.14) varia invece in un intervallo decisamente più ristretto ($1.8\text{--}2.9 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}\text{K}^{-1}$) oltre ad avere un'influenza decisamente più ridotta, rispetto alla conducibilità, sul potenziale geotermico.

Come già anticipato, la stima e l'assegnazione dei parametri termici è riferita alla formazione litologica affiorante e, pertanto, non tiene conto della variabilità verticale e delle intercalazioni degli strati con differenti litologie. Questa assunzione semplificativa, molto comune in letteratura [28], [44], è necessaria per una mappatura di larga scala nella quale non è possibile produrre una stratigrafia tridimensionale di sufficiente dettaglio. È pertanto necessario, per procedere alla progettazione di un impianto, integrare la conoscenza geologica del sito con la consulenza di un professionista.

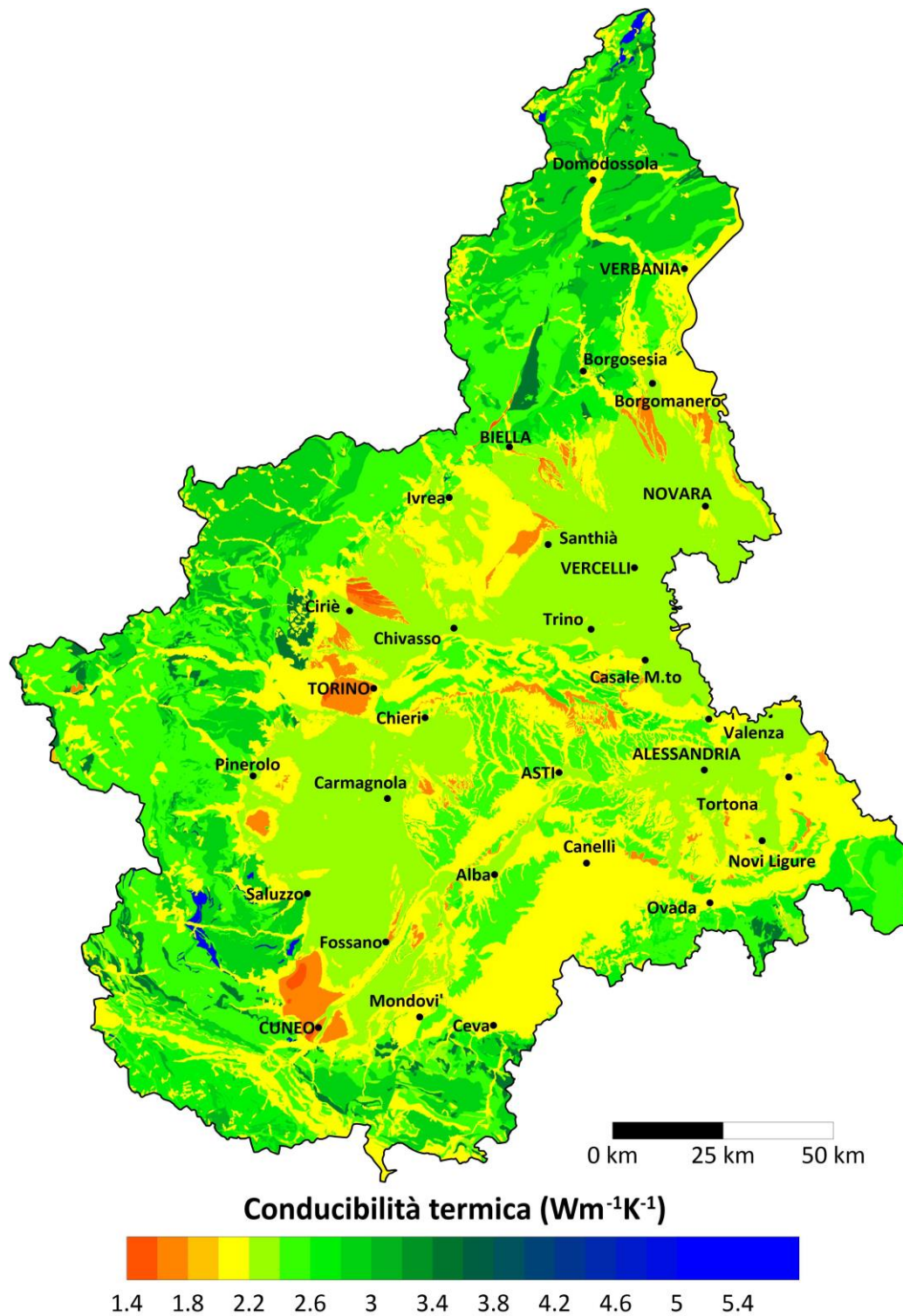


Figura 2.13 – Mappa della conducibilità termica stimata (λ) in scala 1:1.5M.



Figura 2.14 – Mappa della capacità termica stimata (pc) in scala 1:15M.

2.3 Input: temperatura del terreno

La temperatura del terreno è un parametro molto importante per il corretto dimensionamento degli impianti geotermici poiché determina la massima alterazione termica che può essere raggiunta dal fluido termovettore. Ad esempio, a fronte di un requisito progettuale di temperatura minima del fluido termovettore pari a $T_{lim} = -2\text{ °C}$, l'alterazione termica massima sarà pari a 15 °C in presenza di una temperatura indisturbata del suolo $T_0 = 13\text{ °C}$, e di 10 °C in presenza di una temperatura indisturbata $T_0 = 8\text{ °C}$. L'alterazione termica del fluido termovettore è proporzionale alla potenza termica per unità di lunghezza: nel primo caso ($T_0 = 13\text{ °C} \rightarrow T_0 - T_{lim} = 15\text{ °C}$, quindi, sarà possibile estrarre una potenza termica per unità di lunghezza del 50% superiore rispetto al secondo caso ($T_0 = 8\text{ °C} \rightarrow T_0 - T_{lim} = 10\text{ °C}$).

Per questo motivo è fondamentale valutare nel modo più accurato possibile la temperatura del terreno al variare della profondità, della posizione e del periodo dell'anno. Una misura diretta di questo parametro è possibile solo là dove siano presenti in zona delle perforazioni (pozzi o sonde geotermiche) accessibili. Per tutti gli altri casi, si rende necessario assumere – almeno fino alla realizzazione della prima perforazione del campo sonde – un valore verosimile della temperatura del terreno, considerando i fattori che la influenzano.

La distribuzione in verticale della temperatura del terreno segue andamenti simili a quello riportato in Figura 2.15: nello strato più superficiale (di profondità generalmente compresa fra 10 e 20 m) si osservano variazioni stagionali che si trasmettono dalla superficie in profondità con uno smorzamento e un ritardo; al di sotto di questo strato, la temperatura del terreno è costante durante l'anno (pari circa al valore medio annuo della temperatura dell'aria) e cresce con la profondità per effetto del flusso geotermico, che induce un gradiente di temperatura generalmente pari a circa $2.5\text{--}3\text{ °C}$ ogni 100 m [46]. L'effetto delle variazioni stagionali della temperatura è quindi pressoché trascurabile quando si considera una sonda geotermica, che ha profondità tipiche di 100 – 200 m.

Inoltre, poiché i metodi di progettazione degli impianti geotermici (e anche il metodo G.POT per la stima del potenziale geotermico) non tengono conto della variabilità della temperatura indisturbata del terreno ma la considerano omogenea lungo la verticale, l'assunzione più comune è quella di utilizzare il valore medio lungo la profondità della sonda o il valore misurato a metà di tale profondità [18].

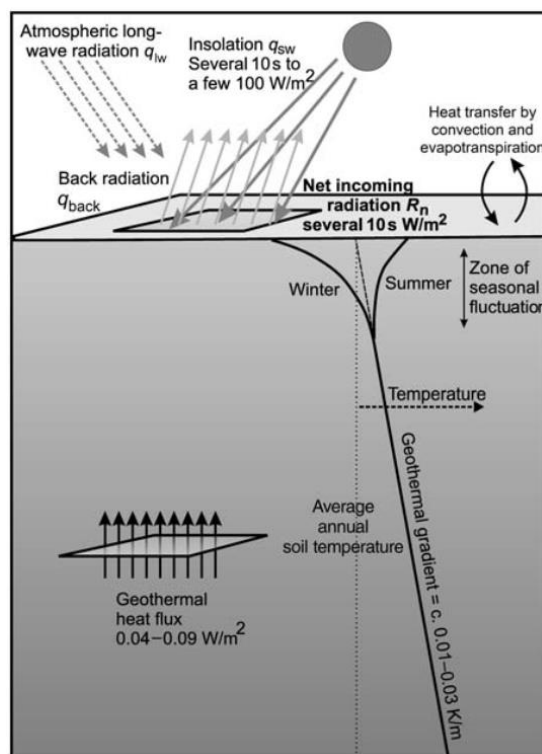


Figura 2.15 – Esempio di distribuzione delle temperature nel sottosuolo [47].

2.3.1 Dati e studi disponibili

Come evidenziato nel paragrafo precedente, la temperatura indisturbata del terreno T_0 è correlata a due parametri: la temperatura media annua dell'aria e il gradiente geotermico. La stima della temperatura indisturbata del sottosuolo si è quindi basata su tre fonti di dati, che di seguito vengono presentate:

- La relazione geotermometrica di ARPA Piemonte [48];
- I dati della rete meteorologica di ARPA Piemonte [23];
- Le stime di gradiente geotermico condotte dal Ministero per lo Sviluppo Economico [49].

Relazione geotermometrica ARPA Piemonte (2009)

L'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale (ARPA) ha eseguito nel 2008 un'indagine termometrica con lo scopo di ottenere dati utili sulla temperatura dell'acquifero superficiale [48]. Attraverso una rete di piezometri (118 unità) distribuiti nella pianura piemontese è stata misurata la temperatura del suolo a varie profondità e la soggiacenza dell'acquifero all'inizio e alla fine della stagione estiva, nei mesi di marzo-aprile e settembre-ottobre. Questi dati sono stati utilizzati come riferimento per determinare la relazione tra temperatura dell'aria e temperatura indisturbata del terreno. Le profondità a cui sono state effettuate le rilevazioni variano in media tra 5 e 15 m.

Dati meteorologici ARPA Piemonte

I dati temporali relativi alla temperatura dell'aria in varie località del Piemonte sono accessibili tramite il portale della Banca Dati Meteorologica del Piemonte [23]. Numerose stazioni meteorologiche installate a varie altitudini permettono di ricavare l'evoluzione storica della temperatura dell'aria nel corso degli anni. Nell'analisi sono state considerate oltre 80 stazioni meteorologiche nella fascia altimetrica compresa tra 0-2500 m, riportate in Tabella 2.2. Per ricavare la temperatura media dell'aria nelle varie località sono stati analizzati i dati delle temperature medie mensili nell'arco temporale 2005-2020.

Tabella 2.2 – Stazioni meteorologiche in Piemonte considerate nell'analisi, storico 2005-2020.

Fascia altimetrica	N. stazioni	Località
0-500 m	20	Vercelli, Govone, Asti, Verolengo, Novara, Novi, Gavi, Ovada, Carmagnola, Torino, Rossiglione, Pralormo, Caselle, Pinerolo, Biella, Ceva, Rodello, Mondovì, Mallare, Cabella Ligure
501-1000 m	21	Lozzolo, Cuneo, Belvedere Langhe, Brossasco, Lanzo, Priero, Osi- glia, Perrero Germanasca, Meugliano, Anzino, Perlo, Pettinengo, Feisoglio, Boccioleto, Finiere, Nebbiuno, Mombarcaro, Cursolo, Pamparato, Lemie
1001-1500 m	20	Graglia, Ala di Stura, Salbertrand, Piedicavallo, Coazze, Forzo, Oropa, Arvogno, Colletterto, Pesana, Rima, Carcoforo, Bobbio Pel- lice, Alagna, Settepani, Massello, Niquidetto, Neraissa, Alpe Cheg- gio, Vaccera
1501-2500 m	22	Pragelato, Ceresole, Bardonecchia (Pian del Sole, Melezet), Chia- ves, Palanfrè, Piaggia, Argentera, Mottac, Alpe Veglia, Castelmag- no, Elva, Malciaussia, Bellino, Larecchio, Cesana (Thuras), Grange Martina, Rochemolle, Le Selle, Ceppo Morelli, Sestriere, Pian Gias- set

Dati gradiente geotermico

Il Ministero dello Sviluppo Economico (MISE) ha prodotto nel 1994 l'inventario delle risorse geotermiche nazionali [50] e la zonazione geotermica del territorio italiano [49].

Come evidenziato nelle mappe in Figura 2.16, il flusso geotermico in Piemonte ha valori (circa 40 – 80 mW/m²) in linea con la media per la crosta terrestre (65 mW/m² secondo Pollack, 1993 [51]), lontani da quelli tipici delle aree di anomalia geotermica (fino a 550 mW/m²); la temperatura del terreno a 1000 m di profondità varia da circa 30 °C a 50 °C, con l'eccezione dell'area di Acqui Terme in cui supera di poco gli 80 °C.

Si può quindi ipotizzare che, salvo eccezioni locali, i gradienti verticali di temperatura si mantengano su valori tipici (0.03 K/m) e che, quindi, la temperatura del terreno dipenda principalmente dalla temperatura media annua dell'aria.

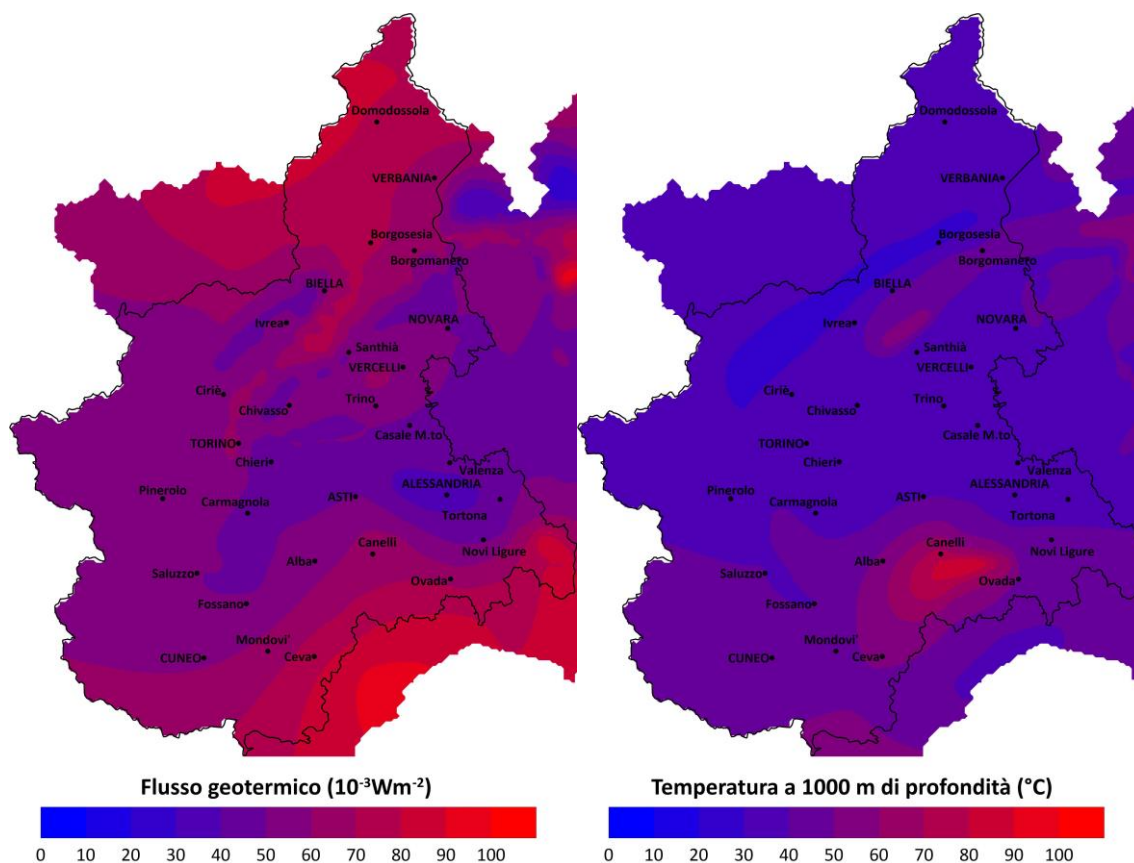


Figura 2.16 – Distribuzione del flusso geotermico in mW/m^2 (a sx) e della temperatura del sottosuolo a 1000 m di profondità) stimati nell'inventario nazionale delle risorse geotermiche (MISE, 1994 [49]).

2.3.2 Metodologia

Poiché, come riportato in diverse fonti bibliografiche [52]–[54], la temperatura indisturbata dipende fortemente dalla temperatura media annua dell'aria, questo parametro è stato analizzato nelle 83 stazioni meteorologiche gestite da ARPA Piemonte (Tabella 2.2) e confrontato con la quota altimetrica z (m s.l.m.). L'andamento risultante, riportato in Figura 2.17, mostra una netta correlazione lineare con una riduzione di circa 1°C ogni 200 m di altitudine:

$$T_{\text{med annua aria}} = 14.2342 - 0.0049 \cdot z \quad (2.10)$$

Per quanto riguarda la differenza di temperatura fra la media annua dell'aria e quella effettiva del terreno, in Figura 2.18 si riporta un confronto fra le temperature misurate a fondo pozzo nella campagna geotermometrica di ARPA Piemonte (2009, [48]) e le temperature medie annue dell'aria stimate con l'Equazione (2.10). Nella maggioranza dei casi la differenza di temperatura tra terreno e aria esterna non eccede il valore di 2°C , con un valore medio di tale differenza pari a $+1.1^\circ\text{C}$ all'inizio della stagione estiva e a $+1.3^\circ\text{C}$ alla fine della stagione estiva. Tali valori sono in linea con la letteratura [53], [55]–[59].

Seguendo l'approccio utilizzato in un recente studio sulla Valle d'Aosta (progetto GRETA, [25]), si è adottata la seguente formula:

$$T_0 = T_{\text{med annua aria}} + 1 = 15.2342 - 0.0049 \cdot z \quad (2.11)$$

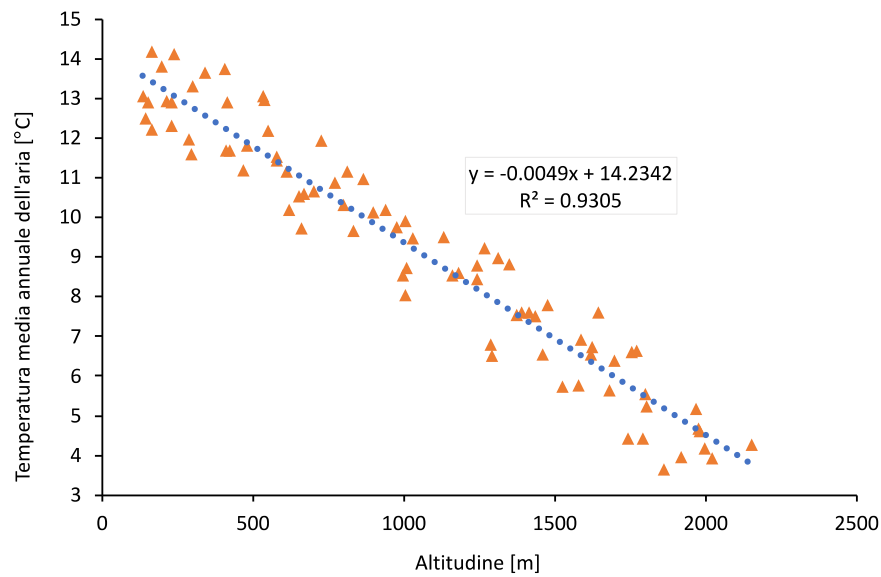


Figura 2.17 – Correlazione fra altitudine e temperatura media annuale dell'aria per le località del Piemonte analizzate. Fonte dati: ARPA Piemonte [23].

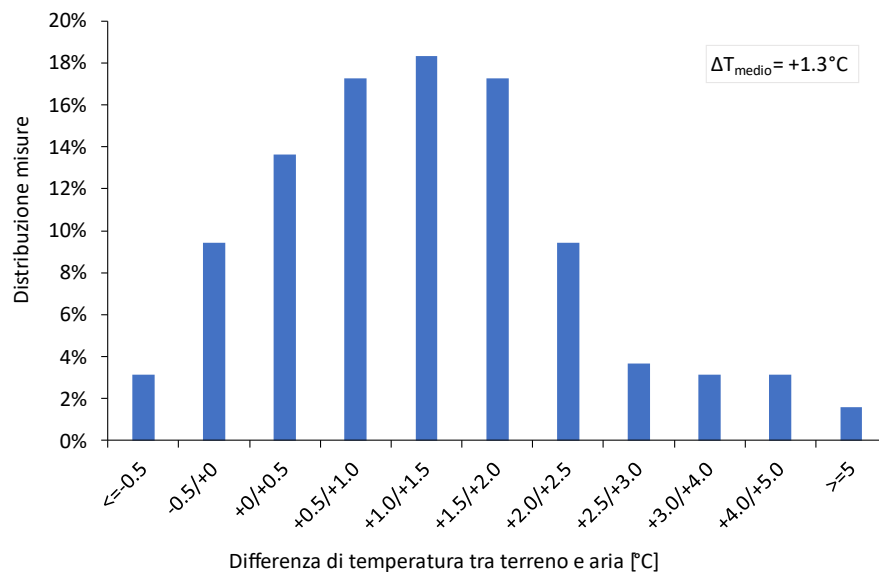


Figura 2.18 – Distribuzione della differenza tra temperatura misurata del terreno e media annua dell'aria. Fonte dati: ARPA Piemonte [48].

2.3.3 Risultati

In Figura 2.19 si riporta la distribuzione del valore stimato di temperatura indisturbata del terreno T_0 . Nella maggior parte del territorio regionale i valori sono compresi fra 10 °C e 14 °C. Tra i capoluoghi di Provincia, il valore massimo di temperatura si osserva ad Alessandria (14.78 °C) e il valore minimo a Cuneo (12.47 °C), mentre il valore previsto per Torino è 14.03 °C.

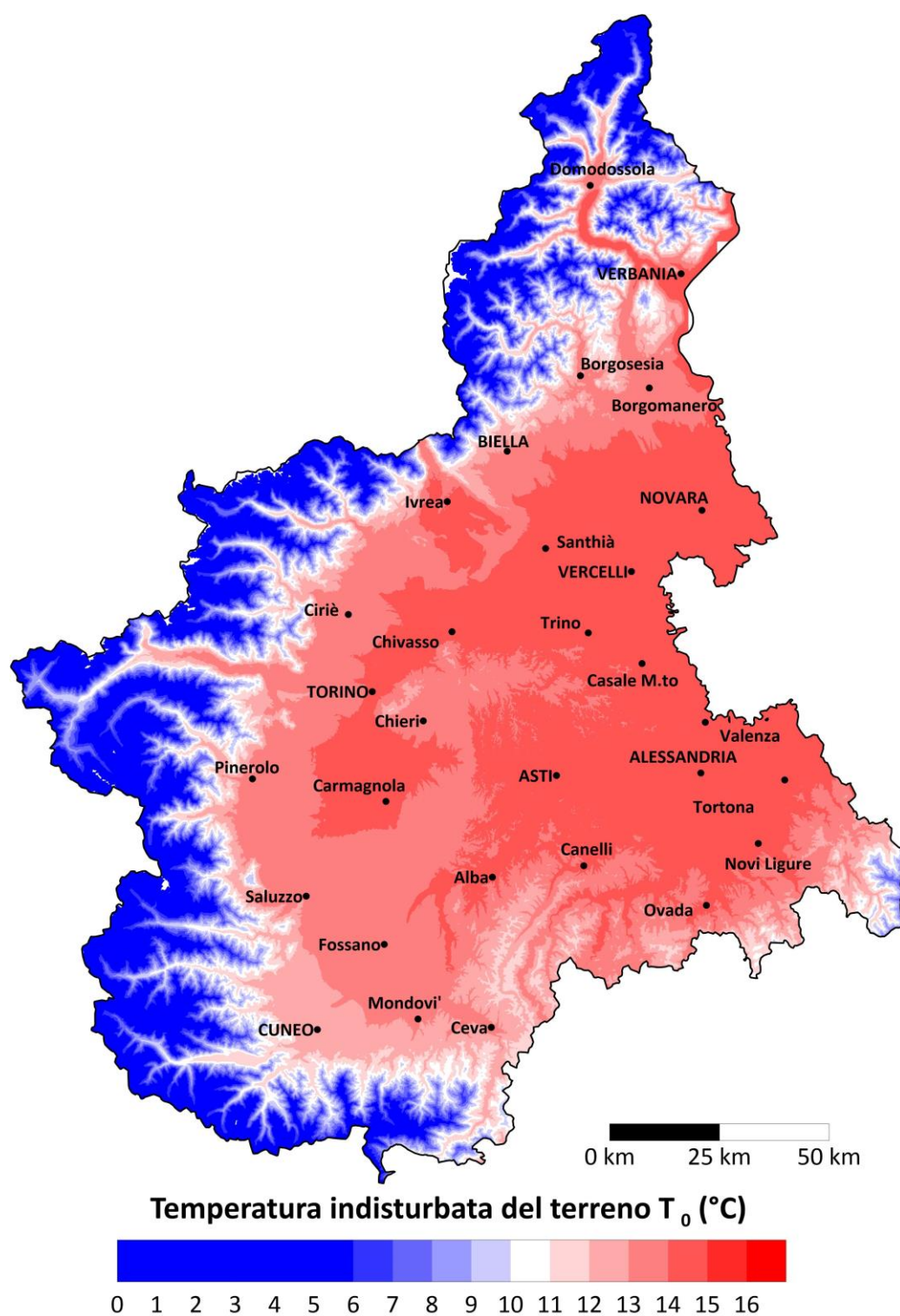


Figura 2.19 – Mappa della temperatura indisturbata del terreno (T_0) stimata, in scala 1:1.5M.

2.4 Input: durata della stagione di riscaldamento

2.4.1 Dati e studi disponibili

La durata della stagione di riscaldamento è regolamentata dalla Tabella A del D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412, aggiornata al 24 ottobre 2018. Tale decreto stabilisce una regolamentazione del periodo di funzionamento degli impianti termici di riscaldamento sul suolo nazionale e fornisce una classificazione basata su sei differenti zone climatiche, definite in base ai gradi giorno di riscaldamento (GG) calcolati, per le diverse località, in corrispondenza della quota del municipio. I gradi giorno corrispondono alla differenza positiva tra la temperatura dell'ambiente interno e la temperatura media esterna giornaliera, sommata sul periodo annuale:

$$GG = \sum_{i=1}^N (T_{int} - T_{ext,i}) \quad (2.12)$$

dove N è il numero di giorni della durata convenzionale della stagione di riscaldamento, T_{int} è la temperatura dell'ambiente interno, fissata convenzionalmente a 20 °C, e $T_{ext,i}$ è la temperatura media esterna del giorno i . La normativa UNI 10349:2016 [60] prevede inoltre che la differenza $T_{int} - T_{ext,i}$ sia calcolata nel periodo dell'anno (di durata N giorni) compreso fra il primo e l'ultimo giorno nei quali la temperatura media giornaliera è inferiore a 12 °C. La norma ipotizzando quindi che, al di sopra di questa temperatura media giornaliera, il fabbisogno di riscaldamento dell'edificio sia trascurabile. Altre normative utilizzano altre soglie e altre temperature di riferimento (ad esempio il JRC suggerisce di utilizzare $T_{int} = 18^\circ\text{C}$ e di calcolare questa differenza per i giorni in cui $T_{ext,i} < 15^\circ\text{C}$ [61]).

Quale che sia il metodo utilizzato, le località caratterizzate da climi rigidi sono caratterizzate da un numero di gradi giorno superiore rispetto a località con un clima più mite.

Il territorio nazionale è suddiviso in sei zone climatiche, come da Tabella 2.3 e Figura 2.20 e tutte le località piemontesi appartengono alle fasce climatiche E (2101-3000 GG) ed F (oltre 3000 GG), con un valor medio di gradi giorno pari a 2800 ed alcune località che superano i 5000 GG [62]. I valori di durata della stagione di riscaldamento ex DPR 412/1993, riportati in Tabella 2.3, rappresentano i limiti massimi: ad esempio a Torino (2617 GG, zona E) non è possibile accendere gli impianti di riscaldamento prima del 15 ottobre e dopo il 15 aprile. Ciò non significa, però, che all'interno di questa zona climatica i riscaldamenti siano accesi esattamente per questo periodo, anche perché si tratta di intervalli piuttosto ampi di gradi giorno. È quindi necessario un metodo per attribuire con maggiore definizione la durata della stagione di riscaldamento.

Tabella 2.3 – Zone climatiche, gradi giorno e durata della stagione di riscaldamento in Italia secondo il D.P.R. 412/93.

Zona climatica	Gradi giorno	Durata stagione di riscaldamento
A	<600	1° dicembre – 15 marzo
B	600<GG<900	1° dicembre – 31 marzo
C	901<GG<1400	15 novembre – 31 marzo
D	1401<GG<2100	1° novembre – 15 aprile
E	2101<GG<3000	15 ottobre – 1° aprile
F	GG>3000	1° gennaio – 31 dicembre



Figura 2.20 – Mappa delle zone climatiche in Italia ex DPR 412/93 [63].

2.4.2 Metodologia

Sfruttando la definizione dei gradi giorno di riscaldamento da norma UNI 10349-1:2016, la durata effettiva della stagione di riscaldamento è stata stimata pari al numero di giorni con temperatura media inferiore a 12 °C. Questa grandezza è stata quindi calcolata per tutte le stazioni meteorologiche del Piemonte (valore medio sugli anni di misura disponibili). Come si osserva in Figura 2.21, essa presenta una correlazione lineare con la quota altimetrica z :

$$t_c = 141.8841 + 0.0826 \cdot z \quad (2.13)$$

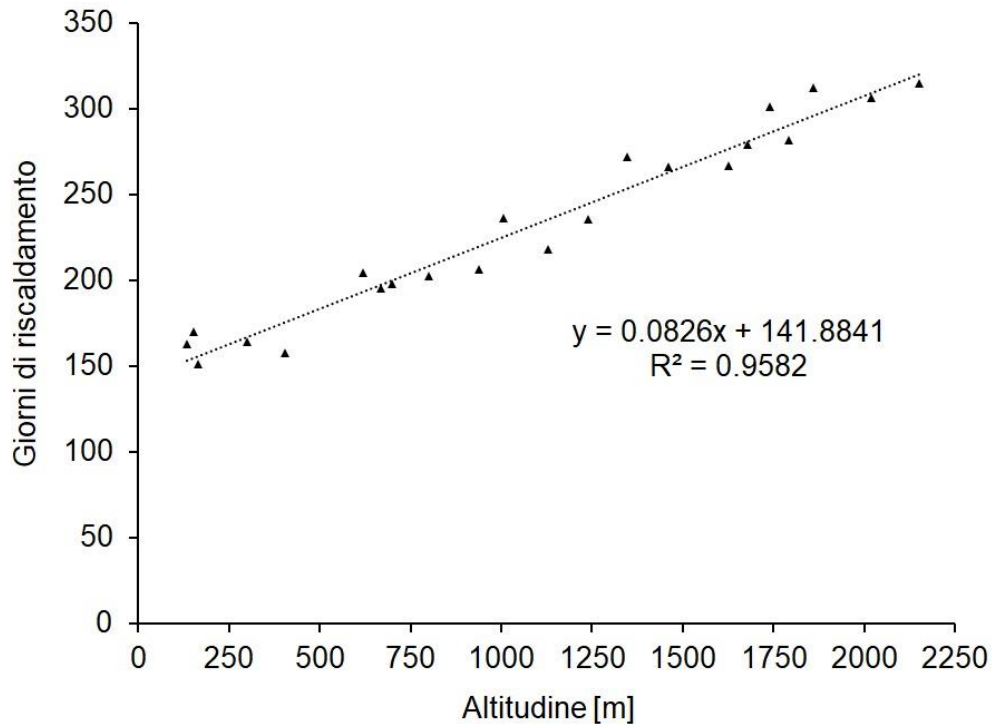


Figura 2.21 – Correlazione fra altitudine e durata della stagione di riscaldamento (t_c) espressa come numero di giorni con temperatura media inferiore a 12 °C. Fonte dati: ARPA Piemonte [23].

2.4.3 Risultati

In Figura 2.22 si riporta la mappa dei valori di durata della stagione di riscaldamento, con valori compresi fra circa 130 e 200 giorni su gran parte del territorio regionale. Per quanto riguarda i capoluoghi di Provincia, il valore più basso è registrato ad Alessandria (149.5 giorni, 2559 GG secondo DPR 412/93) e il più elevato a Cuneo (188.6 giorni, 3012 GG). Il valore attribuito a Torino è di 162.1 giorni (2617 GG secondo DPR 412/93).

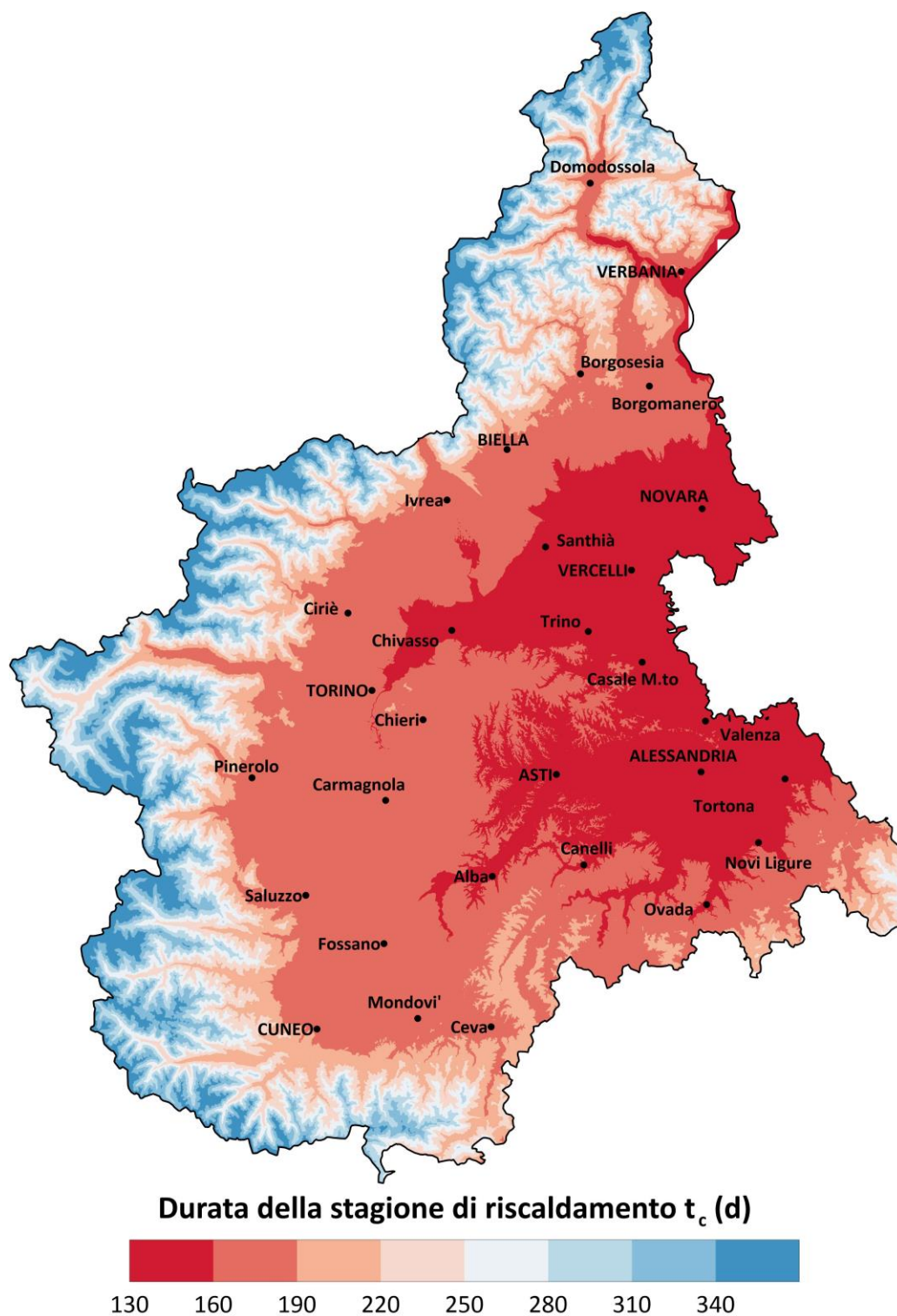


Figura 2.22 – Mappa della durata della stagione di riscaldamento (t_c) stimata.

2.5 Potenziale geotermico: risultati e discussione

Il potenziale geotermico a circuito chiuso, espresso come la quantità di calore estraibile con una sonda geotermica di profondità 100 m in una stagione di riscaldamento (MWh/anno), è stato calcolato utilizzando il metodo G.POT. Alcuni parametri sono stati imposti con un valore uguale su tutto il territorio regionale (Capitolo 2.1) mentre per altri parametri sito-specifici sono state assegnate le rispettive distribuzioni spaziali (mappatura dei parametri) utilizzando correlazioni con altre informazioni disponibili:

- Conducibilità e capacità termica del terreno (Capitolo 2.2), utilizzando correlazioni con la litologia risultante dalla Carta Geologica 1:250mila e con la soggiacenza di falda risultante da Piano di Tutela delle Acque;
- Temperatura indisturbata del terreno (Capitolo 2.3), sviluppando una correlazione lineare con la quota altimetrica;
- Durata della stagione di riscaldamento (Capitolo 2.4), sviluppando una correlazione lineare con la quota altimetrica.

La distribuzione del potenziale geotermico risente quindi di questi parametri e, in particolare, della conducibilità termica e della temperatura indisturbata del terreno.

2.5.1 Mappa a scala regionale

In Figura 2.23 si riporta la carta del potenziale geotermico su tutto il territorio Regionale, mentre nel successivo paragrafo 2.5.2 si riportano alcuni dettagli a scala più ravvicinata.

Considerando la superficie della Regione, il potenziale geotermico ha un valore mediano attorno a 10.5 MWh/anno, con buona parte del territorio regionale che presenta valori in un intervallo relativamente ristretto attorno ad esso (25° percentile pari a 9.5 MWh/anno e 75° percentile pari a 10.9 MWh/anno).

Il potenziale geotermico *closed-loop* risente principalmente di due parametri: la conducibilità termica e la temperatura indisturbata del terreno:

- Nell'area di pianura, il principale fattore limitante è rappresentato dalla conducibilità: come già evidenziato in precedenza (Capitolo 2.2.3), vi sono alcune aree caratterizzate da elevata soggiacenza di falda (il settore sud-ovest della Pianura Cuneese; gli altipiani di Fossano e del Beinale, il conoide fluvioglaciale su cui poggia l'area urbana torinese e, più a nord, il conoide della Vauda; gli anfiteatri morenici di Ivrea, del Verbano e dell'Orta) ed alcune aree collinari, soprattutto nel Monferrato, con litologie sedimentarie poco conduttive (gessi);
- Nelle aree montane, il fattore limitante è la bassa temperatura del terreno, che può però essere compensata da valori più elevati della conducibilità termica delle rocce presenti.

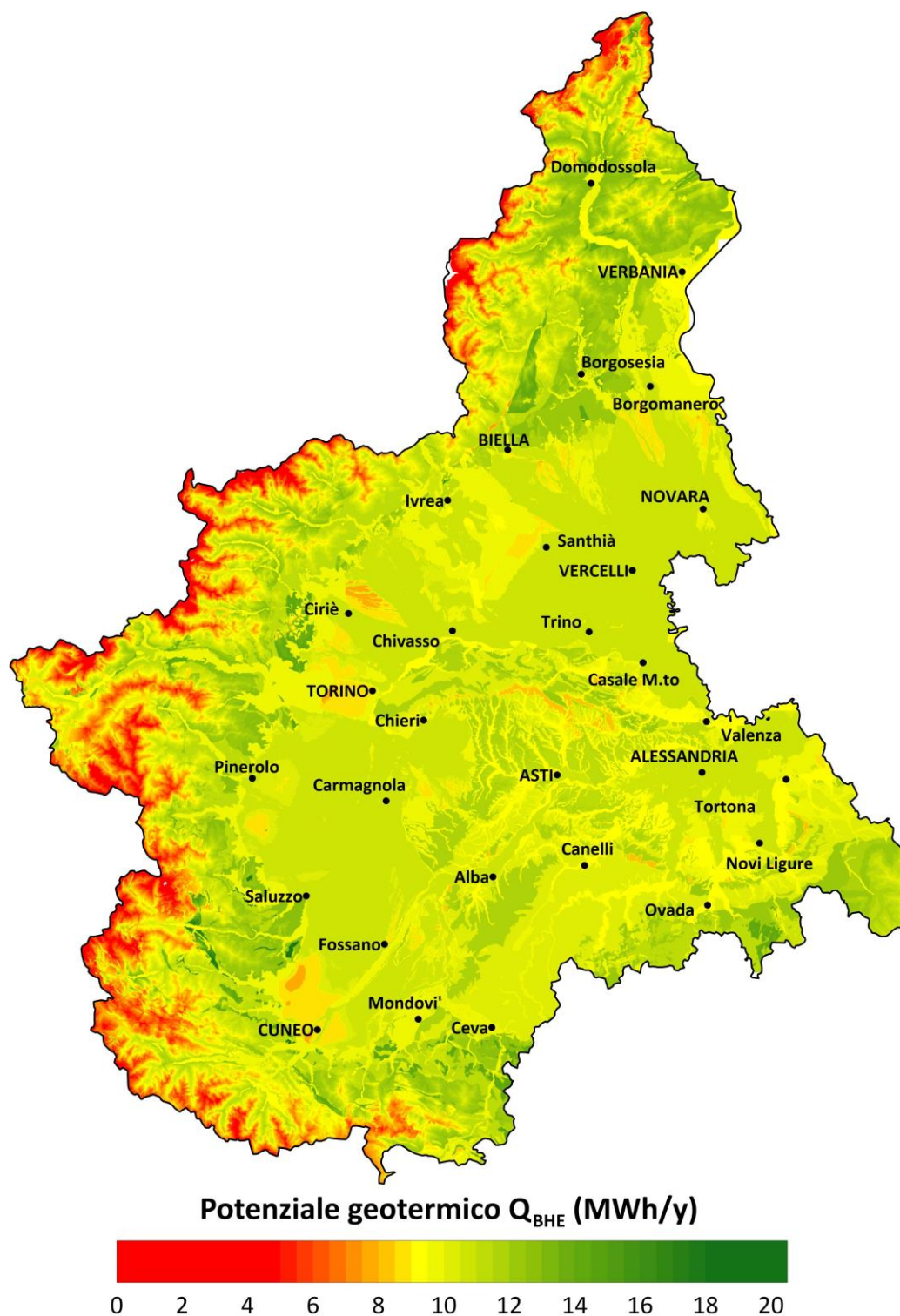


Figura 2.23 – Mappa del potenziale geotermico a circuito chiuso (Q_{BHE}) in scala 1:1.5M.

Nella carta in Figura 2.23 compaiono delle aree di ridotta estensione, con valori di potenziale inferiori a 5 MWh/anno. Si tratta però di aree con quota superiore ai 2000 m, per le quali la temperatura del sottosuolo è sottostimata dal modello matematico adottato (1 °C in più della temperatura media dell'aria). A quote così elevate, infatti, la copertura nevosa esercita un importante ruolo di isolante termico durante il periodo invernale: il risultato è che la

temperatura del sottosuolo può essere decisamente superiore alla media annua dell'aria. Per questo motivo, seguendo un approccio già adottato per la mappatura del potenziale geotermico in Valle d'Aosta [25], in Figura 2.24 sono state escluse dalla cartina tutte le aree con quota altimetrica superiore a 2000 m s.l.m. Ciò non significa che non sia possibile realizzare impianti geotermici al di sopra di tale quota - a Cervinia (AO), per esempio, è stato realizzato un impianto a 2400 m s.l.m. [64] – ma che la stima della temperatura del terreno a questa quota sicuramente richiede approfondimenti in situ.

La stima del potenziale geotermico con il metodo G.POT si basa sull'assunzione che il trasporto di calore nel terreno avvenga per sola conduzione. Viene quindi trascurato l'effetto dell'advezione e della dispersione termica, ovvero dei due ulteriori meccanismi di trasporto di calore che si attivano in presenza di un flusso di falda. Tale assunzione, peraltro comune ai già citati metodi di Eskilson [18] e ASHRAE [20], è conservativa poiché, come evidenziato in numerosi studi, la presenza di un flusso di falda può fornire un importante incremento della potenza termica scambiabile, anche dell'ordine del 20-30% [65]–[67]. Il contributo al trasporto di calore dato dal flusso di falda dipende dalla sua velocità e dalla sua estensione verticale (ovvero per quale intervallo di profondità la sonda viene attraversata dal flusso): si tratta di due parametri per i quali i dataset regionali disponibili (Piano di Tutela delle Acque) non forniscono un livello di dettaglio e un'affidabilità del dato sufficienti. Inoltre, allo stato attuale, è possibile tenere conto del contributo del flusso di falda nel dimensionamento di impianti a sonde geotermiche solo utilizzando complessi software per la simulazione di flusso e trasporto di calore nei mezzi porosi.

Si può quindi affermare che, per le pianure alluvionali del Piemonte, il potenziale geotermico risultante dal metodo G.POT rappresenti una stima conservativa del potenziale realmente presente. Questa considerazione, unita ai buoni valori di potenziale osservati, rende le pianure alluvionali del Piemonte (Cuneese, Torinese, Vercellese, Novarese e Alessandrino) aree con ottime potenzialità per lo sviluppo della geotermia *closed-loop*. All'interno delle pianure alluvionali, le aree ad elevata soggiacenza di falda presentano un potenziale geotermico leggermente inferiore a causa della minore conducibilità termica del terreno; tuttavia, il flusso di falda presente può compensare la scarsa conducibilità termica media. Nel caso dell'area urbana torinese, ad esempio, l'acquifero superficiale è generalmente caratterizzato da elevato spessore saturo (nell'ordine dei 20 m) e da elevate velocità del flusso sotterraneo.

Nelle aree montane a bassa quota (indicativamente sotto i 1200 m s.l.m.) si osservano i valori di potenziale geotermico più elevati, anche dell'ordine di 15 MWh/anno, grazie alla combinazione di elevati valori di conducibilità termica e di temperature non molto inferiori a quelle della pianura (10-12 °C a fronte di 12-15 °C). Al crescere della quota e quindi al ridursi della temperatura indisturbata, il potenziale geotermico si riduce.

Le aree collinari delle Langhe e del Monferrato presentano buoni valori di potenziale (attorno a 10-11 MWh/anno), con l'eccezione di alcune aree caratterizzate da litologie scarsamente conduttive (gessi).

A conclusione dell'analisi sul potenziale geotermico a scala regionale, al di sotto dei 2000 metri di quota non si individuano aree per le quali il potenziale geotermico sia così basso da

sconsigliare l'installazione di sistemi a circuito chiuso. Al di sopra dei 2000 m s.l.m., invece, la stima della temperatura del terreno con il metodo adottato in questa mappatura non può essere considerata affidabile e sono quindi necessari approfondimenti in situ.

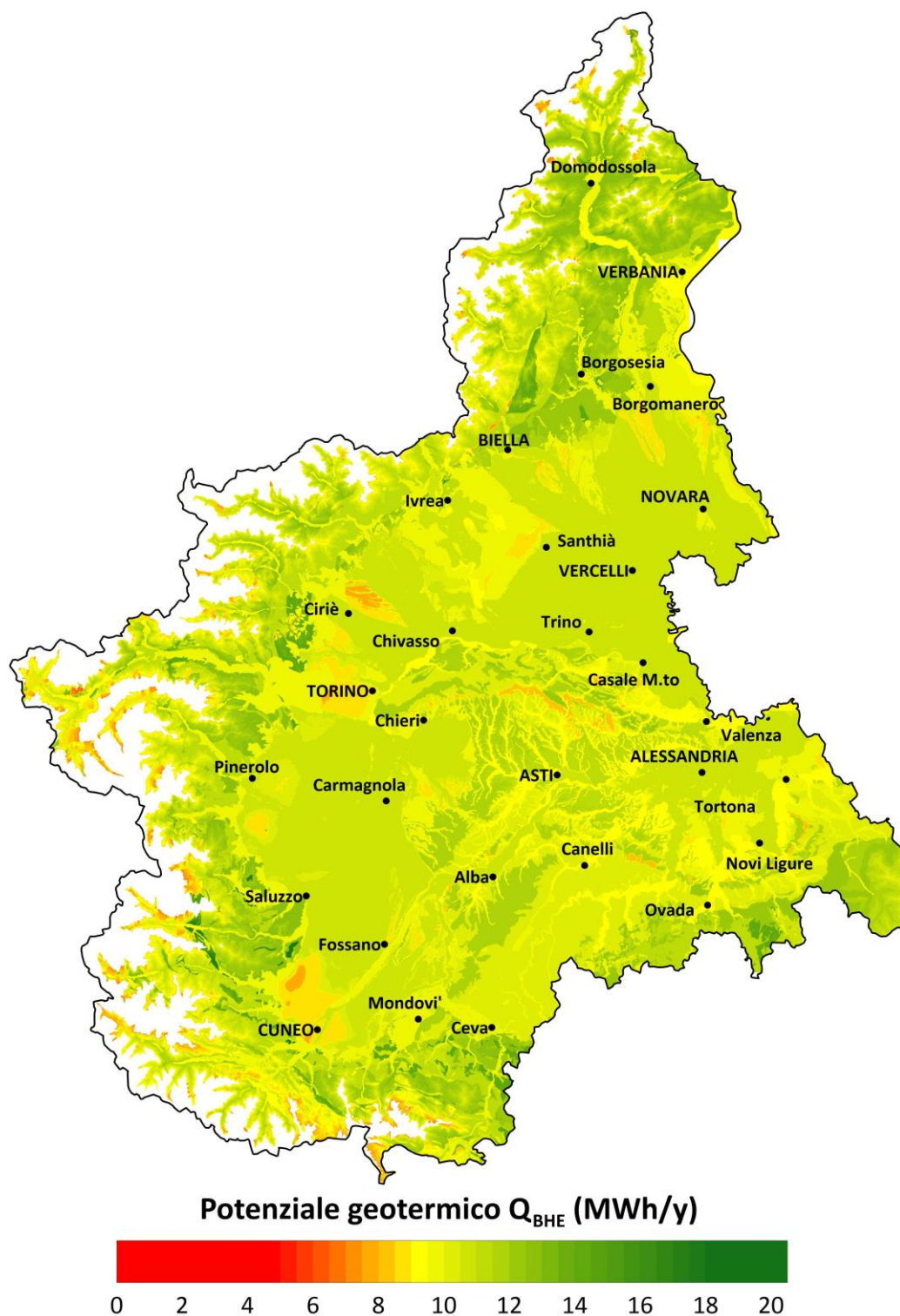


Figura 2.24 – Mappa del potenziale geotermico a circuito chiuso (Q_{BHE}), in scala 1:1.5M, con l'esclusione della fascia altimetrica sopra i 2000 m s.l.m.

2.5.2 Mappe di dettaglio in scala 1:500mila

In questo paragrafo sono riportate cinque mappe del potenziale geotermico ad una scala di maggior dettaglio (1:500mila se stampate in formato A4), che coprono le seguenti zone:

1. Torino, Asti, Vercelli, Biella (Figura 2.26);
2. Alessandria, Vercelli, Novara (Figura 2.27);
3. Novara, Verbania, Biella (Figura 2.28);
4. Torino e vallate torinesi (Figura 2.29);
5. Cuneo e vallate Cuneesi (Figura 2.30).

L'estensione di ciascuna cartina è rappresentata nel quadro d'unione in Figura 2.25.

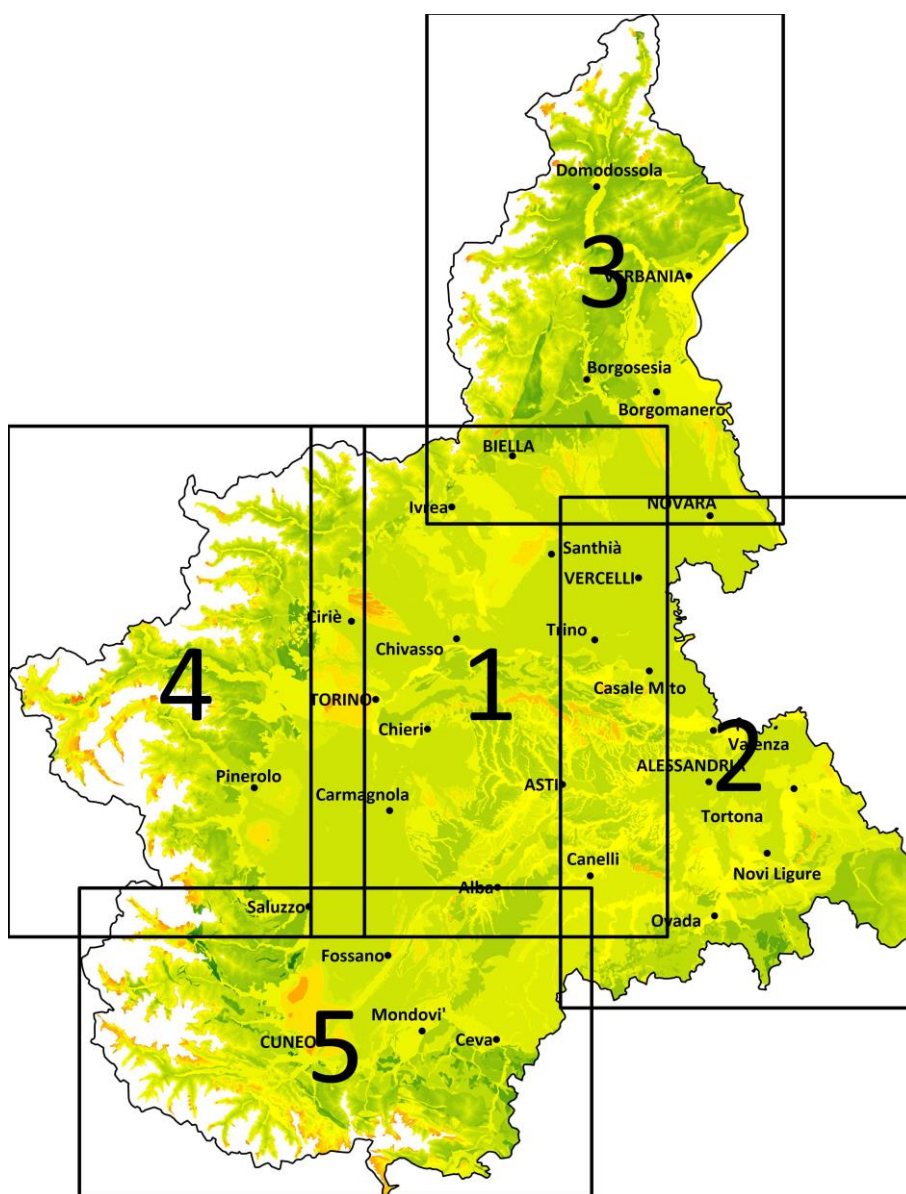


Figura 2.25 – Quadro d'unione delle mappe di dettaglio del potenziale geotermico da Figura 2.26 (n.1) a Figura 2.30 (n.5).

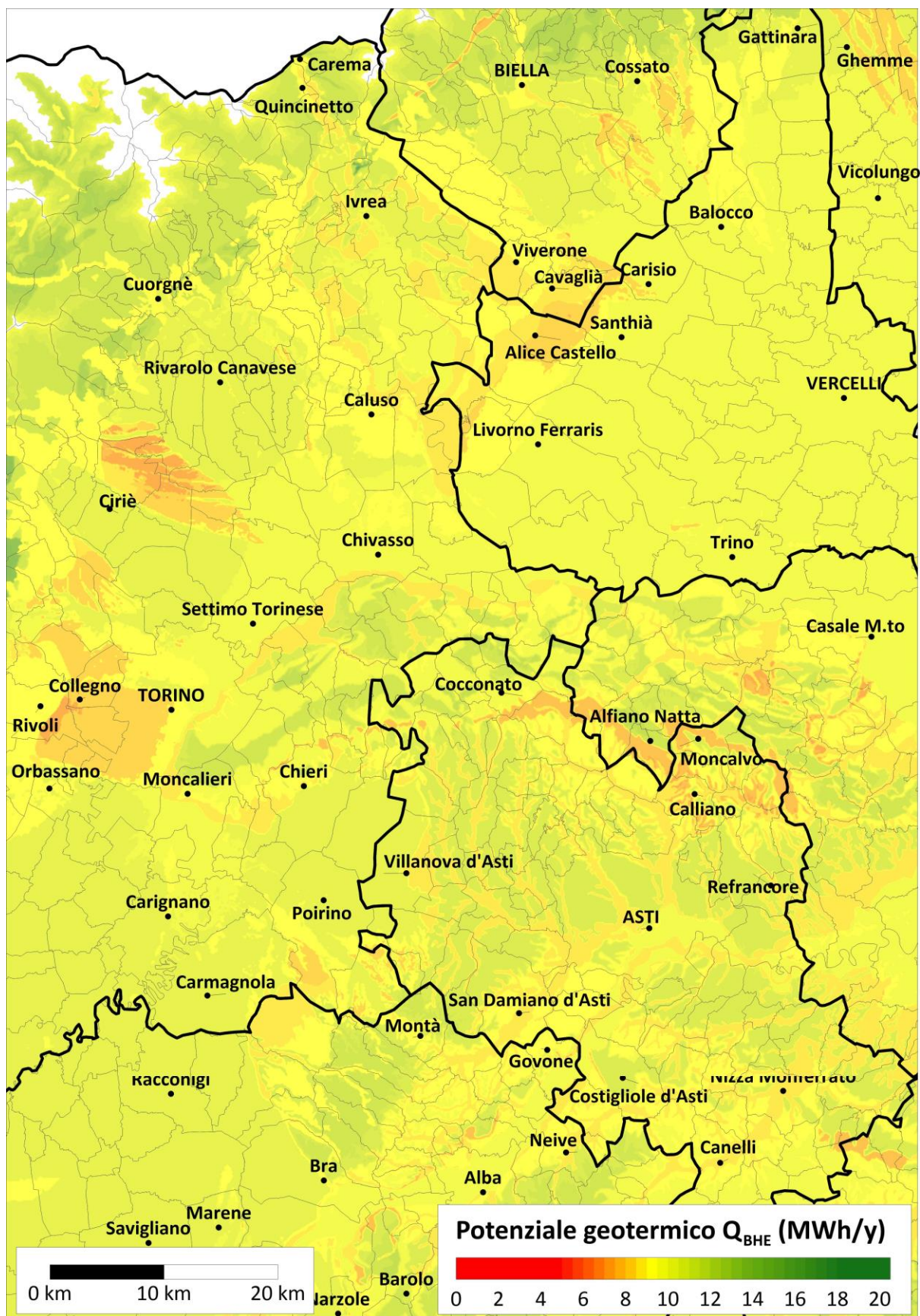


Figura 2.26 – Mappa del potenziale geotermico a circuito chiuso (Q_{BHE}): dettaglio centro Piemonte (AT, CN, TO, VC, BI, AL).

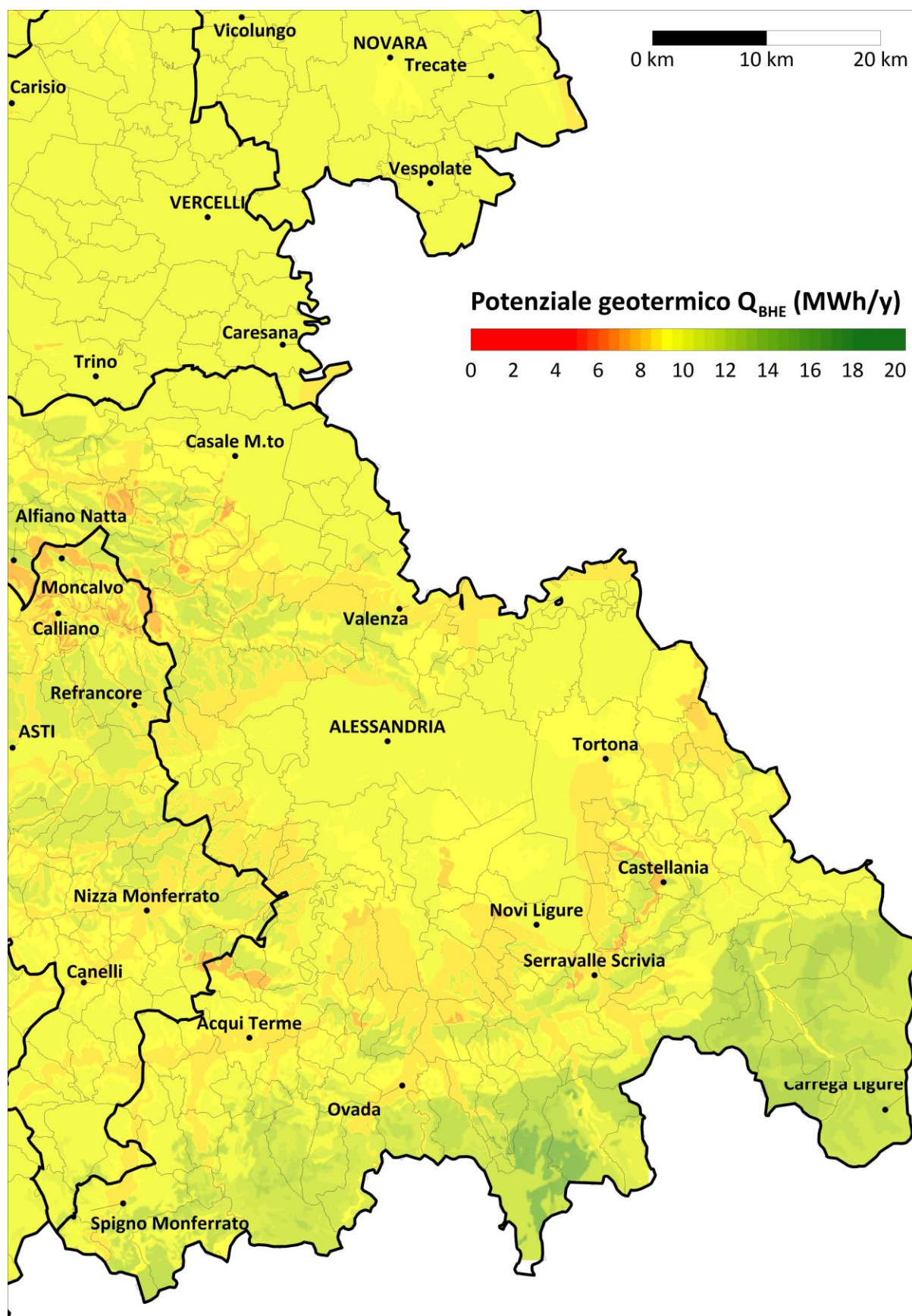


Figura 2.27 – Mappa del potenziale geotermico a circuito chiuso (Q_{BHE}): dettaglio Sud-Est Piemonte (AL, AT, VC).

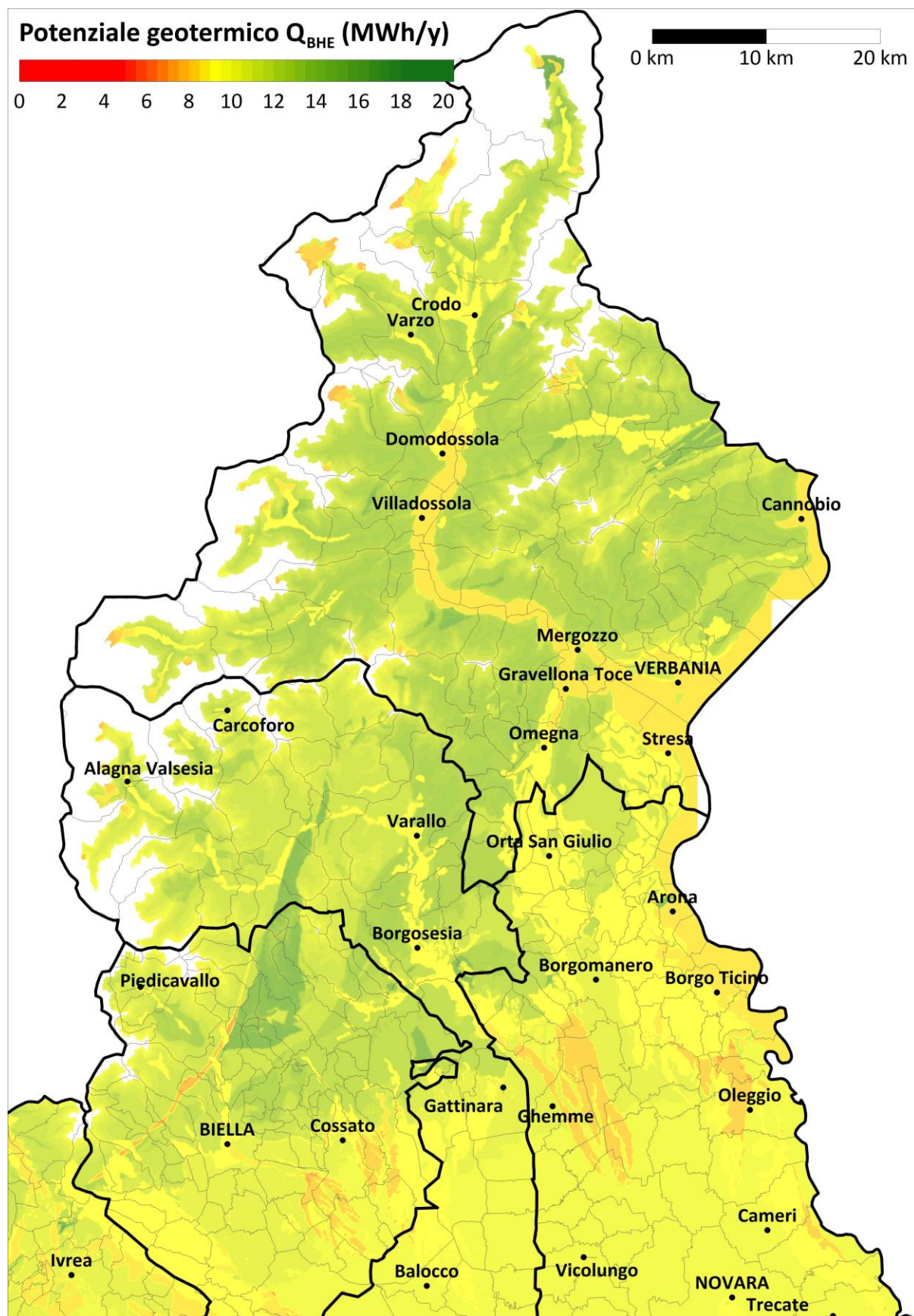


Figura 2.28 – Mappa del potenziale geotermico a circuito chiuso (Q_{BHE}): dettaglio Nord Piemonte (VB, NO, VC, BI).

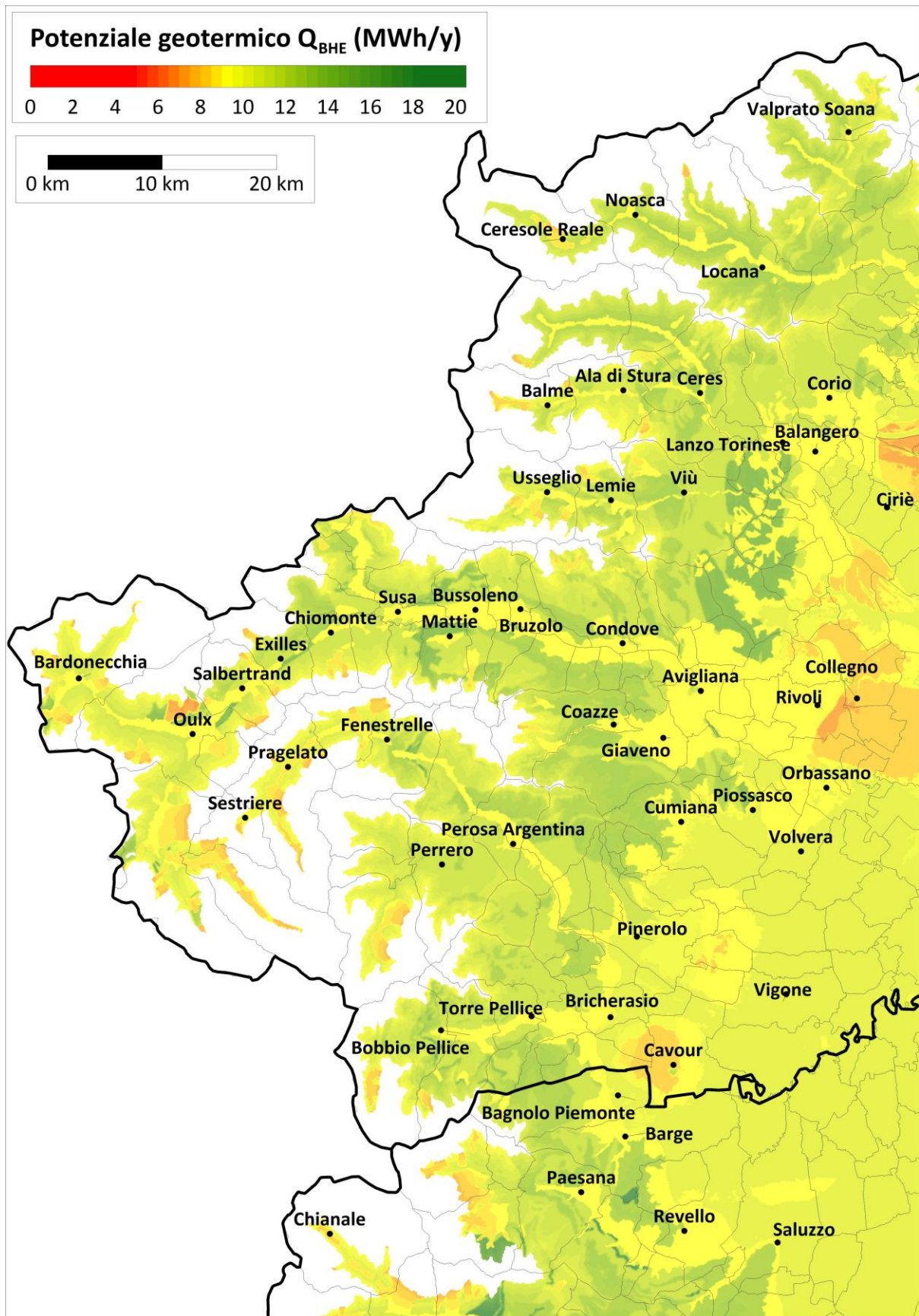


Figura 2.29 – Mappa del potenziale geotermico a circuito chiuso (Q_{BHE}): dettaglio della parte ovest del Torinese e Cuneese.

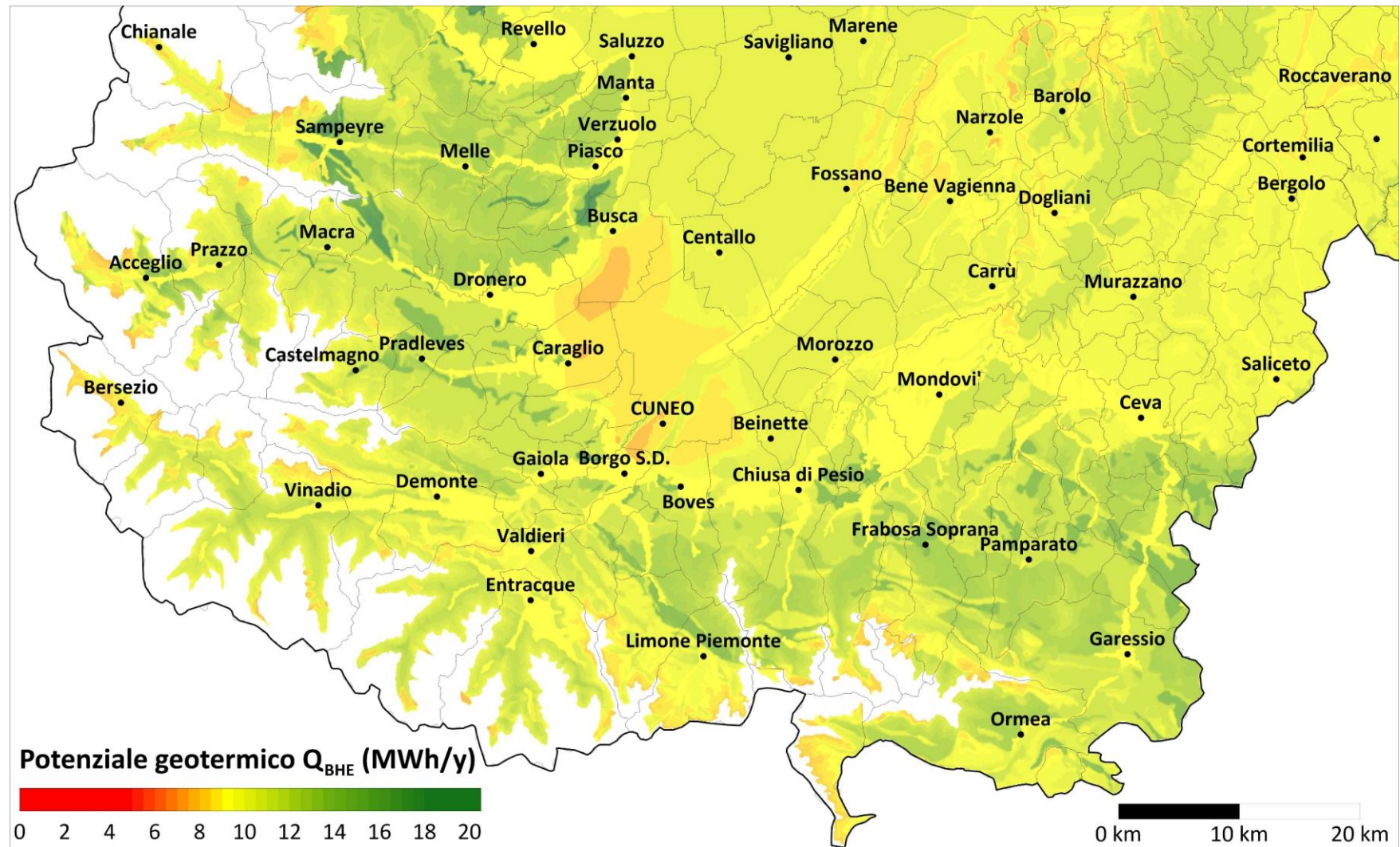


Figura 2.30 – Mappa del potenziale geotermico a circuito chiuso (Q_{BHE}) dettaglio del Cuneese.

2.5.3 Potenziale geotermico e popolazione

La mappatura del potenziale geotermico permette di comprendere qual è l'estensione delle aree con maggiore o minore propensione all'utilizzo della tecnologia geotermica *closed-loop*. Al fine di fornire indicazioni sulla popolazione che effettivamente può sfruttare il potenziale esistente, è stata effettuata una stima sulla base della densità di popolazione. Per ognuna delle 35672 sezioni censitarie dell'ISTAT in Piemonte è stato estratto un valore di potenziale geotermico (più precisamente nel baricentro del poligono della sezione), attribuendo questo valore all'intera popolazione al suo interno (con valori da 0 a 2056 abitanti residenti). In Figura 2.31 si riporta l'istogramma di frequenza che rappresenta i valori più comuni di potenziale geotermico e la popolazione corrispondente. Su una popolazione di 4.36 milioni di abitanti (dato del censimento 2011), risultano circa 25mila persone residenti in aree con un potenziale basso (inferiore a 8 MWh/anno), circa 67mila residenti in aree con potenziale molto alto (superiore a 12 MWh/anno), mentre il resto della popolazione risiede in aree con potenziale geotermico intermedio tra i due.

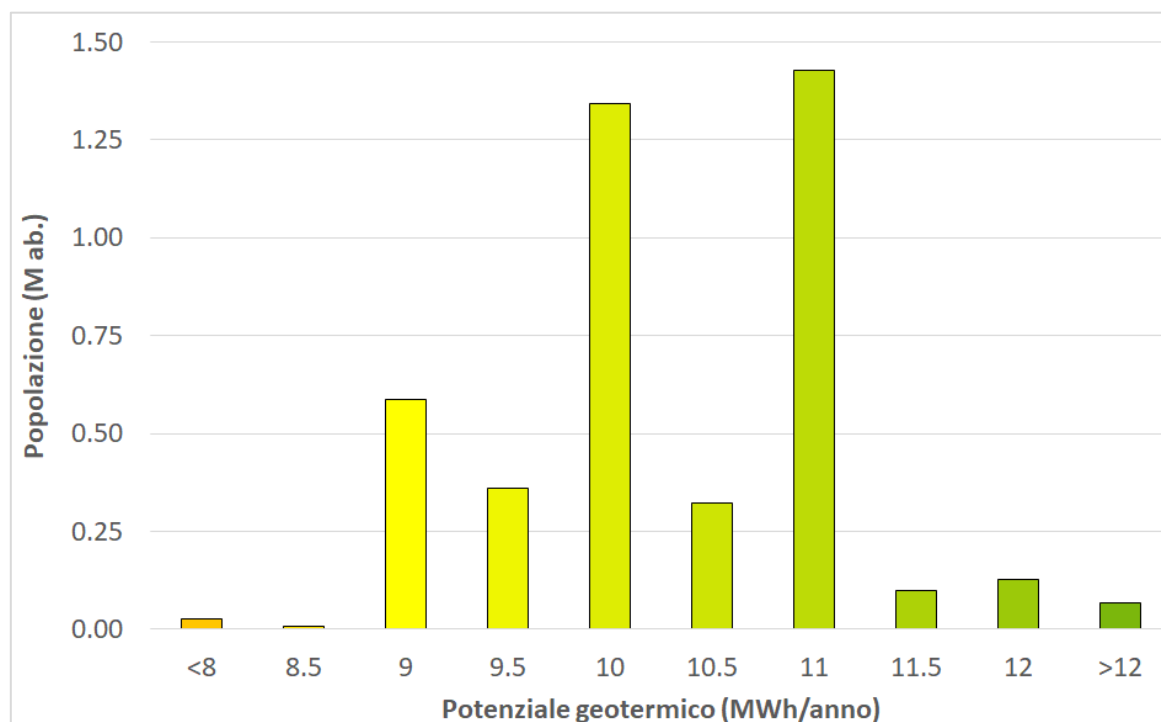


Figura 2.31 – Istogramma della popolazione e del potenziale geotermico closed-loop nella Regione Piemonte.

Approfondendo questa analisi sulle sezioni di censimento ISTAT, è possibile individuare sulla carta del potenziale geotermico le aree che presentano una densità abitativa elevata e un potenziale geotermico elevato o molto elevato.

Sono quindi state definite due tipologie di area:

- Le aree promettenti, con una densità abitativa di almeno 100 ab/km² e un potenziale geotermico compreso tra 9 e 10.5 MWh/anno, che occupano una superficie totale di 1529

km² nelle quali vive una popolazione di 3.514 milioni (pari all'81% della popolazione regionale);

- Le aree molto promettenti, con una densità abitativa di almeno 100 ab/km² e un potenziale geotermico superiore a 10.5 MWh/anno, che occupano una superficie totale di 715 km² e nelle quali vive una popolazione di 1.594 milioni di persone (pari al 37% della popolazione regionale).

Di seguito si riportano cinque mappe di maggior dettaglio (1:500mila se stampate in formato A4) delle aree più promettenti, che coprono le seguenti zone:

1. Torino, Asti, Vercelli, Biella (Figura 2.33);
2. Alessandria, Vercelli, Novara (Figura 2.34);
3. Novara, Verbania, Biella (Figura 2.35);
4. Torino e vallate torinesi (Figura 2.36);
5. Cuneo e vallate Cuneesi (Figura 2.37).

L'estensione di ciascuna cartina è rappresentata nel quadro d'unione in Figura 2.32.

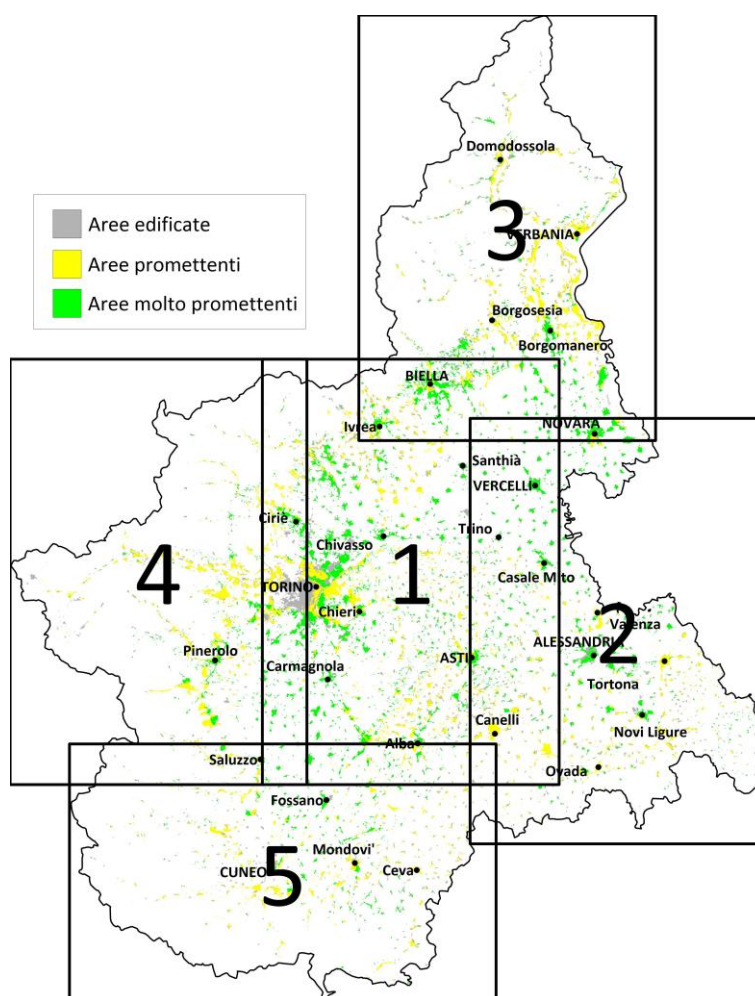


Figura 2.32 – Quadro d'unione delle mappe di dettaglio del potenziale geotermico da Figura 2.26 (n.1) a Figura 2.30 (n.5).

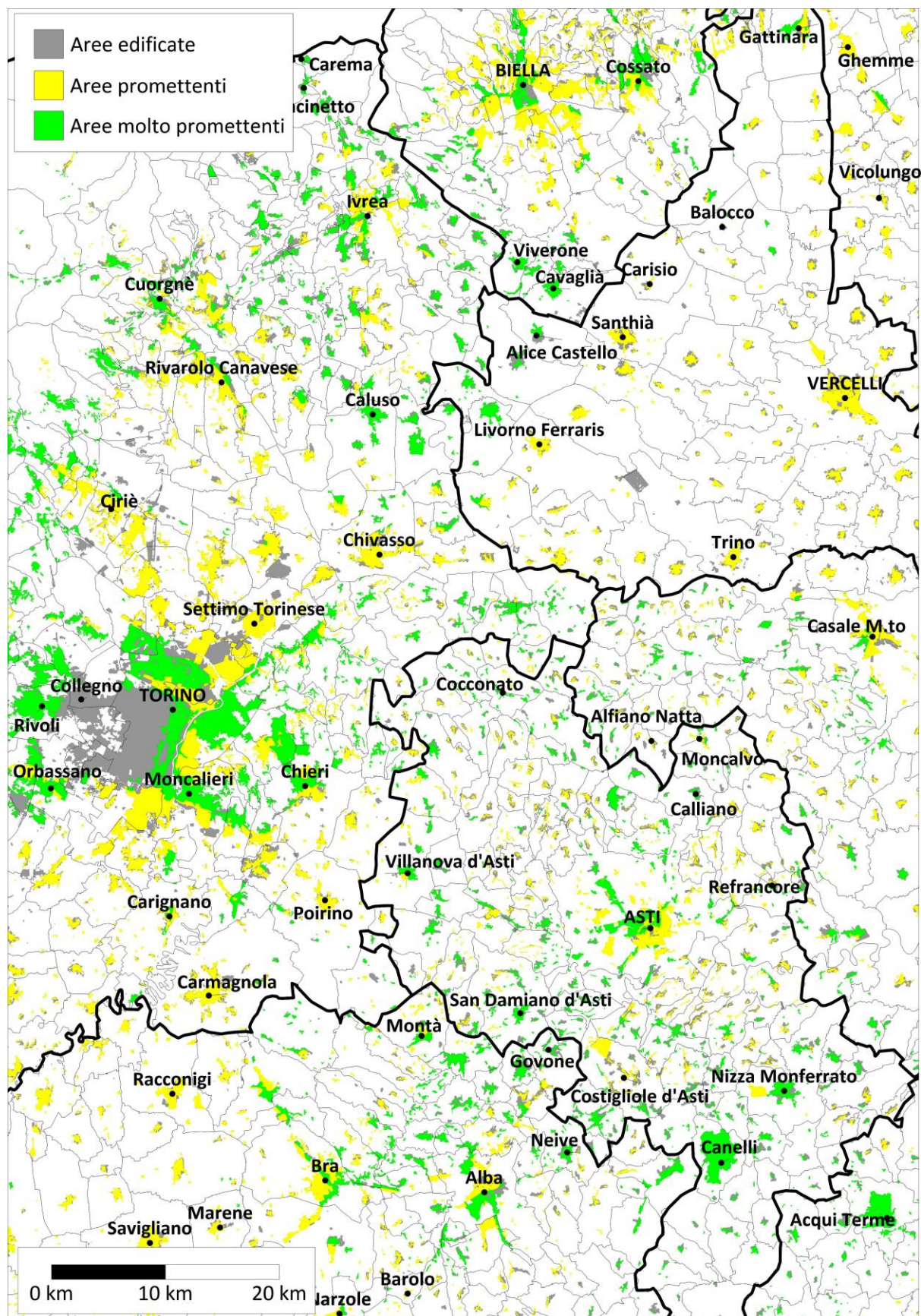


Figura 2.33 – Mappa delle aree più promettenti per la geotermia: dettaglio centro Piemonte (AT, CN, TO, VC, BI, AL).

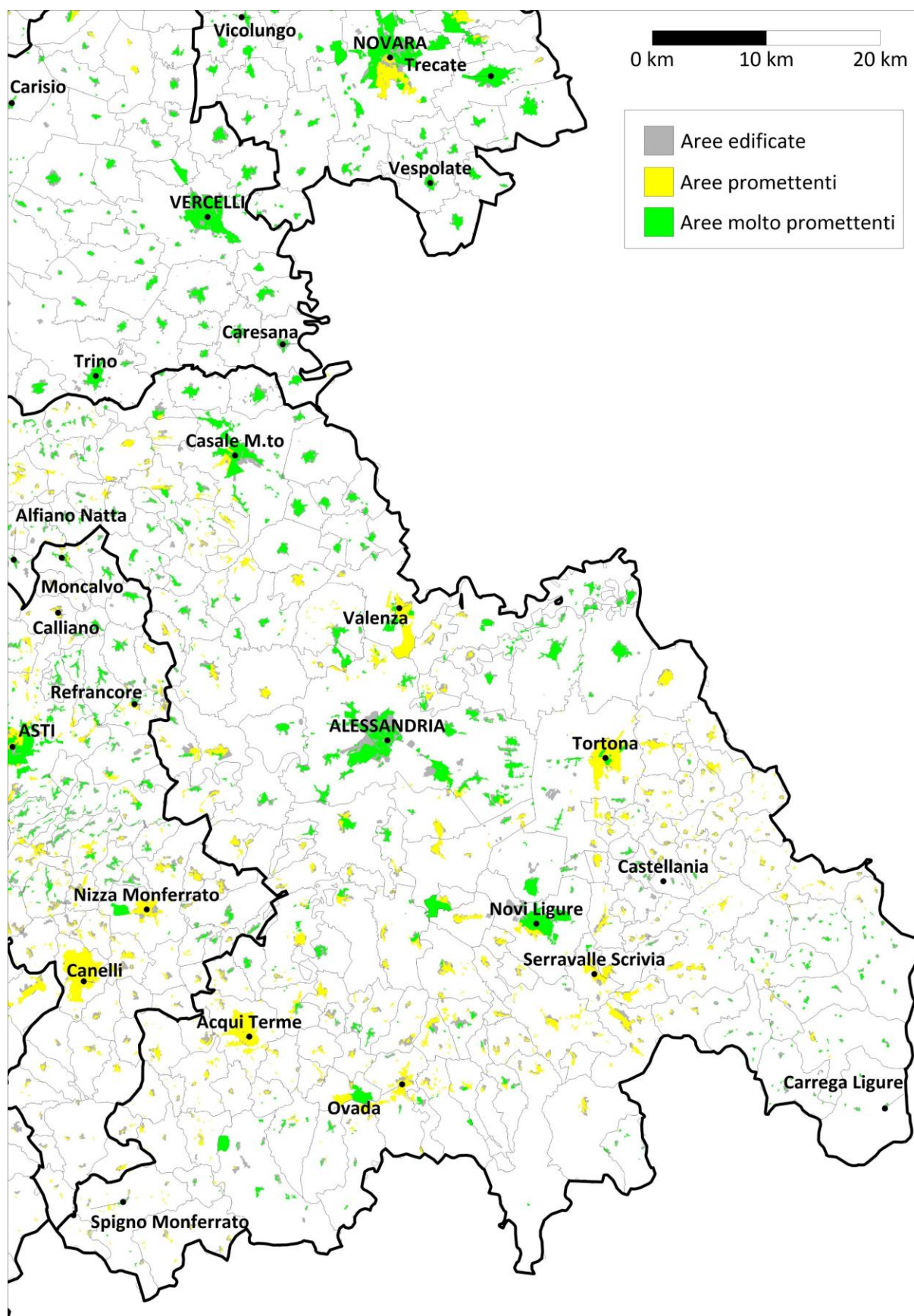


Figura 2.34 – Mappa delle aree più promettenti per la geotermia: dettaglio Sud-Est Piemonte (AL, AT, VC).

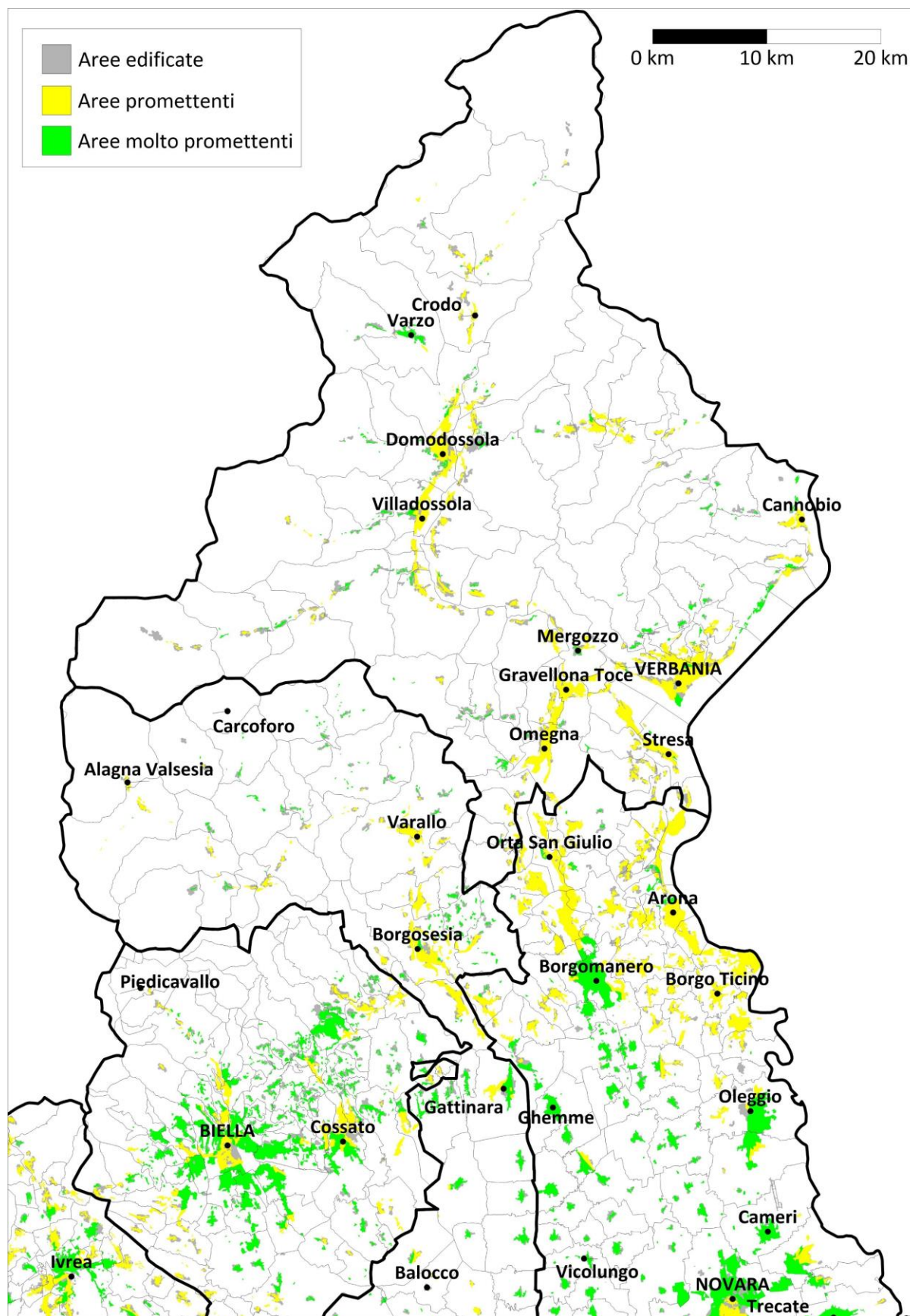


Figura 2.35 – Mappa delle aree più promettenti per la geotermia: dettaglio Nord Piemonte (VB, NO, VC, BI).

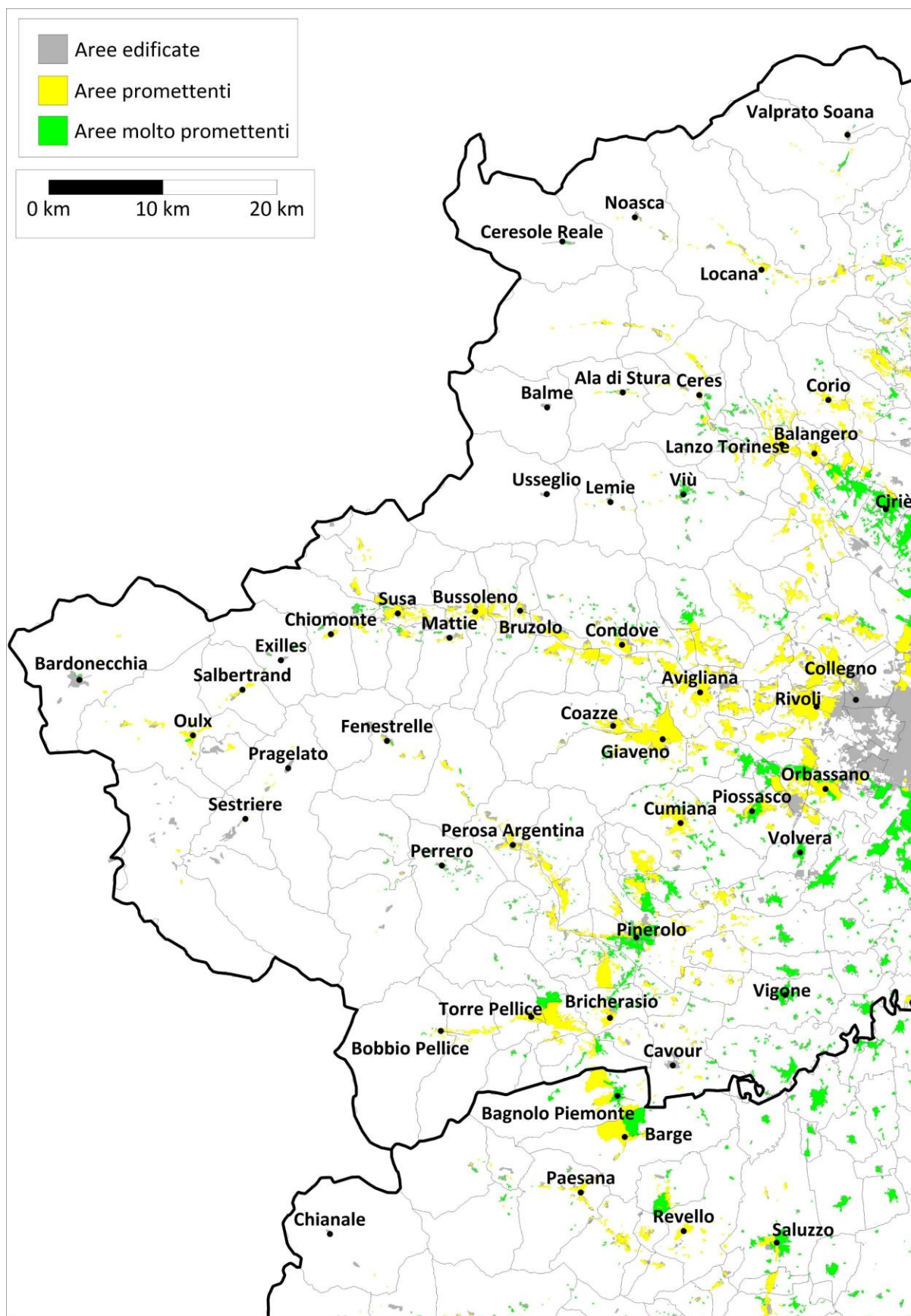


Figura 2.36 – Mappa delle aree più promettenti per la geotermia: dettaglio della parte ovest del Torinese e Cuneese.

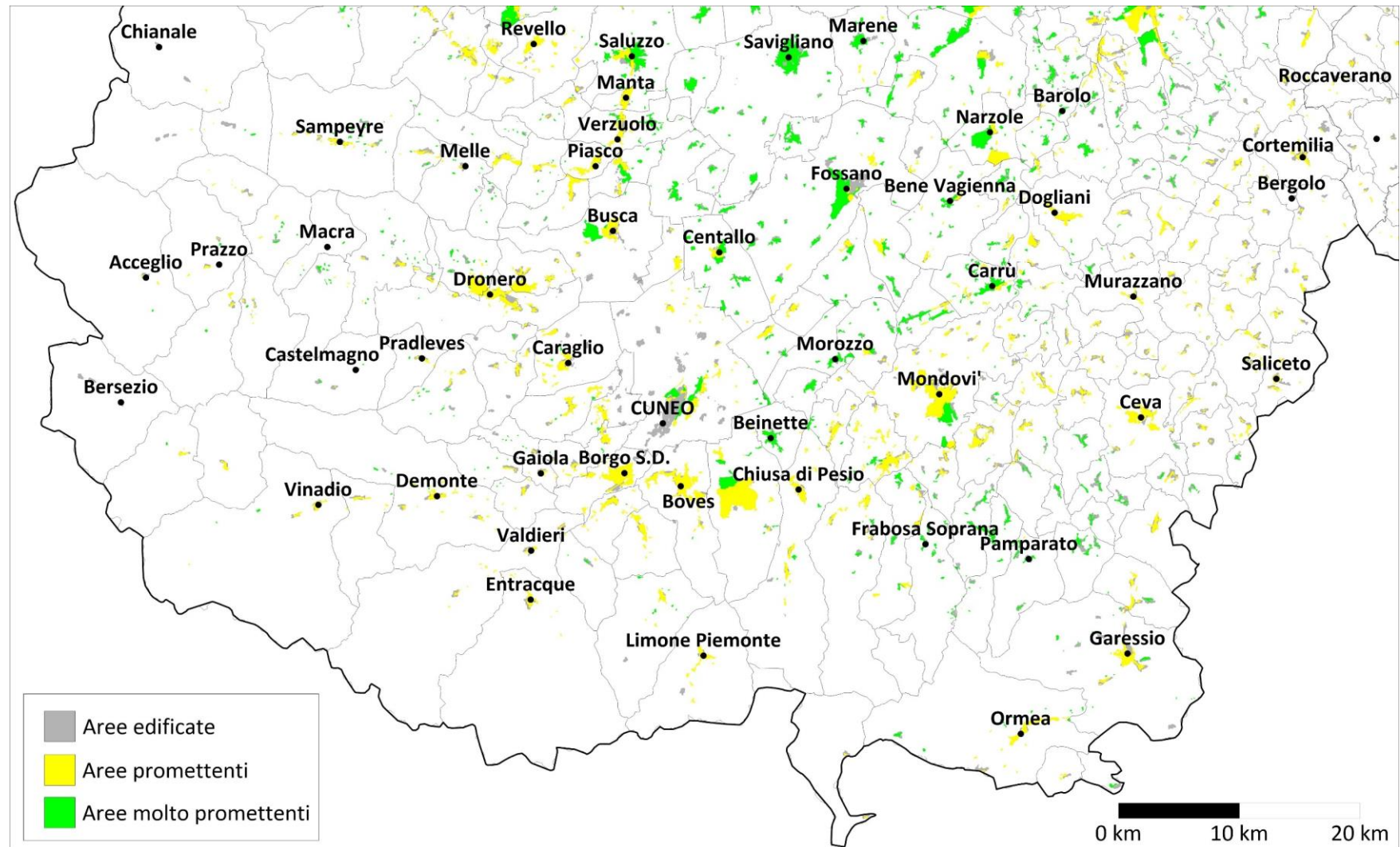


Figura 2.37 – Mappa delle aree più promettenti per la geotermia: dettaglio del Cuneese.

2.5.4 Significato tecno-economico del potenziale geotermico: un esempio

Il potenziale geotermico *closed-loop* è un indicatore della potenza media (quantità di calore per stagione di riscaldamento) che una sonda di profondità 100 metri è in grado di scambiare con il terreno. Questo indicatore può quindi essere utilizzato per stimare il numero di sonde necessario per soddisfare un certo carico termico.

Anticipando i risultati dell'analisi economica descritta nel capitolo successivo, si prende ad esempio un condominio con 10 appartamenti e un volume riscaldato di 3074 m³.

Come riportato in Appendice A.2.2, il fabbisogno di riscaldamento di questo edificio è di 101.25 MWh/anno se si trova a Torino (2617 Gradi/Giorno), 128.77 MWh/anno se si trova a Cuneo (3012 GG) e di 152.35 MWh/anno se si trova a Oulx (4100 GG).

Il valore di potenziale geotermico in queste 3 località è pari, rispettivamente, a 10 MWh/anno a Torino, 9 MWh/anno a Cuneo e 9.2 MWh/anno a Oulx.

Il numero di sonde da 100 m necessarie sarà quindi, arrotondando per eccesso all'unità superiore: 11 a Torino, 15 a Cuneo e 17 a Oulx.

L'incremento del numero di sonde si ripercuote sui costi totali: ipotizzando un costo di perforazione e realizzazione di 50 €/m + IVA si otterrà un totale di 55000 € + IVA a Torino, 75000 € + IVA a Cuneo (+36.4%) e 85000 € + IVA a Oulx (+54.5%). Anche lo spazio necessario cambia: ipotizzando una distanza tra le sonde di 8 m, sarà necessaria una superficie minima di 384 m² (3 file da 4 sonde, 24x16 m) a Torino e una superficie massima di 640 m² (3 file da 6 sonde, 40x16 m) a Oulx, ovvero il 66.7% di spazio in più.

Questo esempio permette di comprendere inoltre qual è il principale fattore limitante all'utilizzo delle sonde geotermiche in ambiente urbano, ovvero lo spazio a disposizione.

Altre località con caratteristiche climatiche simili possono essere scelte per comprendere qual è l'effetto del potenziale geotermico.

Tabella 2.4 – Esempi dell'impatto del potenziale geotermico closed-loop sulla spesa e la superficie necessaria per le sonde geotermiche in un condominio da 10 appartamenti.

Località	Gradi giorno	Potenziale geotermico (MWh/anno)	Numero di sonde e disposizione		Costo sonde (€ + IVA)	Superficie richiesta sonde (m ²)
Torino	2617	10	11	3x4	55000	384
Collegno (TO)	2646	7.8	13	3x5	65000	512
Masserano (BI)	2748	11.6	9	3x3	45000	256
Cuneo	3012	9	15	3x5	75000	512
Pino Torinese (TO)	3096	11.7	12	3x4	60000	384
Vauda Canavese (TO)	2948	7.8	17	3x6	85000	640
Oulx (TO)	4100	9.2	17	3x6	85000	640
Argentera (CN)	4403	8.2	19	4x5	95000	768
Trasquera (VB)	3734	12.2	13	3x5	65000	512

3 Analisi tecno-economica e ambientale

Lo sviluppo della geotermia a bassa entalpia è legato non solo alla disponibilità della risorsa (il potenziale geotermico), ma soprattutto alla fattibilità tecnico-economica dei singoli interventi. In questo senso una distinzione fondamentale deve essere operata tra le installazioni in edifici di nuova costruzione e le riqualificazioni energetiche di edifici esistenti. La legislazione italiana, con il D.Lgs. 28/2011, prevede che almeno il 50% della somma di tutti i consumi termici e, in particolare, almeno il 50% della produzione di acqua calda sanitaria sia prodotta da fonti rinnovabili sia nel caso di edifici nuovi sia nel caso di quelli sottoposti a ristrutturazioni importanti. Il D.I. 26 giugno 2015, detto anche “Decreto Requisiti Minimi”, esplicita quali casistiche rientrano nella definizione di “ristrutturazioni importanti” (di primo e di secondo livello) e quali no.

La necessità di soddisfare i requisiti di produzione da fonti rinnovabili in seguito al D.Lgs. 28/2011 ha portato ad una grande crescita dell'utilizzo delle pompe di calore, soprattutto nelle nuove costruzioni. In questa analisi, considerato il basso tasso di ricambio del patrimonio edilizio italiano, si è scelto, tuttavia, di valutare unicamente gli interventi sul parco edilizio esistente, con due ipotesi: un intervento massiccio che coinvolge l'involucro edilizio (“ristrutturazione importante”) e un intervento di sostituzione dell'impianto termico accompagnato da pochi miglioramenti dell'involucro (“riqualificazione energetica”). Tuttavia, è necessario considerare che un edificio, in seguito a un intervento di ristrutturazione importante, raggiunge prestazioni energetiche paragonabili a quelle di un edificio di nuova costruzione, a causa dei requisiti piuttosto stringenti imposti dalla legislazione vigente (ad esempio in merito alla trasmittanza dell'involucro opaco e trasparente). La seconda casistica, invece, potrebbe essere propria di un edificio sottoposto a vincoli architettonici o che, in ogni caso, non può subire interventi di miglioramento dell'involucro.

Per il rispetto dei requisiti di produzione di energia da fonte rinnovabile sono disponibili altre soluzioni tecniche: le pompe di calore aerotermiche e le caldaie a biomassa (legna o pellet). Nel caso di una riqualificazione energetica oppure, per ristrutturazioni importanti, nel caso di dimostrata impossibilità tecnica ad installare impianti per produzione da fonte rinnovabile, è ancora possibile installare caldaie a combustibile fossile (metano, GPL, gasolio). Di conseguenza, la soluzione geotermica può essere soggetta alla comparazione con le sopra citate alternative. Nell'analisi delle possibili soluzioni, non sono stati presi in considerazione i sistemi ibridi formati da caldaia e pompa di calore aerotermica per le ragioni approfondite in Appendice A.9.

In questo capitolo si presenta, quindi, un'analisi tecno-economica e ambientale di confronto tra le diverse tecnologie di riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria in una serie di contesti (tipologie di edifici e zone climatiche) che sono stati identificati come rappresentativi di una buona parte del patrimonio edilizio piemontese (Paragrafo 3.1). Per ogni caso studio è stata condotta un'analisi energetica ed economica al fine di determinare i costi di installazione e operativi per ciascuna tipologia di impianto ipotizzata. Nel Paragrafo 3.2 si descrive sinteticamente l'analisi energetica condotta con un software di calcolo semi-stazionario

al fine di determinare i fabbisogni energetici dell'edificio e i consumi energetici risultanti con ciascuna tipologia impiantistica. Successivamente, nel Paragrafo 3.3 si descrive il metodo e le assunzioni utilizzate per la quantificazione dei costi di installazione e operativi. Nel Paragrafo 3.5, invece, si definiscono gli indicatori economici scelti, quali il LCOH (*Levelized Cost of Heating*, "Costo livellato dell'energia termica") e il costo annuo, per confrontare le varie soluzioni tecniche e, quindi, identificare in quali contesti le pompe di calore geotermiche risultano un'opzione economicamente vantaggiosa. I risultati di questa analisi sono stati riportati sinteticamente nel Paragrafo 3.5.3. Infine, il Paragrafo 3.7 presenta la quantità di gas ad effetto serra e di inquinanti che verrebbero emessi da ognuna delle casistiche considerate. Nel Paragrafo 0, invece, è stata analizzata la possibilità di fornire anche un servizio di raffrescamento integrato a quello di riscaldamento ed è stato condotto un confronto tra le due soluzioni proposte.

3.1 Casi studio

L'analisi tecno-economica e ambientale è stata condotta su due tipologie edilizie: un edificio unifamiliare isolato (villetta) e un edificio multifamiliare (piccolo condominio composto da dieci appartamenti), le cui caratteristiche dimensionali più importanti sono riassunte in Tabella 3.1, mentre in Figura 3.1 e Figura 3.2 sono rappresentate le viste in pianta.

Tabella 3.1 - Dati geometrici degli edifici-tipo considerati.

Classe di dimensione edilizia	Edificio monofamiliare	Edificio multifamiliare
Volume lordo climatizzato [m ³]	679	3074
Superficie utile di pavimento [m ²]	156	-
Superficie lorda di pavimento [m ²]	-	934
Rapporto di forma [m ⁻¹]	0.73	0.54
Numero piani [-]	1	5
Numero appartamenti [-]	1	10

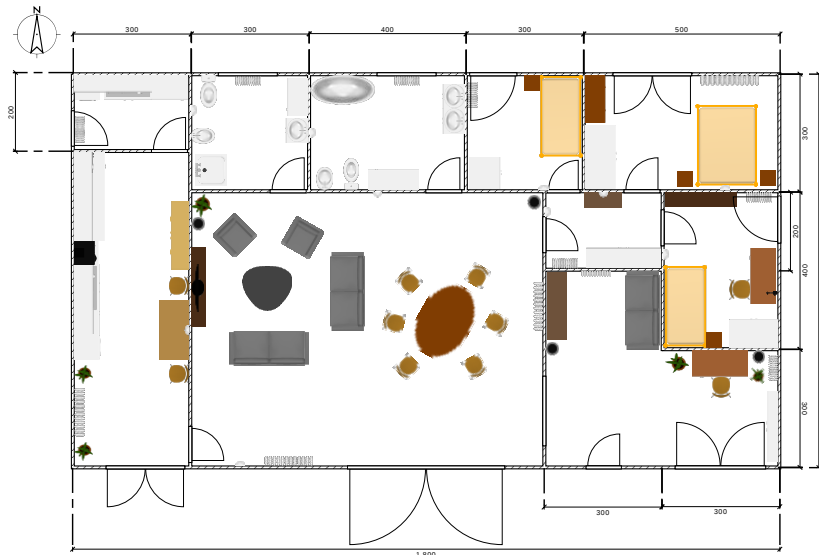


Figura 3.1 – Vista in pianta dell'edificio unifamiliare.

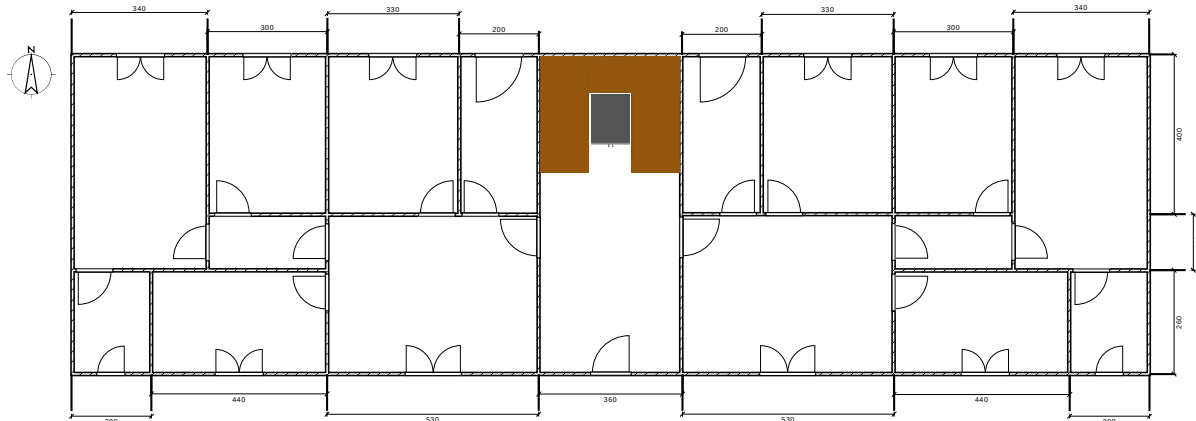


Figura 3.2 – Vista in pianta di un piano dell'edificio multifamiliare

Si è ritenuto, infatti, che queste due tipologie possano convenientemente rappresentare la maggior parte degli edifici residenziali. In particolare, è importante considerare applicazioni di taglia diversa per le quali possono realizzarsi, ad esempio, economie di scala molto differenti fra una tecnologia e l'altra.

Le caratteristiche e tipologie costruttive dell'involucro edilizio sono state tratte dai report dei progetti TABULA ed EPISCOPE [68], [69], finanziati dall'Unione Europea e ai quali ha partecipato il Politecnico di Torino – Dipartimento di Energia (DENERG). Nell'ambito di questo progetto sono state analizzate le tipologie edilizie più diffuse in Italia e in Piemonte suddividendole in merito al periodo di costruzione ed evidenziandone le caratteristiche termofisiche più comuni. Sulla base dei censimenti del patrimonio edilizio disponibili, sono state considerate le tipologie costruttive tipiche degli anni '60-'70, al quale risale buona parte degli edifici esistenti. Da queste tipologie costruttive sono state tratte le proprietà termofisiche dell'involucro opaco e dei componenti trasparenti, i cui valori di trasmittanza utilizzati sono stati richiamati in Tabella 3.2.

Tabella 3.2 - Caratteristiche termofisiche tipiche degli anni '60 e '70 secondo il rapporto Tabula/Episcopo [68].

Tipologia	Descrizione	U [W/(m ² K)]
Chiusura opaca superiore (copertura)	Tetto a falde in laterizio	2.20
Chiusura opaca orizzontale superiore (solaio verso sottotetto non climatizzato)	Solaio latero-cementizio	1.65
Chiusura opaca orizzontale inferiore	Solaio latero-cementizio	1.30
Chiusura opaca verticale (parete)	Muratura a cassa-vuota con mattoni pieni (paramano) e forati (40 cm)	1.26
Chiusura trasparente (finestra)	Vetro-camera con intercapedine d'aria, telaio in legno	2.8

Per ognuno degli edifici tipo sono stati simulati i seguenti interventi, denominati secondo quanto previsto dal Decreto Requisiti Minimi:

- “Riqualificazione energetica”, costituita dalla sostituzione del generatore del sistema di riscaldamento/raffrescamento e dei componenti trasparenti, nonché dall’installazione di pannelli fotovoltaici;
- “Ristrutturazione importante” (di primo livello) dell’involucro, comprendente il precedente e tale da soddisfare i requisiti minimi per ottenere le detrazioni fiscali più rilevanti (Ecobonus 65% e Superbonus 110%).

Per quanto riguarda l’involucro edilizio, i requisiti minimi di cui al suddetto decreto (trasmissioni massime ammesse) dipendono dalla zona climatica ex DPR 412/93 del Comune nel quale si trova l’edificio. Poiché il Piemonte ricade interamente nelle zone E ed F, si richiamano in Tabella 3.3 i requisiti stabiliti per queste due zone climatiche.

Tabella 3.3 – Estratto, per le fasce climatiche di interesse, della Tabella 1 “Valori di trasmittanza massimi consentiti per l’accesso alle detrazioni” dell’Allegato E del decreto 6 agosto 2020.

Tipologia di intervento	Zona climatica	Trasmittanza Massima [W/(m ² K)]
i. Strutture opache orizzontali: isolamento coperture (calcolo secondo le norme UNI EN ISO 6946)	E	0.20
	F	0.19
ii. Strutture opache orizzontali: isolamento pavimenti (calcolo secondo le norme UNI EN ISO 6946)	E	0.25
	F	0.23
iii. Strutture opache verticali: isolamento pareti perimetrali (calcolo secondo le norme UNI EN ISO 6946)	E	0.23
	F	0.22
iv. Sostituzione di finestre comprensive di infissi (calcolo secondo le norme UNI EN ISO 10077-1)	E	1.30
	F	1.00

La “ristrutturazione importante” è l’intervento sicuramente migliore dal punto di vista termotecnico perché riduce i fabbisogni termici dell’edificio e, quindi, permette l’installazione di sistemi meno energivori. Sebbene consigliabile, non sempre ciò è possibile, come nel caso di edifici soggetti a particolari vincoli architettonici o con conformazioni geometriche che renderebbero eccessivamente alti i costi di posa dell’isolante. Per questo motivo si è deciso di considerare anche l’intervento denominato “riqualificazione energetica”.

Inoltre, si è scelto di sostituire solo ed unicamente il generatore e non, ad esempio, il sistema di emissione o quello di distribuzione nell’ottica di poter garantire un intervento di ristrutturazione il meno invasivo possibile per gli inquilini dello stabile. Questa decisione sicuramente incentiva la fattibilità dell’intervento dal punto di vista del cliente; tuttavia, introduce alcune complessità tecniche non irrilevanti. La maggior parte degli edifici esistenti presenta, infatti, sistemi di emissione con radiatori ad alta temperatura, con temperature di mandata tipiche di 70-80 °C. Tali temperature, come già evidenziato nel Paragrafo 1.1.3, sono poco compatibili con l’utilizzo di pompe di calore (e con le caldaie a condensazione se si vuole ottenere il massimo rendimento). Vi sono determinate condizioni, tuttavia, come il sovradimensionamento dei radiatori, che permettono di utilizzare questa tipologia di terminale anche con temperature sostenibili per una pompa di calore: questo aspetto è approfondito in Appendice A.7.

La scelta di non considerare la sostituzione di questa tipologia di terminali ha implicitamente escluso da questa prima parte dell’analisi il soddisfacimento del fabbisogno di raffrescamento estivo, che non è possibile effettuare con i radiatori. Questa assunzione è giustificata dal fatto che in Piemonte sono ancora poco diffusi e utilizzati i sistemi di raffrescamento, come peraltro confermato dalle recenti statistiche ISTAT [70]. Il fatto di non tenere conto dei fabbisogni di raffrescamento rende peraltro più cautelativa l’analisi economica, in quanto la presenza di un carico termico estivo incrementa il margine di risparmio ottenuto con una pompa di calore geotermica, rispetto all’utilizzo di pompe di calore reversibili aerotermiche o di condizionatori. Tuttavia, nella seconda parte dell’analisi si è preso in esame l’introduzione di un sistema di raffrescamento. È stato possibile, quindi, analizzare più nel dettaglio quali possano essere i vantaggi economici conseguenti all’integrazione di questa soluzione con le tecnologie di riscaldamento precedentemente ipotizzate.

Considerando la variabilità climatica del Piemonte, sono state considerate tre località rappresentative:

- Torino (200-715 m s.l.m., 2617 GG), in rappresentanza della zona pianeggiante e urbanizzata (indicativamente, sotto i 500 m di quota) appartenente alla fascia “E” secondo la catalogazione riportata nel D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412;
- Cuneo (419-620 m s.l.m., 3012 GG), in rappresentanza della fascia collinare e pedemontana già appartenente alla fascia “F”;
- Oulx (1025-3217 m s.l.m., 4100 GG), in rappresentanza dell’ambiente montano.

Tabella 3.4 – Principali caratteristiche climatiche delle località scelte.

Località	T _{min,gennaio} [°C]	T _{min,progetto} [°C]	T _{terreno,superficie} [°C]	Durata stagione di riscaldamento [giorni]
Torino	1.2	-8	13.7	183
Cuneo	0.6	-10	12	200
Oulx	-3.7	-12.8	8.8	200

La scelta delle zone climatiche si è basata sull'elaborazione dei risultati demografici, dai quali risulta che la netta maggioranza della popolazione risiede in pianura, come rappresentato in Figura 3.3.

Per l'analisi tecno-economica della tipologia geotermica, considerando che non vi è certa correlazione fra la zona climatica e le proprietà termiche del terreno, per queste ultime sono state considerate tre casistiche: un terreno poco conduttivo ($\lambda = 1.6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), mediamente conduttivo ($\lambda = 2.4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) e molto conduttivo ($\lambda = 3.2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$).

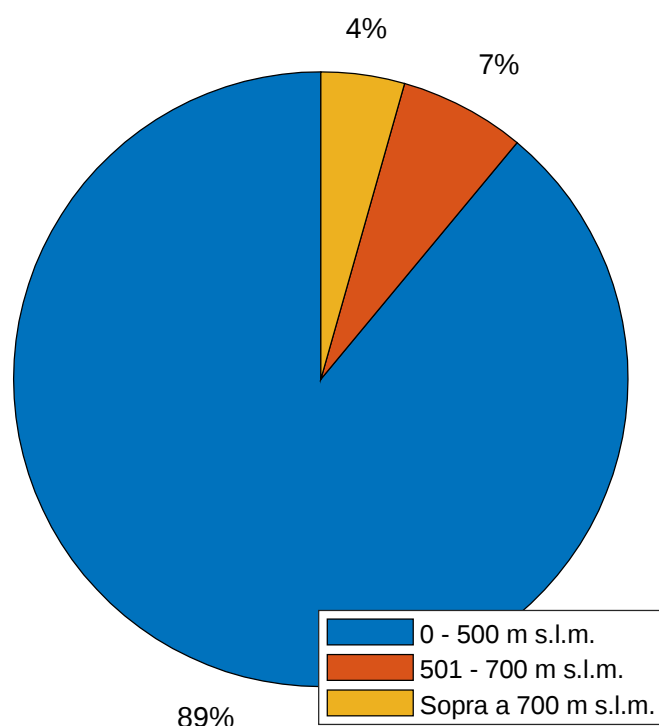


Figura 3.3 – Distribuzione percentuale della popolazione piemontese in funzione dell'altitudine. Dati: ISTAT.

3.2 Analisi energetica

La determinazione dei fabbisogni termici nei casi studio considerati è stata effettuata utilizzando il software di simulazione energetica in regime semi-stazionario LETO 5.0, che fa parte di una suite sviluppata dalla società TEP S.r.l. per conto dell'Associazione Nazionale Isolamento Termico e Acustico (ANIT) [71]. La suite si compone di diversi software per dimensionare e valutare l'involucro opaco, i componenti trasparenti, i ponti termici e i carichi termici

dell'edificio che si vuole analizzare. Il pacchetto software è comunemente utilizzato per certificazioni energetiche, progettazione di impianti termici e audit energetici ed è sviluppato in accordo con le normative UNI EN ISO 10211, UNI-TS 11300 e UNI 10349:2016. Per la descrizione dettagliata dei metodi utilizzati dal software si rimanda, quindi, a queste normative. In questo paragrafo si riportano alcuni dettagli dei metodi utilizzati per l'analisi energetica dei casi studio e una sintesi dei risultati ottenuti.

Lo sviluppo del modello energetico si compone delle seguenti macro-fasi:

1. Definizione del modello geometrico dell'edificio;
2. Assegnazione dei parametri climatici;
3. Assegnazione delle proprietà termiche a ciascun elemento dell'involucro edilizio;
4. Definizione delle caratteristiche degli impianti di:
 - a. Riscaldamento (nelle sezioni di generazione, distribuzione ed emissione);
 - b. Produzione dell'acqua calda sanitaria (efficienze, potenze di progetto, ...);
 - c. Produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili (fotovoltaico).
5. Calcolo dell'energia richiesta e prodotta da ciascun impianto e determinazione degli indici e dei rendimenti caratteristici.

La modellazione geometrica dell'edificio è stata effettuata definendo la pianta dell'edificio e l'estensione delle superfici disperdenti verso l'esterno, verso ambienti non riscaldati e verso il terreno. Essendo stata considerata, nel caso dell'edificio monofamiliare, un'unica zona termica riscaldata, non sono presenti pareti fra zone termiche differenti, mentre, nel caso del multifamiliare, coesistono i dieci appartamenti riscaldati e il vano scala non riscaldato.

Nel software sono già implementati i dati climatici e i gradi giorno delle località scelte (Torino, Cuneo, Oulx), in accordo, rispettivamente, con la UNI 10349:2016 e il D.P.R. 412/93.

Inoltre, con i pacchetti PAN e APOLLO sono state assegnate, rispettivamente, le stratigrafie di ciascun elemento dell'involucro opaco e le proprietà degli infissi e delle finestre. Nell'appendice A.1 sono riportati i valori di trasmittanza areale dei vari elementi dell'involucro opaco e trasparente.

L'impianto di riscaldamento è stato modellato secondo la suddivisione in generazione, distribuzione ed emissione, in accordo con la normativa UNI 11300-TS. Come già accennato in precedenza, è stato ipotizzato un sistema di emissione con radiatori, in quanto la sostituzione con ventilconvettori o pannelli radianti si rivela spesso un intervento troppo invasivo. Tuttavia, per una maggiore compatibilità con pompe di calore convenzionali (monostadio), è stato ipotizzato un intervento di sostituzione dei radiatori in ghisa con una tipologia più performante (radiatori in acciaio ben alettati) e con un sovradimensionamento che permettesse di garantire il carico termico di progetto (con temperatura esterna di -8 °C, -10 °C e -12.8 °C rispettivamente per Torino, Cuneo e Oulx) con una temperatura di mandata non superiore a 45 °C. Per le tipologie impiantistiche con pompa di calore è stata considerata inoltre la presenza di un serbatoio di volano termico (*puffer*) con un volume di 25 litri ogni kW di picco di potenza installata. Tale serbatoio permette di ridurre la frequenza di accensione e spegnimento della pompa di calore.

Per quanto riguarda l'acqua calda sanitaria, è stato considerato un fabbisogno giornaliero di 50 litri a persona e si è ipotizzato che il generatore per riscaldamento (caldaia o pompa di calore) includesse già anche la funzione di produzione ACS.

L'impianto fotovoltaico è stato dimensionato tenendo conto del requisito più stringente tra quello minimo richiesto da D. Lgs. 28/2011 (1 kW ogni 50 m² di superficie coperta in pianta) e, là dove era presente una pompa di calore, il soddisfacimento del suo fabbisogno elettrico con la produzione annua dell'impianto. Maggiori dettagli in merito sono stati riportati in Appendice A.10.

Il risultato delle simulazioni ha portato alla definizione di dodici valori di fabbisogno termico utile (Q_{nd}), corrispondente alle combinazioni possibili di due edifici (unifamiliare e residenziali), due tipologie di interventi ("riqualificazione energetica" e "ristrutturazione importante") e tre zone climatiche (rappresentate dai comuni di Torino, Cuneo e Oulx). Tali valori sono riportati in Tabella 3.5 insieme ai fabbisogni termici dell'edificio originario (prima dell'intervento di ristrutturazione). Ulteriori dettagli sui fabbisogni termici sono riportati nell'Appendice A.2. Come si può notare, la sostituzione dei soli componenti trasparenti comporta una modesta riduzione dei carichi termici (9 - 19% a seconda dei casi), mentre gli interventi previsti per la ristrutturazione importante, che interessano anche l'intero involucro opaco, portano ad una riduzione decisamente più consistente (73 - 89%).

Tabella 3.5 – Fabbisogno annuale di riscaldamento, espresso in MWh e in kWh/m², dei casi studio analizzati.

Edificio	Località	Edificio originario		Riqualificazione energetica		Ristrutturazione Importante	
		(MWh)	(kWh/m ²)	(MWh)	(kWh/m ²)	(MWh)	(kWh/m ²)
Monofamiliare	Torino	29.05	193.77	26.42	176.22	7.85	52.37
	Cuneo	36.19	241.42	29.28	195.35	7.33	48.92
	Oulx	42.61	284.28	38.62	257.62	10.96	73.13
Multifamiliare	Torino	115.37	143.32	101.25	125.78	17.03	21.16
	Cuneo	128.77	159.96	112.43	139.66	14.06	17.46
	Oulx	172.89	214.77	152.35	189.26	26.91	33.43

Dai fabbisogni termici sono stati infine ricavati i valori di energia in ingresso al generatore e di quella prodotta *extra situ* e acquistata, che sono riportati in dettaglio rispettivamente nell'Appendice A.3 e nella A.4. Queste definizioni indicano sostanzialmente la stessa quantità per le tecnologie a combustione, mentre presentano delle differenze nel caso delle pompe di calore. Come dati di input per l'analisi economica sono stati effettivamente utilizzati quelli riferiti alla quota prodotta *extra situ* e acquistata.

3.3 Definizione e quantificazione dei costi

La valutazione economica è incentrata sull'analisi della spesa complessiva nel ciclo di vita (20 anni) per ogni tecnologia, spesa che consta sostanzialmente di due contributi:

- Costi di installazione, ossia l'investimento iniziale da sostenere.
- Costi operativi, ossia la spesa dovuta alla quantità di energia (termica o elettrica) necessaria a soddisfare il fabbisogno annuale, nonché alla manutenzione.

Nei paragrafi che seguono vengono descritte le assunzioni effettuate per il calcolo di queste due voci di costo.

3.3.1 Costi di installazione

I costi di installazione sono stati determinati in maniera differente a seconda che si considerasse una caldaia (a combustibile fossile o a biomassa) o una pompa di calore.

Nel caso delle caldaie a combustibile fossile e a biomassa il costo d'installazione è molto più basso rispetto alle pompe di calore e non presenta una forte variazione con la potenza installata. Per l'edificio unifamiliare è stata sempre ipotizzata una caldaia di potenza pari a circa 30 kW (con leggere variazioni a seconda del modello ipotizzato) poiché è la taglia più comunemente adottata ai fini di permettere la produzione di acqua calda istantanea. Questo pur rimanendo al di sotto della soglia di 35 kW, soglia oltre la quale è necessaria la denuncia all'autorità competente (INAIL). Per l'edificio multifamiliare, invece, è stata valutata la potenza effettivamente richiesta dall'edificio.

Le pompe di calore, invece, presentano una forte variabilità del prezzo anche per taglie ridotte. Per questo motivo la scelta del modello è sempre stata effettuata sulla base dell'effettiva potenza richiesta dal sistema; inoltre, non si è ipotizzata una produzione istantanea di acqua calda (che avrebbe richiesto una potenza decisamente più elevata) ma la presenza di un serbatoio di accumulo di ACS. Per la stima dei costi di fornitura è stato utilizzato il listino della AERMEC. In Tabella 3.4 e Figura 3.5 sono riportati i prezzi al variare della potenza, rispettivamente, per pompe di calore aerotermiche e geotermiche. Come si può osservare, l'andamento è ben descritto dalle seguenti correlazioni tra la potenza massima erogabile (P , in kW) e il costo complessivo di macchina e accessori (C , in €):

$$C_{aerotermica} = 1168 \cdot P^{0.8364} \quad (3.1)$$

$$C_{geotermica} = 2485 \cdot P^{0.6094} \quad (3.2)$$

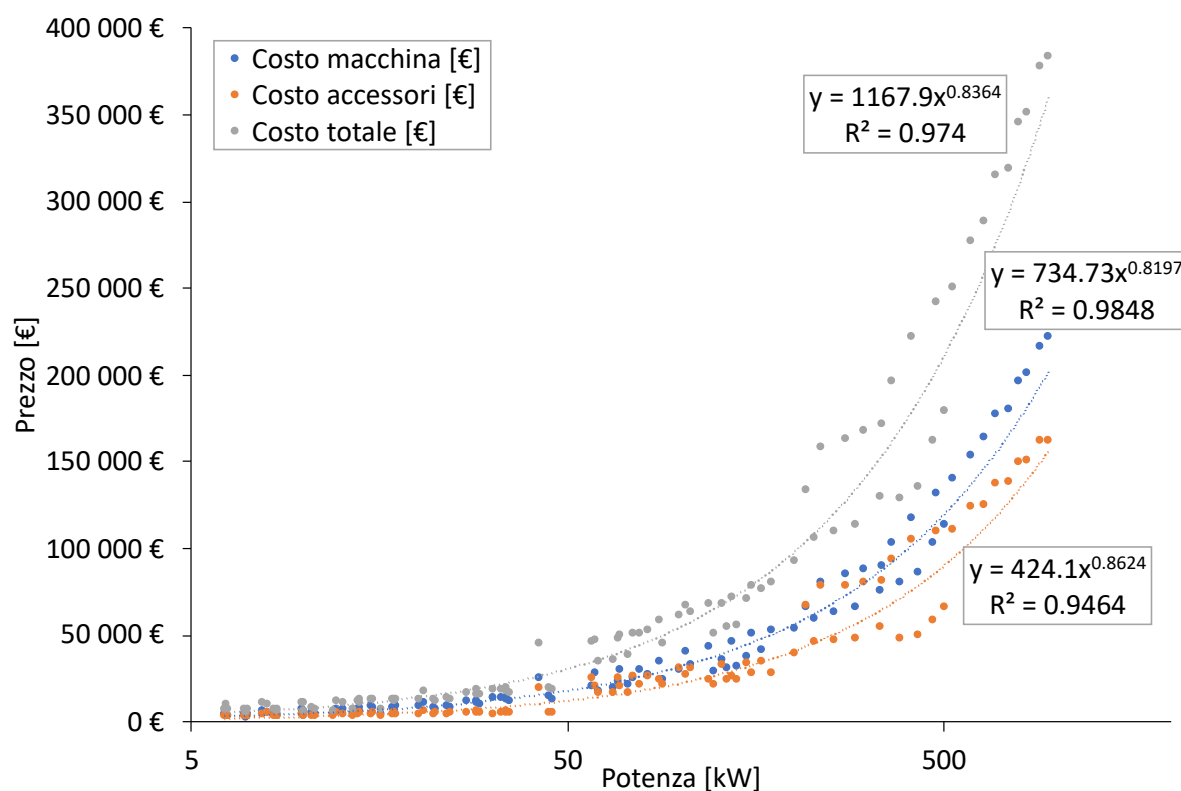


Figura 3.4 – Variazione del prezzo delle pompe di calore aerotermiche in funzione della potenza massima erogata.

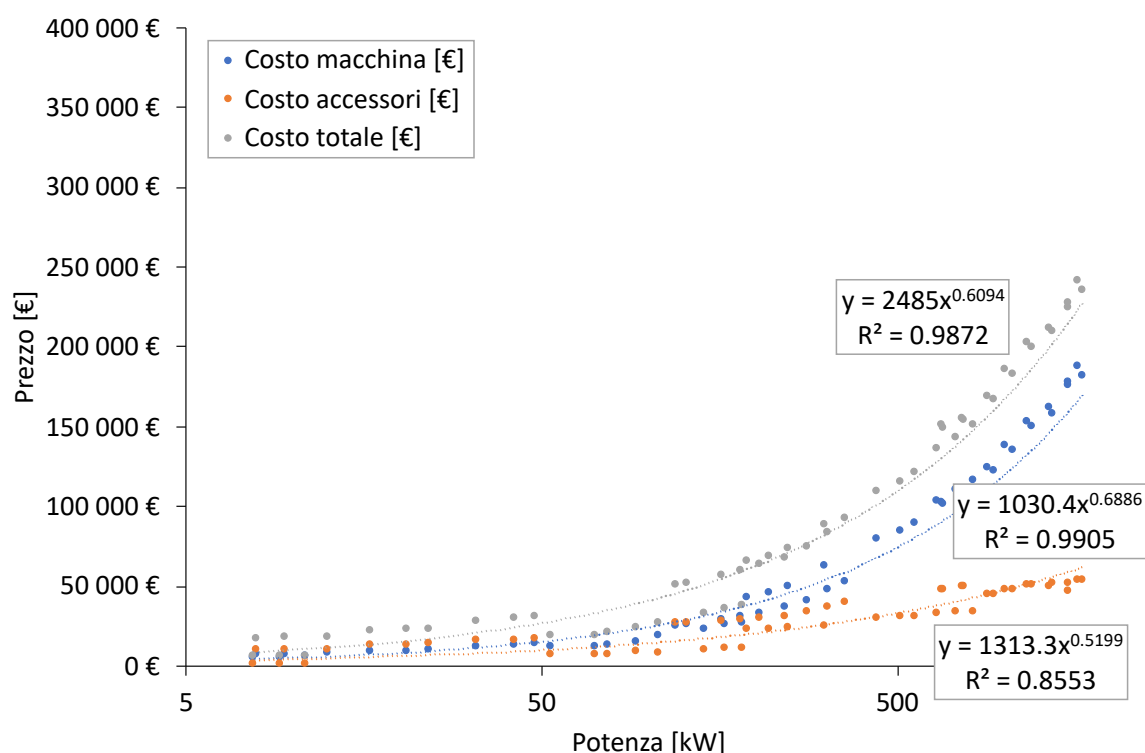


Figura 3.5 – Variazione del prezzo delle pompe di calore geotermiche in funzione della potenza massima erogata.

Si osserva che, per le basse potenze, le pompe di calore aerotermiche sono più economiche; tuttavia, al crescere della potenza, la tipologia geotermica ha un costo più basso. Tale

differenza è attribuibile al diverso costo degli scambiatori termici acqua-acqua e delle unità esterne di scambio termico con l'aria. È importante, però, considerare che le pompe di calore geotermiche comportano un'ulteriore spesa per la perforazione e installazione delle sonde che è stata considerata pari a 50 €/m I.V.A. esclusa come da prezziario regionale [72] e da contatti con alcuni installatori. Tale contributo incide in maniera significativa sulla spesa totale, come si può notare dalla Tabella A.24 in Appendice A.5, dove sono riportati i costi di installazione per tutti i casi studio considerati. Per determinare il costo di perforazione delle sonde geotermiche, è stato effettuato un dimensionamento con il software *Earth Energy Designer* (EED) [73].

3.3.2 Costi operativi

Il costo operativo annuo di ciascuna tipologia impiantistica ipotizzata è suddiviso in due voci: la fonte energetica (combustibile o energia elettrica) e la manutenzione.

Per il calcolo dei costi energetici nel caso delle caldaie sono stati ricercati in letteratura i costi unitari. Per il gas metano la fonte è l'indagine semestrale Eurostat [74] che fornisce i valori in €/kWh. Per gli altri combustibili sono stati considerati i costi unitari tratti dalle rilevazioni quindicinali della Camera di Commercio di Torino [75], nonché di altre camere di commercio piemontesi ed italiane [76]–[92], e i valori di potere calorifico inferiore (PCI) riportati in Tabella 3.6. Il costo della corrente elettrica è stato calcolato tenendo conto del costo del kWh prelevato dalla rete (Eurostat, [74]) e del prezzo di vendita sul Mercato del Giorno Prima (MGP) [93], in modo da simulare il meccanismo di funzionamento del regime di scambio sul posto. In Tabella 3.7 sono riassunti i costi unitari, mentre nell'Appendice A.6 sono disponibili maggiori dettagli sulle analisi effettuate per calcolarli.

La spesa annuale da sostenere per mantenere in funzione l'impianto è stata calcolata come il prodotto tra l'energia acquistata (si veda l'Appendice A.4) e il costo unitario (€/kWh) della rispettiva fonte energetica come da Tabella 3.7.

Tabella 3.6 - Valori del potere calorifico inferiore (in giallo i valori effettivamente considerati nell'analisi).

Combustibile	PCI [kcal/kg]	PCI [MJ/kg]	PCI [kWh/kg]	PCI [kWh/m ³]	Fonte
Gas naturale	9.20	38.51	10.70	7.67	ENEA [94]
GPL	11.00	46.05	12.79	6651	ENEA [94]
Gasolio	10.20	42.70	11.86	9903	ENEA [94]
Legna	3.18	13.32	3.70	-	Regione Piemonte [95]
Pellet	4.30	18.00	5.00	-	Regione Piemonte [95]

Tabella 3.7 – Prezzi unitari delle diverse fonti energetiche (dettaglio nell'Appendice A.1).

Origine dei dati	Fonte energetica	Valore	Unità di misura	Campo di applicabilità		Unità di misura
				Min	Max	
Eurostat	Gas naturale per il settore residenziale	0.148	€/kWh	-	6	MWh
		0.093	€/kWh	6	56	MWh
		0.074	€/kWh	56	-	MWh
	Gas naturale per il settore non residenziale	0.073	€/kWh	-	0.3	GWh
		0.051	€/kWh	0.3	3	GWh
		0.033	€/kWh	3	28	GWh
		0.026	€/kWh	28	278	GWh
		0.024	€/kWh	278	1111	GWh
		0.025	€/kWh	1111	-	GWh
Camere di commercio	Gasolio	1.340	€/l	-	-	-
		0.135	€/kWh	-	-	-
	GPL ²	1.530	€/l	-	-	-
		0.230	€/kWh	-	-	-
	Legna	0.150	€/kg	-	-	-
		0.041	€/kWh	-	-	-
	Pellet ³	0.290	€/kg	-	-	-
		0.058	€/kWh	-	-	-
Eurostat	Elettricità per il settore residenziale	0.468	€/kWh	-	1	MWh
		0.252	€/kWh	1	2.5	MWh
		0.234	€/kWh	2.5	5	MWh
		0.232	€/kWh	5	15	MWh
		0.225	€/kWh	15	-	MWh
	Elettricità per il settore non residenziale	0.371	€/kWh	-	0.02	GWh
		0.221	€/kWh	0.02	0.5	GWh
		0.187	€/kWh	0.5	2	GWh
		0.158	€/kWh	2	20	GWh
		0.129	€/kWh	20	70	GWh
		0.106	€/kWh	70	150	GWh
		0.091	€/kWh	150	-	GWh
GSE	Elettricità sul MGP	66.96	€/MWh	-	-	-
		0.067	€/kWh	-	-	-

In Appendice A.7 è stato riportato il dettaglio della spesa da sostenere annualmente per tipologia di impianto a seconda del caso studio di interesse. Rispetto ad una caldaia a gas, i costi operativi crescono del 146-210% nel caso di caldaia a GPL, del 45-82% nel caso di caldaia a

² Prezzi previsti per clienti con serbatoio in comodato d'uso.

³ Prezzi previsti per materiale venduto in sacchetti da 15 kg.

gasolio, mentre con le fonti energetiche rinnovabili si ottengono risparmi del 44-58% con la legna, del 25-40% con il pellet, del 44-86% con la pompa di calore aerotermica e del 73-89% con la pompa di calore geotermica.

Infine, dal momento che i costi di manutenzione sono all'incirca gli stessi indipendentemente dalla tipologia impiantistica, si è deciso di non considerarli nell'analisi comparativa oggetto del presente studio.

3.4 Incentivi

Attualmente il regime di incentivazione degli interventi in ambito di efficienza energetica degli edifici è il *Superbonus 110%* introdotto dal “Decreto Rilancio”, ossia il D.L. 19 maggio 2020, n. 34 convertito con modificazione dalla L. 17 luglio 2020, n. 77. Grazie a questo provvedimento è possibile ottenere il 110% dell'investimento sotto forma di credito d'imposta in cinque anni ed è, quindi, facilmente immaginabile che sarà un grande traino per tutto il settore. Tuttavia, un'apertura così generosa da parte dello Stato italiano verso l'efficienza energetica è frutto del particolare momento storico dovuto alla pandemia da COVID-19 e al conseguente “Piano per la ripresa dell'Europa” [96] finanziato dall'Unione Europea. Essendo legati alla contingenza del momento, molti di questi provvedimenti, ad esempio il *NextGenerationEU*, sono a tutti gli effetti temporanei, per quanto cospicui e protratti per più anni.

Per queste motivazioni, all'interno del presente progetto di ricerca, si è deciso di valutare gli investimenti senza un regime di incentivazione e con quello precedente alla crisi pandemica, ossia l'Ecobonus. Questa misura, prorogata per l'ultima volta dalla “Legge di bilancio 2020” (legge 27 dicembre 2019, n. 160), prevedeva e prevede, per chi non dovesse riuscire a sfruttare il Superbonus, una detrazione fiscale (dall'IRPEF e dall'IRES) pari al 65% della spesa sostenuta per gli interventi di riqualificazione energetica degli edifici. L'incentivo dell'Ecobonus viene corrisposto in 10 rate annuali di pari importo (pari quindi al 6.5% della spesa sostenuta). Per la determinazione degli interventi sull'involucro e dei carichi termici risultati, sono state soddisfatte, in ottica cautelativa, le richieste del decreto interministeriale 6 agosto 2020 relativo al Superbonus. Questo, pur riferendosi quasi totalmente al “Decreto Requisiti Minimi”, presenta alcuni limiti più stringenti rispetto a quelli fissati per l'ottenimento dell'Ecobonus, ad esempio in merito alla trasmittanza termica massima accettabile per i componenti opachi e trasparenti.

3.5 Parametri economici

3.5.1 Costo livellato dell'energia termica, LCOH

Per confrontare da un punto di vista economico le soluzioni impiantistiche possibili nei diversi casi studio, è stato scelto come indicatore il costo livellato dell'energia termica (LCOH, *Levelized Cost of Heating*). Il parametro LCOH rappresenta il costo medio di un kWh termico nell'arco di vita dell'impianto che in questo studio è stato considerato pari a 20 anni per tutti i casi analizzati. La scelta di questo arco temporale è dettata dalla volontà di non considerare le operazioni di manutenzione straordinaria, che hanno cadenze potenzialmente molto

differenti da un impianto all'altro e anche per le singole componenti. Per esempio, la durata di una pompa di calore può essere diversa da quella delle sonde geotermiche, così come la durata di una caldaia e quella di un serbatoio interrato.

In ogni caso, il parametro LCOH è definito come segue:

$$LCOH = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t - R_t + F_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+i)^t}} \quad (3.3)$$

dove I_t (€) rappresenta la spesa di investimento nell'anno t , R_t (€) la rata di incentivo eventualmente corrisposta nell'anno t , F_t (€) la spesa annua per il combustibile o per l'energia elettrica e E_t (kWh) l'energia termica emessa dai terminali (al netto quindi dei rendimenti di distribuzione ed emissione) per soddisfare il fabbisogno dell'edificio, e il parametro i (adimensionale) è il tasso di sconto (si veda il successivo Paragrafo 3.5.2).

È necessario tenere presente che il valore assoluto del LCOH calcolato è al netto degli interventi di ristrutturazione che devono essere sostenuti per raggiungere i livelli di isolamento e che sono stati ipotizzati indipendentemente dalla tipologia di impianto analizzata. Ne consegue che l'indice sia molto utile per confrontare la convenienza economica dei vari impianti e per determinare il costo dell'energia termica in relazione unicamente alle spese impiantistiche e non a quelle civili ed architettoniche.

3.5.2 Tasso di sconto

Il tasso di sconto è un parametro importante perché, per un investimento di lungo termine come una riqualificazione energetica, è necessario tenere conto del fatto che il denaro perde valore con il trascorrere degli anni; quindi, una certa cifra oggi ha un potere d'acquisto maggiore rispetto a quello futuro. Un valore del tasso di sconto tipicamente utilizzato in economia è il WACC (*Weighted Average Cost of Capital*, "Costo medio ponderato del capitale"), indice che permette a un'impresa o a un investitore di stabilire il costo del capitale. Il WACC è definito come segue:

$$WACC = K_e \cdot E + K_d \cdot D \quad (3.4)$$

in cui K_e rappresenta il tasso d'interesse attribuito al capitale proprio (detto anche "costo del capitale" o, in inglese, *cost of equity*) e K_d il tasso d'interesse richiesto per la quota di investimento presa a prestito ("costo del debito" o, in inglese, *cost of debt*); E e D sono rispettivamente le quote percentuali di capitale proprio e di debito con le quali si sostiene l'investimento iniziale.

Il costo del capitale proprio è formato dalla somma di due componenti, ossia il rischio specifico dell'investimento e il rischio sistemico dipendente dall'evoluzione dell'intero sistema economico. Come rispettivi indicatori sono stati scelti l'*Equity Market Risk Premium* (EMRP) [97] e il buono del tesoro poliennale (BTP) a dieci anni [98]. Inoltre, rischio specifico è corretto da un fattore, generalmente indicato con il simbolo β , che esprime la relazione tra la volatilità

dell'investimento e quella dei mercati. In tal caso è stato ipotizzato come unitario supponendo che la volatilità sia paragonabile.

Il costo dell'indebitamento, invece, è definito come la somma dell'*Interest Rate Swap* (IRS) [99] e di un differenziale (*spread*) che indica l'aumento del tasso di interesse in relazione alla capacità dell'investitore di restituire il capitale (solitamente assunto uguale all'1%).

I suddetti valori utilizzati nell'analisi e il valore del WACC ottenuto sono riportati in Tabella 3.8.

Tabella 3.8 - Valore del tasso di sconto e dei parametri relativi.

Parametro	Valore
E	50%
D	50%
β	1
EMRP	6.25%
BTP 10 anni	0.75%
IRS	-0.10%
Spread	1%
WACC	3.95%

3.5.3 Costo annuale

Un ulteriore parametro considerato, sicuramente meno tecnico e rigoroso rispetto al LCOH, ma, per questo, di maggior immediatezza, è il costo annuale. Esso è definito come la suddivisione in parti uguali della spesa totale per ogni anno di vita dell'impianto o, in altre parole, come il prodotto tra il LCOH e il fabbisogno annuale dell'edificio.

3.6 Sintesi dei risultati

3.6.1 Confronto dei valori di LCOH

I valori di LCOH e di costo annuale ottenuti per ogni impianto analizzato (pertanto per ogni caso studio e per ogni tipologia impiantistica ipotizzata) sono riportati nel dettaglio in Appendice A.11. Di seguito si riporta una sintesi di questi valori. In Tabella 3.9 e Tabella 3.10 sono evidenziati i valori minimi, massimi e medi di LCOH per ogni tipologia di impianto considerando tutte le tipologie di edificio, di zona climatica e di intervento effettuato ("riqualificazione energetica" o "ristrutturazione importante") rispettivamente con e senza regime di incentivazione. Da queste tabelle risulta che le soluzioni economicamente più convenienti sono la caldaia a condensazione a legna e la pompa di calore aerotermica, seguite dalla pompa di calore geotermica (purché in presenza di incentivi e installata in un terreno non scarsamente conduttivo) e dalla caldaia a pellet. In Tabella 3.11 e

, invece, vengono rappresentati gli intervalli di variazione del LCOH a seconda del caso studio considerato (combinazione di tipologia di edificio, tipologia di intervento di ristrutturazione e di zona climatica). In entrambi i casi è evidente l'effetto dell'economia di scala, che fa sì che i valori di LCOH per l'edificio multifamiliare siano molto inferiori rispetto a quelli dell'edificio

unifamiliare. Analogamente, sebbene in misura minore, si osserva che, per l'edificio che ha subito una ristrutturazione importante (con una conseguente notevole riduzione del fabbisogno termico), il valore di LCOH è più elevato rispetto ad un edificio che subisce una sola riqualificazione energetica. L'effetto delle economie di scala è, peraltro, molto più forte per le tipologie impiantistiche a fonti energetiche rinnovabili (soprattutto per le pompe di calore geotermica e aerotermica), per le quali i costi di installazione rappresentano una componente più rilevante del LCOH.

Tabella 3.9 – Valori minimi, massimi e medi del LCOH [€/MWh] per tipologia di impianto considerando il regime di incentivazione. Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GA = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica, GS = pompa di calore geotermica con bassa (b), media (m) e alta (a) conduttività termica del terreno.

	GN	GPL	GAS	LEG	PEL	AS	GS _b	GS _m	GS _a
Valore minimo	89.3	247.8	150.7	51.5	68.3	43.6	49.3	46.3	44.4
Valore massimo	137.1	292.4	189.4	82.6	108.4	84.1	100.5	86.2	84.2
Valore mediano	115.3	272.4	167.3	56.4	77.2	70.0	74.1	66.8	63.8

Tabella 3.10 – Valori minimi, massimi e medi del LCOH [€/MWh] per tipologia di impianto non considerando il regime di incentivazione. Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GA = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica, GS = pompa di calore geotermica con bassa (b), media (m) e alta (a) conduttività termica del terreno.

	GN	GPL	GAS	LEG	PEL	AS	GS _b	GS _m	GS _a
Valore minimo	91.8	254.9	159.5	53.4	70.2	78.8	90.3	83.7	79.6
Valore massimo	168.9	316.4	229.1	115.2	151.9	121.9	180.6	150.8	146.6
Valore mediano	124.9	284.4	174.1	65.7	89.6	107.3	129.6	112.6	105.1

Tabella 3.11 – Valori minimi, massimi e medi del LCOH [€/MWh] per tipologia di intervento, considerando l'Ecobonus.

Edificio	Intervento	Località	Valore minimo	Valore massimo	Valore mediano
Monofamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	62.9	283.6	75.0
		Cuneo	62.9	283.6	75.0
		Oulx	54.5	292.4	63.1
	Ristrutturazione importante	Torino	77.3	282.5	86.3
		Cuneo	82.6	284.6	89.2
		Oulx	71.4	270.3	84.0
Multifamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	52.8	271.3	69.5
		Cuneo	52.7	273.4	73.1
		Oulx	51.5	271.1	79.2
	Ristrutturazione importante	Torino	44.8	247.9	54.7
		Cuneo	43.6	248.7	55.7
		Oulx	46.4	247.8	54.9

Tabella 3.12 – Valori minimi, massimi e medi del LCOH [€/MWh] per tipologia di intervento non considerando l'Ecobonus.

Edificio	Intervento	Località	Valore minimo	Valore massimo	Valore mediano
Monofamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	73.9	294.4	123.9
		Cuneo	71.6	292.0	98.4
		Oulx	64.8	299.9	104.6
	Ristrutturazione importante	Torino	112.4	313.1	148.3
		Cuneo	115.2	316.4	151.9
		Oulx	94.7	293.1	129.3
Multifamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	55.6	275.0	112.9
		Cuneo	55.3	276.7	112.3
		Oulx	53.4	273.6	119.3
	Ristrutturazione importante	Torino	64.8	257.8	86.5
		Cuneo	66.6	259.3	88.8
		Oulx	59.3	254.9	93.4

Nella

sono stati evidenziati i tre impianti più convenienti economicamente per ogni tipologia di intervento e di edificio. In assenza di incentivi, le soluzioni con caldaia a legna, seguite da quelle con caldaia a pellet e dalle pompe di calore aerotermiche, appaiono quasi sempre come le più economicamente convenienti. In presenza di incentivi, invece, le pompe di calore geotermiche diventano competitive con quelle aerotermiche e le soluzioni a biomassa. È opportuno sottolineare, inoltre, che i sistemi a combustibili fossili in realtà non soddisferebbero le quote minime di utilizzo delle rinnovabili richieste dal Decreto Requisiti Minimi, in accordo col D. Lgs 28/2011, per accedere alle incentivazioni. È stata considerata comunque un'eventuale applicazione dei suddetti incentivi anche per gli impianti a combustibili fossili al fine di poter ottenere un ulteriore termine di paragone con le pompe di calore a parità di agevolazioni economiche iniziali. In ogni caso, le soluzioni a combustibile fossile risultano sempre meno vantaggiose delle alternative in presenza di incentivi. In

, infatti, la caldaia a condensazione a gas naturale è l'unica presente e solo a condizione che le caldaie a biomasse non possano essere installate a causa di restrizioni legislative.

Il *Piano Regionale per la Qualità dell'Aria (PRQA)* [100], redatto dalla Regione Piemonte, rivela, tuttavia, come il riscaldamento a biomassa contribuisca in maniera non trascurabile alle emissioni di ossidi di azoto e di particolato atmosferico nelle località cittadine, località in cui le concentrazioni di questi inquinanti sono già elevate per via del traffico veicolare. Questo aspetto viene, inoltre, confermato dalle analisi sulle emissioni effettuate per i casi studio e riportate nel successivo Paragrafo 3.7. Di conseguenza, l'utilizzo di questi sistemi, seppur considerati anch'essi come funzionanti a fonti rinnovabili, sarebbe da sconsigliare nelle zone in cui le suddette emissioni rappresentano già un problema. Per questo motivo, in

, si è scelto di presentare anche quale sarebbe la situazione se questa tipologia di generatori non venisse considerata tra le opzioni fattibili per le località cittadine (rappresentate da Torino). Come si può notare, in questo caso le pompe di calore geotermiche compaiono sempre nel novero delle tre soluzioni più vantaggiose, ma spesso in una posizione comunque inferiore rispetto alle aerotermiche.

Tabella 3.13 – Impianti più vantaggiosi per tipologia di intervento e di edificio considerando per la località Torino sia il caso con le biomasse (b) sia quello senza (s). Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GA = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica, GS = pompa di calore geotermica.

Edificio	Località	Riqualificazione energetica						Ristrutturazione importante					
		Senza incentivo			Con incentivo			Senza incentivo			Con incentivo		
		1°	2°	3°	1°	2°	3°	1°	2°	3°	1°	2°	3°
Monofamiliare	Torino (b)	LEG	PEL	AS	LEG	AS	GS	LEG	AS	GS	AS	LEG	GS
	Torino (s)	AS	GS	GN	AS	GS	GN	AS	GS	GN	AS	GS	GN
	Cuneo	LEG	GS	PEL	LEG	AS	GS	LEG	AS	GS	LEG	AS	GS
	Oulx	LEG	PEL	GS	LEG	GS	AS	LEG	AS	PEL	LEG	AS	GS
Multifamiliare	Torino (b)	LEG	PEL	GN	LEG	GS	PEL	LEG	AS	GS	AS	GS	LEG
	Torino (s)	GN	AS	GS	GS	AS	GN	AS	GS	GN	AS	GS	GN
	Cuneo	LEG	PEL	GN	LEG	GS	PEL	LEG	AS	GS	AS	GS	LEG
	Oulx	LEG	PEL	GN	LEG	PEL	AS	LEG	PEL	AS	AS	GS	LEG

3.6.2 Incidenza dei costi di installazione

Analizzando più nel dettaglio il contributo del costo di investimento sul LCOH riportato in Tabella 3.14, si possono notare delle differenze molto significative tra le caldaie e le pompe di calore. Per le prime, l'incidenza dell'investimento iniziale è molto modesta, mentre per le pompe di calore (soprattutto geotermiche) esso rappresenta la voce di costo nettamente preponderante. Questa differenza evidenzia come il costo iniziale sia il principale fattore limitante dello sviluppo della geotermia, scoraggiando questo tipo di intervento. La presenza di detrazioni e soprattutto la possibilità, concessa negli ultimi anni, di cedere il credito d'imposta (con sconto in fattura o credito bancario) rappresentano sicuramente due fattori chiave nella promozione delle soluzioni in pompa di calore.

Tabella 3.14 – Contributo della spesa per l'investimento iniziale sul totale del LCOH. Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GAS = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica, GS_b = pompa di calore geotermica con bassa (b), media (m) e alta (a) conduttività termica del terreno.

Edificio	Intervento	Località	GN	GPL	GAS	LEG	PEL	AS	GS _b	GS _m	GS _a
Monofamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	15%	7%	12%	28%	28%	75%	80%	79%	79%
		Cuneo	14%	6%	11%	26%	27%	79%	82%	81%	80%
		Oulx	11%	5%	8%	22%	21%	75%	86%	85%	84%

Multifamiliare	Ristrutturazione importante	Torino	35%	18%	32%	53%	53%	59%	81%	80%	80%
		Cuneo	36%	19%	33%	53%	54%	57%	82%	81%	81%
		Oulx	29%	15%	26%	46%	47%	50%	77%	75%	74%
	Riqualificazione energetica	Torino	7%	3%	4%	12%	10%	67%	89%	88%	87%
		Cuneo	7%	2%	4%	11%	9%	63%	88%	85%	84%
		Oulx	5%	2%	3%	9%	7%	56%	84%	79%	76%
	Ristrutturazione importante	Torino	16%	7%	14%	30%	30%	80%	85%	84%	83%
		Cuneo	17%	8%	15%	31%	31%	84%	86%	85%	85%
		Oulx	12%	5%	11%	23%	23%	79%	88%	87%	87%

3.6.3 Incidenza del potenziale geotermico sul LCOH

Siccome, come è già stato approfondito nel Paragrafo 3.3.1, il costo di investimento è sostanzialmente influenzato dalle perforazioni e dagli scavi, è necessario analizzare anche come il potenziale geotermico contribuisca a determinare il LCOH (nel caso, ovviamente, delle pompe di calore geotermiche). Infatti, se il terreno ha una maggiore capacità di geoscambio, sarà necessario installare meno sonde. In Tabella 3.15 è presentata la variazione assoluta e relativa del LCOH tra una pompa di calore geotermica installata in un terreno ad alta conducibilità ($3.2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) e una installata in un terreno scarsamente conduttivo ($1.6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$).

Come si può notare, il divario cresce con l'aumentare dei carichi termici da soddisfare: nel caso di riqualificazione energetica dell'edificio multifamiliare, difatti, il LCOH può variare anche del 34%, mentre negli altri casi non si supera il 14%. Questo fatto si spiega con l'influenza reciproca tra le sonde geotermiche, che accresce il numero e la profondità di sonde che devono essere installate per coprire un certo fabbisogno termico rispettando un determinato requisito di temperatura minima/massima del fluido termovettore. Se una sonda singola non subisce interferenze da parte di altre sonde dello stesso impianto, al crescere del numero di sonde cresce l'interferenza reciproca tra di esse.

Inoltre, è necessario considerare anche che un terreno più conduttivo permette non solo di installare un numero minore di sonde, ma anche di occupare un'area minore, tenuto conto che è necessario rispettare dei requisiti di distanza minima reciproca tra gli scambiatori (5 – 10 m a seconda della linea guida considerata). Tale aspetto non è da sottovalutare soprattutto per edifici multifamiliari, per i quali lo spazio richiesto può diventare di alcune centinaia di mq.

Tabella 3.15 – Variazione nel LCOH tra la pompa di calore geotermica installato in un terreno ad alta conduttività e quella installata in un terreno a bassa conduttività.

Edificio	Intervento	Località	$\Delta_{LCOH, assoluta}$ [€/MWh]	$\Delta_{LCOH, relativa}$ [%]
Monofamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	10.9	8%
			5.1	7%
		Cuneo	10.4	11%
			5.1	7%
		Oulx	14.3	13%
			6.7	11%
	Ristrutturazione importante	Torino	11.0	7%
			5.2	6%
		Cuneo	10.5	7%
			5.0	6%
		Oulx	17.4	12%
			8.2	10%
Multifamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	22.5	17%
			10.6	16%
		Cuneo	32.6	24%
			15.4	21%
		Oulx	61.3	34%
			28.9	29%
	Ristrutturazione importante	Torino	10.7	12%
			5.1	10%
		Cuneo	10.4	12%
			4.9	10%
		Oulx	14.3	14%
			6.8	12%

3.7 Valutazione delle emissioni di gas ad effetto serra e inquinanti

Come introdotto nel Paragrafo 1.2.2, un sicuro vantaggio delle pompe di calore è relativo alle emissioni di gas ad effetto serra e di inquinanti. Oltre alla valutazione economica presentata nei paragrafi precedenti, l'analisi delle emissioni rappresenta, quindi, un altro parametro di confronto molto significativo fra tecnologie differenti. In particolare, per i *Greenhouse gases* (GHG, in italiano “gas ad effetto serra”) sono stati considerati i grammi di CO₂ equivalente, ossia una misura aggregata delle emissioni di diversi GHG, quali CO₂, CH₄ e N₂O. Per quanto riguarda invece gli inquinanti che peggiorano la qualità dell'aria sono stati analizzati i principali, ossia NO_x, PM₁₀, SO₂, e CO.

Tabella 3.16 – Fattori di emissione utilizzati nella presente analisi [12].

Tecnologia	GHG [g di CO _{2,eq} /kWh]	NO _x [mg/kWh]	PM ₁₀ [mg/kWh]	SO ₂ [mg/kWh]	CO [mg/kWh]
Caldaia a gas	235.6	237.1	0.6	1.8	118.5
Caldaia a gasolio	270.7	155.0	3.6	168.7	51.7
Caldaia a GPL	272.9	94.8	0.6	0.0	169.4
Caldaia a legna	49.2	271.6	276.1	183.9	14120.9
Caldaia a pellet	24.4	298.3	70.8	131.9	248.6
Elettricità	303.9	237.6	5.7	71.6	95.7

Per determinare il valore effettivamente emesso da ogni tecnologia analizzata in ognuno dei casi studio, l'energia termica ceduta dal sistema di emissione (per le caldaie) e quella elettrica prelevata dalla rete (per le pompe di calore) sono state moltiplicate per un fattore di emissione corrispondente. I valori numerici dei fattori di emissione, tratti dall'articolo pubblicato da Casasso *et al.* [12], sono espressi in grammi o mg per kWh, come riportato in Tabella 3.16. Si osserva che le emissioni di CO₂ equivalente sono state calcolate utilizzando i valori di GWP (*Global Warming Potential*) a 20 anni e non a 100 anni, e quindi 84 per il metano e 265 per il protossido di azoto (N₂O). Le emissioni di metano (gas serra caratterizzato da emivita breve) assumono, quindi, una maggiore rilevanza rispetto a quella che avrebbero utilizzando il GWP a cento anni. Di conseguenza, la combustione della legna in ciocchi, producendo molto metano, fa sì che il suo fattore di emissione di gas serra (CO₂ equivalente) sia maggiore di quello del pellet, sebbene quest'ultimo comporti maggiori emissioni di CO₂ legate al trasporto e al processamento.

Si può immediatamente notare che le emissioni di GHG, a parità di kWh, sono maggiori per le tecnologie ad energia elettrica rispetto a quelle dovute ai combustibili fossili; tuttavia, è necessario considerare che i kWh_t e i kWh_e non sono direttamente confrontabili e, in valore assoluto, le tecnologie elettriche ne richiedono molti meno. Ne consegue che, come evidenziato dalla Tabella 3.17, le emissioni di gas climalteranti sono, in realtà, molto maggiori per le caldaie a combustibili fossili.

Una situazione simile si verifica in merito alle emissioni di ossidi di azoto (NO_x, in Tabella 3.18), alle quali, tuttavia, contribuiscono in maniera rilevante anche le caldaie a biomassa. Queste rappresentano, inoltre, i principali responsabili sia delle emissioni di monossido di carbonio (CO) sia del particolato atmosferico (PM₁₀), soprattutto se alimentate a tronchetti di legna (si vedano la Tabella 3.19 e la Tabella 3.21).

Per quanto riguarda, infine, le emissioni di biossido di zolfo (SO₂), il contributo preponderante delle tecnologie a gasolio e a biomassa è evidenziato tanto dalla Tabella 3.16 quanto dalla Tabella 3.20.

In conclusione, dal calcolo delle emissioni di GHG e di inquinanti per ogni tipologia le pompe di calore risultano senza ombra di dubbio la soluzione più sostenibile dal punto di vista ambientale. Ciò si può, inoltre, notare visivamente anche dai grafici a barre riportati in Appendice A.12 e suddivisi per tipologia di edificio e di intervento. Oltretutto, è necessario considerare, come già accennato nel Paragrafo 1.2.2, che le emissioni correlate alle pompe di calore non

sono prodotte *in situ* e, quindi, distribuite sul territorio, ma localizzate in corrispondenza delle centrali termoelettriche e degli altri impianti di produzione di energia elettrica.

Tabella 3.17 – Emissioni di GHG [kg di CO_{2,eq}/anno]. Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GA = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica, GS = pompa di calore geotermica.

Edificio	Intervento	Località	GN	GPL	GAS	LEG	PEL	AS	GS
Monofamiliare	Riqualficazione energetica	Torino	6761	7831	7767	1411	699	1885	1321
		Cuneo	7469	8651	8580	1558	772	1874	1224
		Oulx	9730	11271	11178	2030	1006	2835	1969
	Ristrutturazione importante	Torino	2387	2765	2742	498	247	467	253
		Cuneo	2297	2661	2639	479	237	276	131
		Oulx	3215	3724	3693	671	332	777	470
Multifamiliare	Riqualficazione energetica	Torino	27204	31512	31252	5677	2812	8436	4681
		Cuneo	30038	34795	34507	6268	3105	9280	4952
		Oulx	39837	46145	45764	8312	4118	13001	8723
	Ristrutturazione importante	Torino	7362	8528	8458	1536	761	1414	897
		Cuneo	6861	7947	7882	1432	709	1035	694
		Oulx	10281	11909	11811	2145	1063	2240	1504

Tabella 3.18 – Emissioni di NO_x [g/anno]. Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GA = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica, GS = pompa di calore geotermica.

Edificio	Intervento	Località	GN	GPL	GAS	LEG	PEL	AS	GS
Monofamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	6803	2720	4448	7792	8561	1473	1033
		Cuneo	7516	3005	4913	8608	9457	1465	957
		Oulx	9792	3914	6401	11215	12321	2216	1539
	Ristrutturazione importante	Torino	2402	960	1570	2751	3022	365	198
		Cuneo	2312	924	1511	2648	2909	216	102
		Oulx	3235	1293	2115	3705	4071	607	367
Multifamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	27376	10944	17896	31355	34446	6594	3659
		Cuneo	30228	12084	19761	34622	38035	7254	3870
		Oulx	40088	16026	26207	45915	50442	10162	6819
	Ristrutturazione importante	Torino	7409	2962	4843	8486	9322	1105	701
		Cuneo	6904	2760	4514	7908	8688	809	543
		Oulx	10346	4136	6764	11850	13018	1751	1176

Tabella 3.19 – Emissioni di PM₁₀ [g/anno]. Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GA = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica, GS = pompa di calore geotermica.

Edificio	Intervento	Località	GN	GPL	GAS	LEG	PEL	AS	GS
Monofamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	17	17	104	7924	2032	35	25
		Cuneo	19	19	115	8753	2244	35	23
		Oulx	24	24	149	11404	2924	53	37
	Ristrutturazione importante	Torino	6	6	37	2797	717	9	5
		Cuneo	6	6	35	2692	690	5	2
		Oulx	8	8	49	3768	966	15	9
Multifamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	68	68	418	31884	8175	158	88
		Cuneo	76	75	461	35206	9026	174	93
		Oulx	100	100	612	46690	11971	244	164
	Ristrutturazione importante	Torino	19	18	113	8629	2212	27	17
		Cuneo	17	17	105	8041	2062	19	13
		Oulx	26	26	158	12050	3089	42	28

Tabella 3.20 – Emissioni di SO₂ [g/anno]. Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GA = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica, GS = pompa di calore geotermica.

Edificio	Intervento	Località	GN	GPL	GAS	LEG	PEL	AS	GS
Monofamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	52	0	4842	5277	3786	444	311
		Cuneo	57	0	5349	5830	4182	441	288
		Oulx	75	0	6968	7595	5449	668	464
	Ristrutturazione importante	Torino	18	0	1709	1863	1337	110	60
		Cuneo	18	0	1645	1793	1286	65	31
		Oulx	25	0	2302	2509	1800	183	111
Multifamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	209	0	19482	21234	15234	1987	1103
		Cuneo	231	0	21511	23447	16821	2186	1166
		Oulx	306	0	28528	31095	22308	3062	2055
	Ristrutturazione importante	Torino	57	0	5272	5747	4123	333	211
		Cuneo	53	0	4913	5355	3842	244	164
		Oulx	79	0	7363	8025	5757	528	354

Tabella 3.21 – Emissioni di CO [kg/anno]. Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GA = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica, GS = pompa di calore geotermica.

Edificio	Intervento	Località	GN	GPL	GAS	LEG	PEL	AS	GS
Monofamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	3.4	4.9	1.5	405.2	7.1	0.6	0.4
		Cuneo	3.8	5.4	1.6	447.6	7.9	0.6	0.4
		Oulx	4.9	7.0	2.1	583.2	10.3	0.9	0.6
	Ristrutturazione importante	Torino	1.2	1.7	0.5	143.0	2.5	0.1	0.1
		Cuneo	1.2	1.7	0.5	137.7	2.4	0.1	0.0
		Oulx	1.6	2.3	0.7	192.7	3.4	0.2	0.1
Multifamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	13.7	19.6	6.0	1630.5	28.7	2.7	1.5
		Cuneo	15.1	21.6	6.6	1800.3	31.7	2.9	1.6
		Oulx	20.0	28.6	8.7	2387.6	42.0	4.1	2.7
	Ristrutturazione importante	Torino	3.7	5.3	1.6	441.3	7.8	0.4	0.3
		Cuneo	3.5	4.9	1.5	411.2	7.2	0.3	0.2
		Oulx	5.2	7.4	2.3	616.2	10.8	0.7	0.5

3.8 Integrazione con il servizio di raffrescamento

Le casistiche sinora analizzate hanno contemplato l'ipotesi che l'impianto termico provvedesse unicamente ai fabbisogni di riscaldamento e di acqua calda sanitaria, considerata la diffusione relativamente scarsa del servizio di raffrescamento (13.3% delle famiglie secondo ISTAT, 2013 [70]). In realtà, sarebbe interessante valutare anche la variazione del LCOH in seguito all'introduzione del raffrescamento.

Rispetto ai casi studio ipotizzati in questa analisi tecno-economica, il raffrescamento è stato previsto esclusivamente nell'ipotesi di una ristrutturazione importante in quanto, come si può notare dalla Tabella 3.22, solo in questo caso il relativo fabbisogno è comparabile a quello di riscaldamento. Ulteriori dettagli in merito al fabbisogno di raffrescamento sono riportati in Appendice B.1.

Tabella 3.22 – Rapporto percentuale tra il fabbisogno di raffrescamento e quello di riscaldamento per le casistiche analizzate in precedenza.

Edificio	Località	Edificio originario	Riqualificazione energetica	Ristrutturazione importante
Monofamiliare	Torino	3%	3%	30%
	Cuneo	0%	0%	19%
	Oulx	0%	0%	5%
Multifamiliare	Torino	11%	12%	146%
	Cuneo	4%	5%	141%
	Oulx	0%	1%	49%

3.8.1 Impatto sul costo di investimento iniziale

Nel caso di edifici serviti da caldaia, per garantire il raffrescamento diventa necessario introdurre un sistema di condizionamento. Nell'ottica di effettuare interventi il meno invasivi possibile si è scelto di simulare delle pompe di calore aerotermiche mono-split. Per le casistiche già in pompa di calore, invece, questa aggiunta non è necessaria e, anzi, si possono sfruttare con profitto gli impianti ipotizzati in precedenza (che erano già stati ipotizzati di tipologia reversibile). Se si considera anche il raffrescamento, però, negli impianti in pompa di calore non è possibile mantenere i radiatori e si rende necessaria, quindi, la sostituzione dei radiatori con i ventilconvettori. Essi permettono sia il riscaldamento sia il raffrescamento e la loro installazione è sicuramente più semplice rispetto a quella prevista per i pannelli radianti.

Di conseguenza, l'aggiunta di questi componenti aumenta il costo di investimento rispetto ai casi precedenti, mentre l'ulteriore quantità di energia, necessaria a soddisfare il nuovo fabbisogno considerato, accresce la spesa operativa annuale.

Tabella 3.23 – Variazione percentuale tra il costo totale di investimento per la casistica solo riscaldamento (SL) e quella con anche raffrescamento (RR), in edifici sottoposti a ristrutturazione importante.

Edificio	Località	Conducibilità terreno	Costo totale (SL) [€]	Costo totale (RR) [€]	Δ [%]
Edificio monofamiliare	Torino	Bassa	16 996.19 €	17 047.19 €	0.3%
		Media	16 020.19 €	16 193.19 €	1.1%
		Alta	15 471.19 €	15 705.19 €	1.5%
	Cuneo	Bassa	17 118.19 €	17 127.56 €	0.1%
		Media	16 264.19 €	16 334.56 €	0.4%
		Alta	15 715.19 €	15 846.56 €	0.8%
	Oulx	Bassa	20 473.19 €	20 702.69 €	1.1%
		Media	18 094.19 €	18 384.69 €	1.6%
		Alta	17 240.19 €	17 530.69 €	1.7%
Edificio multifamiliare	Torino	Bassa	28 450.14 €	39 952.34 €	40.4%
		Media	25 644.14 €	33 547.34 €	30.8%
		Alta	23 875.14 €	31 046.34 €	30.0%
	Cuneo	Bassa	28 084.14 €	34 175.26 €	21.7%
		Media	25 522.14 €	30 088.26 €	17.9%
		Alta	23 936.14 €	27 770.26 €	16.0%
	Oulx	Bassa	44 620.37 €	41 562.14 €	-6.9%
		Media	38 825.37 €	38 085.14 €	-1.9%
		Alta	36 080.37 €	35 340.14 €	-2.1%

Come si può notare dalla Tabella 3.23, il costo di investimento rimane pressoché uguale nelle casistiche del monofamiliare poichè il fabbisogno di raffrescamento è pari a meno di un terzo di quello di riscaldamento (vedere Tabella 3.22) e quindi l'influenza sul numero di sonde da installare è modesta. Nel caso dell'edificio multifamiliare a Torino e Cuneo, dal momento che il fabbisogno di raffrescamento è decisamente maggiore di quello per riscaldamento (richiedendo quindi potenze maggiori, vedere Tabella 3.24), si verifica una crescita del costo di investimento richiesto, legata all'incremento del numero di sonde necessarie. Interessante è la situazione rappresentata dalla località di Oulx, località che presenta i fabbisogni di riscaldamento più alti in valore assoluto. In questo caso la presenza di un fabbisogno di raffrescamento equivalente a circa la metà di quello di riscaldamento permette una riduzione consistente della lunghezza delle sonde geotermiche, poiché l'immissione di calore nel sottosuolo durante l'estate compensa parzialmente l'estrazione avvenuta durante l'inverno. La spesa complessiva, quindi, diminuisce, anche perché non è necessario incrementare la potenza nominale della pompa di calore.

Tabella 3.24 – Variazione percentuale tra potenza della pompa di calore nel caso solo riscaldamento (SL) e quella con anche raffrescamento (RR), nel caso di edifici sottoposti a ristrutturazione importante.

Edificio	Località	Potenza (SL) [kW]	Potenza (RR) [kW]	Δ [%]
Edificio monofamiliare	Torino	7.42	7.42	0.0%
	Cuneo	7.42	7.42	0.0%
	Oulx	7.42	7.42	0.0%
Edificio multifamiliare	Torino	9.79	12.78	30.5%
	Cuneo	9.79	12.78	30.5%
	Oulx	15.19	15.19	0.0%

Tabella 3.25 – Variazione percentuale tra la lunghezza totale delle sonde nel caso solo riscaldamento (SL) e quella con anche raffrescamento (RR), nel caso di edifici sottoposti a ristrutturazione importante.

Edificio	Località	Conduttività	Lunghezza (SL) [m]	Lunghezza (RR) [m]	Δ [%]
Edificio monofamiliare	Torino	Bassa	93	87	-6.5%
		Media	77	73	-5.2%
		Alta	68	65	-4.4%
	Cuneo	Bassa	95	89	-6.3%
		Media	81	76	-6.2%
		Alta	72	68	-5.6%
	Oulx	Bassa	150	146	-2.7%
		Media	111	108	-2.7%
		Alta	97	94	-3.1%
Edificio multifamiliare	Torino	Bassa	220	360	63.6%
		Media	174	255	46.6%
		Alta	145	214	47.6%
	Cuneo	Bassa	214	267	24.8%
		Media	172	200	16.3%
		Alta	146	162	11.0%
	Oulx	Bassa	428	357	-16.6%
		Media	333	300	-9.9%
		Alta	288	255	-11.5%

In merito ai costi di investimento delle altre soluzioni, la Tabella 3.26 evidenzia che, per quanto riguarda le caldaie, l'aumento del prezzo risulta considerevole dovendo installare un'altra macchina deputata al raffrescamento, mentre la spesa per le pompe di calore aereotermiche aumenta leggermente e unicamente in quei casi in cui è necessaria una maggiore potenza nominale.

Maggiori dettagli in merito ai costi di installazione sono riportati in Appendice B.4.

Tabella 3.26 – Variazione percentuale del costo di investimento per le caldaie e per le pompe di calore aerotermiche tra il caso di solo riscaldamento e quello con anche raffrescamento, per gli edifici sottoposti a ristrutturazione importante. Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GA = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica.

Edificio	Località	GN	GPL	GAS	LEG	PEL	AS
Monofamiliare	Torino	15%	15%	12%	14%	11%	5%
	Cuneo	15%	15%	12%	14%	11%	4%
	Oulx	15%	15%	12%	14%	11%	5%
Multifamiliare	Torino	147%	147%	118%	144%	108%	5%
	Cuneo	147%	147%	118%	144%	108%	5%
	Oulx	147%	147%	118%	144%	108%	6%

Inoltre, la già citata crescita dei consumi implica un generico aumento dei costi annuali per l'energia elettrica prelevata dalla rete, a meno che non si verifichino tre condizioni⁴: l'energia elettrica consumata è interamente prodotta dalla potenza installata obbligatoriamente in accordo con il D.Lgs. 28/2011 (e per questo non considerata come nelle casistiche con solo riscaldamento⁵), oppure sono stati installati ulteriori pannelli fotovoltaici al fine di soddisfare adeguatamente il fabbisogno energetico (vedere Tabella 3.27) ottenendo un guadagno maggiore col meccanismo dello scambio sul posto, oppure l'aumento del consumo annuale permette la diminuzione del prezzo unitario dell'energia elettrica. Le variazioni percentuali dei costi annuali sono state riportate in Tabella 3.28, mentre i valori nel dettaglio sono riportati in Appendice B.5.

Tabella 3.27 – Moduli installati per il raffrescamento in aggiunta a quelli già previsti per il caso di solo riscaldamento, per gli edifici sottoposti a ristrutturazione importante. Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GA = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica, GS = pompa di calore geotermica.

Edificio	Località	GN	GPL	GAS	LEG	PEL	AS	GS
Monofamiliare	Torino	0	0	0	0	0	0	0
	Cuneo	0	0	0	0	0	0	0
	Oulx	0	0	0	0	0	3	0
Multifamiliare	Torino	15	15	15	15	15	31	21
	Cuneo	9	9	9	9	9	22	18
	Oulx	3	3	3	3	3	23	14

⁴ Non è strettamente necessario che tutte le situazioni si verifichino congiuntamente, anche perché le prime due sono mutualmente esclusive.

⁵ Ulteriori approfondimenti sulle motivazioni di ciò sono stati riportati in Appendice A.10.

Tabella 3.28 – Variazione percentuale tra la spesa annuale per l'energia prodotta extra situ e acquistata nel caso solo riscaldamento (SL) e quella con anche raffrescamento (RR).

Edificio	Località	Impianto	SL [€]	RR [€]	Δ [€]	Δ [%]
Monofamiliare	Torino	Gas	1 018.33 €	1 018.33 €	- €	0.0%
		GPL	2 508.08 €	2 508.08 €	- €	0.0%
		Gasolio	1 475.24 €	1 475.24 €	- €	0.0%
		Legna	461.29 €	461.29 €	- €	0.0%
		Pellet	623.50 €	623.50 €	- €	0.0%
		Aerotermica	387.63 €	518.59 €	130.97 €	33.8%
		Geotermica	209.92 €	286.36 €	76.44 €	36.4%
	Cuneo	Gas	983.17 €	983.17 €	- €	0.0%
		GPL	2 421.47 €	2 421.47 €	- €	0.0%
		Gasolio	1 424.30 €	1 424.30 €	- €	0.0%
		Legna	445.29 €	445.29 €	- €	0.0%
		Pellet	601.87 €	601.87 €	- €	0.0%
		Aerotermica	424.63 €	409.99 €	- 14.64 €	-3.4%
		Geotermica	201.40 €	201.10 €	- 0.30 €	-0.1%
	Oulx	Gas	1 354.19 €	1 354.19 €	- €	0.0%
		GPL	3 335.27 €	3 335.27 €	- €	0.0%
		Gasolio	1 961.79 €	1 961.79 €	- €	0.0%
		Legna	614.13 €	614.13 €	- €	0.0%
		Pellet	830.08 €	830.08 €	- €	0.0%
		Aerotermica	598.27 €	569.10 €	- 29.16 €	-4.9%
		Geotermica	361.92 €	435.87 €	73.95 €	20.4%
Multifamiliare	Torino	Gas	3 001.92 €	3 831.52 €	829.60 €	27.6%
		GPL	7 393.52 €	8 225.00 €	831.48 €	11.2%
		Gasolio	4 348.85 €	5 182.58 €	833.74 €	19.2%
		Legna	1 348.67 €	2 183.36 €	834.69 €	61.9%
		Pellet	1 823.70 €	2 658.39 €	834.69 €	45.8%
		Aerotermica	428.34 €	542.17 €	113.82 €	26.6%
		Geotermica	350.39 €	303.94 €	- 46.46 €	-13.3%
	Cuneo	Gas	2 796.53 €	3 622.53 €	826.00 €	29.5%
		GPL	6 887.65 €	7 709.13 €	821.48 €	11.9%
		Gasolio	4 051.29 €	4 877.83 €	826.54 €	20.4%
		Legna	1 261.93 €	2 061.31 €	799.38 €	63.3%
		Pellet	1 705.96 €	2 534.02 €	828.06 €	48.5%
		Aerotermica	279.42 €	355.67 €	76.24 €	27.3%
		Geotermica	283.84 €	287.37 €	3.53 €	1.2%
	Oulx	Gas	4 246.92 €	4 766.93 €	520.02 €	12.2%
		GPL	10 459.85 €	10 979.87 €	520.02 €	5.0%
		Gasolio	6 152.45 €	6 673.03 €	520.58 €	8.5%
		Legna	1 908.51 €	2 428.18 €	519.67 €	27.2%
		Pellet	2 581.39 €	3 101.06 €	519.67 €	20.1%
		Aerotermica	659.03 €	951.67 €	292.64 €	44.4%
		Geotermica	444.56 €	634.90 €	190.33 €	42.8%

3.8.2 Impatto sul valore del LCOH

In ogni caso, nell'ipotesi di soddisfare anche il fabbisogno di raffrescamento, il valore del LCOH diminuisce per tutte le casistiche, ad esclusione delle biomasse per cui non sempre ciò accade. Ciò è dovuto al fatto che la legna da ardere ha costi di produzione del calore molto bassi e, di conseguenza, il costo di produzione del freddo utilizzando corrente elettrica è più elevato.

Di conseguenza, la configurazione che soddisfa anche il fabbisogno di raffrescamento permette di rendere le pompe di calore ancora più competitive a parità di servizi offerti.

L'unica situazione in cui l'aggiunta del raffrescamento risulta sconveniente a livello di LCOH per le pompe di calore è il caso monofamiliare a Oulx. Il motivo risiede nel fatto che la quantità di energia richiesta in più per il raffrescamento e che contribuisce alla "normalizzazione" del prezzo del kWh non riesce a controbilanciare la spesa per la sostituzione dei terminali che in regime di solo riscaldamento non sarebbe stata necessaria.

Ad ogni modo, anche quando il LCOH delle soluzioni geotermiche aumenta, quello delle altre tecnologie subisce una crescita maggiore o conserva un valore assoluto più alto, rendendo di fatto la geotermia una delle soluzioni comunque più convenienti.

Tabella 3.29 – Variazione percentuale del LCOH tra il caso solo riscaldamento e quello anche raffrescamento, per gli edifici sottoposti a ristrutturazione importante. Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GA = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica, GS = pompa di calore geotermica con bassa (b), media (m) e alta (a) conduttività termica del terreno.

Edificio	Località	Incentivo	GN	GPL	GAS	LEG	PEL	AS	GS _b	GS _m	GS _a
Monofamiliare	Torino	No	-15%	-17%	-16%	-13%	-14%	-7%	-14%	-14%	-13%
		Sì	-16%	-17%	-17%	-14%	-15%	-4%	-11%	-11%	-10%
	Cuneo	No	-8%	-10%	-9%	-6%	-8%	-12%	-13%	-12%	-12%
		Sì	-9%	-11%	-10%	-7%	-9%	-13%	-13%	-13%	-12%
	Oulx	No	0%	-2%	-1%	3%	1%	6%	1%	2%	2%
		Sì	1%	-1%	0%	5%	3%	1%	3%	4%	4%
Multifamiliare	Torino	No	-19%	-33%	-26%	2%	-9%	-24%	-23%	-27%	-28%
		Sì	-22%	-35%	-29%	0%	-11%	-26%	-41%	-46%	-47%
	Cuneo	No	-11%	-27%	-20%	10%	-2%	-22%	-21%	-23%	-23%
		Sì	-15%	-30%	-23%	8%	-4%	-23%	-36%	-38%	-39%
	Oulx	No	-1%	-14%	-8%	18%	8%	5%	-15%	-11%	-11%
		Sì	-6%	-16%	-11%	12%	3%	6%	-29%	-27%	-27%

Confrontando la Tabella 3.30 e la corrispettiva

si può notare, infatti, come le tecnologie a pompa di calore siano ora quasi sempre tra le tre soluzioni più convenienti, insieme alla coppia formata dalla caldaia a legna e dalla pompa di calore mono-split. Anche dall'analisi quantitativa dei valori minimi, massimi e mediani del LCOH (

Tabella 3.31,

Tabella 3.32, Tabella 3.33 e Tabella 3.34) risulta che il raffrescamento permette alle pompe di calore, in particolare a quelle geotermiche, di raggiungere valori più convenienti rispetto alle tecnologie concorrenti e alle stesse pompe di calore in regime di solo raffrescamento.

In conclusione, da un punto di vista economico e a parità di servizi energetici offerti, l'utilizzo delle pompe di calore geotermiche è decisamente consigliabile.

Tabella 3.30 – Impianti più vantaggiosi per tipologia di intervento e di edificio considerando per la località Torino sia il caso con le biomasse (b) sia quello senza (s). Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GA = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica, GS = pompa di calore geotermica.

Edificio	Località	Ristrutturazione importante					
		Senza incentivo			Con incentivo		
		1°	2°	3°	1°	2°	3°
Monofamiliare	Torino (b)	LEG	AS	GS	LEG	GS	AS
	Torino (s)	AS	GS	GN	GS	AS	GN
	Cuneo	AS	LEG	GS	AS	GS	LEG
	Oulx	LEG	AS	PEL	AS	LEG	GS
Multifamiliare	Torino (b)	AS	GS	LEG	GS	AS	LEG
	Torino (s)	AS	GS	GN	GS	AS	GN
	Cuneo	AS	GS	LEG	GS	AS	LEG
	Oulx	LEG	GS	AS	GS	AS	LEG

Tabella 3.31 – Valori minimi, massimi e medi del LCOH [€/MWh] per tipologia di impianto considerando il regime di incentivazione. Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GA = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica, GS = pompa di calore geotermica con bassa (b), media (m) e alta (a) conduttività termica del terreno.

	GN	GPL	GAS	LEG	PEL	AS	GS _b	GS _m	GS _a
Valore minimo	83.8	162.2	109.1	54.5	64.7	33.7	29.1	25.2	23.7
Valore massimo	126.7	266.6	174.5	76.7	99.2	74.4	86.7	81.1	79.0
Valore mediano	106.7	221.1	145.1	65.0	81.1	61.1	57.7	55.5	54.0

Tabella 3.32 – Valori minimi, massimi e medi del LCOH [€/MWh] per tipologia di impianto non considerando il regime di incentivazione. Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GA = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica, GS = pompa di calore geotermica con bassa (b), media (m) e alta (a) conduttività termica del terreno.

	GN	GPL	GAS	LEG	PEL	AS	GS _b	GS _m	GS _a
Valore minimo	95.6	174.0	122.3	66.4	78.5	60.3	69.3	60.9	57.7
Valore massimo	155.1	288.5	207.7	108.2	140.3	106.4	143.3	132.0	128.8
Valore mediano	126.3	240.8	168.6	85.5	107.1	94.0	108.3	103.5	100.3

Tabella 3.33 – Valori minimi, massimi e medi del LCOH [€/MWh] per tipologia di intervento, considerando l'Ecobonus, per gli edifici sottoposti a ristrutturazione importante.

Edificio	Località	Valore minimo	Valore massimo	Valore mediano
Monofamiliare	Torino	70.0	233.6	76.4
	Cuneo	73.2	253.0	77.8
	Oulx	73.7	266.6	86.7
Multifamiliare	Torino	23.7	162.2	54.5
	Cuneo	27.3	175.2	59.9
	Oulx	35.3	208.6	58.1

Tabella 3.34 – Valori minimi, massimi e medi del LCOH [€/MWh] per tipologia di intervento non considerando l'Ecobonus, per gli edifici sottoposti a ristrutturazione importante.

Edificio	Località	Valore minimo	Valore massimo	Valore mediano
Monofamiliare	Torino	98.3	261.3	127.5
	Cuneo	106.4	283.9	137.2
	Oulx	97.3	288.5	131.3
Multifamiliare	Torino	57.7	174.0	69.3
	Cuneo	61.5	188.7	73.6
	Oulx	69.9	220.3	85.3

3.8.3 Impatto sulle emissioni di gas serra e di inquinanti

Le emissioni di gas serra e di inquinanti, infine, risultano maggiori rispetto al caso solo riscaldamento come si può notare dalle tabelle che seguono. Il motivo è la proporzionalità con i consumi, i quali, come già evidenziato, aumentano inevitabilmente se si aggiunge un nuovo servizio energetico. In realtà, l'aumento delle emissioni è abbastanza contenuto a livello assoluto perché la quota eccedente rispetto al caso solo riscaldamento viene soddisfatta con tecnologie in pompa di calore che, tra le soluzioni analizzate, sono quelle meno impattanti dal punto di vista ambientale. Le emissioni sono state calcolate, infatti, considerando gli indici caratteristici di ogni tecnologia (caldaie o pompe di calore) per la frazione di carico termico di riscaldamento, mentre per quella correlata al raffrescamento l'unico indice di riferimento è stato, per evidenti motivi, quello dell'energia elettrica (pompe di calore).

Tabella 3.35 – Emissioni di GHG [kg di CO_{2,eq}/anno] nel caso di edifici sottoposti a ristrutturazione importante, nei quali viene integrato il servizio di raffrescamento. Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GA = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica, GS = pompa di calore geotermica.

Edificio	Località	GN	GPL	GAS	LEG	PEL	AS	GS
Monofamiliare	Torino	2387	2765	2742	498	247	625	345
	Cuneo	2297	2661	2639	479	237	494	242
	Oulx	3215	3724	3693	671	332	921	566
Multifamiliare	Torino	8447	9616	9548	2628	1853	1845	943
	Cuneo	7933	9014	8955	2469	1784	1226	771
	Oulx	10961	12589	12492	2825	1743	3116	1675

Tabella 3.36 – Emissioni di NO_x [g/anno] nel caso di edifici sottoposti a ristrutturazione importante, nei quali viene integrato il servizio di raffrescamento. Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GA = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica, GS = pompa di calore geotermica.

Edificio	Località	GN	GPL	GAS	LEG	PEL	AS	GS
Monofamiliare	Torino	2402	960	1570	2751	3022	489	270
	Cuneo	2312	924	1511	2648	2909	386	190
	Oulx	3235	1293	2115	3705	4071	720	442
Multifamiliare	Torino	8257	3812	5696	9339	10175	1442	737
	Cuneo	7743	3594	5352	8719	9528	958	603
	Oulx	10878	4668	7296	12381	13550	2436	1309

Tabella 3.37 – Emissioni di PM_{10} [g/anno] nel caso di edifici sottoposti a ristrutturazione importante, nei quali viene integrato il servizio di raffrescamento. Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GA = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica, GS = pompa di calore geotermica.

Edificio	Località	GN	GPL	GAS	LEG	PEL	AS	GS
Monofamiliare	Torino	6	6	37	2797	717	12	6
	Cuneo	6	6	35	2692	690	9	5
	Oulx	8	8	49	3768	966	17	11
Multifamiliare	Torino	39	39	133	8649	2233	35	18
	Cuneo	37	37	125	8061	2082	23	14
	Oulx	39	39	171	12063	3102	58	31

Tabella 3.38 – Emissioni di SO_2 [g/anno] nel caso di edifici sottoposti a ristrutturazione importante, nei quali viene integrato il servizio di raffrescamento. Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GA = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica, GS = pompa di calore geotermica.

Edificio	Località	GN	GPL	GAS	LEG	PEL	AS	GS
Monofamiliare	Torino	18	0	1709	1863	1337	147	81
	Cuneo	18	0	1645	1793	1286	116	57
	Oulx	25	0	2302	2509	1800	217	133
Multifamiliare	Torino	312	256	5529	6004	4380	435	222
	Cuneo	305	251	5166	5600	4095	289	182
	Oulx	239	160	7523	8185	5917	734	394

Tabella 3.39 – Emissioni di CO [kg/anno] nel caso di edifici sottoposti a ristrutturazione importante, nei quali viene integrato il servizio di raffrescamento. Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GA = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica, GS = pompa di calore geotermica.

Edificio	Località	GN	GPL	GAS	LEG	PEL	AS	GS
Monofamiliare	Torino	1.20	1.72	0.52	143.05	2.52	0.20	0.11
	Cuneo	1.16	1.65	0.50	137.68	2.42	0.16	0.08
	Oulx	1.62	2.31	0.70	192.68	3.39	0.29	0.18
Multifamiliare	Torino	4.05	5.64	1.96	441.60	8.11	0.58	0.30
	Cuneo	3.79	5.27	1.84	411.54	7.58	0.39	0.24
	Oulx	5.39	7.61	2.47	616.42	11.06	0.98	0.53

È necessario evidenziare che, per i sistemi duali con caldaia e pompa di calore, l'aumento delle emissioni è nullo nel caso monofamiliare perché la quota di energia elettrica necessaria viene interamente fornita dai pannelli fotovoltaici già installati. Per quanto riguarda, invece, i sistemi unicamente in pompa di calore, dall'analisi delle tabelle che seguono risulta che l'aumento delle emissioni è direttamente proporzionale all'aumento dei consumi. Ciò è dovuto al fatto che tali emissioni sono legate esclusivamente al consumo di energia elettrica e non di combustibili. In merito alle altre casistiche si notano incrementi relativi consistenti ove le emissioni erano precedentemente molto basse. Ad esempio, la caldaia a GPL ha emissioni di SO₂ trascurabili alle quali, però, nel caso di aggiunta del servizio di raffrescamento si sommano le emissioni di questo inquinante legate alla produzione elettrica. Per questo motivo, allo scopo di analizzare correttamente l'impatto ambientale di ciascuna tecnologia, è necessario valutare tanto le tabelle sugli incrementi percentuali che seguono, quanto quelle presentate precedentemente che riportano i valori assoluti sia per il caso di solo riscaldamento sia per il caso in cui si soddisfano entrambi i fabbisogni. In ogni caso è necessario sottolineare ulteriormente che le pompe di calore a compressione ad azionamento elettrico permettono di evitare qualsiasi emissione *in loco*, a meno di perdite di fluido refrigerante.

Tabella 3.40 – Incremento percentuale delle emissioni di GHG negli edifici sottoposti a ristrutturazione importante, in seguito al soddisfacimento del fabbisogno di raffrescamento. Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GA = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica, GS = pompa di calore geotermica.

Edificio	Località	GN	GPL	GAS	LEG	PEL	AS	GS
Monofamiliare	Torino	0%	0%	0%	0%	0%	34%	36%
	Cuneo	0%	0%	0%	0%	0%	79%	85%
	Oulx	0%	0%	0%	0%	0%	19%	20%
Multifamiliare	Torino	15%	13%	13%	71%	143%	31%	5%
	Cuneo	16%	13%	14%	72%	152%	19%	11%
	Oulx	7%	6%	6%	32%	64%	39%	11%

Tabella 3.41 – Incremento percentuale delle emissioni di NO_x negli edifici sottoposti a ristrutturazione importante, in seguito al soddisfacimento del fabbisogno di raffrescamento. Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GA = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica, GS = pompa di calore geotermica.

Edificio	Località	GN	GPL	GAS	LEG	PEL	AS	GS
Monofamiliare	Torino	0%	0%	0%	0%	0%	34%	36%
	Cuneo	0%	0%	0%	0%	0%	79%	85%
	Oulx	0%	0%	0%	0%	0%	19%	20%
Multifamiliare	Torino	11%	29%	18%	10%	9%	31%	5%
	Cuneo	12%	30%	19%	10%	10%	19%	11%
	Oulx	5%	13%	8%	4%	4%	39%	11%

Tabella 3.42 – Incremento percentuale delle emissioni di PM₁₀ negli edifici sottoposti a ristrutturazione importante, in seguito al soddisfacimento del fabbisogno di raffrescamento. Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GA = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica, GS = pompa di calore geotermica.

Edificio	Località	GN	GPL	GAS	LEG	PEL	AS	GS
Monofamiliare	Torino	0%	0%	0%	0%	0%	34%	36%
	Cuneo	0%	0%	0%	0%	0%	79%	85%
	Oulx	0%	0%	0%	0%	0%	19%	20%
Multifamiliare	Torino	110%	110%	18%	0%	1%	31%	5%
	Cuneo	116%	116%	19%	0%	1%	19%	11%
	Oulx	49%	49%	8%	0%	0%	39%	11%

Tabella 3.43 – Incremento percentuale delle emissioni di SO₂ negli edifici sottoposti a ristrutturazione importante, in seguito al soddisfacimento del fabbisogno di raffrescamento. Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GA = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica, GS = pompa di calore geotermica.

Edificio	Località	GN	GPL	GAS	LEG	PEL	AS	GS
Monofamiliare	Torino	0%	-	0%	0%	0%	34%	36%
	Cuneo	0%	-	0%	0%	0%	79%	85%
	Oulx	0%	-	0%	0%	0%	19%	20%
Multifamiliare	Torino	451%	-	5%	4%	6%	31%	5%
	Cuneo	479%	-	5%	5%	7%	19%	11%
	Oulx	203%	-	2%	2%	3%	39%	11%

Tabella 3.44 – Incremento percentuale delle emissioni di CO negli edifici sottoposti a ristrutturazione importante, in seguito al soddisfacimento del fabbisogno di raffrescamento. Legenda: GN = caldaia a condensazione a gas naturale, GPL = caldaia a condensazione a GPL, GA = caldaia a condensazione a gasolio, LEG = caldaia a condensazione a legna, PE = caldaia a condensazione a pellet, AS = pompa di calore aerotermica, GS = pompa di calore geotermica.

Edificio	Località	GN	GPL	GAS	LEG	PEL	AS	GS
Monofamiliare	Torino	0%	0%	0%	0%	0%	34%	36%
	Cuneo	0%	0%	0%	0%	0%	79%	85%
	Oulx	0%	0%	0%	0%	0%	19%	20%
Multifamiliare	Torino	9%	6%	21%	0%	4%	31%	5%
	Cuneo	10%	7%	22%	0%	5%	19%	11%
	Oulx	4%	3%	10%	0%	2%	39%	11%

4 Scenari di crescita

La risorsa geotermica a bassa entalpia risulta ancora poco sfruttata a livello regionale e nazionale pur considerando i vantaggi economici e ambientali discussi nei capitoli precedenti. Risulta importante individuare, pertanto, i possibili scenari futuri legati all'uso di questa tecnologia in Piemonte, in particolare relativamente alla quota di fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento che è possibile soddisfare nel contesto regionale. La previsione delle nuove installazioni di pompe di calore geotermiche è piuttosto complesso in quanto dipende da molteplici fattori quali l'evoluzione del costo di questa tipologia di impianto e delle alternative a disposizione, del prezzo dell'energia elettrica, delle misure di incentivazione economica e del contesto legislativo del settore. Tuttavia, è possibile ricavare informazioni utili sulla base dei dati storici e statistici disponibili a livello regionale, nazionale ed europeo, correlandoli a provvedimenti presi o ad altri mutamenti delle condizioni al contorno.

In questo capitolo verranno dapprima presentate, nel Paragrafo 4.1, i principali andamenti della produzione e del consumo di energia geotermica a bassa entalpia in Piemonte, in Italia e negli altri Paesi europei. Sulla base di tali dati sono stati ipotizzati, nel Paragrafo 4.2, alcune tendenze di sviluppo fino al 2030 per il contesto piemontese. Nel Paragrafo 4.3, infine, questi risultati sono stati confrontati con gli obiettivi di sviluppo del consumo energetico da fonti rinnovabili auspicati dall'Italia e dall'Europa.

4.1 Analisi dei dati a disposizione

4.1.1 Pompe di calore geotermiche in Piemonte

Nonostante l'assenza di una banca dati dedicata alle pompe di calore geotermiche uniformata a livello regionale, è possibile ricavare alcune informazioni utili sullo sviluppo storico del settore dal Catasto degli Impianti Termici (CIT), consultabile sul sito della Regione Piemonte [101]. Sul CIT sono riportati i dati relativi agli impianti termici installati dal 1985 ad oggi, inclusi il modello di macchina utilizzato, la tipologia e la potenza nominale. Ai fini della presente analisi sono stati considerati unicamente gli impianti la cui sorgente esterna di calore è stata contrassegnata come "acqua" nel *database*. In ogni caso, è stata operata una verifica dalle schede tecniche dei produttori al fine di verificare che la macchina fosse effettivamente progettata per la geotermia. A causa della limitata disponibilità di informazioni all'interno della banca dati, nella maggioranza dei casi non è stato possibile distinguere tra impianti a circuito chiuso, dotati di sonde, ed impianti a ciclo aperto, con estrazione da acquifero.

Ad ogni modo, l'andamento riportato in Figura 4.1 evidenzia una crescita costante delle installazioni di pompe di calore geotermiche, in particolare si attesta un andamento lineare con una crescita media annua del totale delle installazioni pari al 10% nel decennio 2009-2019. Come si può notare dalla Figura 4.4, gli impianti di piccola taglia (sotto i 30 kW) per edifici di piccole e medie dimensioni rappresentano circa la metà sul totale delle installazioni, mentre circa un nuovo impianto geotermico su cinque è di grande taglia (>300 kW). È evidente,

inoltre, un aumento delle installazioni nel quinquennio 2006-2010, attribuibile all'introduzione delle detrazioni d'imposta al 55% per le ristrutturazioni energetiche nel 2006 (successivamente incrementate al 65%). Si può notare, infine, che nel 2018 in Piemonte sono stati installati circa 24 MW di potenza da pompe di calore geotermiche, sui 262 MW totali installati in Italia (pari a circa il 9.2%).

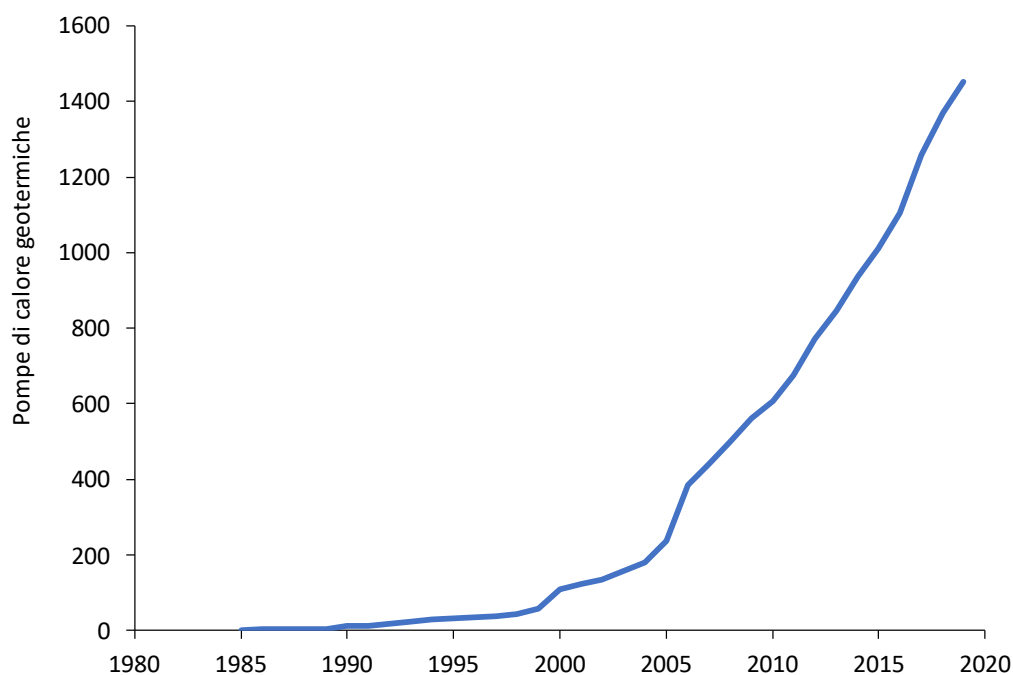


Figura 4.1 - Pompe di calore geotermiche installate in Piemonte dal 1985 al 2019, curva cumulata. Dati: CIT Piemonte [101].

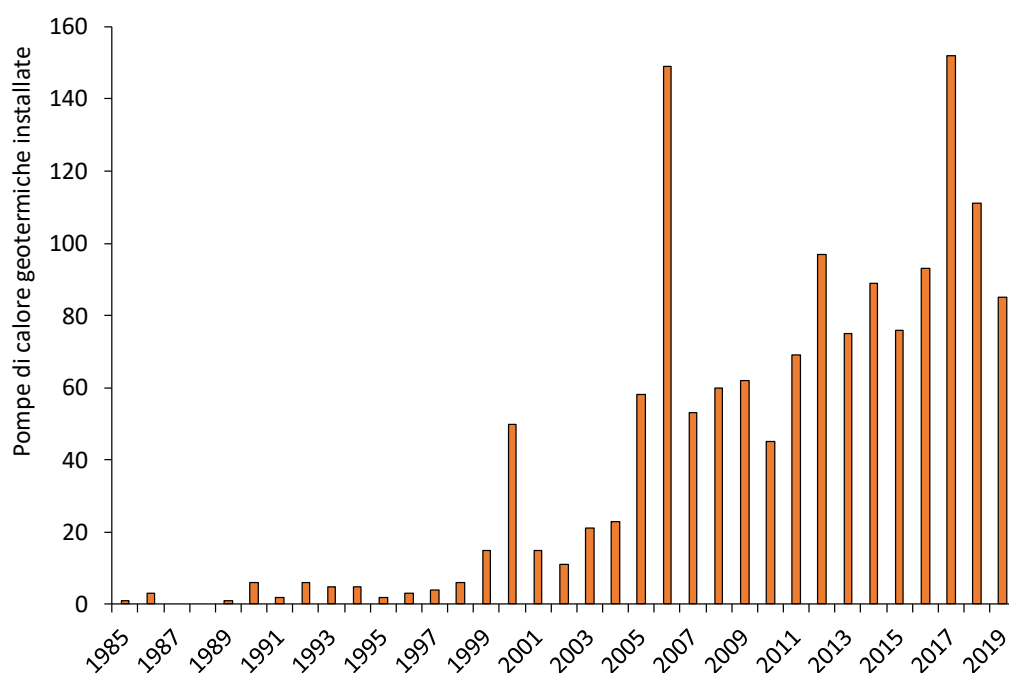


Figura 4.2 – Pompe di calore geotermiche installate in Piemonte ogni anno, 1985-2019. Dati: CIT Piemonte [101].

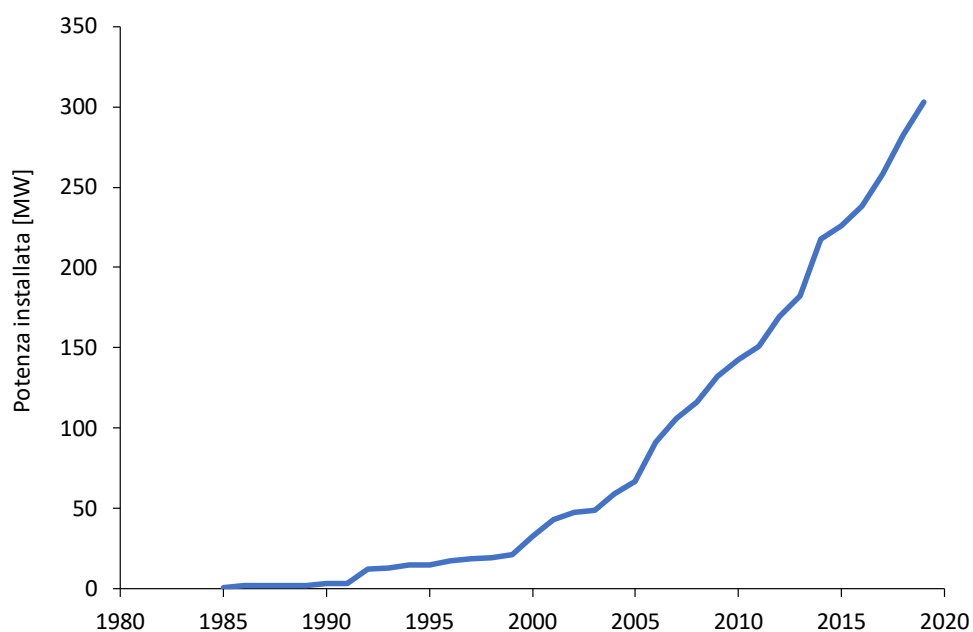


Figura 4.3 – Potenza termica totale installata prodotta da pompe di calore geotermiche in Piemonte nel periodo 1985-2019.
Dati: CIT Piemonte [101].

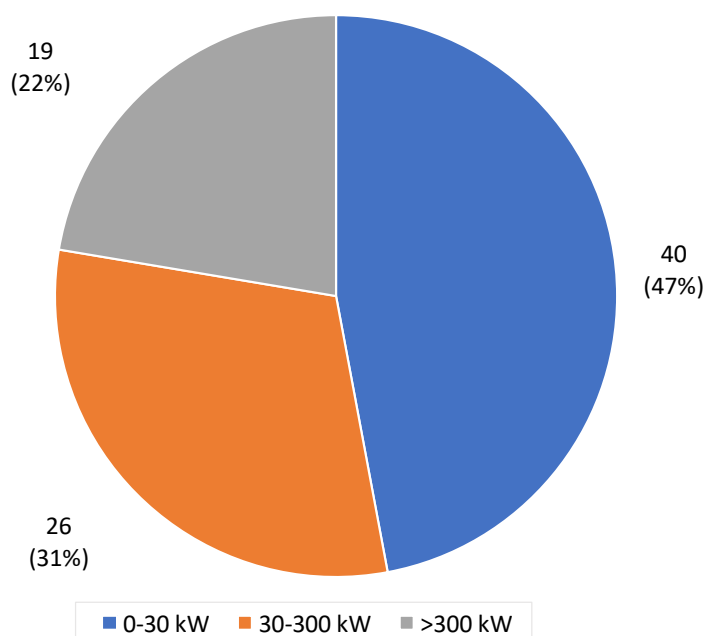


Figura 4.4 – Ripartizione delle taglie di potenza degli impianti a pompa di calore geotermica installati in Piemonte nel 2019.
Dati: CIT Piemonte [101].

Le statistiche ENEA sulle detrazioni economiche al 55% e 65% per interventi di ristrutturazione energetica permettono, inoltre, di tracciare l'andamento delle sostituzioni di impianti esistenti con pompe di calore geotermiche dal 2011 fino al 2017 [102]. Vista la convenienza di

questo regime di incentivazione, infatti, è difficile ipotizzare che siano stati realizzati ulteriori impianti in interventi di ristrutturazione senza richiedere l'Ecobonus. I dati mostrano come le sostituzioni di impianti esistenti con soluzioni geotermiche rimanga ancora una soluzione relativamente poco praticata, con una media di soli 14 interventi l'anno, nonostante il costo degli impianti si sia ridotto di circa il 40% nel periodo analizzato. Le sostituzioni all'interno del regime di detrazione fiscale per ristrutturazione energetica rappresentano una quota variabile pari al 10-30% sul totale di impianti geotermici realizzati tra il 2011 e il 2017. Il grafico in Figura 4.5 riporta, inoltre, l'andamento del costo medio degli impianti presentati per la detrazione, che attualmente si aggira sui 30000 euro.

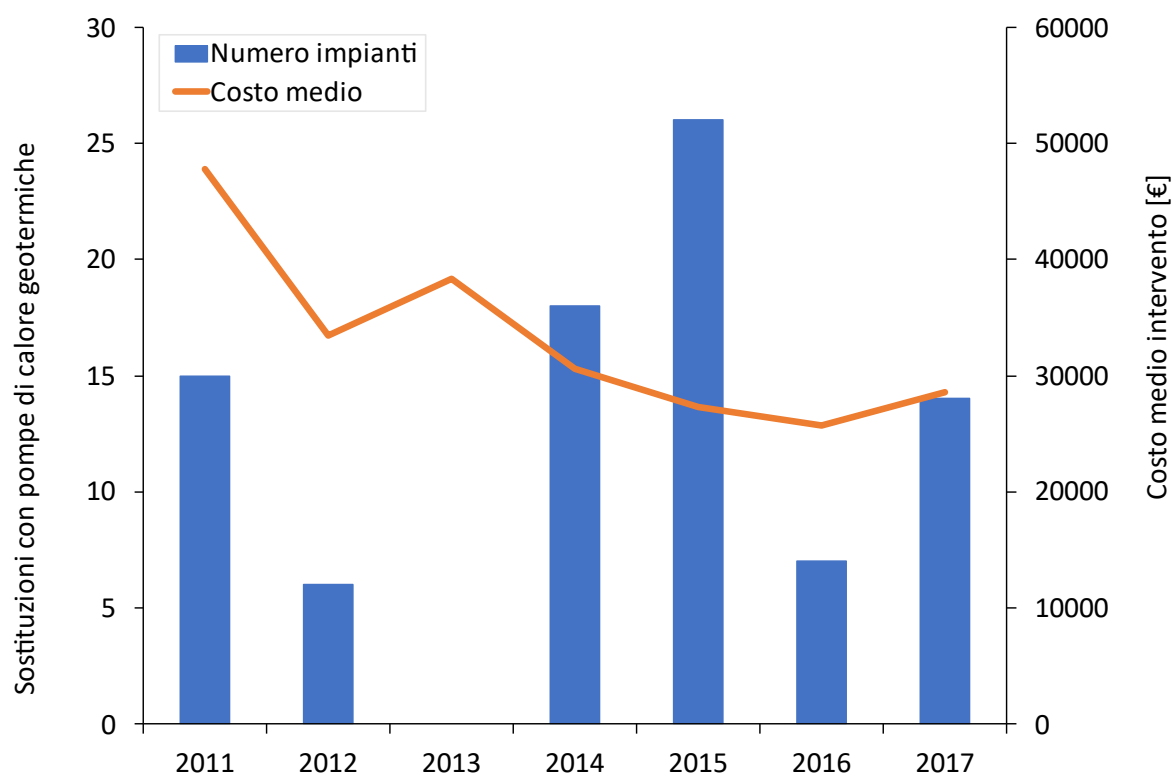


Figura 4.5 – Sostituzione di impianti esistenti con pompe di calore geotermiche e costo medio degli interventi in Piemonte dal 2011 al 2017. Dati relativi alle sostituzioni nel 2013 non disponibili. Dati: Enea [102].

4.1.2 Pompe di calore geotermiche in Italia e in altre Regioni

Per poter effettuare ipotesi attendibili sulle evoluzioni future del mercato delle pompe di calore geotermiche è utile osservare l'andamento dei nuovi impianti installati e delle vendite di pompe di calore nelle altre Regioni italiane e a livello nazionale. La Lombardia, ad esempio, ha istituito nel 2010 il Registro regionale delle sonde geotermiche (RSG), una banca dati delle sonde e relativi impianti installati nel territorio regionale. Trascurando il picco di impianti registrati negli anni immediatamente successivi all'attivazione del RSG, che includono verosimilmente anche impianti realizzati in precedenza, risulta evidente come dal 2013 vi è un andamento negativo dei nuovi impianti installati, i cui numeri risultano molto bassi considerando l'estensione del territorio lombardo e la densità abitativa. Nel periodo 2013-2019 la

crescita media annuale degli impianti totali in funzione è stata del 6.7%, ed il numero di nuovi impianti installati annualmente è in decrescita come evidenziato in Figura 4.6.

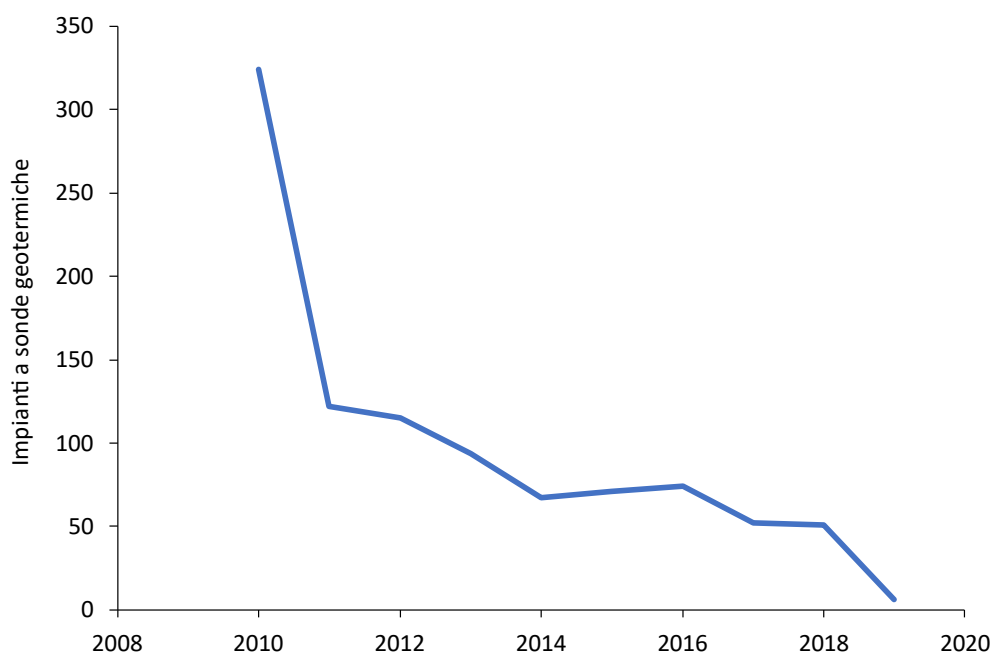


Figura 4.6 – Impianti a sonde geotermiche installati in Lombardia. Dati: RSG Lombardia [103].

L'andamento del mercato delle pompe di calore geotermiche a livello nazionale può essere monitorato indirettamente attraverso le indagini statistiche sul mercato degli impianti di condizionamento dell'aria redatte annualmente da Assoclima, l'Associazione dei costruttori di Sistemi di Climatizzazione federata ad ANIMA - Confindustria Meccanica Varia. Le analisi includono le pompe di calore a compressione con condensazione ad acqua, sia reversibili sia per solo riscaldamento (mentre sono state escluse le macchine per solo raffreddamento). Questi dati mostrano a livello nazionale un chiaro andamento decrescente (circa il -3% annuo) del numero di unità vendute negli ultimi cinque anni, in contrasto con un forte aumento dell'utilizzo di pompe di calore ad aria (+13% annuo, si veda Figura 4.7). Tuttavia, il fatturato complessivo risulta in aumento dal 2017 per entrambe le categorie. L'utilizzo di pompe di calore ad aria è prevalente specialmente per le piccole taglie. In base ai dati sul 2019, le pompe di calore ad acqua rappresentano solamente il 2.7% sul totale delle nuove pompe di calore installate (700-900 impianti installati annualmente), ed il relativo fatturato è pari al 2.6% sul complessivo (Figura 4.8). Il 71% del fatturato per le pompe di calore ad acqua è dovuto ad impianti di potenza relativamente alta (>50 kW), come evidenziato in Figura 4.9. Tra il 2012 e il 2019 sono state installate in Italia circa 5400 nuove pompe di calore che utilizzano acqua come fluido sorgente. L'analisi delle tendenze commerciali rivela come in Italia il mercato delle pompe di calore ad aria sia in forte ascesa, trainato principalmente dalle installazioni di piccola e media taglia. Al contrario le pompe di calore ad acqua sono sempre meno utilizzate per gli impianti di piccola taglia, ma sono in lieve aumento le installazioni su applicazioni su grossi edifici dove le economie di scala aiutano a ridurre i tempi di ritorno di

investimento e i consumi per riscaldamento e raffrescamento incidono maggiormente nel bilancio economico complessivo.

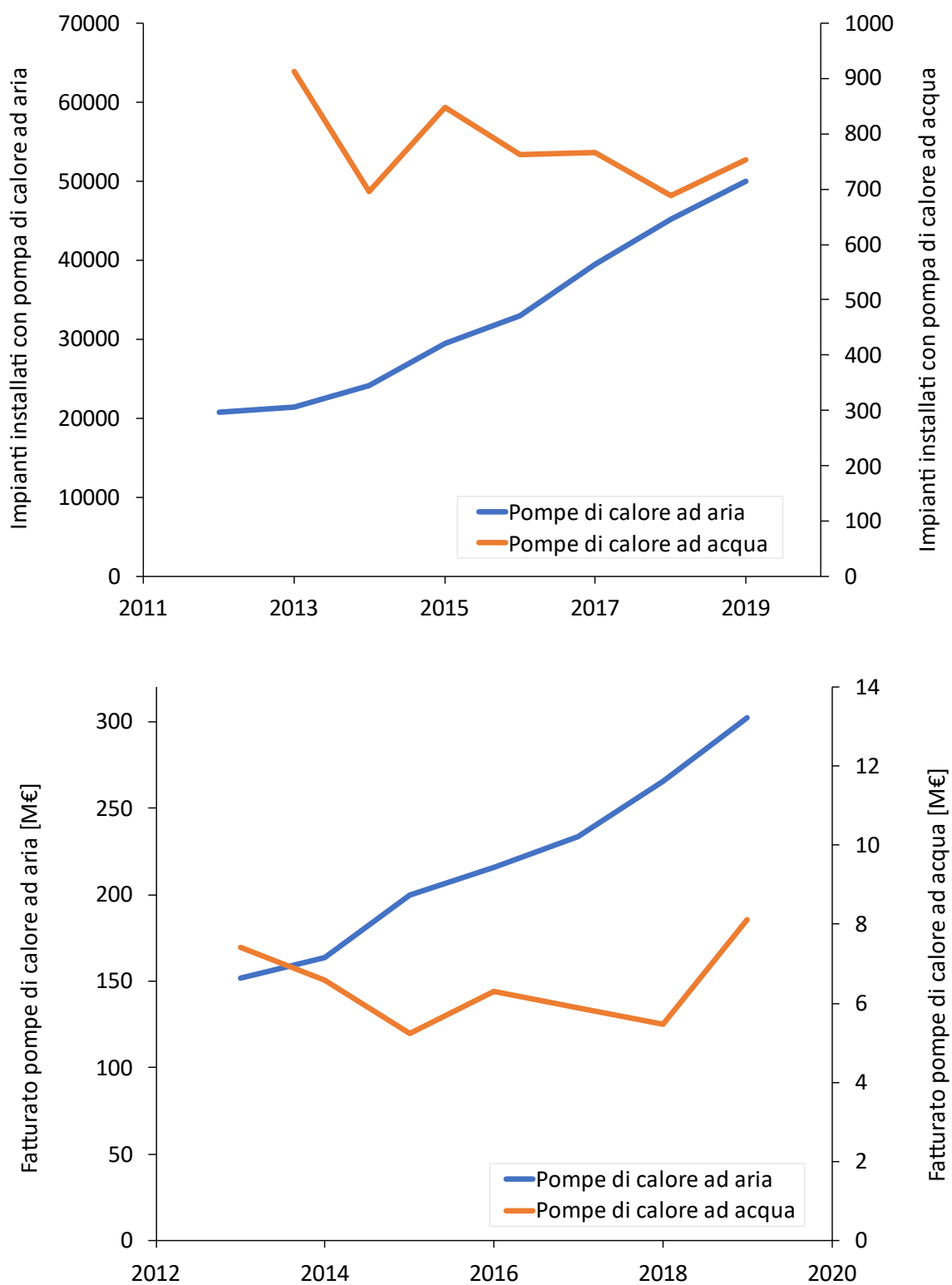


Figura 4.7 – Unità installate (sopra) e fatturato di vendita (sotto) di gruppi refrigeratori di liquido a compressione in Italia, condensazione ad acqua e condensazione ad aria (reversibili e solo riscaldamento). Dati: Assoclimate [104].

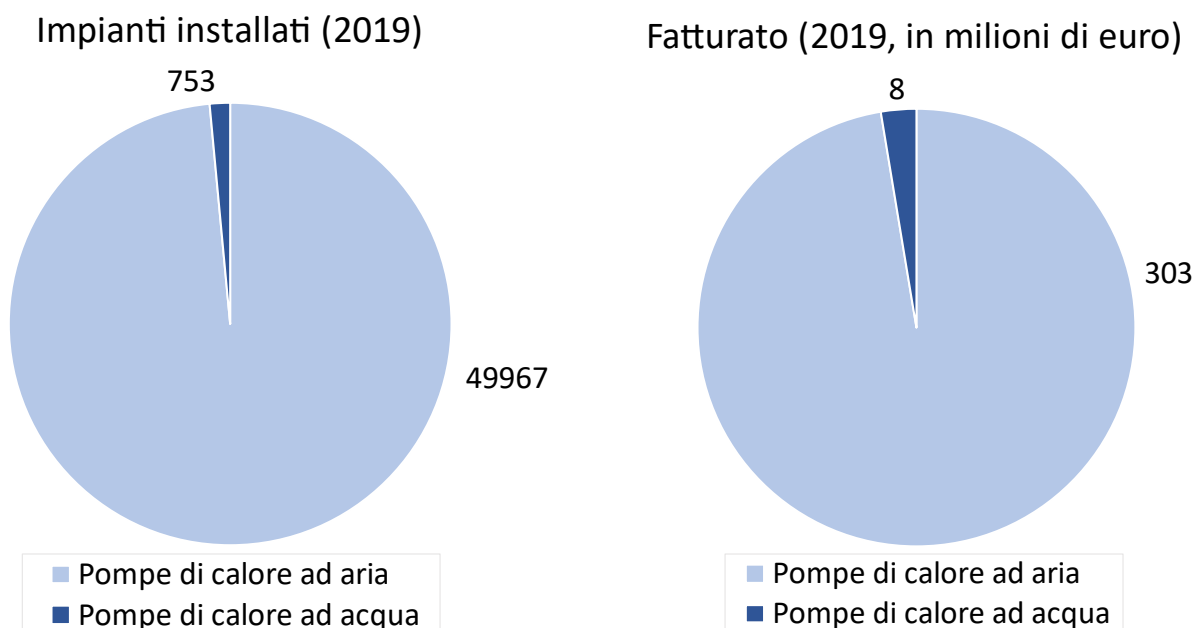


Figura 4.8 – Unità vendute e fatturato in Italia (produzione nazionale + import) per pompe di calore a sorgente aria ed a sorgente acqua, nel 2019. Dati: Assoclima [104].

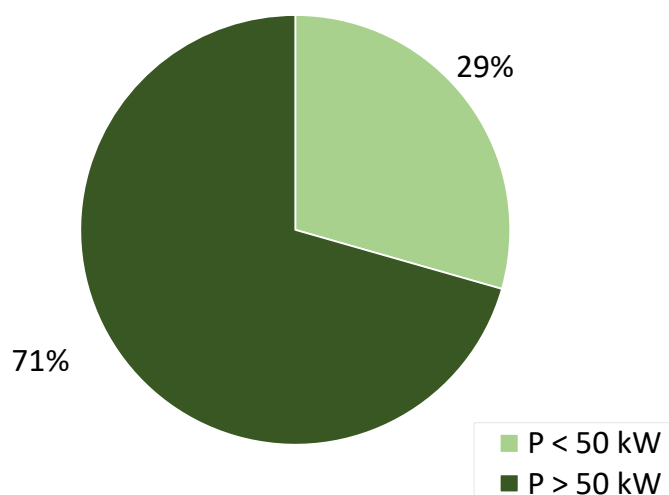


Figura 4.9 – Ripartizione percentuale del fatturato delle pompe di calore ad acqua (reversibili e solo riscaldamento) in Italia per fascia di potenza, nel 2019. Dati: Assoclima [104].

4.1.3 Pompe di calore in geotermiche in altri Paesi

L'utilizzo di pompe di calore geotermiche nel mondo è in continua ascesa, come testimonia l'aumento medio annuo della potenza installata negli ultimi 15 anni (oltre l'11%). Tale crescita è trainata principalmente da Cina e Stati Uniti, che da soli rappresentano il 67% della potenza installata globale (Figura 4.10) [105], seguite a grande distanza dai due principali mercati europei, Svezia (10%) e Germania (6%). In Europa, la crescita del mercato delle pompe di calore geotermiche è lenta ma costante, pari a circa il 3% annuo nell'ultimo quinquennio. Tuttavia, come registrato in Italia, le pompe di calore che sfruttano il terreno come sorgente termica rappresentano solamente il 10% del totale, mentre prevalgono le pompe di calore ad aria ed

i condizionatori (Figura 4.11). I mercati attualmente in più forte espansione sono i Paesi Bassi, il Belgio e il Regno Unito mentre si sta verificando una contrazione delle vendite in Irlanda, Italia ed Austria come riportato in Tabella 4.1. I dati mostrano come il mercato italiano delle pompe di calore geotermiche sia ancora molto ridotto rispetto ad altri paesi europei, ma con grandi potenzialità di sviluppo.

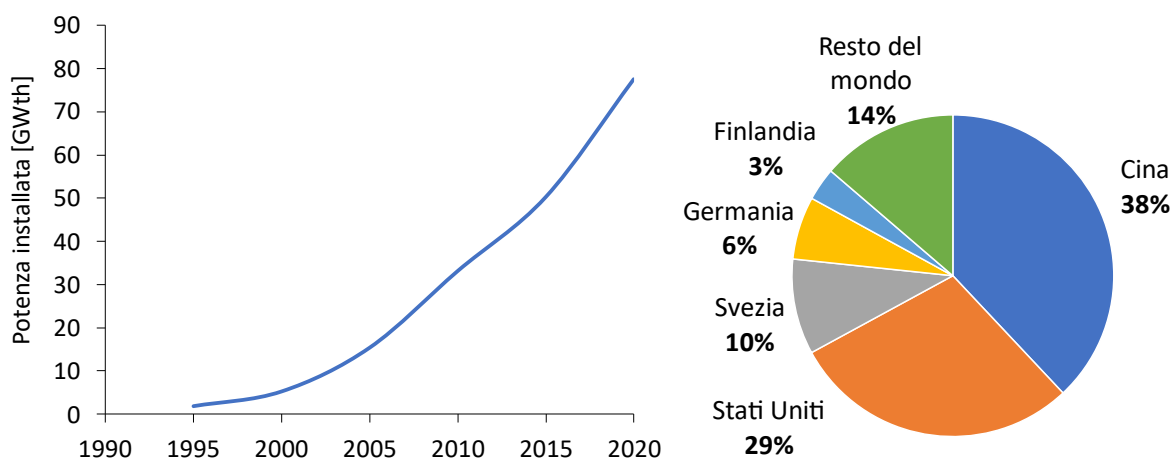


Figura 4.10 – Potenza installata da pompe di calore geotermiche nel mondo, evoluzione temporale (sinistra) e ripartizione tra i paesi nel 2019 (destra). Rielaborazione dati da [105].

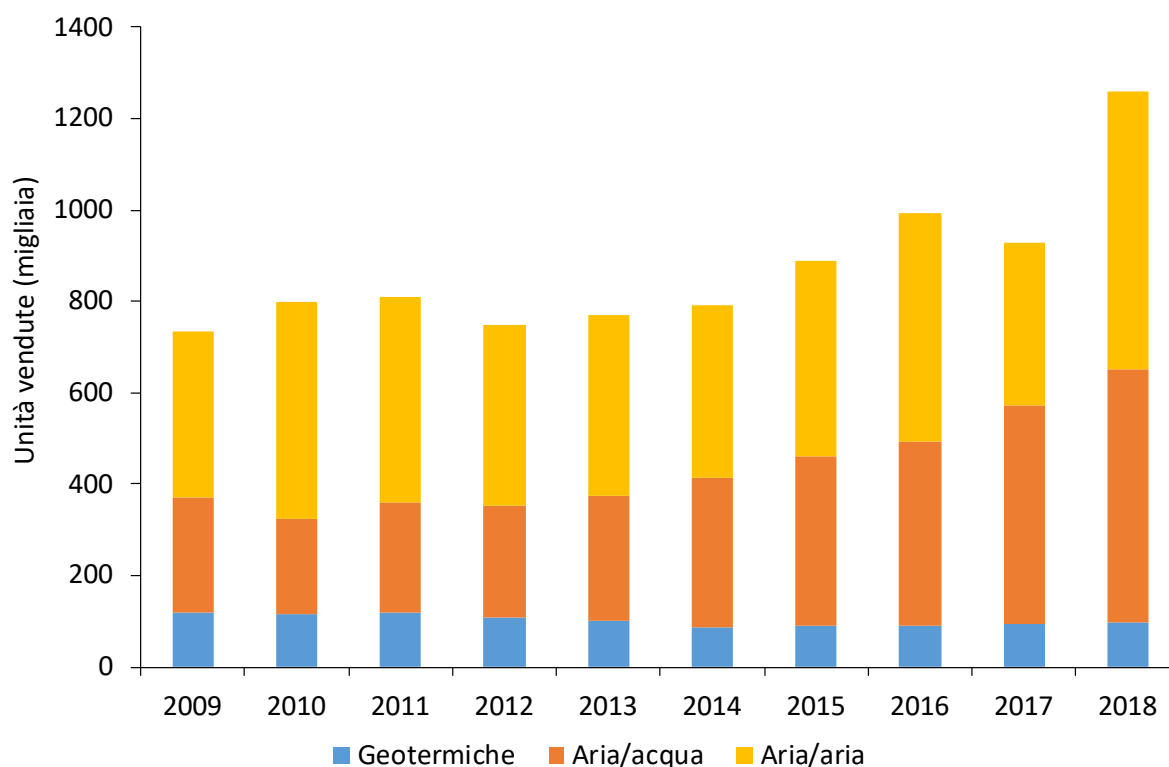


Figura 4.11 – Trend di vendita di pompe di calore nel mercato europeo. Rielaborazione dati da [106].

Tabella 4.1 – Vendite di pompe di calore geotermiche in Europa. Dati: EurObserv'ER [107].

Paese	Unità di pompe di calore geotermiche vendute						Variazione media annua
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2016-2019
Paesi Bassi	2510	2086	4065	4806	6504	12112	+31%
Belgio	1404	1404	1600	1963	1872	2595	+13%
Regno Unito	2190	2388	1920	2358	2310	3026	+12%
Polonia	5275	5567	5390	5660	5831	6710	+6%
Svezia	23356	26377	22843	22641	24162	25343	+3%
Francia	4045	3810	3095	3100	3080	3300	+2%
Finlandia	11125	9210	8491	7986	7995	8988	+1%
Danimarca	2242	1885	2248	2143	2310	2251	-0%
Rep. Ceca	1578	1586	1521	1561	1647	1417	-2%
Germania	18500	17000	20789	20170	21137	19000	-2%
Austria	5885	5897	5228	5230	5513	4699	-3%
Italia	780	952	857	860	775	753	-3%
Irlanda	508	337	371	291	291	316	-4%
EU	79398	78571	78495	78864	83646	90708	+4%

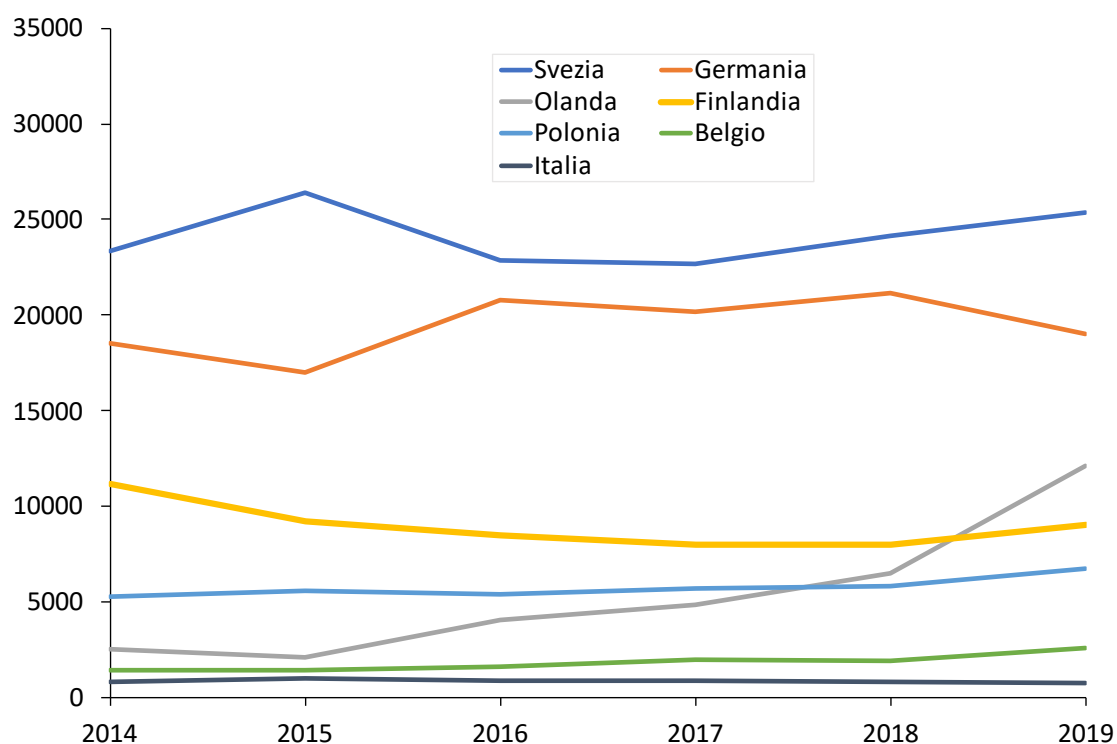


Figura 4.12 – Trend di vendite pompe di calore geotermiche 2014-2019 in alcuni mercati europei. Dati: EurObserv'ER [107].

La Svezia è il paese con il più alto numero di impianti geotermici installati in rapporto alla popolazione: oltre 500 mila impianti in funzione in un Paese di 10 milioni di abitanti. Le pompe

di calore sono state adottate su vasta scala in Svezia nel decennio 1995-2004, con un incremento medio annuo del 30%, al termine del quale è stato raggiunto un picco di oltre 40 mila nuovi impianti annuali (Figura 4.13). Successivamente il mercato si è pressoché stabilizzato su vendite annue di circa 20 mila impianti all'anno [108]. Un ulteriore dato interessante riguarda il fatto che negli ultimi anni si sta registrando un calo delle vendite per gli impianti di taglia monofamiliare, inferiore ai 10 kW, ed al contempo si sta verificando un progressivo aumento degli impianti di taglia media, compresi tra 11-25 kW, per riscaldare edifici plurifamiliari e commerciali (Figura 4.14). Come risultato, dal 2017 il numero totale di nuovi impianti geotermici installati annualmente in Svezia è in lieve aumento, come già evidenziato dai dati in Tabella 4.1.

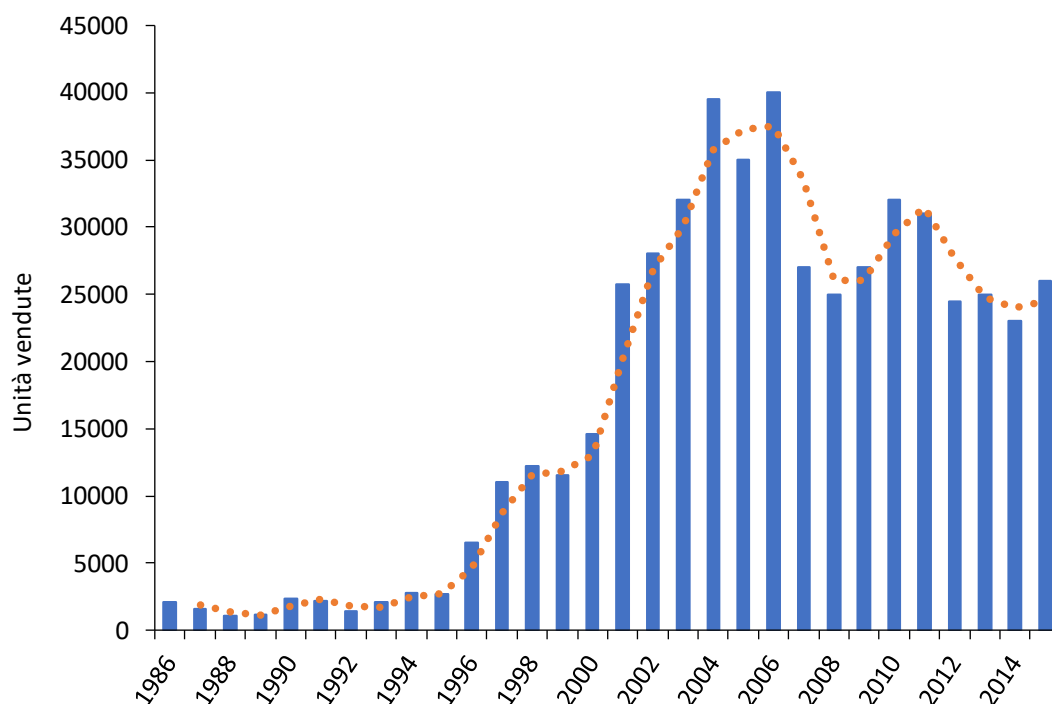


Figura 4.13 – Vendite di pompe di calore geotermiche in Svezia 1986-2015, con andamento medio quinquennale.
Rielaborazione dati da [108].

In Germania, l'altro Paese europeo con un alto grado di diffusione degli impianti geotermici, la tendenza di vendita delle pompe di calore segue un andamento simile a quanto rilevato in Italia, ovvero con un decremento delle pompe di calore geotermiche contrapposto ad una forte crescita delle aerotermiche (Figura 4.15). Grazie all'effetto degli incentivi attivati nel 1995, negli anni 2000-2018 sono stati installati ben 375 mila nuovi impianti geotermici nel territorio tedesco. Il picco di vendite si è raggiunto nel 2008, anno della crisi finanziaria globale, in seguito al quale il mercato ha subito una progressiva contrazione, pur mantenendo volumi di vendita molto alti. Un dato interessante riguarda la diminuzione del divario tra il rendimento medio stagionale delle pompe di calore geotermiche e quello delle aerotermiche, che si è assottigliato nel corso degli anni, rendendo le pompe di calore ad aria sempre più convenienti, soprattutto in applicazioni di piccola taglia [5]. Esclusi gli anni 2017-2019, anche

in Francia vi è stata una netta riduzione delle installazioni di impianti a sonde geotermiche residenziali dopo il picco del 2008 in cui si raggiunse la cifra di circa 20 mila nuovi impianti installati in un solo anno (Figura 4.16). Tra il 2002 e il 2017 sono stati installati circa 150 mila impianti geotermici di potenza compresa tra 2 e 50 kW.

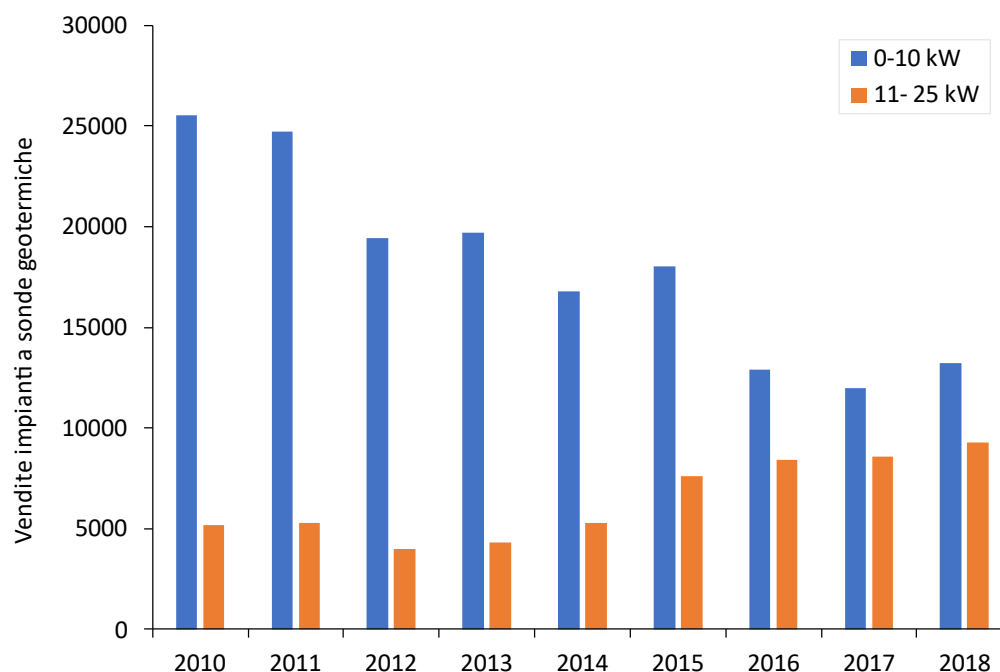


Figura 4.14 – Vendite di pompe di calore geotermiche in Svezia, per fascia di potenza, nel periodo 2010-2018. Rielaborazione dati da [109].

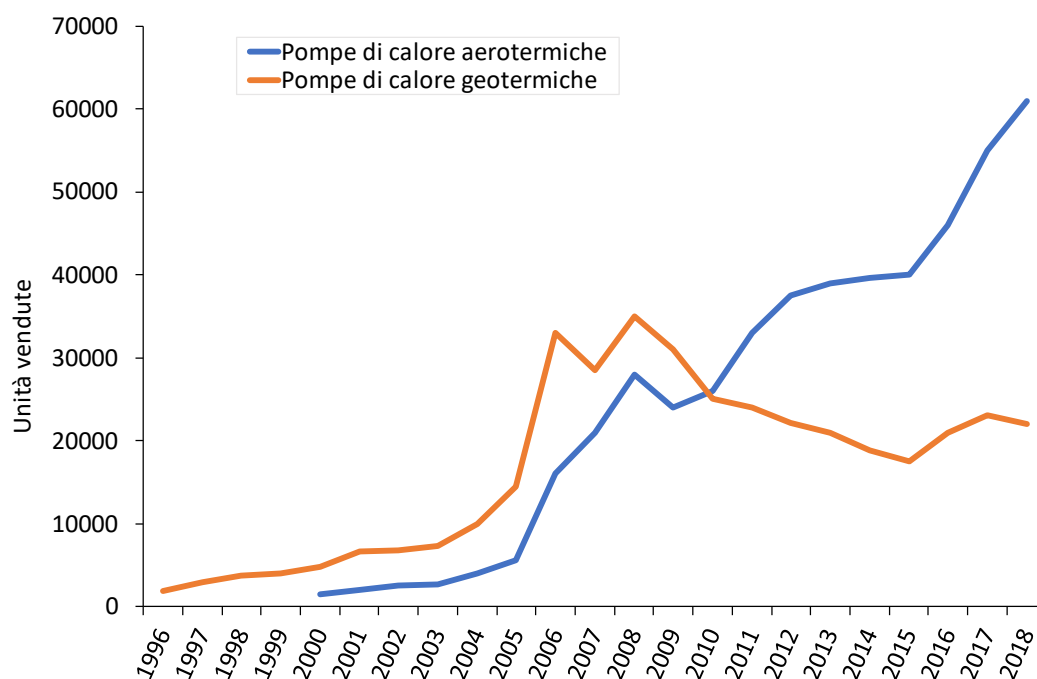


Figura 4.15 – Trend di vendita delle pompe di calore in Germania, per tipologia. Rielaborazione dati da [5].

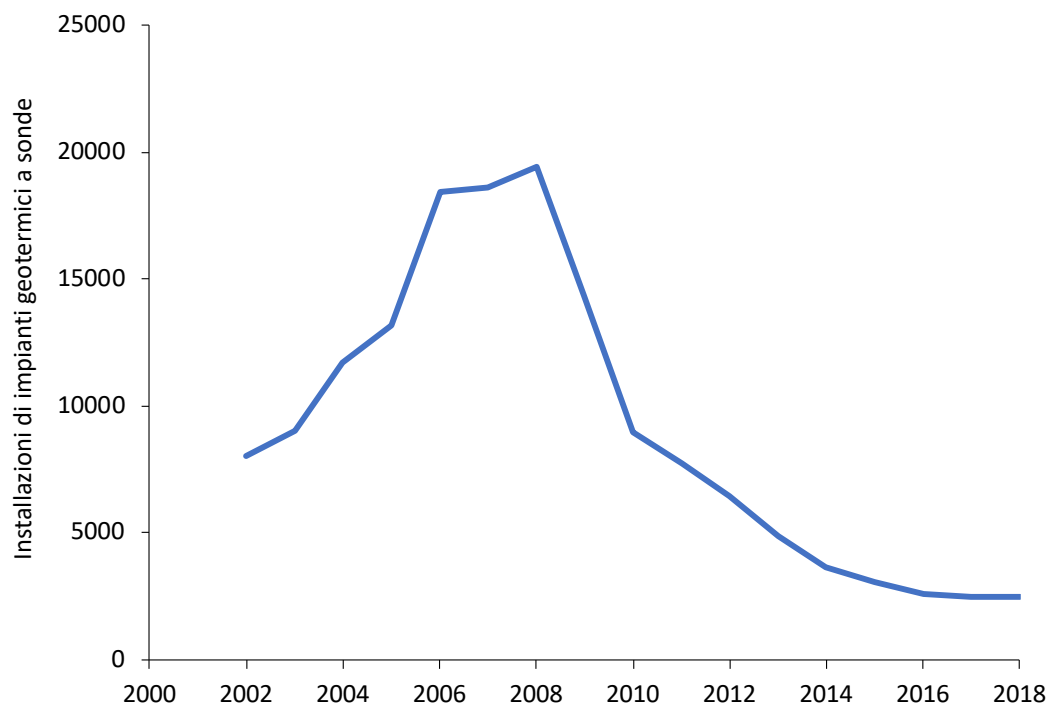


Figura 4.16 – Evoluzione delle vendite di pompe di calore geotermiche in Francia (potenza 2-50 kW) dal 2002 al 2018. Dati: AFGP [110].

4.2 Scenari ipotizzati

Per analizzare gli scenari di sviluppo delle pompe di calore geotermiche in Piemonte fino al 2030 è necessario effettuare alcune ipotesi. Basandosi sui dati relativi al Catasto degli Impianti Termici è possibile determinare l'andamento delle installazioni nel periodo 1996-2020 ed le tendenze di crescita delle nuove installazioni. Per ridurre l'effetto delle oscillazioni annuali, si è deciso di procedere ad un'analisi su base quinquennale, come riportato in Tabella 4.2. Nel periodo immediatamente successivo all'entrata in vigore delle detrazioni fiscali al 55% per le ristrutturazioni energetiche nel 2006 (quinquennio 2006-2010) vi è stato un incremento notevole delle nuove installazioni rispetto al quinquennio precedente. L'effetto trainante delle nuove misure di incentivazione si è successivamente ridotto e la crescita è diminuita nel periodo successivo.

Tabella 4.2 – Pompe di calore geotermiche installate in Piemonte dal 1996 al 2020.

Periodo	Pompe di calore geotermiche installate	Incremento relativo al periodo precedente
1996-2000	78	-
2001-2005	128	64%
2006-2010	369	188%
2011-2015	406	10%
2016-2020	497	22%

Nel periodo 2016-2020 sono state installate quasi 500 nuove pompe di calore geotermiche, con un incremento del 22% rispetto al quinquennio precedente. Ipotizzando che tale crescita rimanga costante in futuro è possibile definire uno scenario *Business As Usual* (BAU) per il contesto piemontese dal 2021 al 2030.

Lo scenario di sviluppo di grado “medio” preso in considerazione prevede, invece, che la recente introduzione del Superbonus (attualmente in vigore fino al 31 dicembre 2022, anche se la Legge di Bilancio 2022 dovrebbe contenere la proroga al 31 dicembre 2023 [111]) abbia un effetto positivo temporaneo sul mercato delle pompe di calore geotermiche, similmente a quanto avvenuto nel quinquennio 2006-2010 con le detrazioni fiscali al 55%. Si è ipotizzato che l’incremento delle nuove installazioni (in termini assoluti) nel quinquennio 2021-2025 sia pari a quello riscontrato nel periodo 2006-2010 (+241 installazioni rispetto al 2001-2005); ciò porterebbe quindi a 738 installazioni nel 2021-2025 (+49% rispetto al quinquennio precedente). Nel quinquennio successivo si osserva invece una crescita del 22% per il periodo 2026-2030, pari allo scenario BAU.

Per lo scenario di sviluppo di grado “alto” si è invece considerato che lo stimolo legato al Superbonus si protragga fino al 2030 con una crescita costante del numero di nuove pompe di calore geotermiche installate pari al 50% su base quinquennale.

Tali scenari rappresentano sviluppi realistici del mercato delle pompe di calore geotermiche in Piemonte, in un contesto nel quale le pompe di calore ad aria rappresentano la quota maggiore del mercato delle pompe di calore per riscaldamento e raffrescamento degli edifici con un andamento di crescita molto elevato negli ultimi anni (Figura 4.7)

Diversamente da quanto avvenuto in altri Paesi europei, in Italia il mercato delle pompe di calore geotermiche è sempre rimasto di nicchia e risulta pertanto improbabile che nel breve e medio periodo le pompe di calore geotermiche possano raggiungere un livello di diffusione sul territorio paragonabile a quello delle pompe di calore ad aria.

Tabella 4.3 – Scenari di sviluppo per le pompe di calore geotermiche installate in Piemonte dal 2021 al 2030. La crescita è definita sulla base dei nuovi impianti installati nel quinquennio antecedente.

Periodo	Scenari di sviluppo					
	BAU		Medio		Alto	
	Impianti	Crescita	Impianti	Crescita	Impianti	Crescita
2016-2020	497	22%	497	22%	497	22%
2021-2025	608	22%	738	49%	738	49%
2026-2030	745	22%	903	22%	1107	50%

4.3 Analisi degli scenari

I risultati ottenuti dall’analisi degli scenari sono riportati in Figura 4.17 e in Figura 4.18. A seconda del grado di sviluppo previsto del settore, gli scenari analizzati prevedono che nel decennio 2021-2030 verranno installati in Piemonte un numero di nuovi impianti compreso tra circa 1300 e 1800 unità, portando il totale delle installazioni a 2800-3400 unità. Pertanto, si può prevedere che nel 2030 saranno in funzione in Piemonte circa il doppio degli impianti a pompa di calore geotermica rispetto ad oggi.

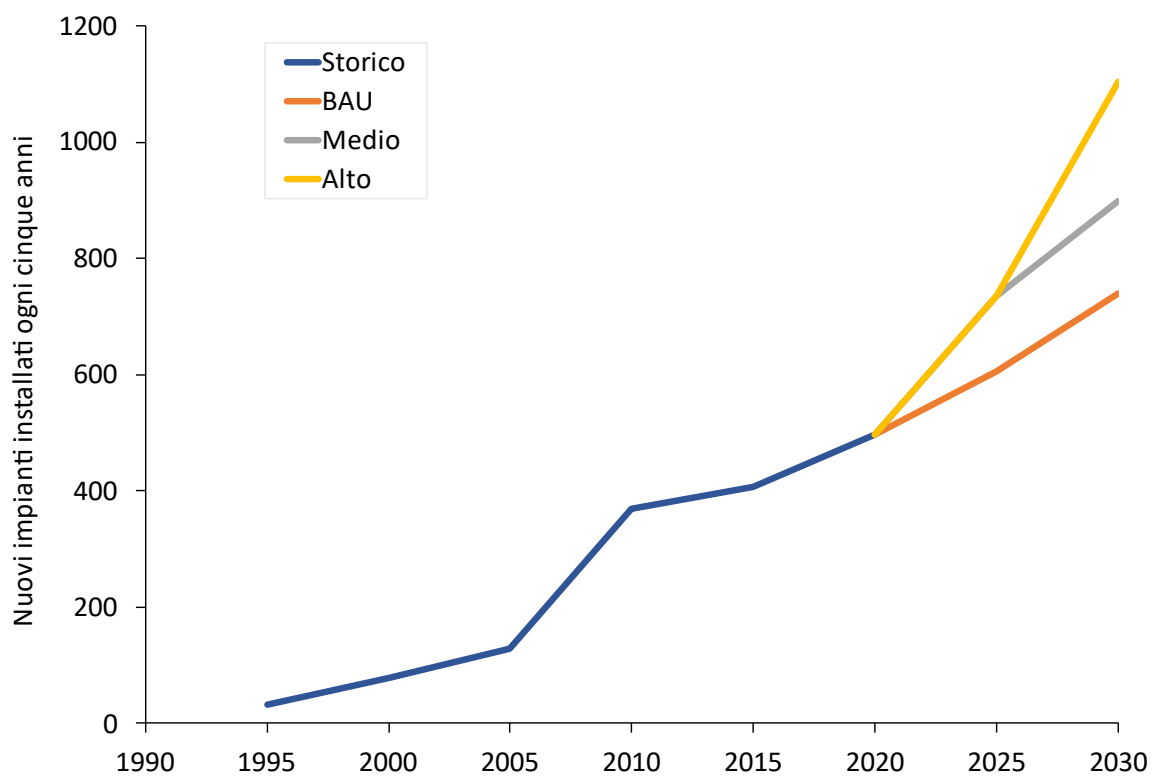


Figura 4.17 – Scenari di sviluppo delle nuove installazioni delle pompe di calore geotermiche su base quinquennale in Piemonte fino al 2030.

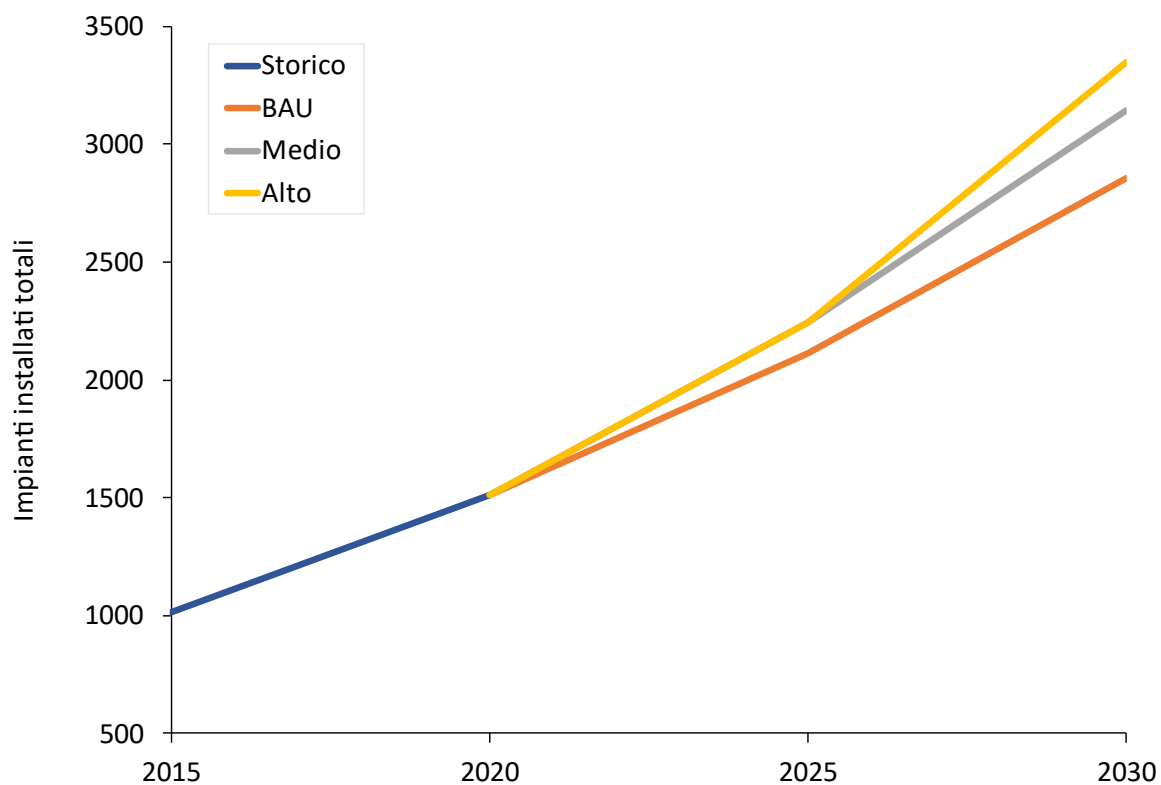


Figura 4.18 - Scenari di sviluppo delle pompe di calore geotermiche installate in totale in Piemonte fino al 2030.

Ipotizzando una crescita della produzione di energia proporzionale a quella delle unità installate, e prendendo a riferimento il dato del 2015 [112], si possono ricavare i contributi di produzione energetica degli impianti geotermici nei tre scenari analizzati, che sono pari a 14.7 ktep nello scenario BAU, 16.2 ktep nello scenario medio e 17.3 ktep nello scenario elevato (Tabella 4.4). Tali valori, se rapportati ai consumi termici odierni, pesano in una misura compresa fra il 3.7% e il 4.3% del consumo termico totale della Regione, a fronte di un contributo attuale delle pompe di calore geotermiche pari al 3.3%.

La previsione sull'incremento in termini assoluti della produzione da fonte geotermica è cautelativa se si considera la tendenza all'aumento della taglia delle pompe di calore geotermiche vendute, come evidenziato nel precedente Paragrafo 4.1.2. Dal punto di vista della quota di tali impianti sulla produzione di calore totale, è poi necessario considerare la progressiva riduzione della domanda di calore degli edifici in conseguenza di un complessivo miglioramento del patrimonio edilizio.

Le pompe di calore geotermiche possono, dunque, giocare un ruolo importante per il raggiungimento degli obiettivi regionali e nazionali di produzione di energia da fonti rinnovabili.

Tabella 4.4 – Energia termica totale prodotta da pompe di calore geotermiche negli scenari analizzati.

Anno	Energia prodotta (ktep)		
	BAU	Medio	Elevato
2025	10.9	11.6	11.6
2030	14.7	16.2	17.3

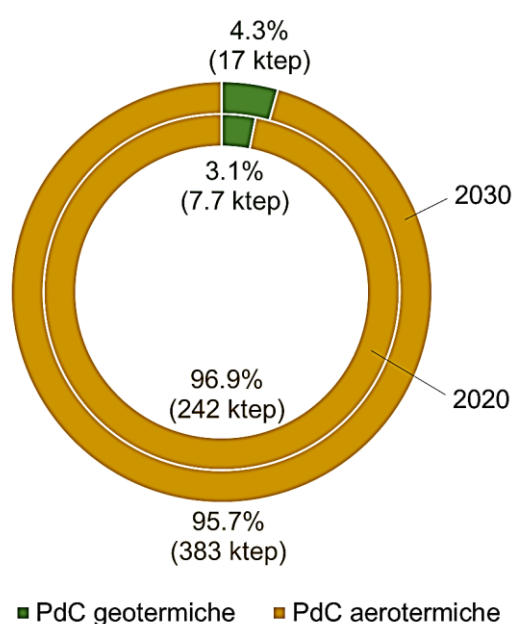


Figura 4.19 – Produzione di energia termica da pompe di calore nel 2020 (situazione attuale) e nel 2030 (scenario di sviluppo elevato). Dati: scenario PEAR [112].

5 Conclusioni

Il gruppo di ricerca “Ingegneria degli Acquiferi” del Politecnico di Torino - DIATI ha condotto uno studio, commissionato dalla Regione Piemonte - Settore Sviluppo Energetico Sostenibile a supporto del nuovo Piano Energetico Ambientale Regionale, sul potenziale geotermico a bassa entalpia nel territorio piemontese. Lo studio si è focalizzato su tre aspetti:

1. La stima del potenziale geotermico *closed-loop* disponibile sul territorio regionale;
2. La valutazione della convenienza economica degli impianti geotermici *closed-loop* rispetto ad altri impianti di climatizzazione a combustibili fossili (metano, GPL, gasolio) e a biomasse (legna da ardere e pellet);
3. La previsione di scenari di diffusione degli impianti geotermici in Piemonte al 2030.

La stima del potenziale geotermico è stata condotta utilizzando il metodo G.POT, sviluppato nel 2016 dal Politecnico di Torino e già utilizzato in numerosi altri contesti. I risultati della mappatura evidenziano che buona parte del territorio regionale ha un potenziale geotermico medio-alto, compreso tra 9.5 MWh/anno e 10.9 MWh/anno. In questo intervallo di potenziale geotermico ricade peraltro la quasi totalità della popolazione piemontese. Questo risultato è dovuto alla combinazione favorevole di una conducibilità termica medio-alta (superiore a $2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) e di una temperatura favorevole sia all'utilizzo in riscaldamento che in raffrescamento (12-15 °C) nella maggior parte del territorio regionale. Una parte ridotta del territorio ha un potenziale geotermico più basso (circa 7-9 MWh/anno) dovuta alla minore conducibilità termica del terreno e/o alla minore temperatura (aree di alta montagna). Le aree a bassa conducibilità termica sono di due tipologie: le aree con copertura sedimentaria del Quaternario (pianura alluvionale, altipiani, conoidi e morene) con elevata soggiacenza di falda e le aree collinari con presenza di strati scarsamente conduttivi (gessi). Per le aree con elevata soggiacenza, tuttavia, il contributo del flusso di falda (advezione e dispersione termica) potrebbe compensare la minore conducibilità termica, ad es. in buona parte dell'area urbana torinese. L'analisi economica è stata condotta eseguendo simulazioni energetiche in regime semi-stazionario di due edifici-tipo, una villetta singola e un condominio di dieci appartamenti, considerando differenti climi (Torino, Cuneo, Oulx) e differenti livelli di isolamento termico. A partire dai fabbisogni termici simulati, sono stati dimensionati gli impianti e sono stati calcolati i relativi costi (di installazione e operativi) per diverse tipologie: pompa di calore (geotermica *closed-loop* e aerotermica), a combustibili fossili (metano, GPL, gasolio) e a biomasse (legna da ardere e pellet). Per ciascuna tipologia è quindi stato ricavato il costo del calore prodotto, calcolato sull'intero ciclo di vita (*Levelized Cost Of Heat*, LCOH), che è stato calcolato tenendo conto dell'incentivo “Ecobonus 65%” e non del “Superbonus 110%”. Questa scelta tiene conto della natura transitoria del Superbonus a fronte di un Ecobonus che di fatto è permanente da circa 15 anni.

Le pompe di calore geotermiche *closed-loop* si confermano una delle tre fonti più convenienti in quasi tutti i casi considerati, insieme alle pompe di calore aerotermiche e agli impianti a legna e pellet. I combustibili fossili si rivelano quindi meno convenienti rispetto alle rinnovabili

termiche: ciò vale in particolare per il GPL, che si conferma la fonte energetica più cara, e per il gasolio da riscaldamento ma anche, sebbene in misura minore, per il metano. Le pompe di calore si confermano, quindi, una soluzione particolarmente adatta per le aree non metanizzate e per quei casi in cui non sia possibile utilizzare le biomasse (es. mancanza di spazi di stoccaggio o scarsa qualità dell'aria). La differenza di LCOH tra pompe di calore geotermiche e aerotermiche è generalmente ridotta: le pompe di calore geotermiche sono più convenienti in presenza di un minore isolamento (semplice "riqualificazione energetica" dell'involucro edilizio rispetto alla "ristrutturazione importante"). Al di là di una valutazione meramente economica, la tipologia geotermica ha un vantaggio rilevante nella minore rumorosità: l'installazione di tutte le componenti in movimento è infatti in locali chiusi che possono essere acusticamente isolati mentre, per ovvie ragioni, per la tipologia aerotermica lo scambio termico deve avvenire all'aperto e questo causa rilevanti problematiche di rumore.

Le emissioni di gas serra delle pompe di calore, sia geotermiche che aerotermiche, dipendono fortemente dal fattore di emissione della rete elettrica nazionale (in forte calo da 30 anni). Attualmente, le pompe di calore permettono di ridurre le emissioni di gas serra di circa il 70% rispetto alle caldaie a combustibile fossile, considerando che siano alimentate interamente con energia elettrica prelevata dalla rete; ipotizzando invece di autoprodurre almeno parte del fabbisogno con pannelli fotovoltaici, il margine di riduzione delle emissioni aumenta.

Solo le caldaie a pellet permettono di raggiungere emissioni di gas serra inferiori a quelle delle pompe di calore geotermiche: tuttavia, è necessario considerare le maggiori emissioni inquinanti delle biomasse legnose, tra le quali quelle (NOx e PM10) più problematiche per il territorio regionale.

Lo studio degli scenari di crescita della tecnologia geotermica in Piemonte ha tenuto conto delle tendenze osservate dal 1996 ad oggi in Regione, in Italia e in altri Stati europei. I dati regionali sono stati aggregati per quinquenni, evidenziando una crescita da 78 impianti realizzati nel 1996-2000 a 497 impianti realizzati nel 2016-2020. La variazione da un quinquennio all'altro ha risentito di fattori come l'introduzione dell'Ecobonus, che ha portato a realizzare nel 2006-2010 quasi il triplo degli impianti rispetto al quinquennio precedente. Sulla base di questi dati e del confronto con quelli nazionali ed internazionali (dai quali sono stati dedotti gli andamenti di crescita tipici), sono stati ipotizzati tre scenari possibili (*Business As Usual*-BAU, medio e alto) che porteranno gli impianti geotermici dal numero attuale di 1378 a un totale compreso tra 2831 e 3323. Questa previsione si basa sull'ipotesi che il Superbonus abbia un effetto paragonabile a quello che ebbe l'introduzione dell'Ecobonus, e che questo effetto sia trascurabile (limitandosi ad anticipare nel 2021-22 gli impianti realizzati nel quinquennio 2021-2025), duraturo (effetto su tutto il 2021-25) o stabile (effetto sul periodo 2021-2030).

Ipotizzando in modo cautelativo (la taglia media degli impianti è in crescita) che la distribuzione delle taglie di impianto resti simile a quella odierna, ciò si tradurrà in un contributo compreso fra 14.7 ktep/anno e 17.3 ktep/anno, pari al 3.7-4.3% dell'obiettivo previsto per il 2030 per le pompe di calore nel loro complesso (400 ktep/anno).

A Ipotesi generali e impianti solo riscaldamento

A.1 Proprietà termofisiche degli edifici simulati

Nella Tabella A.1 sono stati riportati i valori di trasmittanza stazionaria $[W/(m^2K)]$ utilizzati per le simulazioni dei casi studio in accordo con il rapporto Tabula/Episcopo e con l'Allegato E del D.M. 6 agosto 2020.

Tabella A.1 – Valori di trasmittanza stazionaria $[W/(m^2K)]$ utilizzati per le simulazioni dei casi studio.

Edificio	Intervento	Località	Tipo	Trasmittanza stazionaria $[W/(m^2K)]$
Monofamiliare	Edificio originario	Torino, Cuneo, Oulx	Parete esterna	1.26
			Solaio controterra	1.61
			Copertura	2.20
			Solaio interno	1.14
			Componente trasparente medio	2.84
	Riqualificazione energetica	Torino, Cuneo, Oulx	Parete esterna	1.26
			Solaio controterra	1.61
			Copertura	2.20
			Solaio interno	1.14
			Componente trasparente medio	0.91
	Ristrutturazione importante	Torino, Cuneo, Oulx	Parete esterna	0.21
			Solaio controterra	0.23
			Copertura	0.19
			Solaio interno	0.19
			Componente trasparente medio	0.91
Multifamiliare	Edificio originario	Torino, Cuneo, Oulx	Parete esterna	1.26
			Solaio controterra	1.61
			Copertura	2.20
			Solaio interno	0.99
			Parete interna	1.35
			Solaio interno	1.14
			Solaio interno	0.93

		Componente trasparente medio	2.85
Riqualificazione energetica	Torino, Cuneo, Oulx	Parete esterna	1.26
		Solaio controterra	1.61
		Copertura	2.20
		Solaio interno	0.99
		Parete interna	1.35
		Solaio interno	1.14
		Solaio interno	0.93
		Componente trasparente medio	0.96
Ristrutturazione importante	Torino, Cuneo, Oulx	Parete esterna	0.21
		Solaio controterra	0.23
		Copertura	0.20
		Solaio interno	0.99
		Parete interna	0.80
		Solaio interno	0.19
		Solaio interno	0.19
		Componente trasparente medio	0.96

Al fine di ottenere le suddette trasmittanze termiche sono stati modellizzati i componenti opachi e trasparenti attraverso i software PAN e Apollo della suite ANIT. Di seguito, a titolo esemplificativo, sono riportati la stratigrafia della parete esterna e di una finestra per l'edificio unifamiliare soggetto a ristrutturazione importante nella località di Torino.

Tabella A.2 – Stratigrafia esemplificativa di una parete opaca.

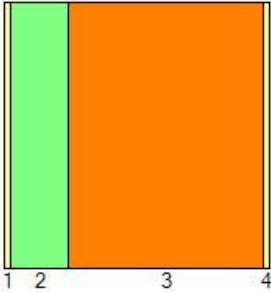
Stratigrafia	Componente	Descrizione
	1 INT	Intonaco di gesso isolante
	2 ISO	Pannello in lana vetro (densità 50 kg/m ³)
	3 MUR	Struttura in blocchi semipieni 16,5x35x25cm rif 1.1.06 - sp.parete 35cm
	4 INT	Intonaco interno

Tabella A.3 – Esempio di componente trasparente e relative caratteristiche.

	Dati geometrici	Trasmittanza
Telaio	$A_f = 0.3328 \text{ m}^2$	$U_f = 1.00 \text{ W/m}^2\text{K}$
Superficie vetrata	$A_g = 0.8732 \text{ m}^2$	$U_g = 0.67 \text{ W/m}^2\text{K}$

Giunto vetro/telaio
TOTALE

$L_g = 3.84 \text{ m}$
 $A_w = 1.206 \text{ m}^2$

$\Psi_p = 0.06 \text{ W/m K}$
 $U_w = 0.95 \text{ W/m}^2\text{K}$

A.2 Fabbisogno di riscaldamento

A.2.1 Edificio monofamiliare

Torino

Tabella A.4 – Fabbisogno di riscaldamento dell'edificio originario. Legenda: dispersioni per trasmissione (Q_{tras}), dispersioni verso cielo (Q_{cielo}), dispersioni per ventilazione (Q_{vent}), apporti solari trasparenti (Q_{st}), apporti solari opachi (Q_{so}), apporti interni (Q_i), fabbisogno di riscaldamento (Q_{nd}), fabbisogno di riscaldamento dell'edificio di riferimento ($Q_{nd,rif}$).

Mese	Q_{tras} [kWh]	Q_{cielo} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{st} [kWh]	Q_{so} [kWh]	Q_i [kWh]	Q_{nd} [kWh]	$Q_{nd,rif}$ [kWh]
Gennaio	7015	192	567	465	173	334	6809	2086
Febbraio	5696	180	460	552	219	302	5276	1485
Marzo	4367	190	353	707	307	334	3599	791
Aprile	2898	233	234	745	341	324	1188	198
Maggio	741	241	60	890	403	334	0	0
Giugno	-776	262	-63	967	441	324	0	0
Luglio	-1358	307	-110	1018	481	334	0	0
Agosto	-962	221	-78	874	423	334	0	0
Settembre	308	197	25	738	339	324	0	0
Ottobre	2862	177	231	612	261	334	1494	300
Novembre	4760	148	385	405	157	324	4418	1231
Dicembre	6459	178	522	413	158	334	6261	1908
Annuale	32010	2526	2586	8386	3704	3936	29046	8000

Tabella A.5 – Fabbisogno di riscaldamento dell'edificio in seguito all'intervento di riqualificazione energetica. Legenda: dispersioni per trasmissione (Q_{tras}), dispersioni verso cielo (Q_{cielo}), dispersioni per ventilazione (Q_{vent}), apporti solari trasparenti (Q_{st}), apporti solari opachi (Q_{so}), apporti interni (Q_i), fabbisogno di riscaldamento (Q_{nd}), fabbisogno di riscaldamento dell'edificio di riferimento ($Q_{nd,rif}$).

Mese	Q_{tras} [kWh]	Q_{cielo} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{st} [kWh]	Q_{so} [kWh]	Q_i [kWh]	Q_{nd} [kWh]	$Q_{nd,rif}$ [kWh]
Gennaio	6401	143	567	401	173	334	6207	2043
Febbraio	5197	134	460	473	219	302	4806	1462
Marzo	3984	141	353	601	307	334	3265	788
Aprile	2644	173	234	628	341	324	1069	199
Maggio	676	179	60	747	403	334	0	0
Giugno	-708	195	-63	811	441	324	0	0
Luglio	-1239	228	-110	851	481	334	0	0
Agosto	-877	164	-78	734	423	334	0	0
Settembre	281	147	25	624	339	324	0	0
Ottobre	2611	131	231	523	261	334	1348	293

Novembre	4342	110	385	349	157	324	4017	1206
Dicembre	5893	133	522	356	158	334	5704	1864
Annuale	29205	1879	2586	7098	3704	3936	26416	7853

Tabella A.6 – Fabbisogno di riscaldamento dell'edificio in seguito all'intervento di ristrutturazione importante. Legenda: dispersioni per trasmissione (Q_{tras}), dispersioni verso cielo (Q_{cielo}), dispersioni per ventilazione (Q_{vent}), apporti solari trasparenti (Q_{st}), apporti solari opachi (Q_{so}), apporti interni (Q_i), fabbisogno di riscaldamento (Q_{nd}), fabbisogno di riscaldamento dell'edificio di riferimento ($Q_{nd,rif}$).

Mese	Q_{tras} [kWh]	Q_{cielo} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{st} [kWh]	Q_{so} [kWh]	Q_i [kWh]	Q_{nd} [kWh]	$Q_{nd,rif}$ [kWh]
Gennaio	2182	25	567	401	29	334	2016	2047
Febbraio	1772	24	460	473	37	302	1459	1470
Marzo	1358	25	353	601	52	334	812	810
Aprile	902	31	234	628	58	324	211	213
Maggio	231	32	60	747	69	334	0	0
Giugno	-241	34	-63	811	75	324	0	0
Luglio	-422	40	-110	851	82	334	0	0
Agosto	-299	29	-78	734	72	334	0	0
Settembre	96	26	25	624	58	324	0	0
Ottobre	890	23	231	523	44	334	309	305
Novembre	1481	19	385	349	27	324	1200	1214
Dicembre	2009	23	522	356	27	334	1844	1868
Annuale	9958	333	2586	7098	630	3936	7851	7927

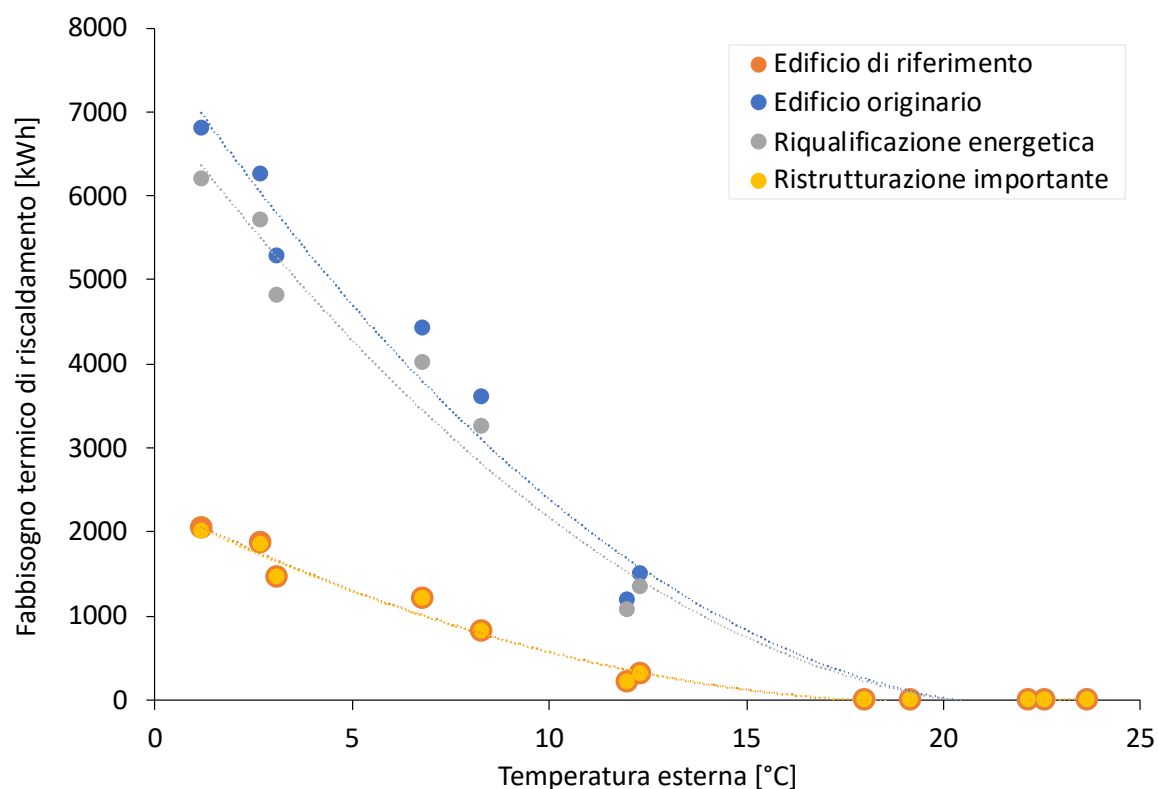


Figura A.1 – Fabbisogno di riscaldamento in funzione della temperatura esterna a Torino per l'edificio monofamiliare.

Cuneo

Tabella A.7 – Fabbisogno di riscaldamento dell'edificio originario. Legenda: dispersioni per trasmissione (Q_{tras}), dispersioni verso cielo (Q_{cielo}), dispersioni per ventilazione (Q_{vent}), apporti solari trasparenti (Q_{st}), apporti solari opachi (Q_{so}), apporti interni (Q_i), fabbisogno di riscaldamento (Q_{nd}), fabbisogno di riscaldamento dell'edificio di riferimento ($Q_{nd,rif}$).

Mese	Q_{tras} [kWh]	Q_{cielo} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{st} [kWh]	Q_{so} [kWh]	Q_i [kWh]	Q_{nd} [kWh]	$Q_{nd,rif}$ [kWh]
Gennaio	7969	222	584	659	243	334	7551	1706
Febbraio	6489	212	475	635	253	302	6001	1268
Marzo	5328	268	390	809	354	334	4528	725
Aprile	4033	242	295	745	341	324	2414	317
Maggio	1811	238	133	839	378	334	0	0
Giugno	-122	235	-9	900	409	324	0	0
Luglio	-880	272	-64	954	448	334	0	0
Agosto	-155	198	-11	826	397	334	0	0
Settembre	1517	179	111	713	331	324	0	0
Ottobre	3636	193	266	632	271	334	2736	369
Novembre	5735	158	420	489	189	324	5324	1132
Dicembre	7899	203	579	522	199	334	7635	1821
Annuale	43261	2618	3168	8724	3811	3936	36189	7338

Tabella A.8 – Fabbisogno di riscaldamento dell'edificio in seguito all'intervento di riqualificazione energetica. Legenda: dispersioni per trasmissione (Q_{tras}), dispersioni verso cielo (Q_{cielo}), dispersioni per ventilazione (Q_{vent}), apporti solari trasparenti (Q_{st}), apporti solari opachi (Q_{so}), apporti interni (Q_i), fabbisogno di riscaldamento (Q_{nd}), fabbisogno di riscaldamento dell'edificio di riferimento ($Q_{nd,rif}$).

Mese	Q_{tras} [kWh]	Q_{cielo} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{st} [kWh]	Q_{so} [kWh]	Q_i [kWh]	Q_{nd} [kWh]	$Q_{nd,rif}$ [kWh]
Gennaio	6543	166	584	569	243	334	6156	1725
Febbraio	5327	159	475	546	253	302	4872	1290
Marzo	4374	201	390	688	354	334	3620	754
Aprile	3311	182	295	628	341	324	1909	340
Maggio	1487	179	133	705	378	334	0	0
Giugno	-100	176	-9	755	409	324	0	0
Luglio	-722	204	-64	799	448	334	0	0
Agosto	-127	148	-11	694	397	334	0	0
Settembre	1246	135	111	603	331	324	0	0
Ottobre	2985	145	266	541	271	334	2167	385
Novembre	4708	119	420	422	189	324	4322	1146
Dicembre	6485	153	579	451	199	334	6239	1829
Annuale	35516	1967	3168	7400	3811	3936	29284	7470

Tabella A.9 – Fabbisogno di riscaldamento dell'edificio in seguito all'intervento di ristrutturazione importante. Legenda: dispersioni per trasmissione (Q_{tras}), dispersioni verso cielo (Q_{cielo}), dispersioni per ventilazione (Q_{vent}), apporti solari trasparenti (Q_{st}), apporti solari opachi (Q_{so}), apporti interni (Q_i), fabbisogno di riscaldamento (Q_{nd}), fabbisogno di riscaldamento dell'edificio di riferimento ($Q_{nd,rif}$).

Mese	Q_{tras} [kWh]	Q_{cielo} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{st} [kWh]	Q_{so} [kWh]	Q_i [kWh]	Q_{nd} [kWh]	$Q_{nd,rif}$ [kWh]
Gennaio	1999	31	584	569	41	334	1683	1734
Febbraio	1628	29	475	546	43	302	1262	1301
Marzo	1336	37	390	688	60	334	755	779
Aprile	1012	34	295	628	58	324	339	360
Maggio	454	33	133	705	64	334	0	0
Giugno	-31	33	-9	755	69	324	0	0
Luglio	-221	38	-64	799	76	334	0	0
Agosto	-39	27	-11	694	68	334	0	0
Settembre	381	25	111	603	56	324	0	0
Ottobre	912	27	266	541	46	334	397	406
Novembre	1439	22	420	422	32	324	1120	1156
Dicembre	1982	28	579	451	34	334	1777	1835
Annuale	10852	364	3168	7400	648	3936	7334	7572

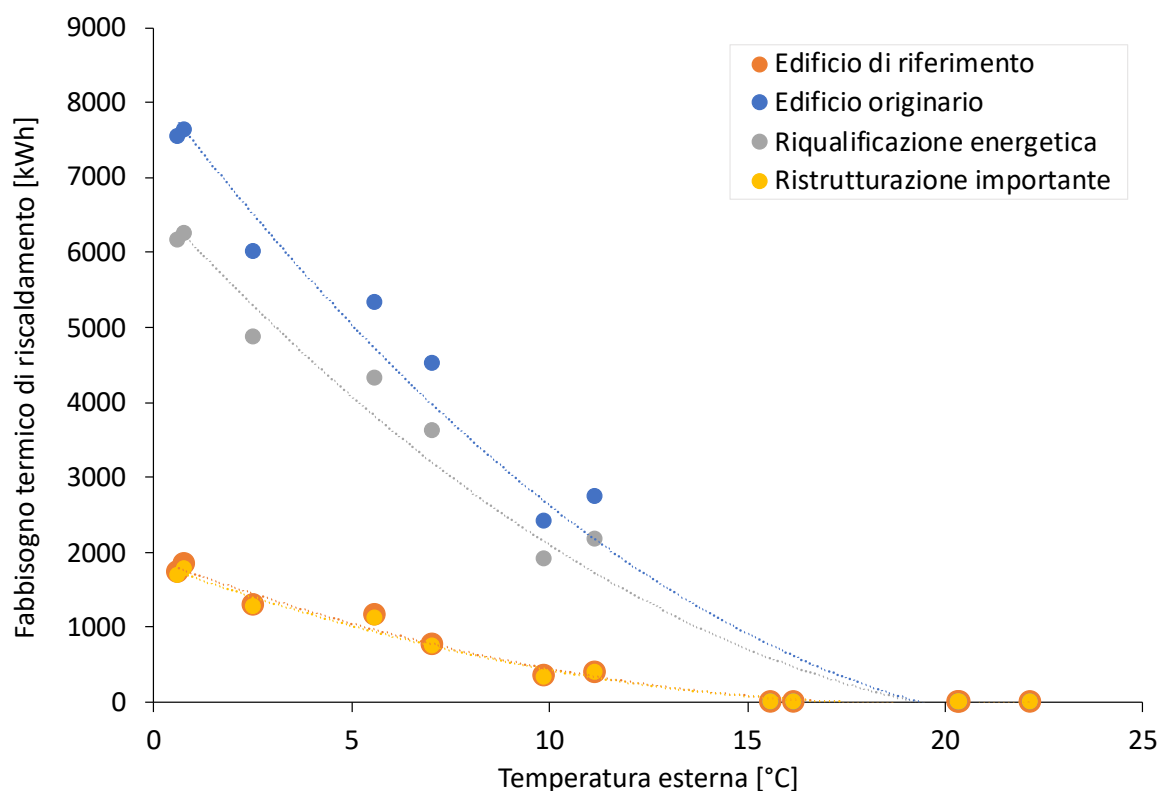


Figura A.2 – Fabbisogno di riscaldamento in funzione della temperatura esterna a Cuneo per l'edificio monofamiliare.

Oulx

Tabella A.10 – Fabbisogno di riscaldamento dell'edificio originario. Legenda: dispersioni per trasmissione (Q_{tras}), dispersioni verso cielo (Q_{cielo}), dispersioni per ventilazione (Q_{vent}), apporti solari trasparenti (Q_{st}), apporti solari opachi (Q_{so}), apporti interni (Q_i), fabbisogno di riscaldamento (Q_{nd}), fabbisogno di riscaldamento dell'edificio di riferimento ($Q_{nd,rif}$).

Mese	Q_{tras} [kWh]	Q_{cielo} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{st} [kWh]	Q_{so} [kWh]	Q_i [kWh]	Q_{nd} [kWh]	$Q_{nd,rif}$ [kWh]
Gennaio	8846	195	712	465	173	334	8786	2505
Febbraio	7348	182	592	552	219	302	7057	1883
Marzo	6189	198	498	707	307	334	5557	1271
Aprile	4657	237	375	745	341	324	2956	565
Maggio	2552	244	206	890	403	334	0	0
Giugno	972	257	78	967	441	324	0	0
Luglio	447	299	36	1018	481	334	0	0
Agosto	844	209	68	874	423	334	0	0
Settembre	2059	197	166	738	339	324	0	0
Ottobre	4680	188	377	612	261	334	3687	773
Novembre	6525	160	525	405	157	324	6331	1708
Dicembre	8288	185	667	413	158	334	8240	2349
Annuale	53407	2551	4301	8386	3704	3936	42614	11053

Tabella A.11 – Fabbisogno di riscaldamento dell'edificio in seguito all'intervento di riqualificazione energetica. Legenda: dispersioni per trasmissione (Q_{tras}), dispersioni verso cielo (Q_{cielo}), dispersioni per ventilazione (Q_{vent}), apporti solari trasparenti (Q_{st}), apporti solari opachi (Q_{so}), apporti interni (Q_i), fabbisogno di riscaldamento (Q_{nd}), fabbisogno di riscaldamento dell'edificio di riferimento ($Q_{nd,rif}$).

Mese	Q_{tras} [kWh]	Q_{cielo} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{st} [kWh]	Q_{so} [kWh]	Q_i [kWh]	Q_{nd} [kWh]	$Q_{nd,rif}$ [kWh]
Gennaio	8022	147	712	402	173	334	7976	2517
Febbraio	6664	137	592	474	219	302	6403	1905
Marzo	5613	149	498	601	307	334	5032	1308
Aprile	4224	178	375	628	341	324	2665	595
Maggio	2315	183	206	747	403	334	0	0
Giugno	881	193	78	812	441	324	0	0
Luglio	405	225	36	852	481	334	0	0
Agosto	765	157	68	734	423	334	0	0
Settembre	1867	148	166	624	339	324	0	0
Ottobre	4244	141	377	523	261	334	3326	791
Novembre	5917	120	525	349	157	324	5738	1720
Dicembre	7516	139	667	357	158	334	7477	2354
Annuale	48432	1917	4301	7102	3704	3936	38617	11191

Tabella A.12 – Fabbisogno di riscaldamento dell'edificio in seguito all'intervento di ristrutturazione importante. Legenda: dispersioni per trasmissione (Q_{tras}), dispersioni verso cielo (Q_{cielo}), dispersioni per ventilazione (Q_{vent}), apporti solari trasparenti (Q_{st}), apporti solari opachi (Q_{so}), apporti interni (Q_i), fabbisogno di riscaldamento (Q_{nd}), fabbisogno di riscaldamento dell'edificio di riferimento ($Q_{nd,rif}$).

Mese	Q_{tras} [kWh]	Q_{cielo} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{st} [kWh]	Q_{so} [kWh]	Q_i [kWh]	Q_{nd} [kWh]	$Q_{nd,rif}$ [kWh]
Gennaio	2471	27	712	402	29	334	2449	2520
Febbraio	2053	25	592	474	37	302	1864	1910
Marzo	1729	28	498	601	52	334	1294	1322
Aprile	1301	33	375	628	58	324	590	610
Maggio	713	34	206	747	69	334	0	0
Giugno	271	36	78	812	75	324	0	0
Luglio	125	42	36	852	82	334	0	0
Agosto	236	29	68	734	72	334	0	0
Settembre	575	27	166	624	58	324	0	0
Ottobre	1307	26	377	523	44	334	794	805
Novembre	1823	22	525	349	27	324	1677	1724
Dicembre	2315	26	667	357	27	334	2294	2357
Annuale	14920	355	4301	7102	630	3936	10962	11247

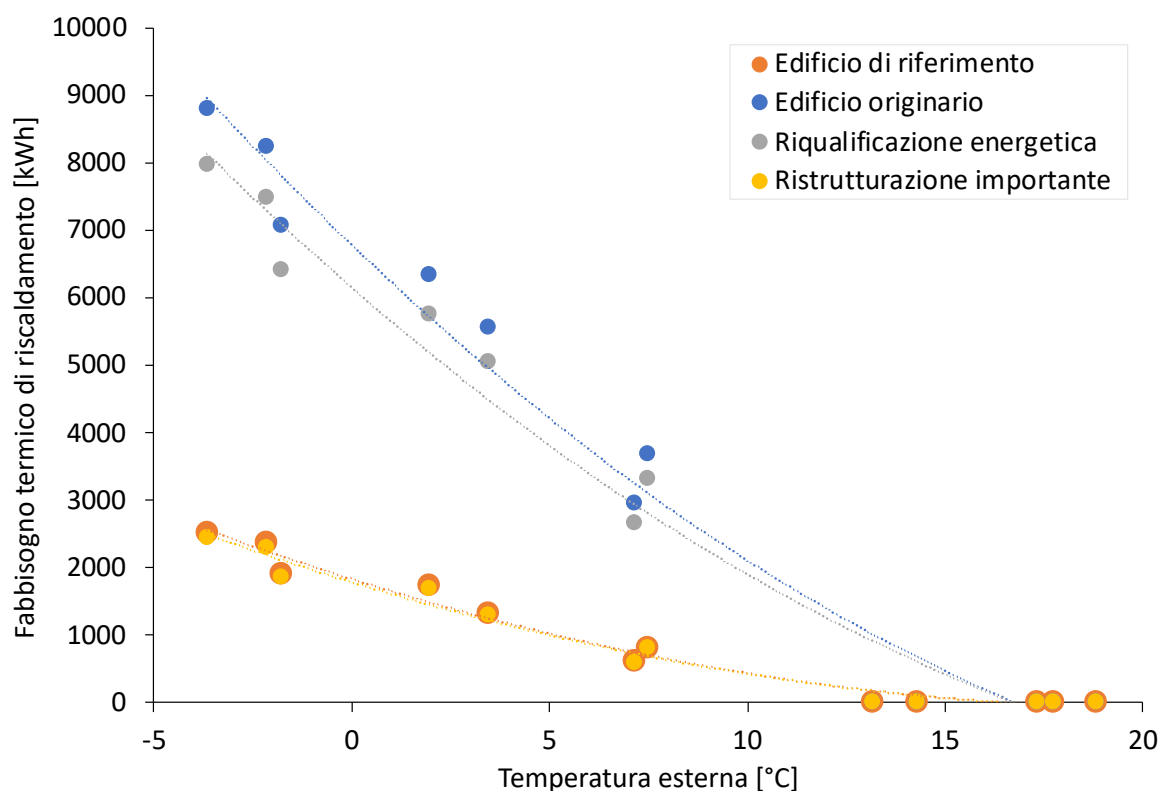


Figura A.3 – Fabbisogno di riscaldamento in funzione della temperatura esterna a Oulx per l'edificio monofamiliare.

A.2.2 Edificio multifamiliare

Torino

Tabella A.13 – Fabbisogno di riscaldamento dell'edificio originario. Legenda: dispersioni per trasmissione (Q_{tras}), dispersioni verso cielo (Q_{cielo}), dispersioni per ventilazione (Q_{vent}), apporti solari trasparenti (Q_{st}), apporti solari opachi (Q_{so}), apporti interni (Q_i), fabbisogno di riscaldamento (Q_{nd}), fabbisogno di riscaldamento dell'edificio di riferimento ($Q_{nd,rif}$).

Mese	Q_{tras} [kWh]	Q_{cielo} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{st} [kWh]	Q_{so} [kWh]	Q_i [kWh]	Q_{nd} [kWh]	$Q_{nd,rif}$ [kWh]
Gennaio	30274	1220	3044	2109	1408	3082	27993	5510
Febbraio	24583	1141	2471	2569	1721	2783	21218	3379
Marzo	18844	1205	1894	3342	2302	3082	13530	1049
Aprile	12506	1477	1257	3696	2442	2982	4170	49
Maggio	3200	1529	322	4772	2837	3082	0	0
Giugno	-3349	1660	-337	5352	3078	2982	0	0
Luglio	-5859	1944	-589	5556	3335	3082	0	0
Agosto	-4150	1402	-417	4544	2964	3082	0	0
Settembre	1328	1249	134	3600	2472	2982	0	0
Ottobre	12351	1120	1242	2915	1997	3082	5324	198
Novembre	20540	937	2065	1909	1248	2982	17507	2523
Dicembre	27872	1130	2802	1860	1288	3082	25629	4918
Annuale	138139	16013	13888	42223	27092	36284	115372	17625

Tabella A.14 – Fabbisogno di riscaldamento dell'edificio in seguito all'intervento di riqualificazione energetica. Legenda: dispersioni per trasmissione (Q_{tras}), dispersioni verso cielo (Q_{cielo}), dispersioni per ventilazione (Q_{vent}), apporti solari trasparenti (Q_{st}), apporti solari opachi (Q_{so}), apporti interni (Q_i), fabbisogno di riscaldamento (Q_{nd}), fabbisogno di riscaldamento dell'edificio di riferimento ($Q_{nd,rif}$).

Mese	Q_{tras} [kWh]	Q_{cielo} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{st} [kWh]	Q_{so} [kWh]	Q_i [kWh]	Q_{nd} [kWh]	$Q_{nd,rif}$ [kWh]
Gennaio	26973	957	3044	1820	1378	3082	24738	5509
Febbraio	21902	895	2471	2204	1687	2783	18672	3433
Marzo	16789	945	1894	2842	2258	3082	11714	1098
Aprile	11142	1159	1257	3119	2399	2982	3524	73
Maggio	2851	1199	322	4010	2791	3082	0	0
Giugno	-2984	1302	-337	4487	3031	2982	0	0
Luglio	-5220	1525	-589	4647	3284	3082	0	0
Agosto	-3698	1099	-417	3822	2916	3082	0	0
Settembre	1184	980	134	3047	2428	2982	0	0
Ottobre	11004	879	1242	2491	1959	3082	4646	205
Novembre	18300	735	2065	1643	1224	2982	15340	2539
Dicembre	24832	887	2802	1607	1261	3082	22617	4894
Annuale	123075	12562	13888	35738	26617	36284	101250	17751

Tabella A.15 – Fabbisogno di riscaldamento dell'edificio in seguito all'intervento di ristrutturazione importante. Legenda: dispersioni per trasmissione (Q_{tras}), dispersioni verso cielo (Q_{cielo}), dispersioni per ventilazione (Q_{vent}), apporti solari trasparenti (Q_{st}), apporti solari opachi (Q_{so}), apporti interni (Q_i), fabbisogno di riscaldamento (Q_{nd}), fabbisogno di riscaldamento dell'edificio di riferimento ($Q_{nd,rif}$).

Mese	Q_{tras} [kWh]	Q_{cielo} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{st} [kWh]	Q_{so} [kWh]	Q_i [kWh]	Q_{nd} [kWh]	$Q_{nd,rif}$ [kWh]
Gennaio	7352	171	3044	1820	408	3082	5313	5366
Febbraio	5970	159	2471	2204	476	2783	3293	3304
Marzo	4576	168	1894	2842	604	3082	1008	1026
Aprile	3037	206	1257	3119	604	2982	17	57
Maggio	777	214	322	4010	675	3082	0	0
Giugno	-813	232	-337	4487	721	2982	0	0
Luglio	-1423	272	-589	4647	775	3082	0	0
Agosto	-1008	196	-417	3822	702	3082	0	0
Settembre	323	175	134	3047	622	2982	0	0
Ottobre	2999	157	1242	2491	532	3082	249	269
Novembre	4988	131	2065	1643	348	2982	2422	2445
Dicembre	6768	158	2802	1607	370	3082	4732	4761
Annuale	33546	2238	13888	35738	6836	36284	17034	17227

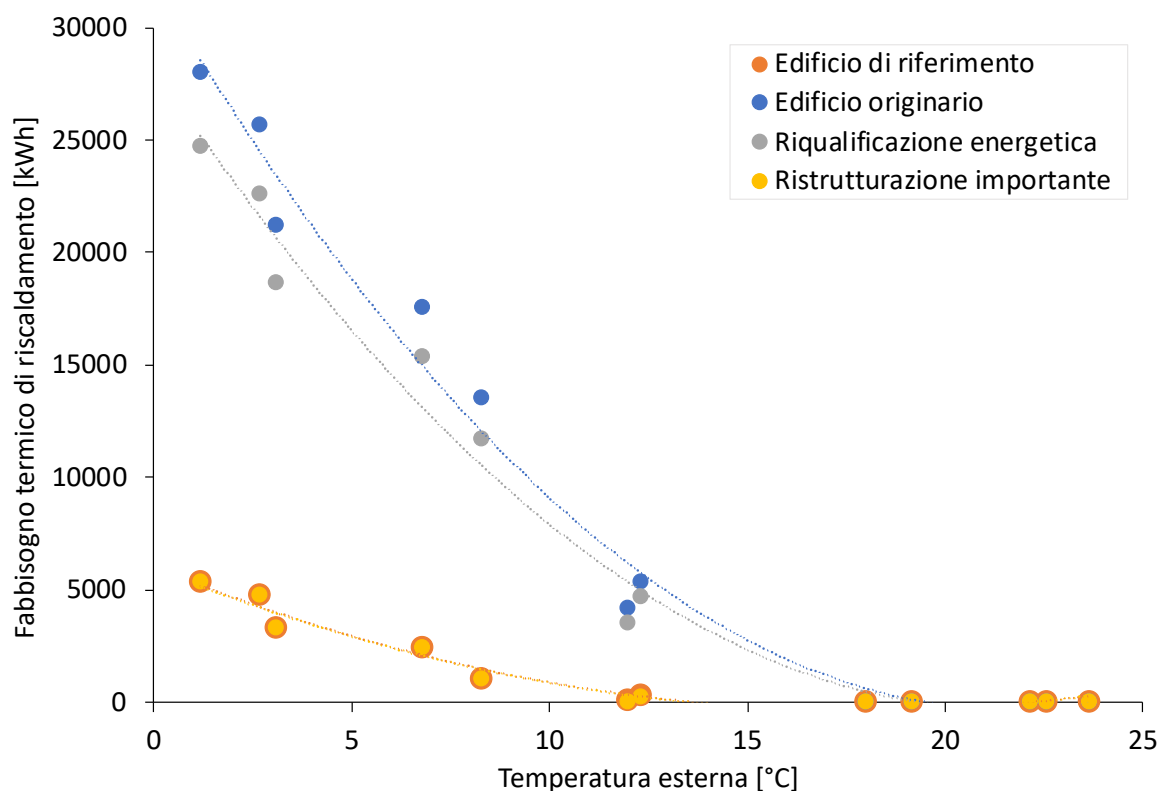


Figura A.4 – Fabbisogno di riscaldamento in funzione della temperatura esterna a Torino per l'edificio multifamiliare.

Cuneo

Tabella A.16 – Fabbisogno di riscaldamento dell'edificio originario. Legenda: dispersioni per trasmissione (Q_{tras}), dispersioni verso cielo (Q_{cielo}), dispersioni per ventilazione (Q_{vent}), apporti solari trasparenti (Q_{st}), apporti solari opachi (Q_{so}), apporti interni (Q_i), fabbisogno di riscaldamento (Q_{nd}), fabbisogno di riscaldamento dell'edificio di riferimento ($Q_{nd,rif}$).

Mese	Q_{tras} [kWh]	Q_{cielo} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{st} [kWh]	Q_{so} [kWh]	Q_i [kWh]	Q_{nd} [kWh]	$Q_{nd,rif}$ [kWh]
Gennaio	31305	1662	3134	2845	2398	3082	27856	4073
Febbraio	25489	1587	2552	2840	2398	2783	21713	2638
Marzo	20929	2008	2095	3686	3207	3082	15358	876
Aprile	15843	1814	1586	3724	2952	2982	7626	123
Maggio	7114	1787	712	4547	3239	3082	0	0
Giugno	-480	1759	-48	5007	3476	2982	0	0
Luglio	-3455	2038	-346	5247	3793	3082	0	0
Agosto	-608	1482	-61	4350	3386	3082	0	0
Settembre	5961	1343	597	3418	2911	2982	0	0
Ottobre	14284	1445	1430	2940	2500	3082	8729	201
Novembre	22527	1188	2255	2178	1828	2982	19088	2176
Dicembre	31030	1525	3107	2279	1959	3082	28400	4548
Annuale	169938	19639	17014	43061	34047	36284	128771	14636

Tabella A.17 – Fabbisogno di riscaldamento dell'edificio in seguito all'intervento di riqualificazione energetica. Legenda: dispersioni per trasmissione (Q_{tras}), dispersioni verso cielo (Q_{cielo}), dispersioni per ventilazione (Q_{vent}), apporti solari trasparenti (Q_{st}), apporti solari opachi (Q_{so}), apporti interni (Q_i), fabbisogno di riscaldamento (Q_{nd}), fabbisogno di riscaldamento dell'edificio di riferimento ($Q_{nd,rif}$).

Mese	Q_{tras} [kWh]	Q_{cielo} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{st} [kWh]	Q_{so} [kWh]	Q_i [kWh]	Q_{nd} [kWh]	$Q_{nd,rif}$ [kWh]
Gennaio	27852	1357	3134	2458	2346	3082	24522	4120
Febbraio	22677	1296	2552	2438	2349	2783	19040	2705
Marzo	18620	1640	2095	3133	3146	3082	13247	945
Aprile	14095	1481	1586	3144	2902	2982	6491	155
Maggio	6329	1459	712	3822	3189	3082	0	0
Giugno	-427	1437	-48	4198	3425	2982	0	0
Luglio	-3074	1664	-346	4389	3738	3082	0	0
Agosto	-541	1210	-61	3660	3335	3082	0	0
Settembre	5303	1097	597	2893	2860	2982	0	0
Ottobre	12708	1180	1430	2512	2453	3082	7385	223
Novembre	20042	970	2255	1877	1790	2982	16707	2212
Dicembre	27607	1245	3107	1970	1918	3082	25036	4560
Annuale	151191	16035	17014	36494	33451	36284	112428	14921

Tabella A.18 – Fabbisogno di riscaldamento dell'edificio in seguito all'intervento di ristrutturazione importante. Legenda: dispersioni per trasmissione (Q_{tras}), dispersioni verso cielo (Q_{cielo}), dispersioni per ventilazione (Q_{vent}), apporti solari trasparenti (Q_{st}), apporti solari opachi (Q_{so}), apporti interni (Q_i), fabbisogno di riscaldamento (Q_{nd}), fabbisogno di riscaldamento dell'edificio di riferimento ($Q_{nd,rif}$).

Mese	Q_{tras} [kWh]	Q_{cielo} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{st} [kWh]	Q_{so} [kWh]	Q_i [kWh]	Q_{nd} [kWh]	$Q_{nd,rif}$ [kWh]
Gennaio	6576	338	3134	2458	680	3082	3949	4000
Febbraio	5355	323	2552	2438	669	2783	2557	2574
Marzo	4397	408	2095	3133	878	3082	828	792
Aprile	3328	369	1586	3144	792	2982	60	127
Maggio	1494	364	712	3822	860	3082	0	0
Giugno	-101	358	-48	4198	919	2982	0	0
Luglio	-726	415	-346	4389	1001	3082	0	0
Agosto	-128	301	-61	3660	897	3082	0	0
Settembre	1252	273	597	2893	786	2982	0	0
Ottobre	3001	294	1430	2512	687	3082	158	172
Novembre	4732	242	2255	1877	513	2982	2101	2086
Dicembre	6519	310	3107	1970	553	3082	4402	4516
Annuale	35700	3994	17014	36494	9234	36284	14055	14267

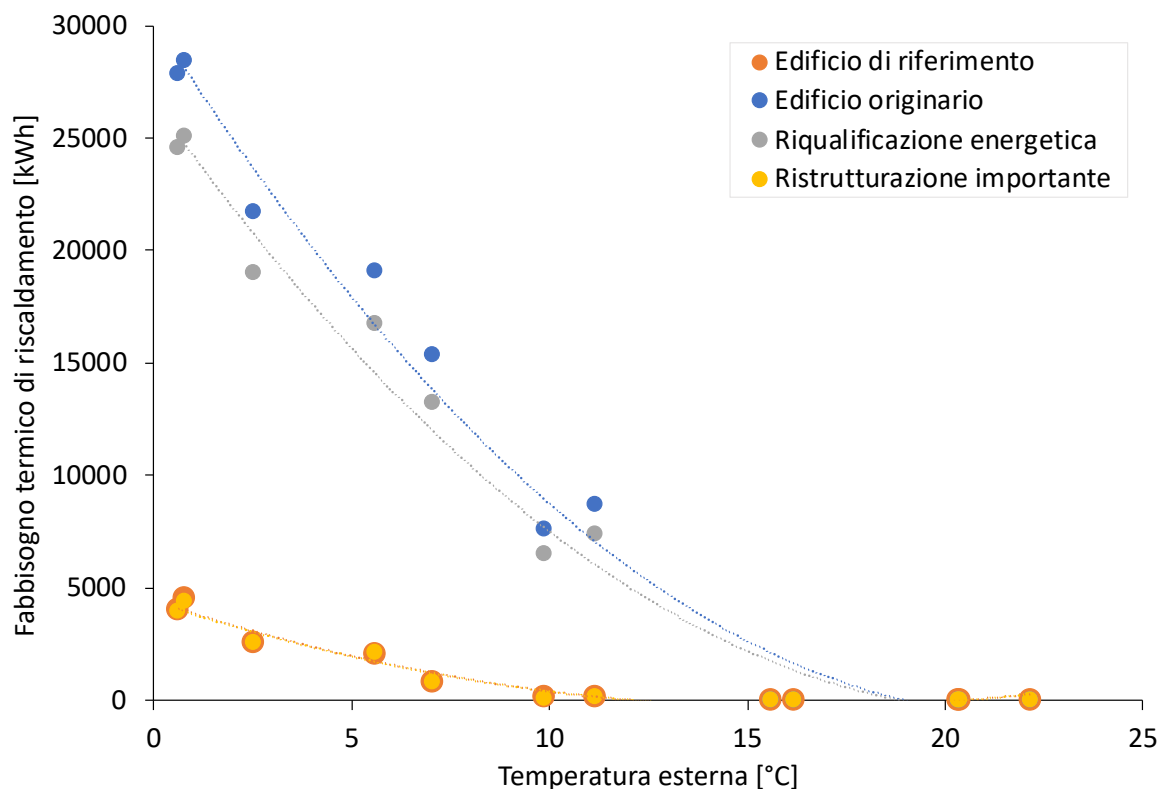


Figura A.5 – Fabbisogno di riscaldamento in funzione della temperatura esterna a Cuneo per l'edificio multifamiliare.

Oulx

Tabella A.19 – Fabbisogno di riscaldamento dell'edificio originario. Legenda: dispersioni per trasmissione (Q_{tras}), dispersioni verso cielo (Q_{cielo}), dispersioni per ventilazione (Q_{vent}), apporti solari trasparenti (Q_{st}), apporti solari opachi (Q_{so}), apporti interni (Q_i), fabbisogno di riscaldamento (Q_{nd}), fabbisogno di riscaldamento dell'edificio di riferimento ($Q_{nd,rif}$).

Mese	Q_{tras} [kWh]	Q_{cielo} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{st} [kWh]	Q_{so} [kWh]	Q_i [kWh]	Q_{nd} [kWh]	$Q_{nd,rif}$ [kWh]
Gennaio	38379	1692	3826	2109	1967	3082	36772	6991
Febbraio	31880	1579	3178	2569	2420	2783	28921	4703
Marzo	26851	1720	2677	3342	3257	3082	21722	2283
Aprile	20206	2058	2014	3696	3480	2982	11036	609
Maggio	11074	2116	1104	4772	4059	3082	0	0
Giugno	4216	2227	420	5352	4412	2982	0	0
Luglio	1938	2594	193	5556	4783	3082	0	0
Agosto	3661	1807	365	4544	4243	3082	0	0
Settembre	8933	1703	891	3600	3515	2982	0	0
Ottobre	20303	1625	2024	2915	2820	3082	14077	1052
Novembre	28308	1385	2822	1909	1752	2982	25925	4124
Dicembre	35956	1604	3584	1860	1801	3082	34434	6480
Annuale	231705	22112	23098	42223	38511	36284	172887	26243

Tabella A.20 – Fabbisogno di riscaldamento dell'edificio in seguito all'intervento di riqualificazione energetica. Legenda: dispersioni per trasmissione (Q_{tras}), dispersioni verso cielo (Q_{cielo}), dispersioni per ventilazione (Q_{vent}), apporti solari trasparenti (Q_{st}), apporti solari opachi (Q_{so}), apporti interni (Q_i), fabbisogno di riscaldamento (Q_{nd}), fabbisogno di riscaldamento dell'edificio di riferimento ($Q_{nd,rif}$).

Mese	Q_{tras} [kWh]	Q_{cielo} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{st} [kWh]	Q_{so} [kWh]	Q_i [kWh]	Q_{nd} [kWh]	$Q_{nd,rif}$ [kWh]
Gennaio	34165	1424	3826	1820	1932	3082	32606	7036
Febbraio	28379	1328	3178	2204	2380	2783	25562	4806
Marzo	23903	1447	2677	2842	3206	3082	19023	2423
Aprile	17987	1731	2014	3119	3430	2982	9548	697
Maggio	9858	1780	1104	4010	4006	3082	0	0
Giugno	3753	1873	420	4487	4358	2982	0	0
Luglio	1725	2182	193	4647	4724	3082	0	0
Agosto	3259	1520	365	3822	4188	3082	0	0
Settembre	7952	1433	891	3047	3464	2982	0	0
Ottobre	18074	1367	2024	2491	2776	3082	12224	1101
Novembre	25200	1165	2822	1643	1724	2982	22881	4176
Dicembre	32008	1349	3584	1607	1769	3082	30509	6495
Annuale	206262	18600	23098	35738	37956	36284	152353	26734

Tabella A.21 – Fabbisogno di riscaldamento dell'edificio in seguito all'intervento di ristrutturazione importante. Legenda: dispersioni per trasmissione (Q_{tras}), dispersioni verso cielo (Q_{cielo}), dispersioni per ventilazione (Q_{vent}), apporti solari trasparenti (Q_{st}), apporti solari opachi (Q_{so}), apporti interni (Q_i), fabbisogno di riscaldamento (Q_{nd}), fabbisogno di riscaldamento dell'edificio di riferimento ($Q_{nd,rif}$).

Mese	Q_{tras} [kWh]	Q_{cielo} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{st} [kWh]	Q_{so} [kWh]	Q_i [kWh]	Q_{nd} [kWh]	$Q_{nd,rif}$ [kWh]
Gennaio	8253	138	3826	1820	326	3082	7012	7119
Febbraio	6856	129	3178	2204	380	2783	4854	4871
Marzo	5774	140	2677	2842	482	3082	2511	2481
Aprile	4345	168	2014	3119	483	2982	722	738
Maggio	2381	173	1104	4010	539	3082	0	0
Giugno	907	182	420	4487	576	2982	0	0
Luglio	417	212	193	4647	619	3082	0	0
Agosto	787	148	365	3822	561	3082	0	0
Settembre	1921	139	891	3047	497	2982	0	0
Ottobre	4366	133	2024	2491	425	3082	1140	1124
Novembre	6088	113	2822	1643	278	2982	4184	4236
Dicembre	7732	131	3584	1607	296	3082	6486	6568
Annuale	49828	1805	23098	35738	5461	36284	26909	27138

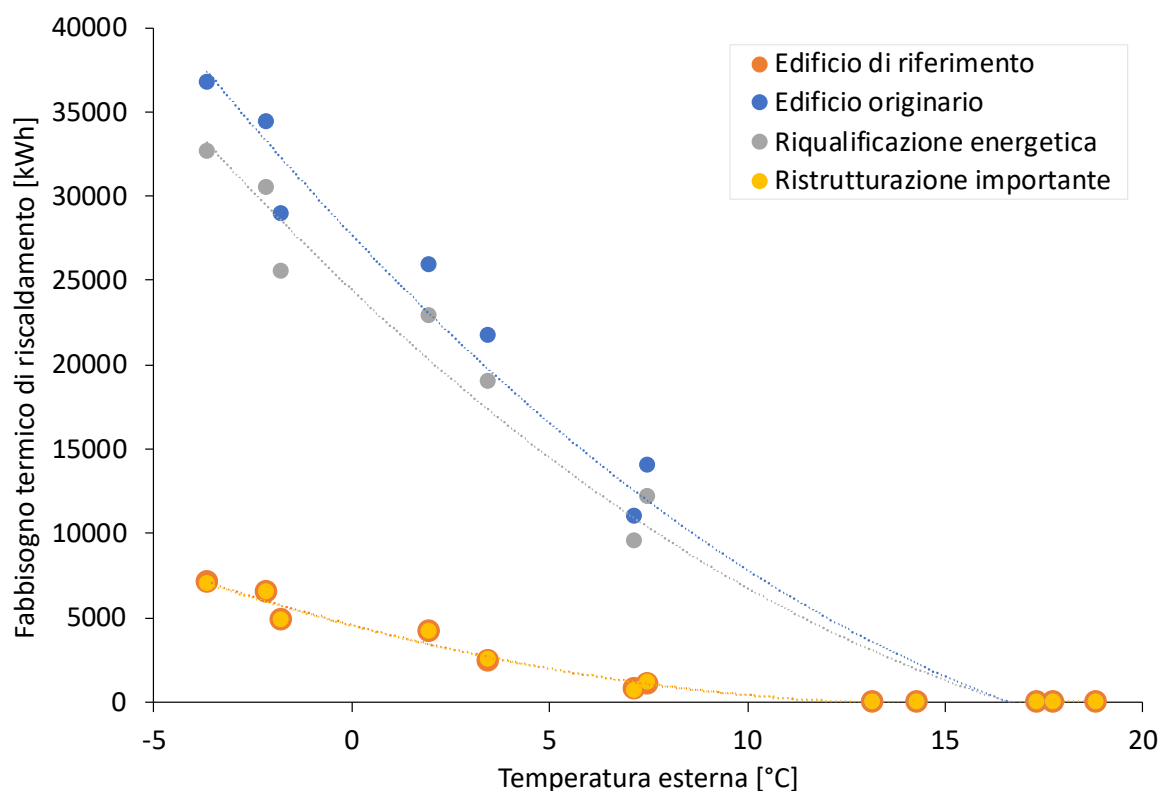


Figura A.6 – Fabbisogno di riscaldamento in funzione della temperatura esterna a Oulx per l'edificio multifamiliare.

A.3 Energia in ingresso al sistema di generazione

In Tabella A.22 è stata riportata l'energia annuale in ingresso al sistema di generazione (espressa in MWh) suddivisa per tipologia di impianto. Per le prime cinque soluzioni, ossia quelle a combustione, l'energia è di tipo termico ed espressa in MWh_t, mentre per le pompe di calore è elettrica ed espressa in MWh_e.

Tabella A.22 – Energia annuale in ingresso al sistema di generazione (espressa in MWh) suddivisa per tipologia di impianto. Per le pompe di calore, l'energia è elettrica; per le altre tipologie, è energia termica.

Edificio	Località	Impianto	Edificio originario	Riqualificazione energetica	Ristrutturazione importante
Monofamiliare	Torino	Gas	44.9	33.8	10.9
		GPL	44.9	33.8	10.9
		Gasolio	45.2	33.8	10.9
		Legna	50.0	35.6	11.4
		Pellet	50.0	33.6	10.8
		Aerotermica	0.0	9.2	3.1
		Geotermica	0.0	6.7	2.2
	Cuneo	Gas	56.2	37.4	10.5
		GPL	56.2	37.4	10.5
		Gasolio	56.5	37.4	10.5
		Legna	62.6	39.3	11.0
		Pellet	62.6	37.0	10.4
		Aerotermica	0.0	10.4	2.8
		Geotermica	0.0	7.7	2.2
	Oulx	Gas	65.9	51.0	14.5
		GPL	65.9	51.0	14.5
		Gasolio	66.2	51.0	14.5
		Legna	73.4	49.3	15.1
		Pellet	73.4	49.3	14.3
		Aerotermica	0.0	14.4	4.4
		Geotermica	0.0	11.1	3.4
Multifamiliare	Torino	Gas	176.0	134.2	32.1
		GPL	176.0	134.2	32.1
		Gasolio	176.0	134.2	32.1
		Legna	197.1	136.6	33.3
		Pellet	197.1	128.8	31.4
		Aerotermica	0.0	37.9	9.8
		Geotermica	0.0	23.9	7.2

Edificio	Località	Impianto	Edificio originario	Riqualificazione energetica	Ristrutturazione importante
	Cuneo	Gas	195.3	149.5	29.9
		GPL	195.3	149.5	29.9
		Gasolio	195.3	149.5	29.9
		Legna	218.7	152.2	31.1
		Pellet	218.7	143.5	29.4
		Aerotermica	0.0	43.8	9.4
		Geotermica	0.0	28.0	7.0
	Oulx	Gas	262.1	197.3	45.5
		GPL	262.1	197.3	45.5
		Gasolio	262.1	197.3	45.5
		Legna	293.2	201.1	47.1
		Pellet	293.2	189.6	44.5
		Aerotermica	0.0	54.8	14.6
		Geotermica	0.0	39.7	10.5

A.4 Energia prodotta *extra situ* e acquistata

In Tabella A.23 è stata riportata l'energia prodotta *extra situ* ed effettivamente acquistata (espressa in MWh) suddivisa per tipologia di impianto. È importante evidenziare come tale quantità di energia non debba necessariamente corrispondere a quella in ingresso al sistema di generazione. La corrispondenza, infatti, si verifica solo per le prime cinque soluzioni, ossia quelle a combustione, in quanto l'energia termica è interamente prelevata esternamente al sistema. Nel caso delle pompe di calore, invece, una quota è fornita dai pannelli fotovoltaici e, pertanto, non presente in quanto autoprodotta. Per un approfondimento in merito si rimanda all'Appendice A.10.

Tabella A.23 – Energia annuale prodotta *extra situ* e acquistata (espressa in MWh) suddivisa per tipologia di impianto. Per le pompe di calore, l'energia è elettrica; per le altre tipologie, è energia termica.

Edificio	Località	Impianto	Edificio originario	Riqualificazione energetica	Ristrutturazione importante
Monofamiliare	Torino	Gas	44.9	33.8	10.9
		GPL	44.9	33.8	10.9
		Gasolio	45.2	33.8	10.9
		Legna	50.0	35.6	11.4
		Pellet	50.0	33.6	10.8
		Aerotermica	0.0	6.2	1.5
		Geotermica	0.0	4.3	0.8
	Cuneo	Gas	56.2	37.4	10.5

Edificio	Località	Impianto	Edificio originario	Riqualificazione energetica	Ristrutturazione importante
		GPL	56.2	37.4	10.5
		Gasolio	56.5	37.4	10.5
		Legna	62.6	39.3	11.0
		Pellet	62.6	37.0	10.4
		Aerotermica	0.0	6.2	0.9
		Geotermica	0.0	4.0	0.4
	Oulx	Gas	65.9	51.0	14.5
		GPL	65.9	51.0	14.5
		Gasolio	66.2	51.0	14.5
		Legna	73.4	49.3	15.1
		Pellet	73.4	49.3	14.3
		Aerotermica	0.0	9.3	2.6
		Geotermica	0.0	6.5	1.5
Multifamiliare	Torino	Gas	176.0	134.2	32.1
		GPL	176.0	134.2	32.1
		Gasolio	176.0	134.2	32.1
		Legna	197.1	136.6	33.3
		Pellet	197.1	128.8	31.4
		Aerotermica	0.0	27.8	4.7
		Geotermica	0.0	15.4	3.0
	Cuneo	Gas	195.3	149.5	29.9
		GPL	195.3	149.5	29.9
		Gasolio	195.3	149.5	29.9
		Legna	218.7	152.2	31.1
		Pellet	218.7	143.5	29.4
		Aerotermica	0.0	30.5	3.4
		Geotermica	0.0	16.3	2.3
	Oulx	Gas	262.1	197.3	45.5
		GPL	262.1	197.3	45.5
		Gasolio	262.1	197.3	45.5
		Legna	293.2	201.1	47.1
		Pellet	293.2	189.6	44.5
		Aerotermica	0.0	42.8	7.4
		Geotermica	0.0	28.7	4.9

A.5 Costi di installazione

La Tabella A.24 evidenzia la composizione del costo totale delle pompe di calore geotermiche suddividendo i contributi della macchina in sé, delle sonde e i restanti (I.V.A., manodopera e accessori). La Tabella A.25, invece, riporta i costi di installazione delle restanti tecnologie.

Tabella A.24 – Costo di installazione delle pompe di calore geotermiche totale e suddiviso per componenti.

Edificio	Intervento	Località	Conduttività	Costo totale	Costo macchina		Costo sonde		I.V.A., manodopera e accessori	
Monofamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	Bassa	36 209.30 €	5 956.11 €	16%	11 400.00 €	31%	18 853.19 €	52%
			Media	33 647.30 €	5 956.11 €	18%	9 300.00 €	28%	18 391.19 €	55%
			Alta	31 939.30 €	5 956.11 €	19%	7 900.00 €	25%	18 083.19 €	57%
		Cuneo	Bassa	29 472.18 €	5 956.11 €	20%	11 800.00 €	40%	11 716.07 €	40%
			Media	26 910.18 €	5 956.11 €	22%	9 700.00 €	36%	11 254.07 €	42%
			Alta	24 958.18 €	5 956.11 €	24%	8 100.00 €	32%	10 902.07 €	44%
		Oulx	Bassa	42 430.93 €	7 211.03 €	17%	20 400.00 €	48%	14 819.90 €	35%
			Media	36 940.93 €	7 211.03 €	20%	15 900.00 €	43%	13 829.90 €	37%
			Alta	34 378.93 €	7 211.03 €	21%	13 800.00 €	40%	13 367.90 €	39%
	Ristrutturazione importante	Torino	Bassa	16 996.19 €	4 096.06 €	24%	4 650.00 €	27%	8 250.13 €	49%
			Media	16 020.19 €	4 096.06 €	26%	3 850.00 €	24%	8 074.13 €	50%
			Alta	15 471.19 €	4 096.06 €	26%	3 400.00 €	22%	7 975.13 €	52%
		Cuneo	Bassa	17 118.19 €	4 096.06 €	24%	4 750.00 €	28%	8 272.13 €	48%
			Media	16 264.19 €	4 096.06 €	25%	4 050.00 €	25%	8 118.13 €	50%
			Alta	15 715.19 €	4 096.06 €	26%	3 600.00 €	23%	8 019.13 €	51%
		Oulx	Bassa	20 473.19 €	4 096.06 €	20%	7 500.00 €	37%	8 877.13 €	43%
			Media	18 094.19 €	4 096.06 €	23%	5 550.00 €	31%	8 448.13 €	47%
			Alta	17 240.19 €	4 096.06 €	24%	4 850.00 €	28%	8 294.13 €	48%

Edificio	Intervento	Località	Conduttività	Costo totale	Costo macchina		Costo sonde		I.V.A., manodopera e accessori	
Multifamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	Bassa	150 616.22 €	13 866.16 €	9%	64 800.00 €	43%	71 950.05 €	48%
			Media	125 728.22 €	13 866.16 €	11%	44 400.00 €	35%	67 462.05 €	54%
			Alta	115 114.22 €	13 866.16 €	12%	35 700.00 €	31%	65 548.05 €	57%
		Cuneo	Bassa	177 828.50 €	13 866.16 €	8%	86 400.00 €	49%	77 562.34 €	44%
			Media	135 555.50 €	13 866.16 €	10%	51 750.00 €	38%	69 939.34 €	52%
			Alta	121 098.50 €	13 866.16 €	11%	39 900.00 €	33%	67 332.34 €	56%
		Oulx	Bassa	318 900.19 €	15 991.02 €	5%	192 600.00 €	60%	110 309.17 €	35%
			Media	214 590.19 €	15 991.02 €	7%	107 100.00 €	50%	91 499.17 €	43%
			Alta	177 502.19 €	15 991.02 €	9%	76 700.00 €	43%	84 811.17 €	48%
	Ristrutturazione importante	Torino	Bassa	28 450.14 €	4 957.46 €	17%	11 000.00 €	39%	12 492.68 €	44%
			Media	25 644.14 €	4 957.46 €	19%	8 700.00 €	34%	11 986.68 €	47%
			Alta	23 875.14 €	4 957.46 €	21%	7 250.00 €	30%	11 667.68 €	49%
		Cuneo	Bassa	28 084.14 €	4 957.46 €	18%	10 700.00 €	38%	12 426.68 €	44%
			Media	25 522.14 €	4 957.46 €	19%	8 600.00 €	34%	11 964.68 €	47%
			Alta	23 936.14 €	4 957.46 €	21%	7 300.00 €	30%	11 678.68 €	49%
		Oulx	Bassa	44 620.37 €	6 708.52 €	15%	21 400.00 €	48%	16 511.85 €	37%
			Media	38 825.37 €	6 708.52 €	17%	16 650.00 €	43%	15 466.85 €	40%
			Alta	36 080.37 €	6 708.52 €	19%	14 400.00 €	40%	14 971.85 €	41%

Tabella A.25 – Costo di installazione delle altre tecnologie (I.V.A. e manodopera incluse).

Edificio	Intervento	Località	Caldaia a gas	Caldaia a gasolio	Caldaia a GPL	Caldaia a legna	Caldaia a pellet	Pompa di calore aerotermica
Monofamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	8 007.37 €	8 007.37 €	8 391.79 €	8 199.52 €	10 951.84 €	23 844.83 €
		Cuneo	8 007.37 €	8 007.37 €	8 391.79 €	8 199.52 €	10 951.84 €	23 893.18 €
		Oulx	8 007.37 €	8 007.37 €	8 391.79 €	8 199.52 €	10 951.84 €	28 484.62 €
	Ristrutturazione importante	Torino	8 007.37 €	8 007.37 €	9 997.31 €	8 199.52 €	10 951.84 €	9 211.79 €
		Cuneo	8 007.37 €	8 007.37 €	9 997.31 €	8 199.52 €	10 951.84 €	9 211.79 €
		Oulx	8 007.37 €	8 007.37 €	9 997.31 €	8 199.52 €	10 951.84 €	9 211.79 €
Multifamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	10 931.67 €	10 931.67 €	10 931.67 €	10 945.86 €	10 945.86 €	69 702.73 €
		Cuneo	10 931.67 €	10 931.67 €	10 931.67 €	10 945.86 €	10 945.86 €	68 910.04 €
		Oulx	10 931.67 €	10 931.67 €	10 931.67 €	10 945.86 €	10 945.86 €	72 361.91 €
	Ristrutturazione importante	Torino	8 007.37 €	8 007.37 €	9 997.31 €	8 199.52 €	10 951.84 €	18 571.71 €
		Cuneo	8 007.37 €	8 007.37 €	9 997.31 €	8 199.52 €	10 951.84 €	18 571.71 €
		Oulx	8 007.37 €	8 007.37 €	9 997.31 €	8 199.52 €	10 951.84 €	20 358.65 €

A.6 Costi unitari delle fonti energetiche

A.6.1 Gas naturale

Dal relativo database Eurostat [74] riferito ai consumi domestici nel quinquennio 2015-2020 risulta che il prezzo del gas per le fasce con consumi minori di 20 GJ (circa 5.56 MWh) subisce variazioni considerevoli tra il primo e secondo semestre dell'anno. All'aumentare dei consumi e della relativa fascia tale variazione è sempre meno pronunciata. Una simile tendenza si presenta anche per il prezzo del gas per le utenze commerciali.

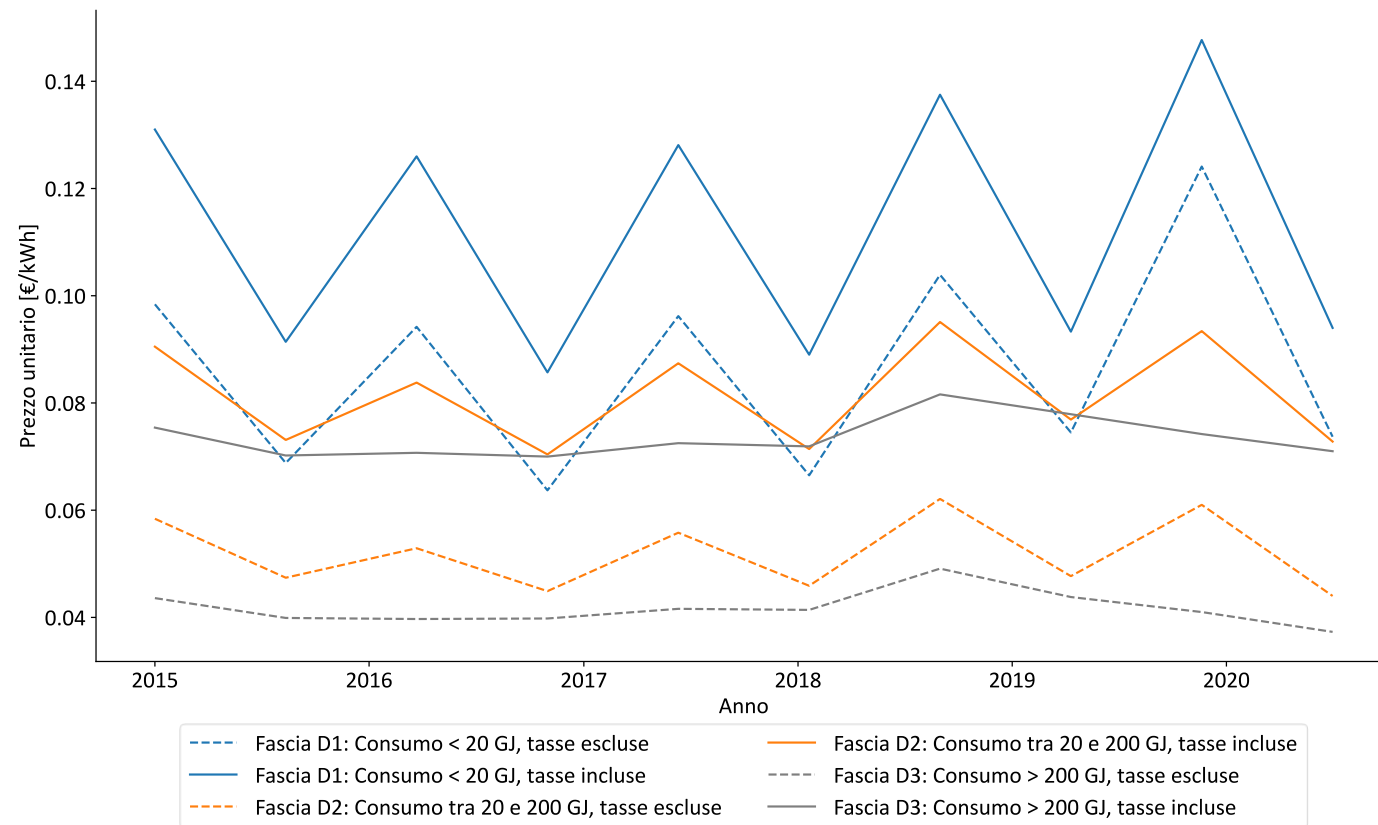


Figura A.7 – Prezzo del gas naturale per utenze residenziali (rielaborazione propria di dati Eurostat [74]).

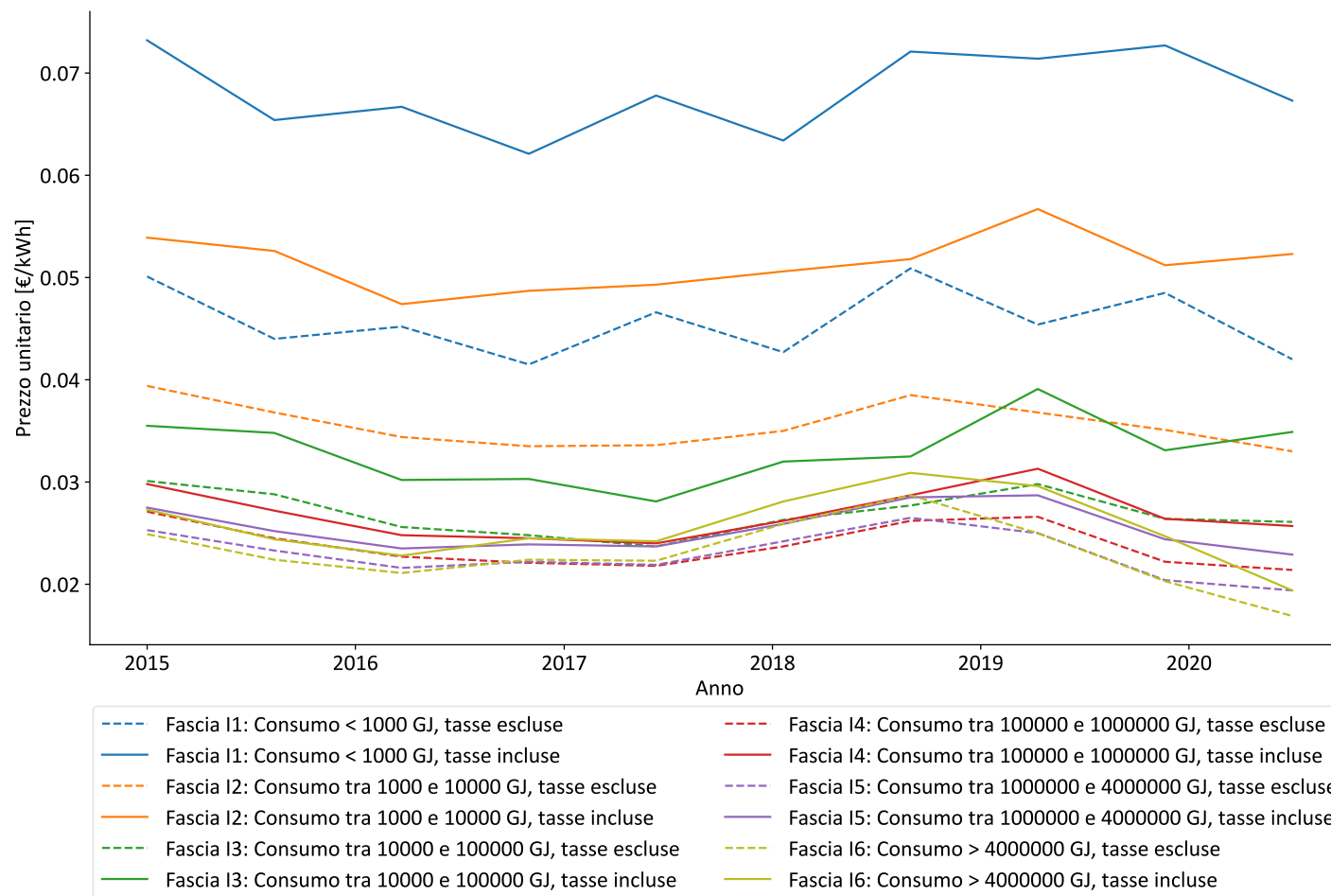


Figura A.8 – Prezzo del gas naturale per utenze non residenziali (rielaborazione propria di dati Eurostat [74]).

I consumi annuali di gas relativi ai casi-studio analizzati sono sufficientemente alti da poter trascurare la variabilità stagionale del prezzo del gas. Come dato di riferimento si è scelto quello relativo al prezzo rilevato nel secondo semestre del 2019, in quanto ultimo dato disponibile prima dell'inizio della pandemia e, comunque, non molto dissimile dal corrispettivo del 2020.

A.6.2 Gas di petrolio liquefatto (GPL)

Per determinare il costo del GPL è stato preso come riferimento l'archivio storico del *Listino quindicinale prezzi* [75] redatto dalla Camera di Commercio di Torino. Nella figura seguente è riportato l'andamento del prezzo del GPL dal 2017 ad oggi.

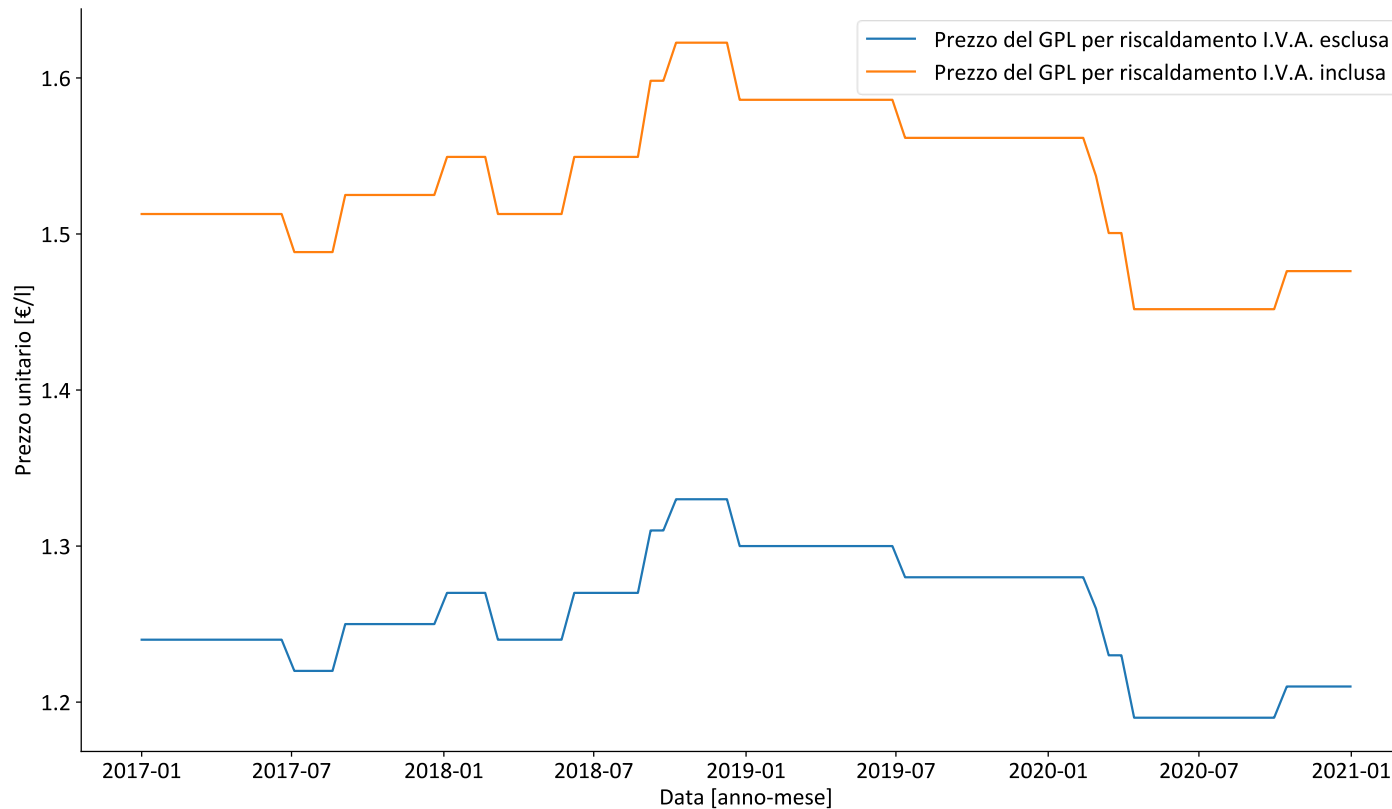


Figura A.9 – Prezzo del GPL (rielaborazione propria di dati Camera di Commercio di Torino [75]).

Come si può notare il prezzo non ha subito forti variazioni, se si esclude il periodo di *lockdown* dovuto alla pandemia di COVID-19. Il valore massimo negli ultimi quattro anni è stato raggiunto alla fine del 2018 con un prezzo pari a 1.62 €/litro (I.V.A. inclusa), mentre il minimo si è avuto nell'estate del 2020 con un prezzo di 1.45 €/litro (I.V.A. inclusa). Si è scelto come riferimento il prezzo dell'ultima rilevazione del 2019, pari a 1.53

€/litro (I.V.A. inclusa), prezzo relativo al caso in cui il consumatore scelga l'opzione di acquistare il GPL per piccoli serbatoi in comodato. Questa è, difatti, la casistica più diffusa in quanto il fornitore si occupa della fornitura del GPL e della gestione degli accessori d'impianto [113]. Generalmente ciò comporta un prezzo leggermente più alto rispetto all'opzione con il serbatoio di proprietà.

A.6.3 Gasolio

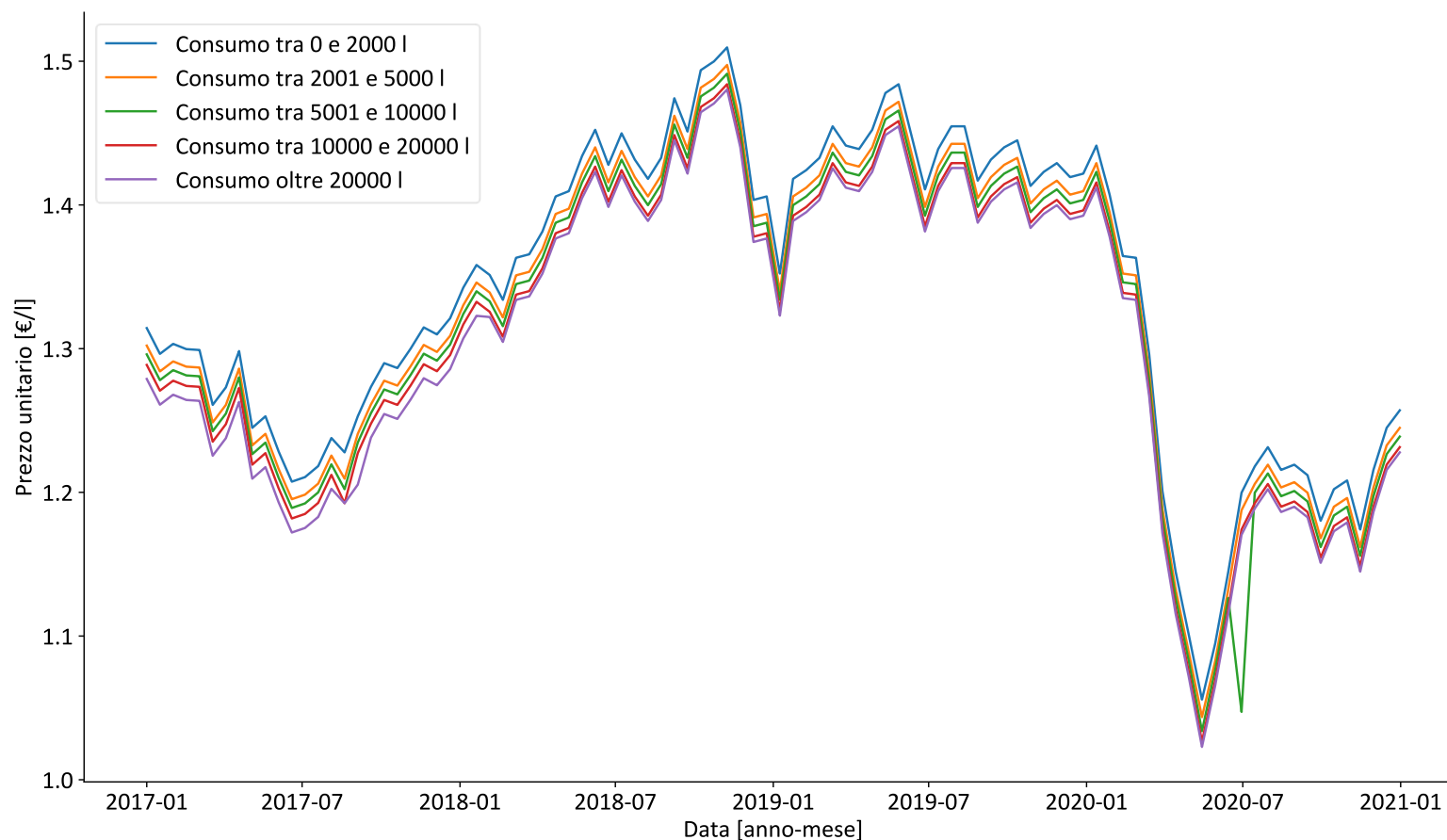


Figura A.10 – Prezzo del gasolio (rielaborazione propria di dati Camera di Commercio di Torino [75]).

Similmente al GPL, il prezzo del gasolio per riscaldamento è stato ricavato dal *Listino quindicinale prezzi* redatto dalla Camera di Commercio di Torino. Nella Figura A.10 è riportato l'andamento del prezzo unitario (I.V.A. inclusa) negli ultimi quattro anni.

Anche in questo caso si può notare un crollo del valore unitario in corrispondenza del *lockdown*. Come per il gas naturale i prezzi sono diversificati a seconda della fascia di consumo; tuttavia, in questo caso, la variazione di prezzo è di lieve entità. Per questo motivo è stato calcolato il valore medio nel periodo considerato per la prima fascia, pari a 1.34 €/litro (I.V.A. inclusa). Anche la moda della distribuzione è in linea essendo pari a 1.45 €/litro (I.V.A. inclusa).

A.6.4 Biomassa

Il costo della legna da ardere è stato determinato attraverso le rilevazioni dei prezzi da parte delle Camere di Commercio di alcune province piemontesi e di altre regioni italiane. Come riferimento è stato considerato il prezzo della legna in pezzatura da stufa, a cui è stata applicata un'I.V.A. pari al 10% ed un costo di trasporto e consegna pari a 15 €/ton. Il prezzo medio considerato nello studio è pari a 12.3 € per quintale di legna; considerando pertanto I.V.A. e trasporto il costo totale sale a 15 €/quintale.

Tabella A.26 – Rilevazioni prezzi della legna da ardere considerate nell'analisi (I.V.A. e trasporto esclusi) [76]–[81].

Prezzo [€/quintale]			Provincia	Anno rilevazione
Min	Max	Medio		
10	13.1	11.4	Cuneo	2010-2020
12	13	12.5	Piacenza	2020
10	12	11.0	Avellino	2020
13.5	15	14.3	Alessandria	2021
-	-	12.3	Vercelli	2018
12	13	12.5	Cremona	2019

Il prezzo del pellet considerato nello studio è stato ricavato da un'analisi delle rilevazioni delle Camere di Commercio di Cuneo, Biella e Vercelli e dei listini prezzi online di diversi rivenditori. I prezzi sono stati definiti per il caso di acquisto di un bancale (60-70 sacchetti di pellet per bancale),

con relativo trasporto al costo di 15 €/bancale. Il costo medio ricavato di un sacchetto da 15 kg di pellet dal potere calorifico variabile tra 4.9-5.3 kWh/kg, I.V.A. e trasporto inclusi, è pari a 4.40 € (0.29 €/kg).

Tabella A.27 - Rilevazioni del prezzo del pellet (per sacco da 15 kg) considerate nell'analisi [76], [80], [82]–[92].

Min	Max	Medio	Incluso trasporto	Fonte
3.8	4.7	4.2	4.5	CC di Cuneo (2010-2020)
-	-	3.3	3.6	CC di Vercelli (2018)
3.8	4.2	4.0	4.2	Agraria Tocchio
3.8	4.6	4.2	4.4	Silver Solutions
3.9	4.8	4.4	4.6	OPUS
4.6	5.2	4.9	4.9	Veneta Agricola
-	-	4.1	4.3	Timberyard
3.4	4.1	3.9	4.1	GT Carburanti
-	-	4.3	4.3	BluEnergy
3.7	4.4	4.1	4.4	PelletBo
-	-	4.3	4.3	Agrimondo
-	-	4.9	5.1	Pellet a Casa Tua
-	-	4.0	4.0	Maison Pellet

A.6.5 Energia elettrica

Il prezzo proposto dagli operatori del mercato libero dell'energia elettrica, inclusi gli oneri di rete e le tasse, viene raccolto dall'Eurostat con cadenza semestrale [74]. Come si può notare dalla Figura A.11 e dalla Figura A.12, il prezzo relativo alla prima fascia di consumo è desisamente più alto rispetto alle restanti fasce.

Così come per il gas naturale, anche per l'energia elettrica si considera la variabilità tra le fasce e i prezzi del secondo semestre del 2019 come riferimento.

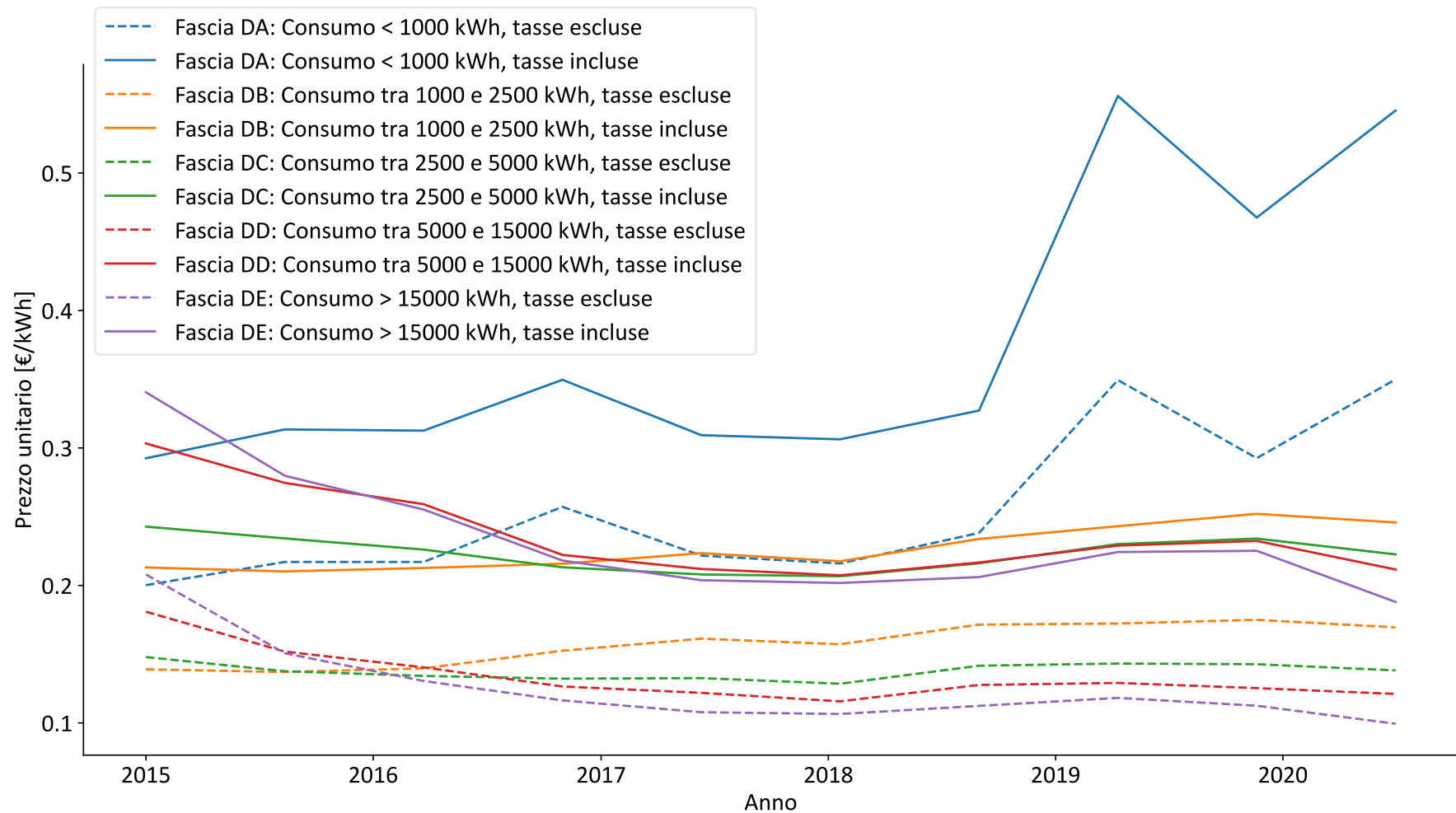


Figura A.11 – Prezzo dell'energia elettrica per utenze residenziali (rielaborazione propria di dati Eurostat [74]).

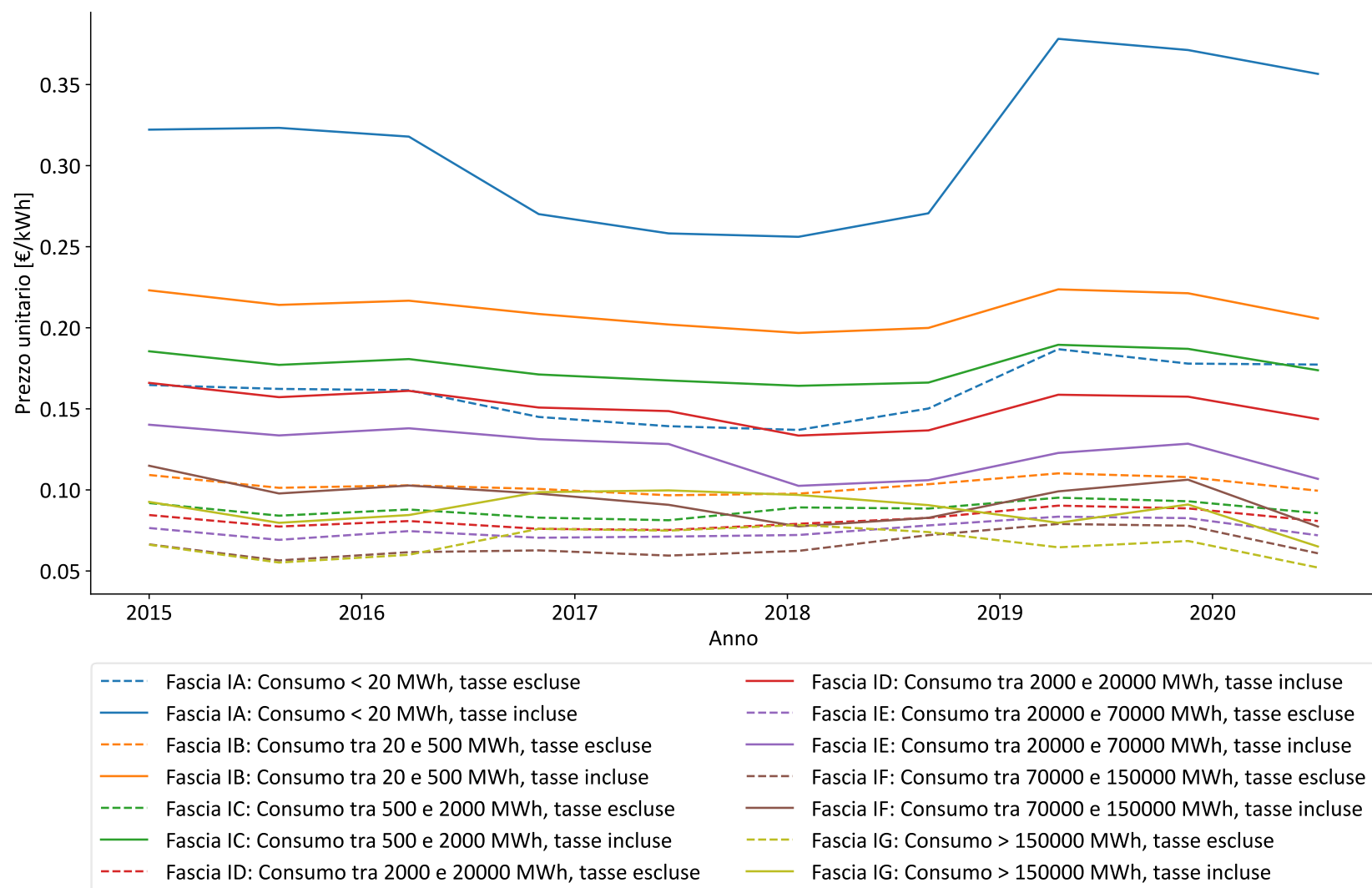


Figura A.12 – Prezzo dell'energia elettrica per utenze non residenziali (rielaborazione propria di dati Eurostat [74]).

Il meccanismo che regola il prezzo del Mercato del Giorno Prima è basato, invece, sull'incontro tra la domanda e l'offerta oraria e gestito dal Gestore Mercati Energetici (GME) [93]. Nella figura sottostante è riportato l'andamento del prezzo unitario negli ultimi due anni.

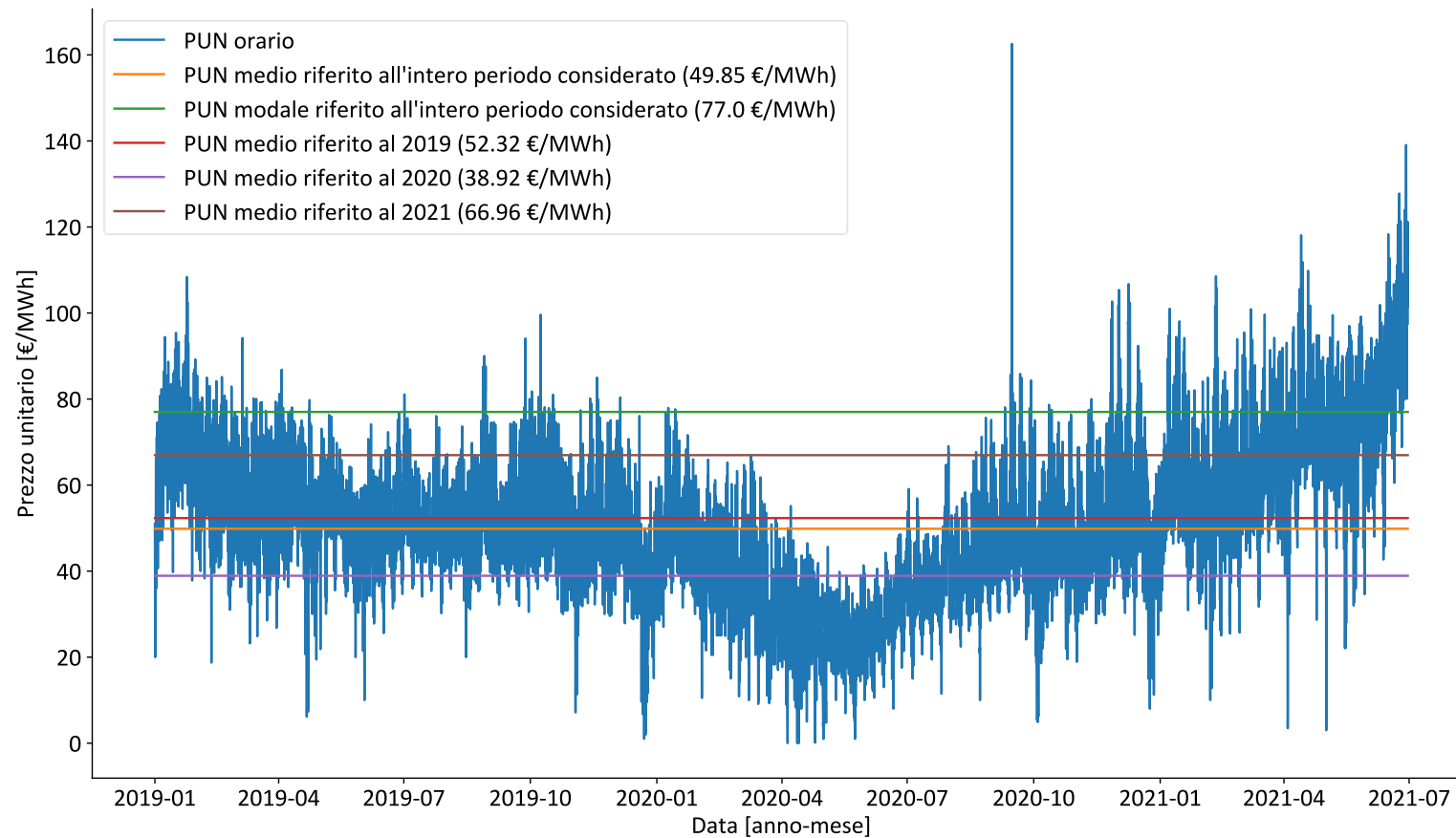


Figura A.13 – Prezzo unico nazionale (PUN) nel contesto del MGP (rielaborazione propria di dati GME [93]).

Come avvenuto per le altre *commodity*, anche il prezzo dell'energia elettrica è stato soggetto ad un forte calo durante i periodi di *lockdown* o simili. Per questo motivo il valore di riferimento è stato scelto pari alla media del primo semestre del 2021 (pari a 66.96 €/MWh).

A.7 Spesa annuale per le fonti energetiche

Nella tabella seguente è stata riportata la spesa annuale per l'energia prodotta *extra situ* e acquistata suddivisa per tipologia di impianto.

Tabella A.28 – Spesa annuale per l'energia prodotta *extra situ* ed acquistata suddivisa per tipologia di impianto.

Edificio	Località	Impianto	Edificio originario	Riqualificazione energetica	Ristrutturazione importante
Monofamiliare	Torino	Gas	4 789.80 €	3 160.38 €	1 018.33 €
		GPL	10 928.84 €	7 783.78 €	2 508.08 €
		Gasolio	6 707.76 €	4 578.40 €	1 475.24 €
		Legna	2 662.34 €	1 443.46 €	461.29 €
		Pellet	3 535.80 €	1 946.33 €	623.50 €
		Aerotermica	-	746.14 €	387.63 €
		Geotermica	-	672.53 €	209.92 €
	Cuneo	Gas	4 767.74 €	3 489.06 €	983.17 €
		GPL	13 527.62 €	8 593.30 €	2 421.47 €
		Gasolio	8 239.38 €	5 054.56 €	1 424.30 €
		Legna	3 164.00 €	1 591.87 €	445.29 €
		Pellet	4 257.32 €	2 146.57 €	601.87 €
		Aerotermica	-	617.03 €	424.63 €
		Geotermica	-	502.95 €	201.40 €
	Oulx	Gas	5 489.19 €	4 759.74 €	1 354.19 €
		GPL	15 758.18 €	11 722.90 €	3 335.27 €
		Gasolio	9 557.35 €	6 895.37 €	1 961.79 €
		Legna	3 606.63 €	1 996.76 €	614.13 €
		Pellet	4 888.41 €	2 856.70 €	830.08 €
		Aerotermica	-	1 051.68 €	598.27 €
		Geotermica	-	606.39 €	361.92 €
Multifamiliare	Torino	Gas	13 107.00 €	9 958.70 €	3 001.92 €
		GPL	40 530.49 €	30 874.32 €	7 393.52 €
		Gasolio	23 860.36 €	18 160.18 €	4 348.85 €
		Legna	8 120.28 €	5 538.19 €	1 348.67 €
		Pellet	11 561.98 €	7 472.60 €	1 823.70 €
		Aerotermica	-	4 585.34 €	456.68 €
		Geotermica	-	1 574.04 €	364.97 €
	Cuneo	Gas	14 544.72 €	11 096.04 €	2 796.53 €
		GPL	44 976.19 €	34 400.34 €	6 887.65 €

Edificio	Località	Impianto	Edificio originario	Riqualificazione energetica	Ristrutturazione importante
		Gasolio	26 477.58 €	20 234.17 €	4 051.29 €
		Legna	9 108.04 €	6 168.96 €	1 261.93 €
		Pellet	12 926.80 €	8 323.88 €	1 705.96 €
		Aerotermica	-	5 523.69 €	302.51 €
		Geotermica	-	2 108.62 €	294.64 €
		Gas	19 509.49 €	14 638.22 €	4 246.92 €
		GPL	60 350.47 €	45 381.94 €	10 459.85 €
		Gasolio	35 524.15 €	26 693.52 €	6 152.45 €
	Oulx	Legna	12 207.59 €	8 151.08 €	1 908.51 €
		Pellet	17 326.64 €	10 998.10 €	2 581.39 €
		Aerotermica	-	8 207.03 €	704.04 €
		Geotermica	-	4 902.83 €	474.81 €

A.8 Terminali di riscaldamento

Come già accennato, simulando degli edifici risalenti agli anni '60-'70 è necessario considerare che la tipologia di terminali installati è progettata per lavorare ad alta temperatura. I sistemi di produzione di calore più moderni e che sono stati valutati nell'analisi, ossia le caldaie a condensazione e le pompe di calore, lavorano al massimo dell'efficienza con temperature molto minori. Infatti, un radiatore ad alta temperatura prevede una temperatura in ingresso di circa 80 °C e in uscita di 60 °C, mentre le caldaie a condensazione e le pompe di calore garantiscono rendimenti elevati con un flusso d'acqua in mandata, rispettivamente, a 50-55 °C e a 35-45 °C. Inoltre, i radiatori solitamente lavorano con una differenza di temperatura tra ingresso e uscita di 20 °C, mentre la maggior parte delle pompe di calore è progettata per una differenza tra mandata e ritorno di 5 °C.

Questi sembrerebbero ostacoli apparentemente insormontabili, ma si è visto che, in alcune condizioni, è possibile ottenere un accoppiamento sufficientemente efficiente. In primo luogo, è necessario considerare il calore che un radiatore è in grado di scambiare con l'ambiente da riscaldare:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad (\text{A.1})$$

dove U rappresenta il coefficiente di scambio termico funzione del materiale e della forma del radiatore, A la superficie di scambio e ΔT_{ml} la differenza media logaritmica tra le temperature di ingresso e uscita al radiatore e quella dell'ambiente.

Come si può facilmente notare, diminuendo il terzo fattore è necessario aumentare gli altri due per garantire la stessa potenza emessa. Questo può essere effettuato tramite o l'aumento dell'area dei radiatori, intervento che, però, sarebbe spesso troppo invasivo o non praticabile, oppure sostituendo i radiatori in ghisa poco alettati (o comunque sia scarsamente performanti) tipici degli anni '60-'70 con alternative migliori, quali quelle in acciaio o in alluminio. Così facendo, si potrebbe passare, ad esempio, da elementi che forniscono 140 W l'uno ad altri da 400 W l'uno. A parità di volumetria, si avrebbe, quindi, un aumento del 185% del calore scambiabile a fronte di una spesa più che sostenibile⁶.

Un'altra soluzione sarebbe quella di ridurre i carichi termici dell'edificio così da poter garantire il fabbisogno senza la necessità di sostituire tutti i radiatori. Per determinare l'entità della diminuzione necessaria è d'uopo analizzare come varii la potenza emessa al variare delle differenze di temperature. I dati di targa, forniti dal produttore per ogni radiatore, sono relativi alle prove effettuate con una differenza di temperatura pari a 50 °C, in accordo con la norma UNI EN 442. Per ottenere il potere emissivo con un altro ΔT_{ml} si può sfruttare la seguente relazione:

⁶ Secondo il prezzario della Regione Piemonte, il prezzo medio per i radiatori a colonnine tubolari in acciaio è pari a 130 €/kW I.V.A. esclusa.

$$Q_{\Delta T} = Q_{50^{\circ}\text{C}} \cdot \left(\frac{\Delta T_{ml}}{50^{\circ}\text{C}} \right)^n \quad (\text{A.2})$$

dove n è un esponente caratteristico della tipologia di radiatore, ma che si può considerare quasi sempre pari a 1.3. Ipotizzando, quindi, un minore ΔT_{ml} dovuto al nuovo impianto, è possibile determinare la riduzione della potenza emissiva dei radiatori alle nuove condizioni di lavoro. Di conseguenza, questo valore corrisponderebbe, con buona approssimazione, anche alla percentuale di cui si deve ridurre il carico termico dell'edificio.

Attraverso l'insieme degli interventi sopracitati solitamente si può garantire la potenza necessaria a soddisfare il fabbisogno termico dell'edificio. Il problema maggiore, perché di più difficile quantificazione è, invece, quello relativo all'incremento della portata nelle tubazioni quando si installa una pompa di calore. Il motivo risiede nel fatto che la potenza erogabile dal fluido di processo (solitamente acqua) è funzione del suo calore specifico e della differenza di temperatura tra ingresso e uscita:

$$Q = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (\text{A.3})$$

Nel caso delle pompe di calore, tuttavia, non si può garantire un ΔT pari a 20 °C tra ingresso e uscita al radiatore e, pertanto, tra mandata e ritorno della macchina. Quest'ultima, difatti, è solitamente progettata per lavorare con un ΔT pari a 5 °C. A livello di circuito lato utenza, esso si può aumentare fino a raggiungere circa 10 °C, avendo, però, l'accortezza di inserire un accumulo termico sulla tubazione di ritorno in modo da aumentare la temperatura di uscita dal radiatore e riportare la differenza di temperatura lato macchina a 5 °C.

Per questi motivi la portata del fluido di processo, a parità di potenza dovrebbe raddoppiare. Si è visto, tuttavia, che la sostituzione dei componenti trasparenti prevista con la prima tipologia di intervento è in grado di ridurre i carichi termici in modo tale da richiedere un incremento medio di portata non del 100%, ma solo del 70%. Quando si interviene anche sull'involucro opaco, invece, la riduzione dei carichi termici è così elevata che la portata di acqua risulta minore pure rispetto alla corrispettiva antecedente l'intervento.

Se nella seconda prospettiva, pertanto, nemmeno la questione delle portate è un reale problema, nella prima è necessario porre maggiore attenzione. In ogni caso, gli impianti progettati e realizzati prima che ci fosse un'evidente consapevolezza sotto l'aspetto dell'efficienza e del risparmio energetico, con i relativi obblighi di legge, sono stati tendenzialmente sovradimensionati. Non è quindi utopistico pensare che un tale incremento di portata sia sostenibile. Inoltre, un impianto di emissione e distribuzione di solito viene progettato per funzionare con un fluido che circola a velocità tali per cui, anche un aumento simile a quelli richiesti nella presente analisi, difficilmente si supera la soglia, pari a circa 1-2 m/s, per cui potrebbero sorgere problemi di vibrazioni e, quindi, rumore.

A.9 Sistemi ibridi

Un'alternativa agli impianti termici a pompa di calore è quella rappresentata dai cosiddetti "sistemi ibridi", formati da una pompa di calore aerotermica e da una caldaia a condensazione. Solitamente quest'ultima è a gas naturale, ma potrebbe essere alimentata anche con altri combustibili fossili o con le biomasse. In accordo con il GSE "nei sistemi ibridi a pompa di calore, il rapporto tra la potenza termica utile della pompa di calore (gruppo funzionale a pompa di calore) e la potenza termica utile della caldaia (gruppo funzionale a combustione a condensazione) deve essere minore o uguale a 0.5" [114]. Una definizione equivalente viene riportata anche dall'ENEA in [115].

Questi sistemi sono stati concepiti allo scopo di superare i limiti delle pompe di calore aerotermica legati al brinamento: in caso di basse temperature e, soprattutto, di alti livelli di umidità relativa è possibile, infatti, che si formi della brina sulla superficie esterna dell'evaporatore, che in breve tempo rende impossibile lo scambio termico tra refrigerante e aria esterna. In queste situazioni la logica di un sistema ibrido prevede lo spegnimento del gruppo funzionale a pompa di calore e il soddisfacimento della domanda termica da parte di quello a combustione.

In alternativa, qualora le condizioni climatiche lo permettano, sarebbe possibile anche utilizzare la caldaia in integrazione alla pompa di calore raggiungendo più facilmente le alte temperature tipiche dei radiatori convenzionali, temperature che, come si è visto, le pompe di calore non sempre riescono a garantire. Di conseguenza, il fabbisogno di raffrescamento potrebbe essere suddiviso in una quota di base (carico di base) e una di picco (carico di picco). La prima rappresenta la maggior parte dell'energia prodotta dall'impianto durante l'anno (richiedendo però una frazione ridotta della potenza nominale), mentre la seconda indica una porzione minorita che necessita, tuttavia, di un'elevata potenza per la propria generazione. In un impianto ibrido, il carico di base potrebbe essere soddisfatto dalla pompa di calore, mentre il carico di picco dal gruppo funzionale a combustione a condensazione. Risulta così possibile dimensionare il sistema prevedendo una pompa di calore di taglia minore rispetto a quella richiesta da un equivalente impianto esclusivamente aerotermico. In ogni caso, per garantire un corretto funzionamento dell'impianto ibrido, la caldaia dovrebbe operare per brevi periodi ed unicamente durante la stagione più rigida.

È necessario considerare tuttavia che, riducendo la potenza della pompa di calore, il risparmio economico ottenuto sui costi di installazione (equazione (3.1)) è in parte compensato dall'installazione della caldaia ausiliaria. Ipotezzando che il bilancio tra i costi di investimento sia positivo, non sempre un risparmio in questa fase potrebbe risultare la scelta migliore per il cliente finale, soprattutto se si opera avendo a disposizione un regime di incentivazione sui costi iniziali molto generoso come quello italiano. Quando, infatti, il 65% del costo di installazione è coperto dall'Ecobonus (o addirittura il 110% coperto dal Superbonus), infatti, è necessario considerare che il risparmio conseguito avviene solo sulla parte restante.

I sistemi ibridi, oltre agli aspetti positivi sopracitati, presentano anche delle criticità dal punto di vista dei costi operativi, poiché la quota parte del calore prodotto con la caldaia a metano ha costi superiori rispetto a quello prodotto con la pompa di calore. Dal punto di vista

ambientale, inoltre, questa quota comporta un aumento delle emissioni di inquinanti e di gas ad effetto serra.

Le soluzioni ibride, inoltre, sono solitamente vendute *factory made*, ossia pre-assemblate dalle aziende produttrici in strutture monoblocco (eventualmente solo l'unità esterna è indipendente). In questi casi la pompa di calore installata difficilmente potrà garantire le stesse prestazioni di una corrispettiva macchina progettata per operare in autonomia: ciò non tanto per la qualità intrinseca dei componenti (fattore fortemente condizionato dalle scelte del produttore), quanto per il fatto che in una struttura monoblocco lo spazio a disposizione per il corretto funzionamento della pompa di calore in termini di scambio termico è sicuramente esiguo.

L'alternativa a sistemi *factory made* potrebbe essere rappresentata da sistemi *custom made*, ovvero abbinando una pompa di calore e una caldaia e sviluppando una logica d'intervento dell'una e/o dell'altra a soddisfare il fabbisogno termico. Tuttavia, è richiesto sia dal GSE [114] sia dall'ENEA [115] che la caldaia e la pompa di calore vengano realizzati e concepiti espressamente per funzionare in abbinamento tra loro e non in modo mutuamente esclusivo.

In aggiunta, è opportuno evidenziare che i problemi convenzionalmente addebitati alle pompe di calore per giustificare l'adozione di sistemi ibridi sono, in realtà, spesso risolvibili. Come si è stato discusso nell'Appendice A.8, infatti, le alte temperature non sono necessarie con i radiatori se sussistono determinate condizioni e se la fase progettuale dell'impianto è stata condotta con cura. Oltre a ciò, le pompe di calore aerotermiche nel corso degli ultimi anni sono state interessate da un miglioramento costante delle prestazioni, in particolare grazie all'introduzione degli inverter [116], anche in condizioni particolari di umidità e temperatura esterna.

Alla luce delle considerazioni qui riportate, si è deciso, pertanto, di non analizzare nello specifico i sistemi ibridi, lasciando alla professionalità e all'esperienza del progettista incaricato le valutazioni in merito a quale impianto preferire in accordo con le richieste del cliente e le caratteristiche dell'edificio interessato dall'intervento.

A.10 Impianti fotovoltaici e autoconsumo

L'allegato 3 del decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28 prevede che “nel caso di edifici nuovi o edifici sottoposti a ristrutturazioni rilevanti, la potenza elettrica degli impianti alimentati da fonti rinnovabili che devono essere obbligatoriamente installati sopra o all'interno dell'edificio o nelle relative pertinenze, misurata in kW, è calcolata secondo la seguente formula”:

$$P = \frac{1}{K} \cdot S \quad (\text{A.4})$$

dove S è la superficie in pianta dell'edificio al livello del terreno, misurata in m^2 , e K è un determinato coefficiente, espresso in m^2/kW . Quest'ultimo è pari a 50 quando la richiesta del pertinente titolo edilizio è rilasciato dal 1° gennaio 2017 (negli anni precedenti la potenza richiesta era minore).

Di conseguenza, si è pensato di simulare inizialmente, per tutti gli impianti, una potenza di picco del fotovoltaico pari a quella minima richiesta per legge. Nel caso delle pompe di calore, si è scelto, inoltre, di aggiungere dei moduli così da raggiungere una taglia che possa garantire il fabbisogno dell'impianto termico, definito come la somma tra la quota di autoconsumo e la quota prelevata dalla rete. In ogni caso, la potenza complessiva non supera mai il valore di 20 kW perché, diversamente, vi sarebbero alcune conseguenze burocratiche, giuridiche e fiscali che non sono state approfondite in questa analisi.

Ovviamente non tutta l'energia elettrica prodotta potrebbe essere contestualmente autoconsumata, pertanto si sfrutta un particolare meccanismo offerto dal GSE chiamato “scambio sul posto”. In questi casi, ogni impianto, nel punto di connessione della rete elettrica nazionale, presenta un particolare contatore che misura, oltre alla quota di energia prelevata dalla rete, anche quella ceduta. La cessione avviene quando la quantità prodotta è in eccesso rispetto a quanto l'impianto possa effettivamente autoconsumare o, in alternativa, accumulare, nel caso sia presente un sistema di batterie.

I consumatori che aderiscono al meccanismo dello “scambio sul posto”, dopo aver saldato la bolletta elettrica ricevono, infatti, un rimborso da parte del GSE per tutta quota di energia non auto consumata e ceduta alla rete [117]. Fino alla quota di pareggio tra l'energia prelevata e quella immessa, quest'ultima viene corrisposta per circa il 70% di quanto l'utente la paga al proprio operatore (non vengono rimborsate le imposte e le misure di compensazione territoriale). Infine, il prezzo della quota che è stata ceduta e mai prelevata, quindi effettivamente in eccesso, viene valutata dal GSE pari al prezzo del MGP. Il calcolo esatto degli importi è stato effettuato in accordo con il documento *Servizio di Scambio sul Posto – Regole tecniche*, redatto dal GSE [118].

La produzione da fotovoltaico è, pertanto, molto utile nel caso di impianti a pompa di calore in quanto essi, come si è visto, sfruttano l'energia elettrica per produrne di termica. Nel caso di una caldaia, invece, il fotovoltaico avrebbe apparentemente meno utilità perché non direttamente utilizzabile dall'impianto termico, se non in minima parte per l'avviamento o per le mansioni accessorie. In merito all'energia elettrica, si potrebbe considerare, quindi, oltre alla

richiesta degli impianti termici, un consumo medio degli elettrodomestici nel caso in cui siano presenti degli occupanti, ad esempio quattro per unità immobiliare, ipotesi coerente con le precedenti per il calcolo dei carichi termici di ventilazione. Il motivo non sarebbe tanto il corretto posizionamento in una determinata fascia di consumo elettrico e, conseguentemente, di prezzo unitario della relativa *commodity*, ma, appunto, la possibilità di sfruttare l'autoconsumo anche nel caso di impianti termici convenzionali a combustibili fossili. Infatti, nel caso in cui non si considerassero i consumi degli elettrodomestici, tutta l'energia prodotta verrebbe contabilizzata, nell'ipotesi di partecipare al meccanismo dello "scambio sul posto", come "netta" e, pertanto, valorizzato al prezzo del MGP. Tuttavia, ciò non è assolutamente conveniente rispetto all'autoconsumo, considerando che, in quest'ultimo scenario, il risparmio rispetto al prezzo in bolletta è molto maggiore del guadagno in funzione del MGP.

Allo stesso tempo, però, in questo modo non si riuscirebbe più a discernere quale sia la quota di energia prodotta dal fotovoltaico e impiegata per soddisfare i fabbisogni termici e quale per i consumi delle utenze elettriche. Di conseguenza, la quota di investimento relativa al numero di pannelli da installare per legge è stata estrapolata dal computo finale, così come la percentuale di energia elettrica prodotta da questa frazione dell'impianto fotovoltaico ed autoconsumata dall'impianto termico. È importante sottrarre anche questa quantità di energia perché, diversamente, dovrebbe essere prelevata dalla rete, situazione che non corrisponderebbe a quella reale in autoconsumo creando uno svantaggio economico per le pompe di calore rispetto alle altre tecnologie.

I costi dei pannelli fotovoltaici e dei loro componenti sono stati ricavati in questo caso dal prezzo redatto dalla Regione Piemonte [72]. In particolare, le celle in silicio monocristallino presentano un prezzo di 0.92 €/W_p (potenza di picco), mentre gli inverter di circa 240 €/kW di potenza nominale in AC. La struttura metallica di sostegno e la posa in opera richiedono, rispettivamente, 70 e 112 €/m².

A.11 LCOH e spesa annuale: valori a confronto

A.11.1 Edificio monofamiliare

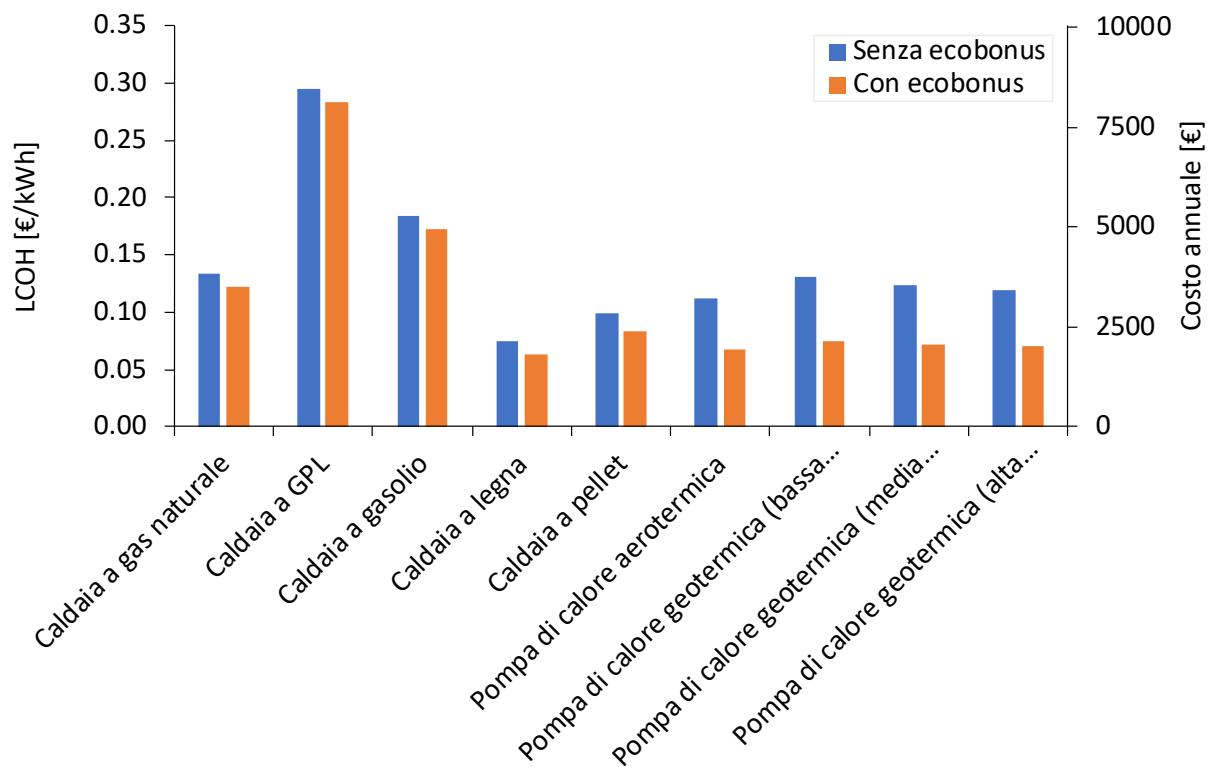


Figura A.14 – LCOH relativi ai diversi impianti nel caso di riqualificazione energetica a Torino.

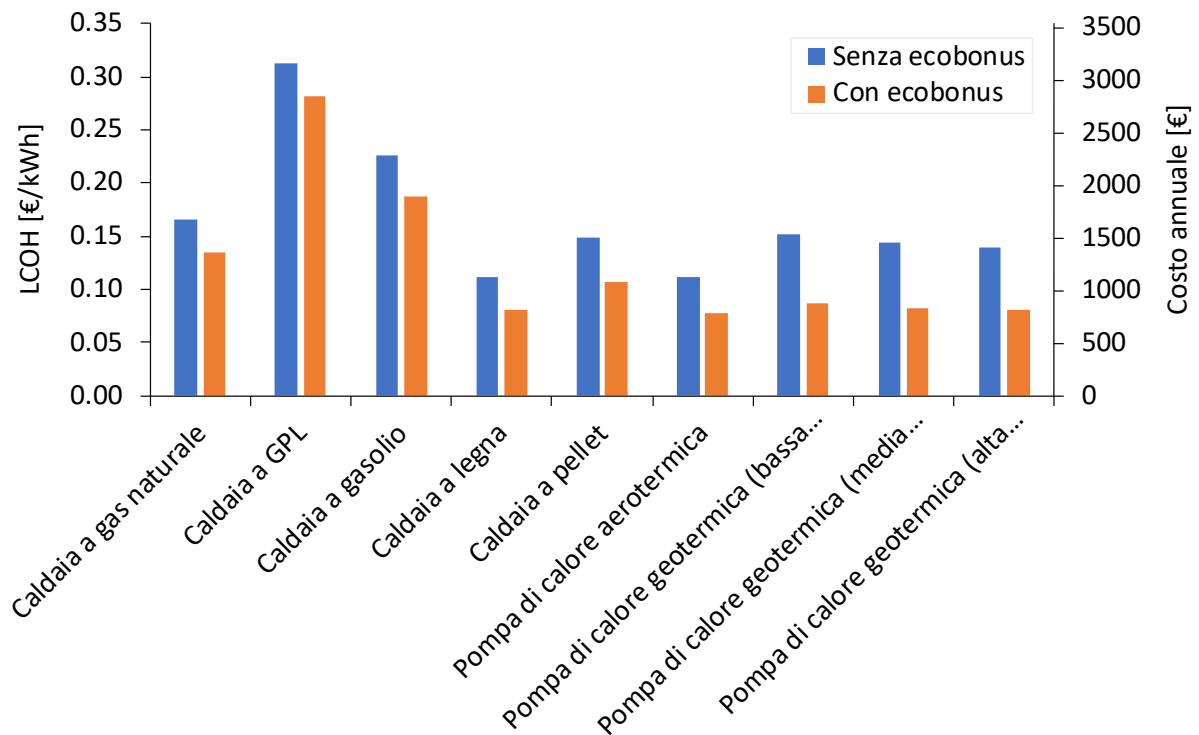


Figura A.15 – LCOH relativi ai diversi impianti nel caso di ristrutturazione importante a Torino.

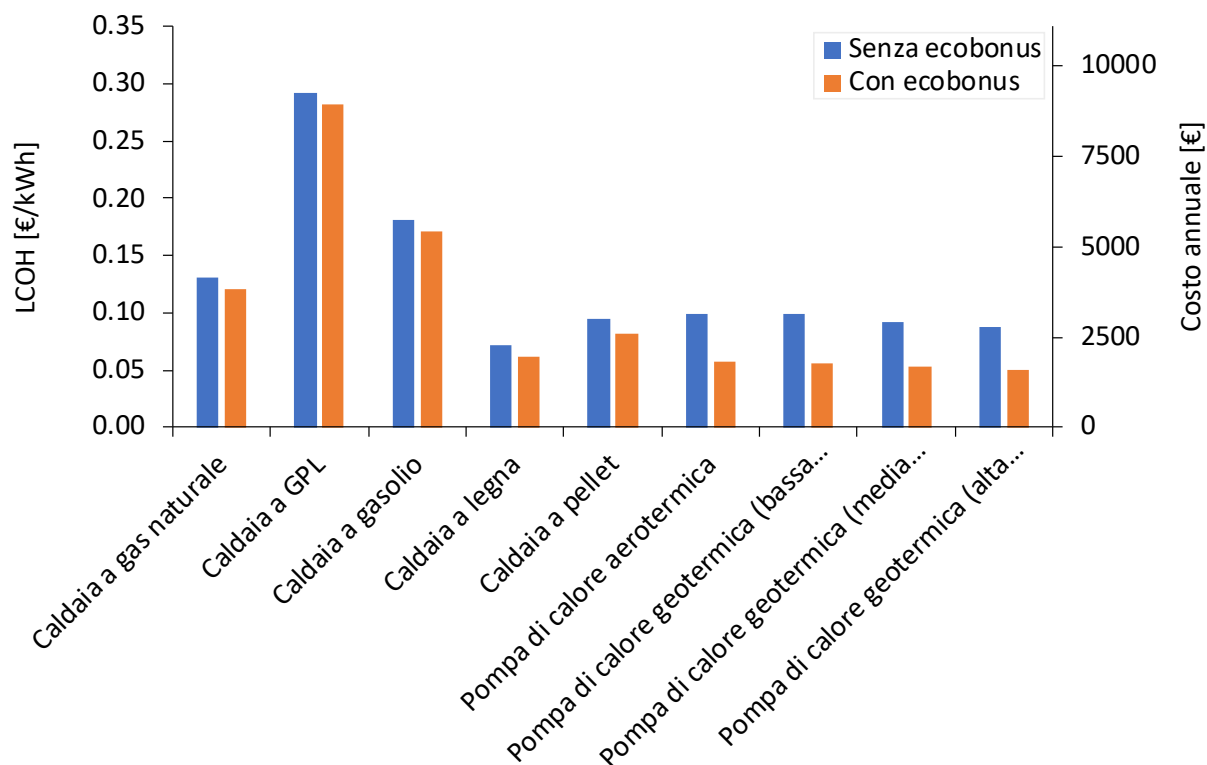


Figura A.16 – LCOH relativi ai diversi impianti nel caso di riqualificazione energetica a Cuneo.

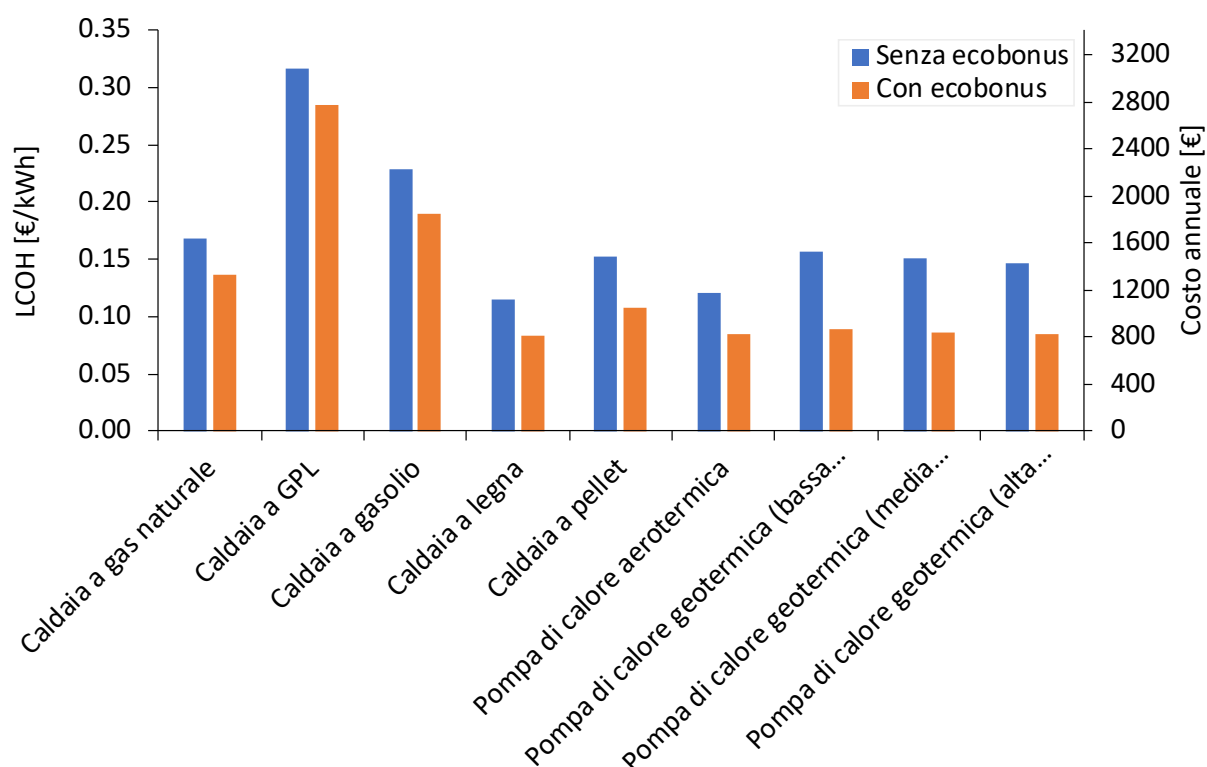


Figura A.17 – LCOH relativi ai diversi impianti nel caso di ristrutturazione importante a Cuneo.

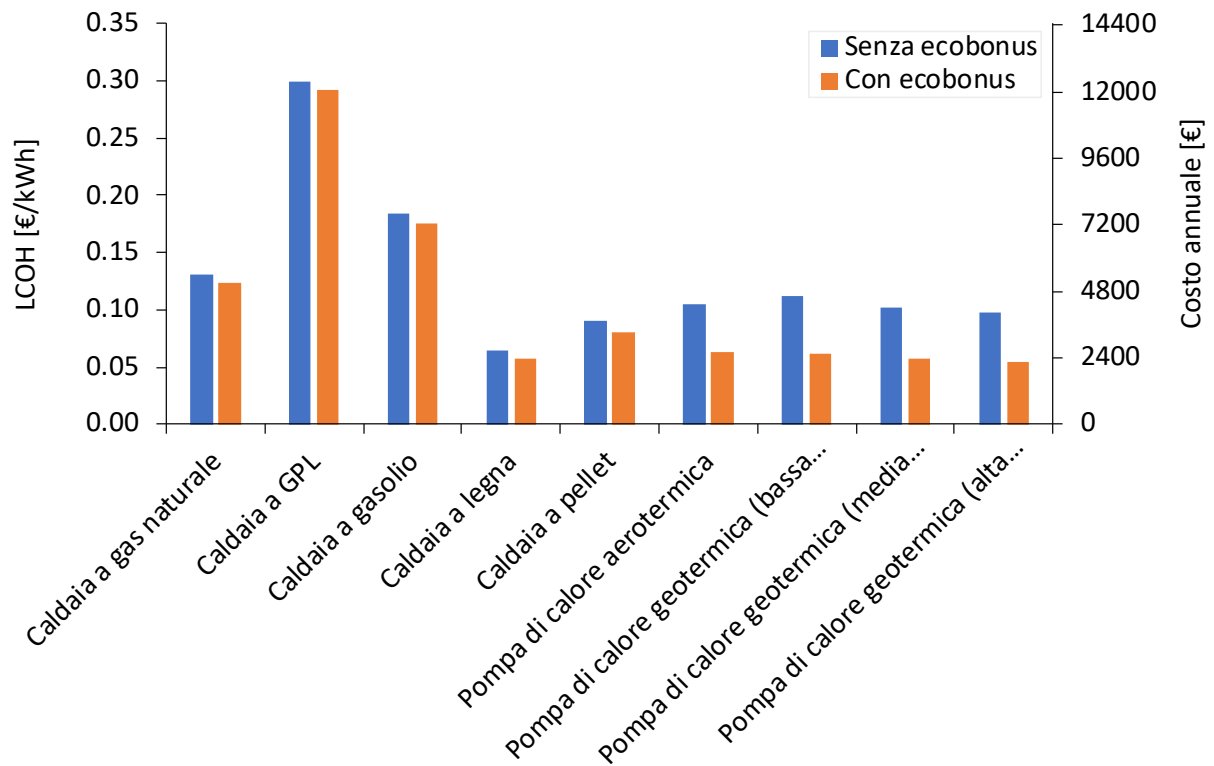


Figura A.18 – LCOH relativi ai diversi impianti nel caso di riqualificazione energetica a Oulx.

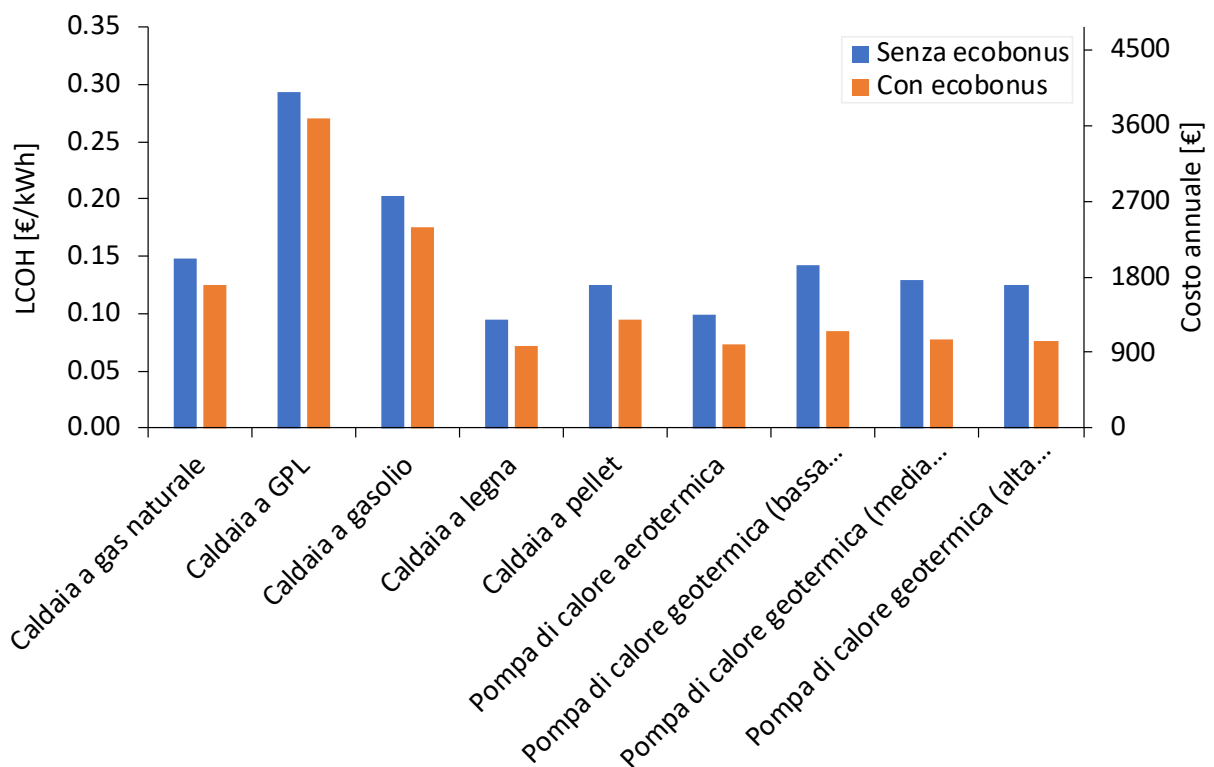


Figura A.19 – LCOH relativi ai diversi impianti nel caso di ristrutturazione importante a Oulx.

A.11.2 Edificio multifamiliare

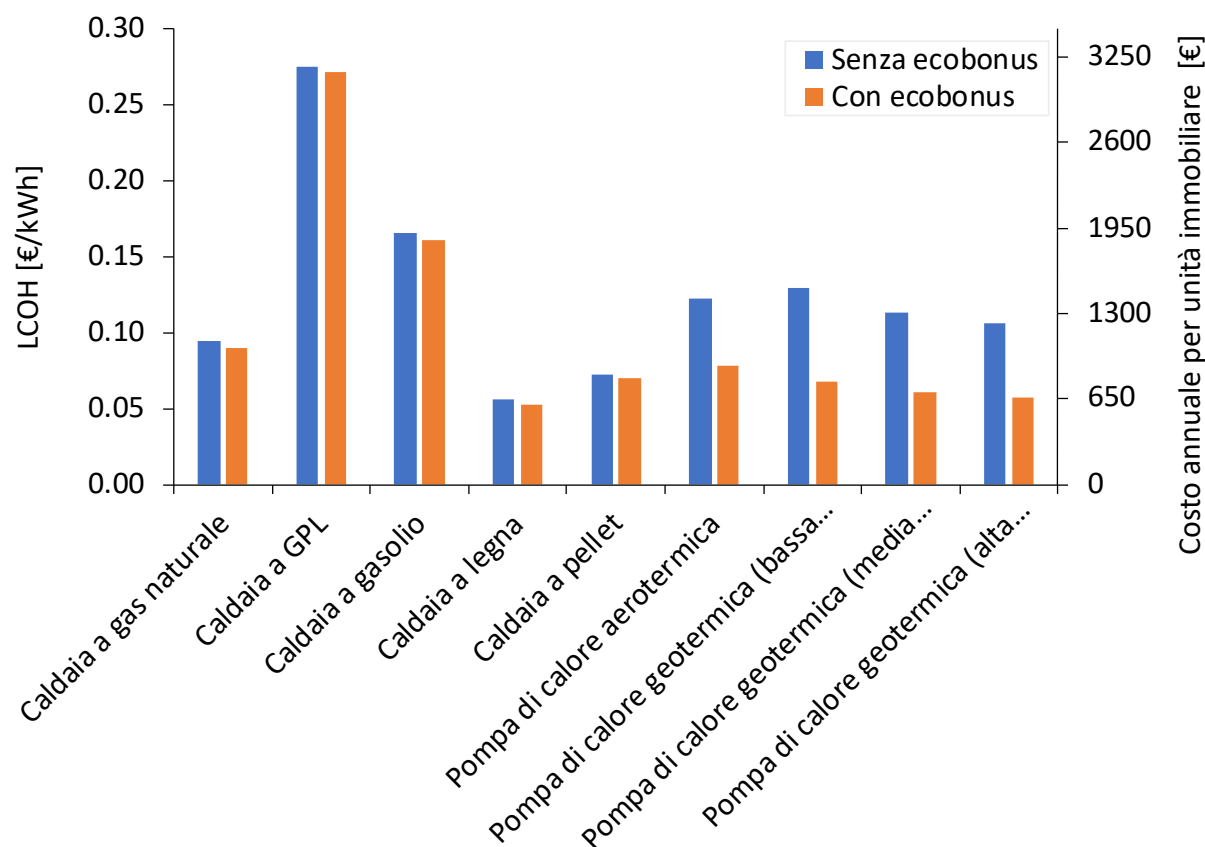


Figura A.20 – LCOH relativi ai diversi impianti nel caso di riqualificazione energetica a Torino.

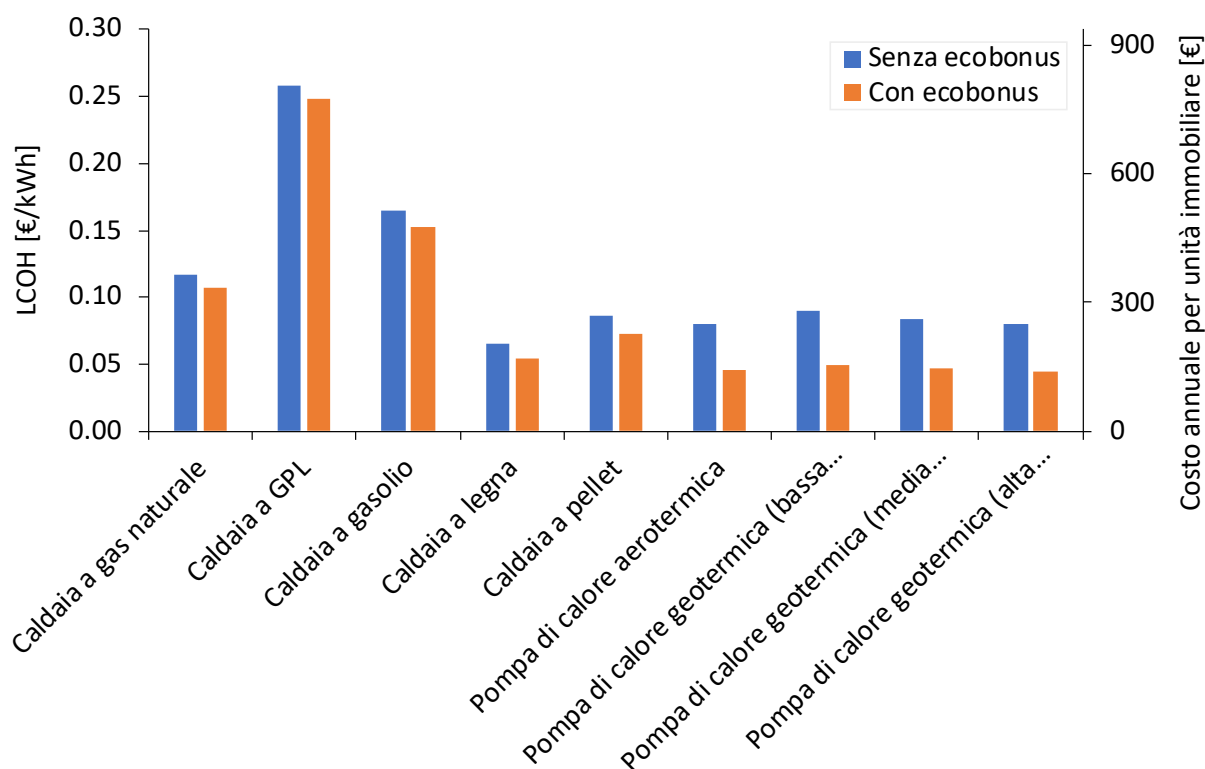


Figura A.21 – LCOH relativi ai diversi impianti nel caso di ristrutturazione importante a Torino.

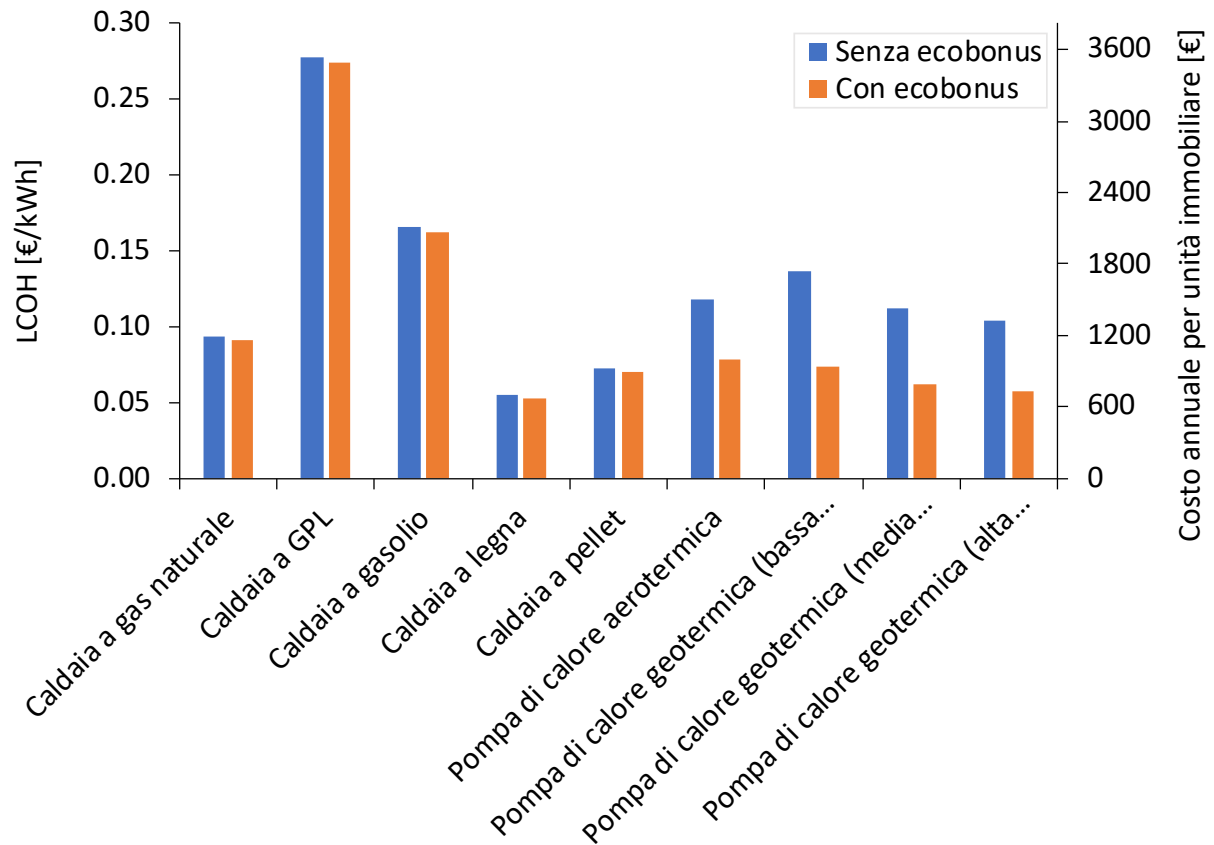


Figura A.22 – LCOH relativi ai diversi impianti nel caso di riqualificazione energetica a Cuneo.

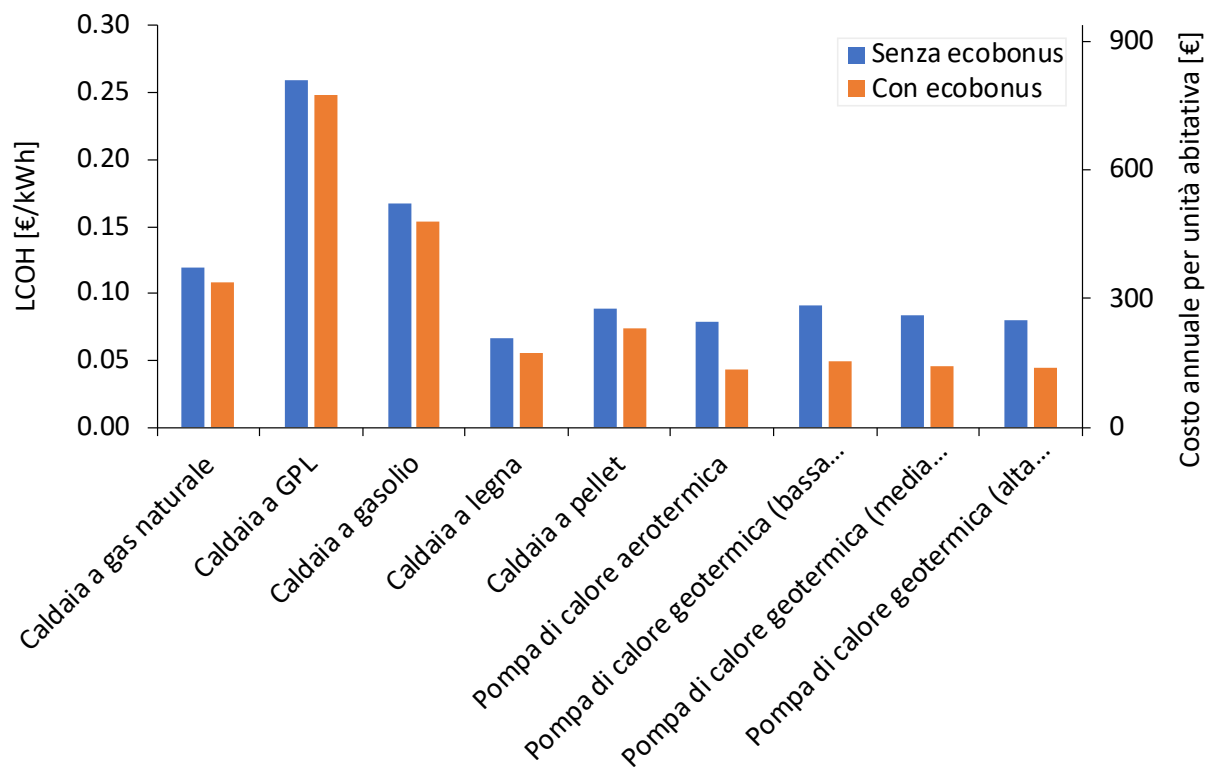


Figura A.23 – LCOH relativi ai diversi impianti nel caso di ristrutturazione importante a Cuneo.

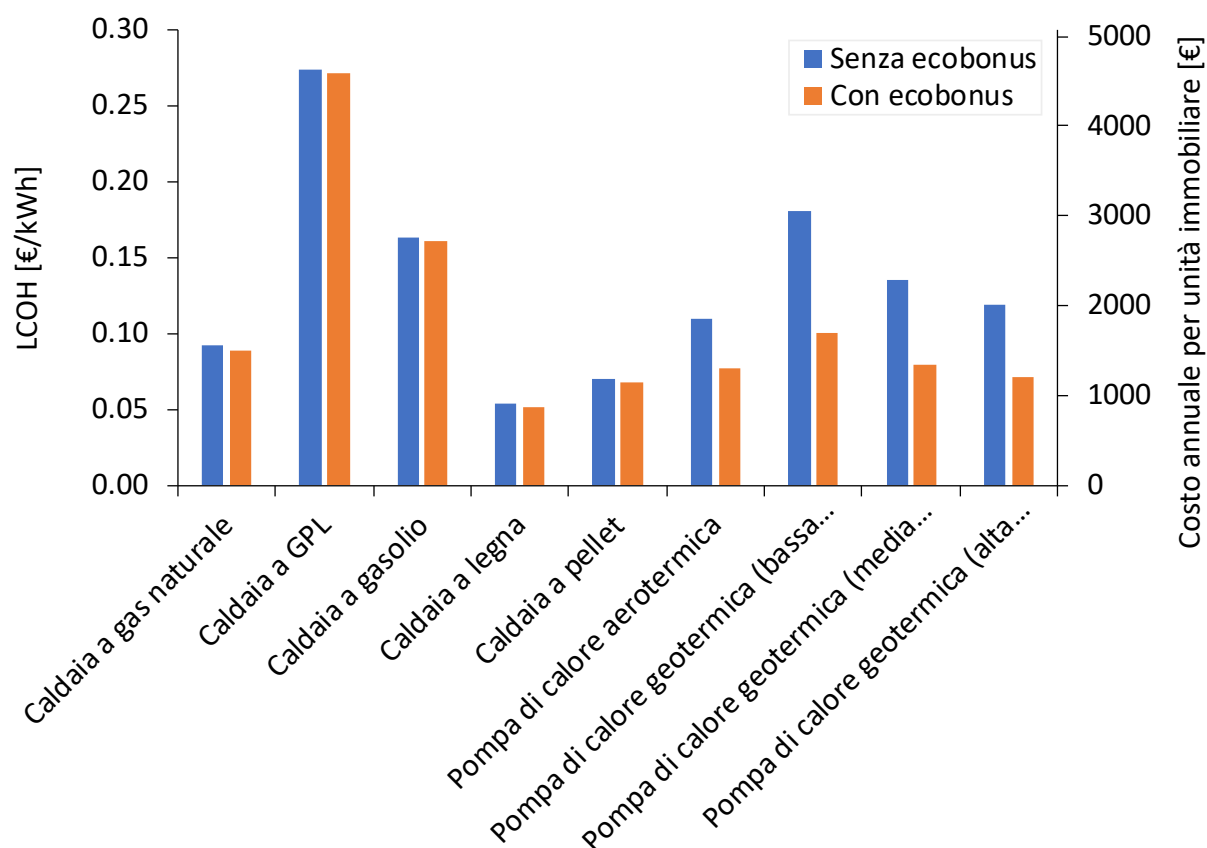


Figura A.24 – LCOH relativi ai diversi impianti nel caso di riqualificazione energetica a Oulx.

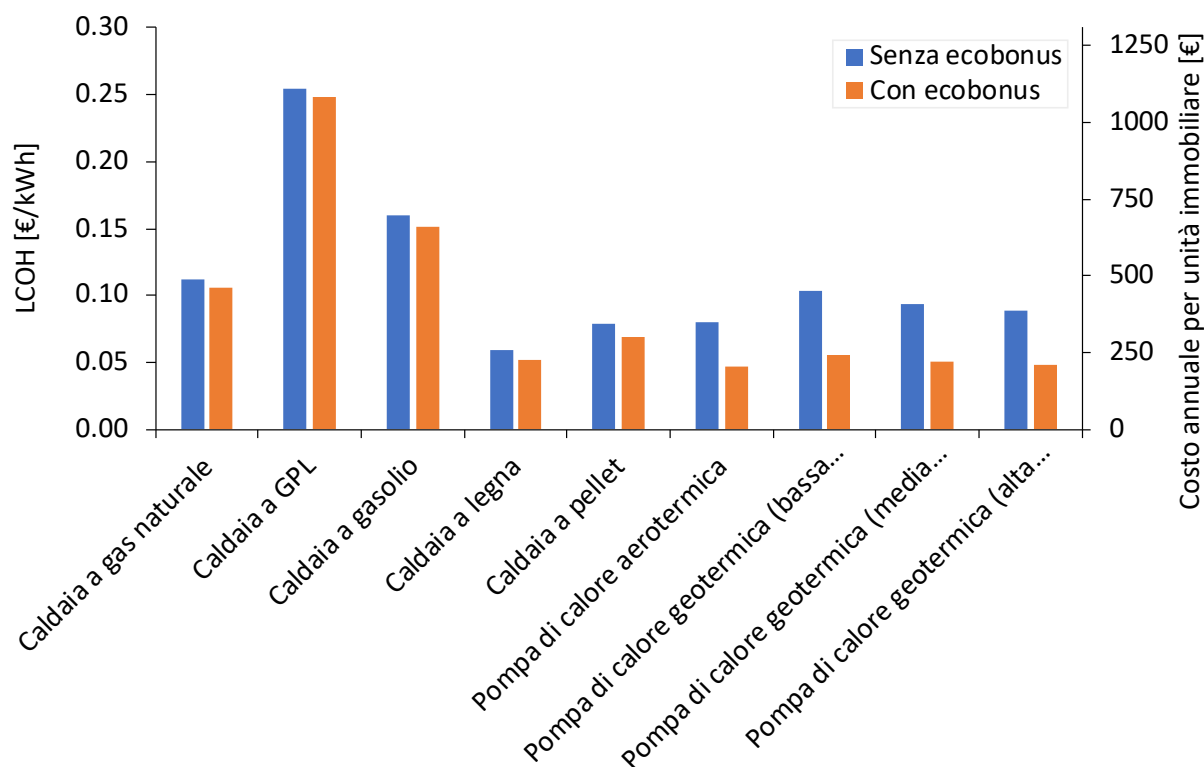


Figura A.25 – LCOH relativi ai diversi impianti nel caso di ristrutturazione importante a Oulx.

A.11.3 Minimi, massimi e variazioni relative del LCOH

Tabella A.29 – Dettaglio dei valori di LCOH e relativi valori minimi, massimi e medi per ogni tipologia di impianto o per ogni caso studio.

Edificio	Intervento	Località	Incentivo	Gas naturale	GPL	Gasolio	Legna	Pellet	Aerotermica	Geotermica (bassa conduttività)	Geotermica (media conduttività)	Geotermica (alta conduttività)	Valore minimo	Valore massimo	Valore mediano
Monofamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	No	133.3	294.4	183.7	73.9	98.5	111.7	130.4	123.9	119.5	73.9	294.4	123.9
			Sì	122.5	283.6	172.3	62.9	83.7	67.2	75.0	71.9	69.9	62.9	283.6	75.0
		Cuneo	No	131.0	292.0	181.3	71.6	95.5	99.8	98.4	92.5	88.0	71.6	292.0	98.4
			Sì	122.5	283.6	172.3	62.9	83.7	67.2	75.0	71.9	69.9	62.9	283.6	75.0
		Oulx	No	131.3	299.9	183.7	64.8	90.5	104.6	112.3	102.6	98.1	64.8	299.9	104.6
			Sì	123.8	292.4	175.8	57.1	80.2	63.1	61.2	56.6	54.5	54.5	292.4	63.1
	Ristrutturazione importante	Torino	No	166.0	313.1	225.5	112.4	148.3	112.5	151.2	144.2	140.2	112.4	313.1	148.3
			Sì	135.4	282.5	187.3	81.1	106.5	77.3	86.3	82.9	81.1	77.3	282.5	86.3
		Cuneo	No	168.9	316.4	229.1	115.2	151.9	120.7	157.2	150.8	146.6	115.2	316.4	151.9
			Sì	137.1	284.6	189.4	82.6	108.4	84.1	89.2	86.2	84.2	82.6	284.6	89.2
		Oulx	No	147.9	293.1	203.1	94.7	125.3	98.9	142.1	129.3	124.7	94.7	293.1	129.3
			Sì	125.2	270.3	174.7	71.4	94.2	72.8	84.0	78.0	75.8	71.4	270.3	84.0
Multifamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	No	93.9	275.0	164.9	55.6	72.3	121.9	128.7	112.9	106.2	55.6	275.0	112.9
			Sì	90.2	271.3	161.2	52.8	69.5	78.5	67.9	60.4	57.2	52.8	271.3	69.5
		Cuneo	No	93.9	276.7	165.6	55.3	72.2	118.4	136.5	112.3	103.9	55.3	276.7	112.3
			Sì	90.6	273.4	162.3	52.7	69.6	78.8	73.1	61.7	57.8	52.7	273.4	73.1
		Oulx	No	91.8	273.6	163.1	53.4	70.2	109.9	180.6	135.4	119.3	53.4	273.6	119.3
			Sì	89.3	271.1	160.6	51.5	68.3	77.5	100.5	79.2	71.6	51.5	271.1	79.2
	Ristrutturazione importante	Torino	No	117.3	257.8	165.1	64.8	86.5	79.6	90.3	83.7	79.6	64.8	257.8	86.5
			Sì	107.4	247.9	152.7	54.7	72.9	46.1	49.8	46.7	44.8	44.8	247.9	54.7
		Cuneo	No	118.8	259.3	166.9	66.6	88.8	78.8	90.7	84.2	80.2	66.6	259.3	88.8
			Sì	108.2	248.7	153.6	55.7	74.2	43.6	49.3	46.3	44.4	43.6	248.7	55.7
		Oulx	No	112.5	254.9	159.5	59.3	79.3	79.5	103.1	93.4	88.8	59.3	254.9	93.4
			Sì	105.4	247.8	150.7	52.0	69.6	46.4	54.9	50.4	48.2	46.4	247.8	54.9
	Valore minimo	No	91.8	254.9	159.5	53.4	70.2	78.8	90.3	83.7	79.6				
		Sì	89.3	247.8	150.7	51.5	68.3	43.6	49.3	46.3	44.4				
	Valore massimo	No	168.9	316.4	229.1	115.2	151.9	121.9	180.6	150.8	146.6				
		Sì	137.1	292.4	189.4	82.6	108.4	84.1	100.5	86.2	84.2				
	Valore mediano	No	124.9	284.4	174.1	65.7	89.6	107.3	129.6	112.6	105.1				
		Sì	115.3	272.4	167.3	56.4	77.2	70.0	74.1	66.8	63.8				

Tabella A.30 – Rapporto tra il valore del LCOH di ogni casistica e quello della relativa soluzione più economicamente conveniente.

Edificio	Intervento	Località	Incentivo	Gas naturale	GPL	Gasolio	Legna	Pellet	Aerotermica	Geotermica (bassa conduttività)	Geotermica (media conduttività)	Geotermica (alta conduttività)
Monofamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	No	1.8	4.0	2.5	1.0	1.3	1.5	1.8	1.7	1.6
			Sì	1.9	4.5	2.7	1.0	1.3	1.1	1.2	1.1	1.1
		Cuneo	No	1.8	4.1	2.5	1.0	1.3	1.4	1.4	1.3	1.2
			Sì	1.9	4.5	2.7	1.0	1.3	1.1	1.2	1.1	1.1
		Oulx	No	2.0	4.6	2.8	1.0	1.4	1.6	1.7	1.6	1.5
			Sì	2.3	5.4	3.2	1.0	1.5	1.2	1.1	1.0	1.0
	Ristrutturazione importante	Torino	No	1.5	2.8	2.0	1.0	1.3	1.0	1.3	1.3	1.2
			Sì	1.8	3.7	2.4	1.0	1.4	1.0	1.1	1.1	1.0
		Cuneo	No	1.5	2.7	2.0	1.0	1.3	1.0	1.4	1.3	1.3
			Sì	1.7	3.4	2.3	1.0	1.3	1.0	1.1	1.0	1.0
		Oulx	No	1.6	3.1	2.1	1.0	1.3	1.0	1.5	1.4	1.3
			Sì	1.8	3.8	2.4	1.0	1.3	1.0	1.2	1.1	1.1
	Riqualificazione energetica	Torino	No	1.7	4.9	3.0	1.0	1.3	2.2	2.3	2.0	1.9
			Sì	1.7	5.1	3.1	1.0	1.3	1.5	1.3	1.1	1.1
		Cuneo	No	1.7	5.0	3.0	1.0	1.3	2.1	2.5	2.0	1.9
			Sì	1.7	5.2	3.1	1.0	1.3	1.5	1.4	1.2	1.1
		Oulx	No	1.7	5.1	3.1	1.0	1.3	2.1	3.4	2.5	2.2
			Sì	1.7	5.3	3.1	1.0	1.3	1.5	2.0	1.5	1.4
Multifamiliare	Ristrutturazione importante	Torino	No	1.8	4.0	2.5	1.0	1.3	1.2	1.4	1.3	1.2
			Sì	2.4	5.5	3.4	1.2	1.6	1.0	1.1	1.0	1.0
		Cuneo	No	1.8	3.9	2.5	1.0	1.3	1.2	1.4	1.3	1.2
			Sì	2.5	5.7	3.5	1.3	1.7	1.0	1.1	1.1	1.0
		Oulx	No	1.9	4.3	2.7	1.0	1.3	1.3	1.7	1.6	1.5
			Sì	2.3	5.3	3.2	1.1	1.5	1.0	1.2	1.1	1.0

Tabella A.31 – Differenza percentuale tra il LCOH di ogni casistica e quello della relativa pompa di calore geotermica installata in un terreno a media conduttività.

Edificio	Intervento	Località	Incentivo	Gas naturale	GPL	Gasolio	Legna	Pellet	Aerotermica	Geotermica (bassa conduttività)	Geotermica (media conduttività)	Geotermica (alta conduttività)
Monofamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	No	8%	138%	48%	-40%	-21%	-10%	5%	0%	-4%
			Sì	70%	294%	140%	-13%	16%	-7%	4%	0%	-3%
		Cuneo	No	42%	216%	96%	-23%	3%	8%	6%	0%	-5%
			Sì	70%	294%	140%	-13%	16%	-7%	4%	0%	-3%
		Oulx	No	28%	192%	79%	-37%	-12%	2%	9%	0%	-4%
			Sì	119%	417%	211%	1%	42%	12%	8%	0%	-4%
	Ristrutturazione importante	Torino	No	15%	117%	56%	-22%	3%	-22%	5%	0%	-3%
			Sì	63%	241%	126%	-2%	28%	-7%	4%	0%	-2%
		Cuneo	No	12%	110%	52%	-24%	1%	-20%	4%	0%	-3%
			Sì	59%	230%	120%	-4%	26%	-2%	4%	0%	-2%
		Oulx	No	14%	127%	57%	-27%	-3%	-23%	10%	0%	-4%
			Sì	61%	247%	124%	-8%	21%	-7%	8%	0%	-3%
Multifamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	No	-17%	143%	46%	-51%	-36%	8%	14%	0%	-6%
			Sì	49%	349%	167%	-13%	15%	30%	12%	0%	-5%
		Cuneo	No	-16%	147%	48%	-51%	-36%	5%	22%	0%	-7%
			Sì	47%	343%	163%	-15%	13%	28%	19%	0%	-6%
		Oulx	No	-32%	102%	20%	-61%	-48%	-19%	33%	0%	-12%
			Sì	13%	242%	103%	-35%	-14%	-2%	27%	0%	-10%
	Ristrutturazione importante	Torino	No	40%	208%	97%	-23%	3%	-5%	8%	0%	-5%
			Sì	130%	431%	227%	17%	56%	-1%	7%	0%	-4%
		Cuneo	No	41%	208%	98%	-21%	5%	-6%	8%	0%	-5%
			Sì	134%	438%	232%	20%	60%	-6%	7%	0%	-4%
		Oulx	No	20%	173%	71%	-37%	-15%	-15%	10%	0%	-5%
			Sì	109%	392%	199%	3%	38%	-8%	9%	0%	-4%

A.11.4 Spesa annuale complessiva

Nelle tabelle seguenti vengono riportati i valori della spesa annuale calcolati come il prodotto tra il LCOH [€/kWh] e il fabbisogno annuale [kWh]. In particolare, nella Tabella A.32 sono riportati i costi totali, nella Tabella A.33 quelli per unità immobiliare.

Tabella A.32 – Spesa annuale totale per le varie soluzioni analizzate.

Edificio	Intervento	Località	Incentivo	Gas naturale	GPL	Gasolio	Legna	Pellet	Aerotermica	Geotermica (bassa conduttività)	Geotermica (media conduttività)	Geotermica (alta conduttività)
Monofamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	No	3 823.97 €	8 447.37 €	5 270.15 €	2 121.13 €	2 825.62 €	3 204.85 €	3 742.25 €	3 554.57 €	3 429.45 €
			Sì	3 513.94 €	8 137.34 €	4 945.24 €	1 803.66 €	2 401.59 €	1 929.55 €	2 152.54 €	2 064.05 €	2 005.06 €
		Cuneo	No	4 152.65 €	9 256.90 €	5 746.31 €	2 269.54 €	3 025.87 €	3 162.62 €	3 119.24 €	2 931.55 €	2 788.56 €
			Sì	3 842.62 €	8 946.87 €	5 421.40 €	1 952.07 €	2 601.84 €	1 838.51 €	1 766.90 €	1 678.41 €	1 610.99 €
		Oulx	No	5 423.33 €	12 386.49 €	7 587.12 €	2 674.43 €	3 735.99 €	4 319.99 €	4 639.57 €	4 237.39 €	4 049.71 €
			Sì	5 113.30 €	12 076.46 €	7 262.21 €	2 356.96 €	3 311.96 €	2 606.86 €	2 527.30 €	2 337.69 €	2 249.20 €
	Ristrutturazione importante	Torino	No	1 681.92 €	3 171.67 €	2 284.61 €	1 138.96 €	1 502.79 €	1 139.45 €	1 532.00 €	1 460.50 €	1 420.29 €
			Sì	1 371.89 €	2 861.64 €	1 897.54 €	821.49 €	1 078.76 €	782.79 €	873.95 €	840.24 €	821.28 €
		Cuneo	No	1 646.76 €	3 085.06 €	2 233.67 €	1 122.96 €	1 481.16 €	1 176.45 €	1 532.41 €	1 469.85 €	1 429.63 €
			Sì	1 336.73 €	2 775.03 €	1 846.59 €	805.49 €	1 057.13 €	819.79 €	869.63 €	840.14 €	821.18 €
		Oulx	No	2 017.78 €	3 998.86 €	2 771.16 €	1 291.80 €	1 709.37 €	1 350.09 €	1 938.71 €	1 764.43 €	1 701.87 €
			Sì	1 707.75 €	3 688.83 €	2 384.09 €	974.33 €	1 285.34 €	993.43 €	1 146.04 €	1 063.87 €	1 034.37 €
Multifamiliare	Riqualificazione energetica	Torino	No	10 836.52 €	31 752.14 €	19 038.00 €	6 417.05 €	8 351.45 €	14 078.08 €	14 864.96 €	13 041.75 €	12 264.21 €
			Sì	10 413.27 €	31 328.89 €	18 614.75 €	6 091.05 €	8 025.45 €	9 062.06 €	7 836.38 €	6 976.78 €	6 610.19 €
		Cuneo	No	11 973.85 €	35 278.15 €	21 111.99 €	7 047.82 €	9 202.74 €	15 094.67 €	17 408.37 €	14 311.60 €	13 252.54 €
			Sì	11 550.60 €	34 854.91 €	20 688.74 €	6 721.82 €	8 876.74 €	10 045.34 €	9 326.20 €	7 866.14 €	7 366.82 €
		Oulx	No	15 516.03 €	46 259.75 €	27 571.33 €	9 029.93 €	11 876.95 €	18 585.64 €	30 536.95 €	22 895.58 €	20 178.65 €
			Sì	15 092.79 €	45 836.51 €	27 148.08 €	8 703.93 €	11 550.95 €	13 107.66 €	16 992.82 €	13 390.09 €	12 109.12 €
	Ristrutturazione importante	Torino	No	3 665.51 €	8 057.11 €	5 158.21 €	2 026.34 €	2 702.99 €	2 487.58 €	2 822.42 €	2 616.86 €	2 487.27 €
			Sì	3 355.49 €	7 747.08 €	4 771.14 €	1 708.87 €	2 278.96 €	1 439.92 €	1 556.59 €	1 459.68 €	1 398.58 €
		Cuneo	No	3 460.12 €	7 551.24 €	4 860.66 €	1 939.59 €	2 585.25 €	2 294.25 €	2 640.23 €	2 452.55 €	2 336.36 €
			Sì	3 150.09 €	7 241.21 €	4 473.59 €	1 622.13 €	2 161.22 €	1 270.07 €	1 435.52 €	1 347.03 €	1 292.25 €
		Oulx	No	4 910.51 €	11 123.44 €	6 961.82 €	2 586.17 €	3 460.68 €	3 470.92 €	4 500.85 €	4 076.33 €	3 875.24 €
			Sì	4 600.48 €	10 813.42 €	6 574.75 €	2 268.71 €	3 036.65 €	2 025.47 €	2 397.71 €	2 197.55 €	2 102.75 €

Tabella A.33 – Spesa annuale per unità abitativa per le varie soluzioni analizzate.

Edificio	Intervento	Località	Incentivo	Gas naturale	GPL	Gasolio	Legna	Pellet	Aerotermica	Geotermica (bassa conduttività)	Geotermica (media conduttività)	Geotermica (alta conduttività)
Monofamiliare	Riqualficazione energetica	Torino	No	3 823.97 €	8 447.37 €	5 270.15 €	2 121.13 €	2 825.62 €	3 204.85 €	3 742.25 €	3 554.57 €	3 429.45 €
			Sì	3 513.94 €	8 137.34 €	4 945.24 €	1 803.66 €	2 401.59 €	1 929.55 €	2 152.54 €	2 064.05 €	2 005.06 €
		Cuneo	No	4 152.65 €	9 256.90 €	5 746.31 €	2 269.54 €	3 025.87 €	3 162.62 €	3 119.24 €	2 931.55 €	2 788.56 €
			Sì	3 842.62 €	8 946.87 €	5 421.40 €	1 952.07 €	2 601.84 €	1 838.51 €	1 766.90 €	1 678.41 €	1 610.99 €
		Oulx	No	5 423.33 €	12 386.49 €	7 587.12 €	2 674.43 €	3 735.99 €	4 319.99 €	4 639.57 €	4 237.39 €	4 049.71 €
			Sì	5 113.30 €	12 076.46 €	7 262.21 €	2 356.96 €	3 311.96 €	2 606.86 €	2 527.30 €	2 337.69 €	2 249.20 €
	Ristrutturazione importante	Torino	No	1 681.92 €	3 171.67 €	2 284.61 €	1 138.96 €	1 502.79 €	1 139.45 €	1 532.00 €	1 460.50 €	1 420.29 €
			Sì	1 371.89 €	2 861.64 €	1 897.54 €	821.49 €	1 078.76 €	782.79 €	873.95 €	840.24 €	821.28 €
		Cuneo	No	1 646.76 €	3 085.06 €	2 233.67 €	1 122.96 €	1 481.16 €	1 176.45 €	1 532.41 €	1 469.85 €	1 429.63 €
			Sì	1 336.73 €	2 775.03 €	1 846.59 €	805.49 €	1 057.13 €	819.79 €	869.63 €	840.14 €	821.18 €
		Oulx	No	2 017.78 €	3 998.86 €	2 771.16 €	1 291.80 €	1 709.37 €	1 350.09 €	1 938.71 €	1 764.43 €	1 701.87 €
			Sì	1 707.75 €	3 688.83 €	2 384.09 €	974.33 €	1 285.34 €	993.43 €	1 146.04 €	1 063.87 €	1 034.37 €
Multifamiliare	Riqualficazione energetica	Torino	No	1 083.65 €	3 175.21 €	1 903.80 €	641.70 €	835.15 €	1 407.81 €	1 486.50 €	1 304.18 €	1 226.42 €
			Sì	1 041.33 €	3 132.89 €	1 861.47 €	609.10 €	802.55 €	906.21 €	783.64 €	697.68 €	661.02 €
		Cuneo	No	1 197.39 €	3 527.82 €	2 111.20 €	704.78 €	920.27 €	1 509.47 €	1 740.84 €	1 431.16 €	1 325.25 €
			Sì	1 155.06 €	3 485.49 €	2 068.87 €	672.18 €	887.67 €	1 004.53 €	932.62 €	786.61 €	736.68 €
		Oulx	No	1 551.60 €	4 625.98 €	2 757.13 €	902.99 €	1 187.70 €	1 858.56 €	3 053.70 €	2 289.56 €	2 017.87 €
			Sì	1 509.28 €	4 583.65 €	2 714.81 €	870.39 €	1 155.10 €	1 310.77 €	1 699.28 €	1 339.01 €	1 210.91 €
	Ristrutturazione importante	Torino	No	366.55 €	805.71 €	515.82 €	202.63 €	270.30 €	248.76 €	282.24 €	261.69 €	248.73 €
			Sì	335.55 €	774.71 €	477.11 €	170.89 €	227.90 €	143.99 €	155.66 €	145.97 €	139.86 €
		Cuneo	No	346.01 €	755.12 €	486.07 €	193.96 €	258.53 €	229.43 €	264.02 €	245.25 €	233.64 €
			Sì	315.01 €	724.12 €	447.36 €	162.21 €	216.12 €	127.01 €	143.55 €	134.70 €	129.23 €
		Oulx	No	491.05 €	1 112.34 €	696.18 €	258.62 €	346.07 €	347.09 €	450.09 €	407.63 €	387.52 €
			Sì	460.05 €	1 081.34 €	657.47 €	226.87 €	303.67 €	202.55 €	239.77 €	219.76 €	210.27 €

A.12 Emissioni di GHG e di inquinanti dell'aria

A.12.1 Edificio monofamiliare

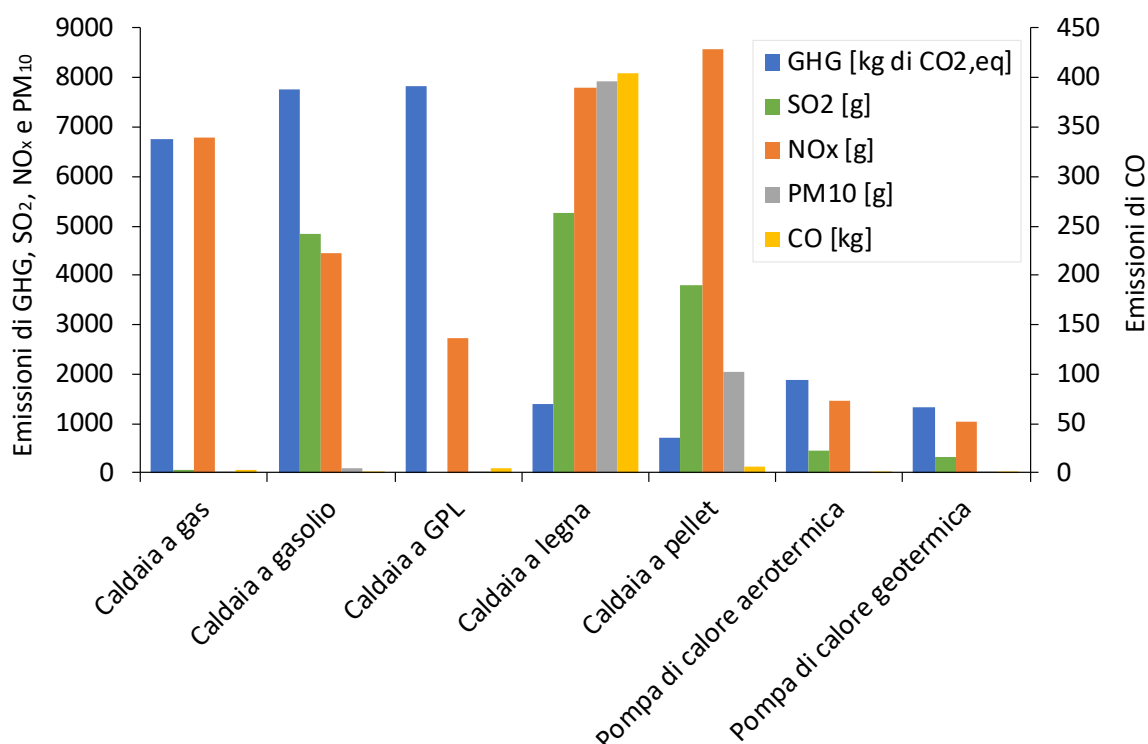


Figura A.26 – Emissioni relative ai diversi impianti nel caso di riqualificazione energetica a Torino.

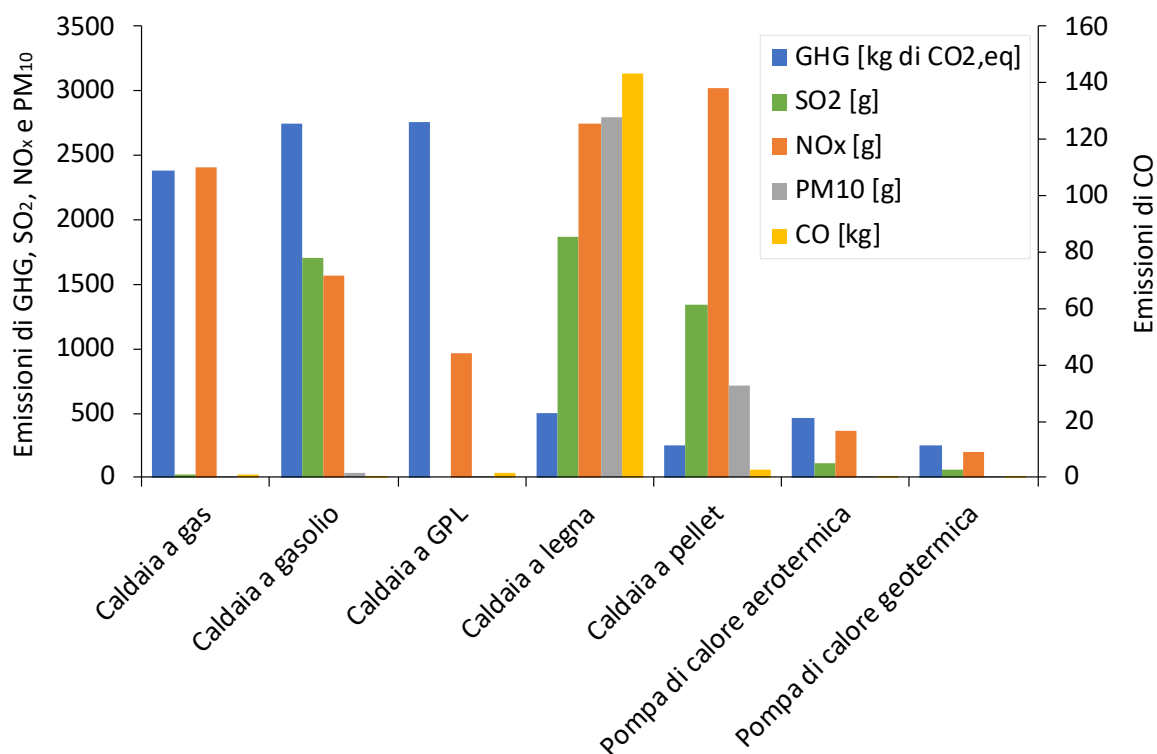


Figura A.27 – Emissioni relative ai diversi impianti nel caso di ristrutturazione importante a Torino.

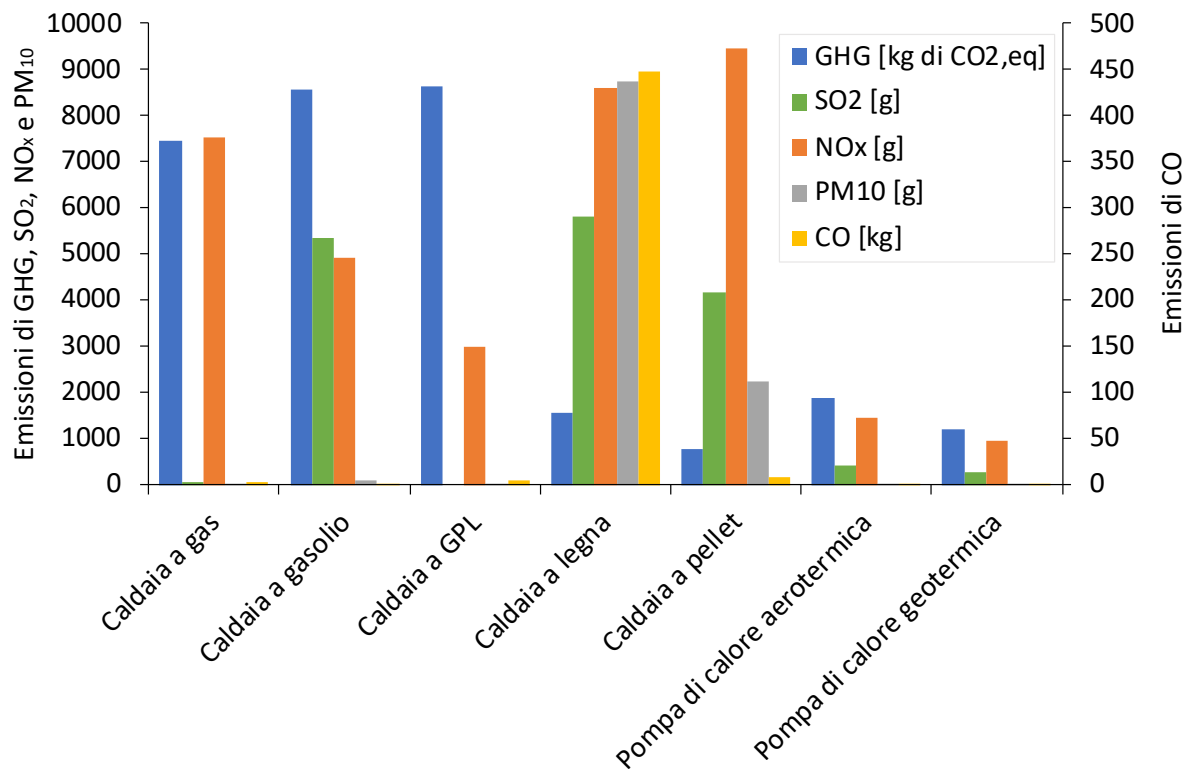


Figura A.28 – Emissioni relative ai diversi impianti nel caso di riqualificazione energetica a Cuneo.

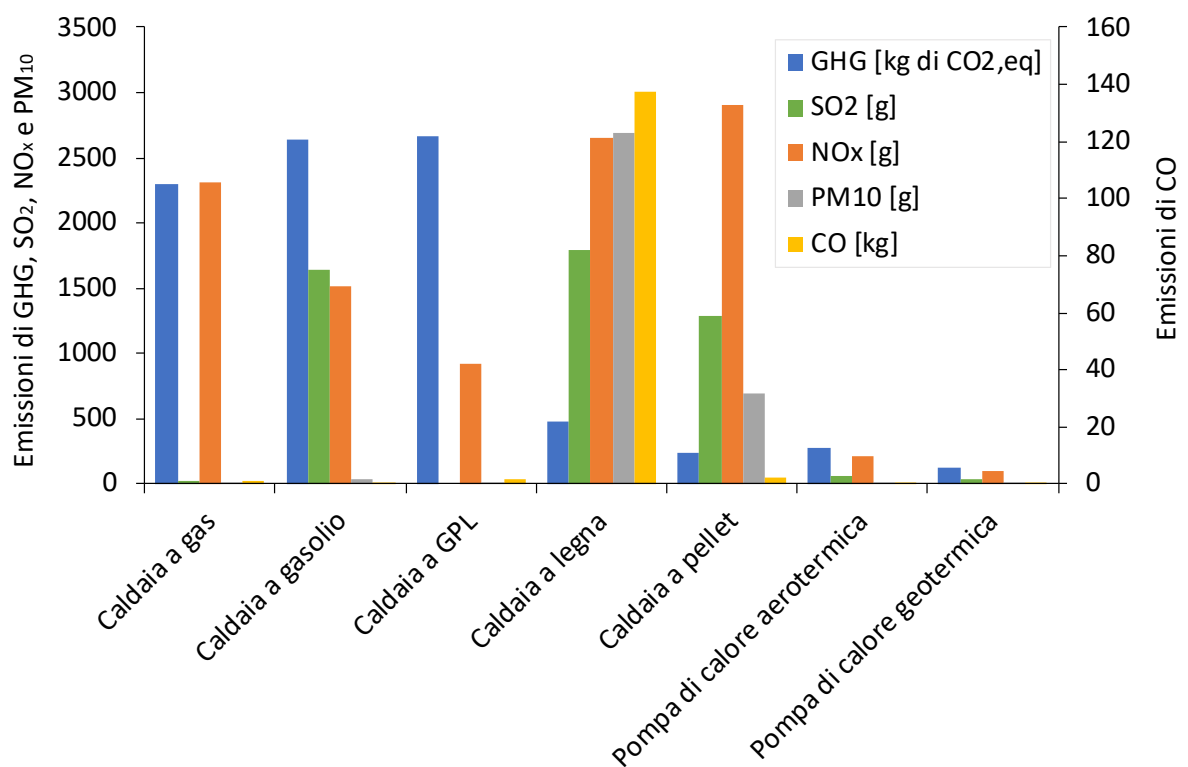


Figura A.29 – Emissioni relative ai diversi impianti nel caso di ristrutturazione importante a Cuneo.

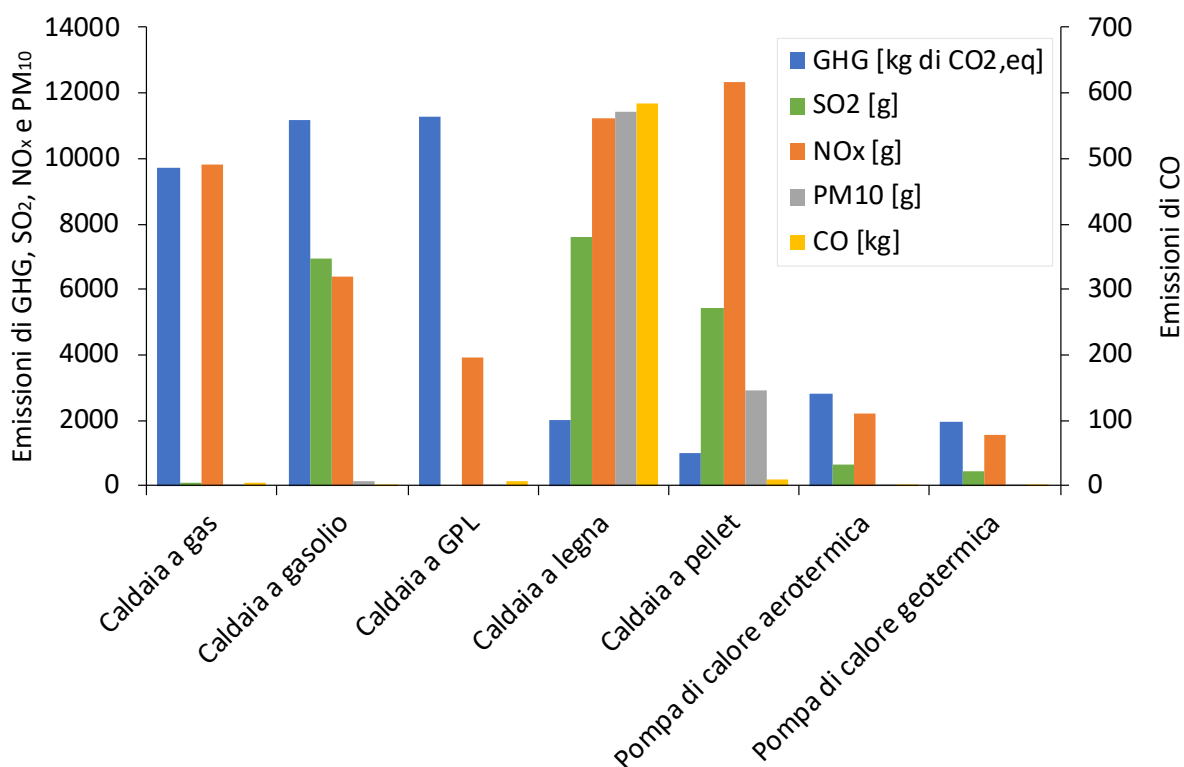


Figura A.30 – Emissioni relative ai diversi impianti nel caso di riqualificazione energetica a Oulx.

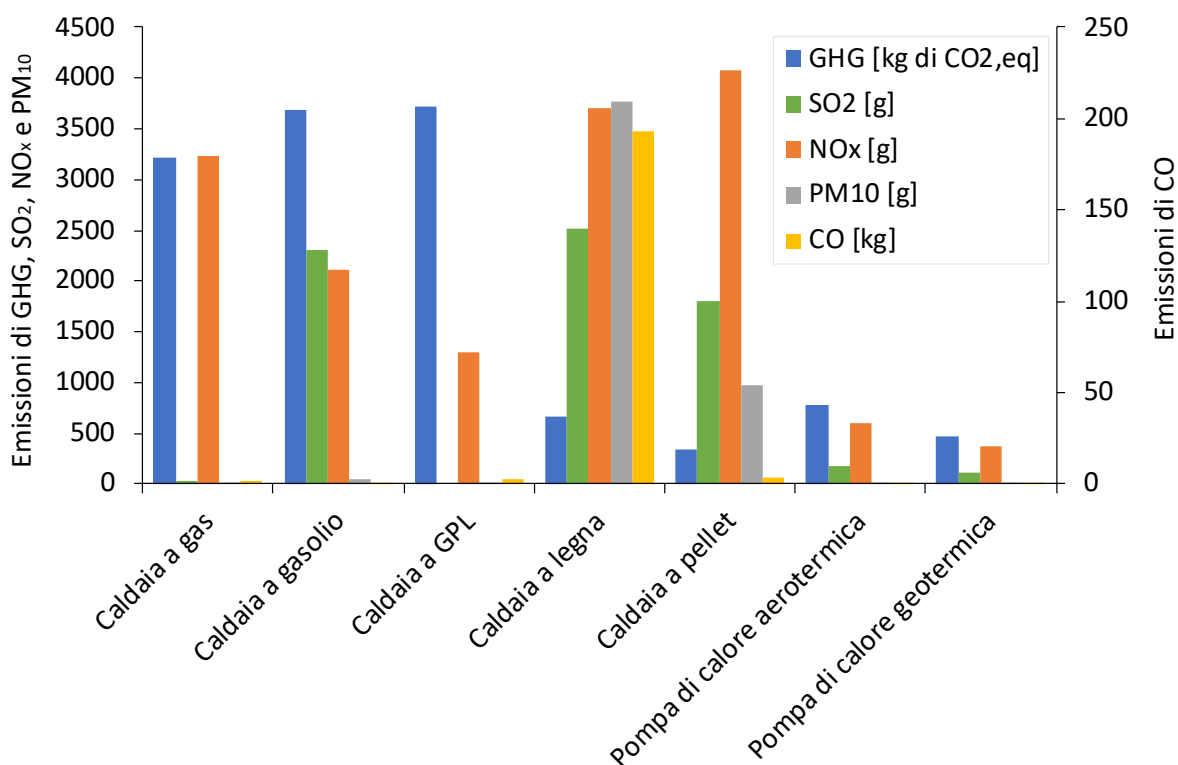


Figura A.31 – Emissioni relative ai diversi impianti nel caso di ristrutturazione importante a Oulx.

A.12.2 Edificio multifamiliare

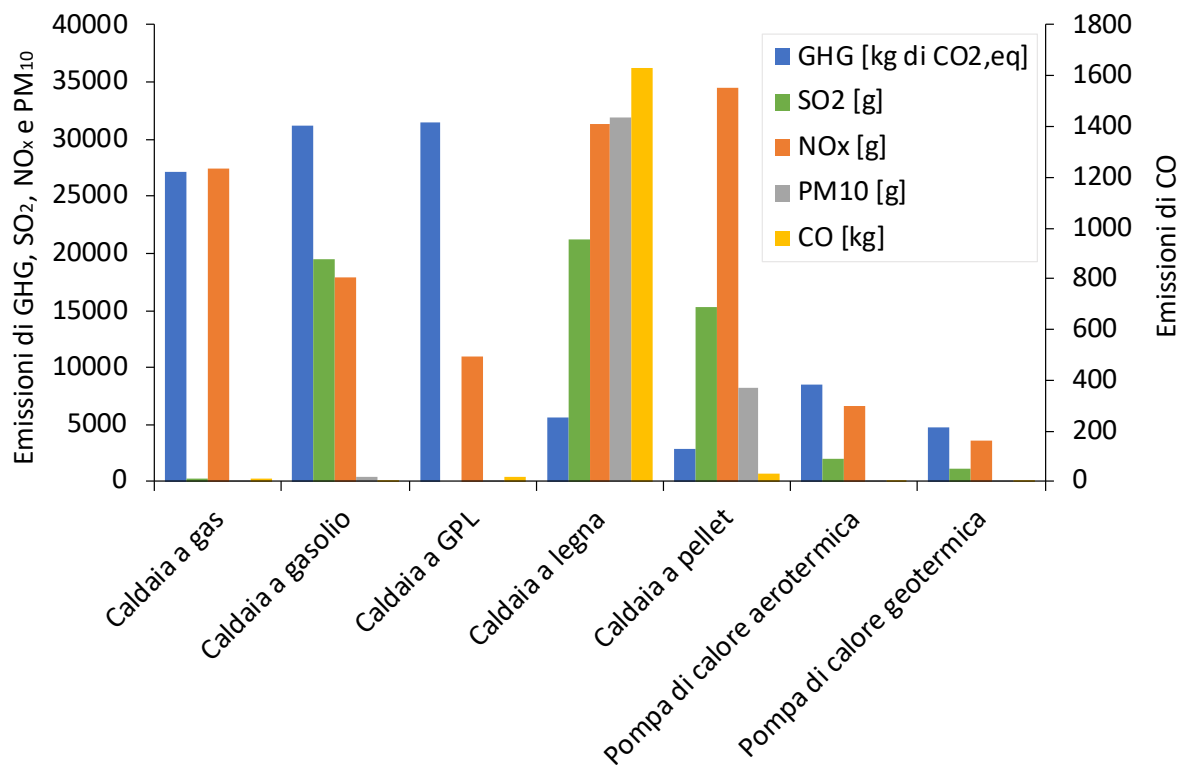


Figura A.32 – Emissioni relative ai diversi impianti nel caso di riqualificazione energetica a Torino.

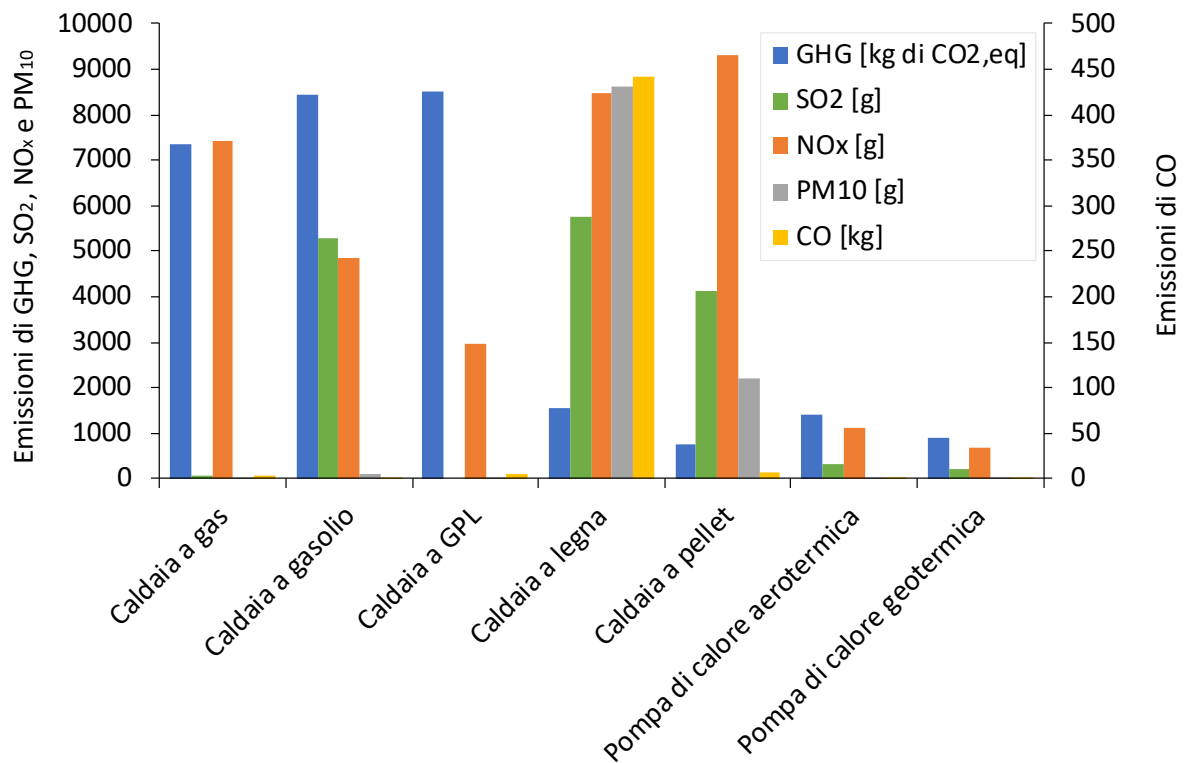


Figura A.33 – Emissioni relative ai diversi impianti nel caso di ristrutturazione importante a Torino.

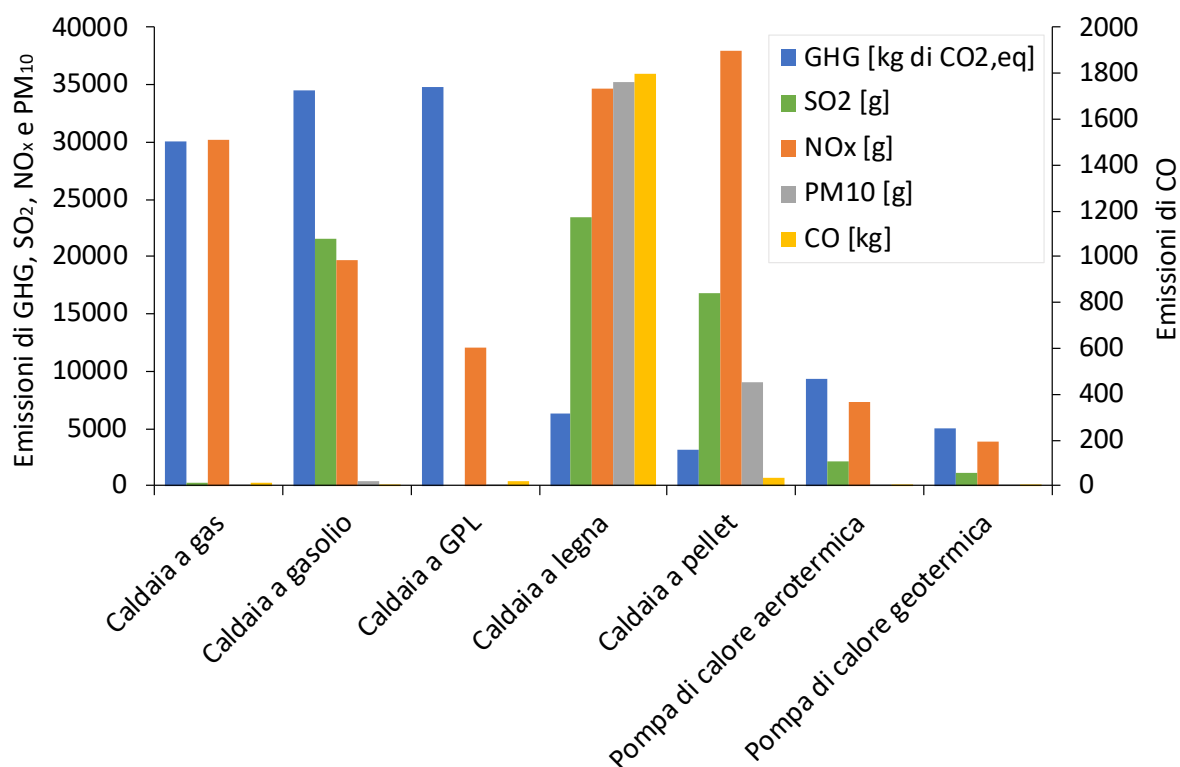


Figura A.34 – Emissioni relative ai diversi impianti nel caso di riqualificazione energetica a Cuneo.

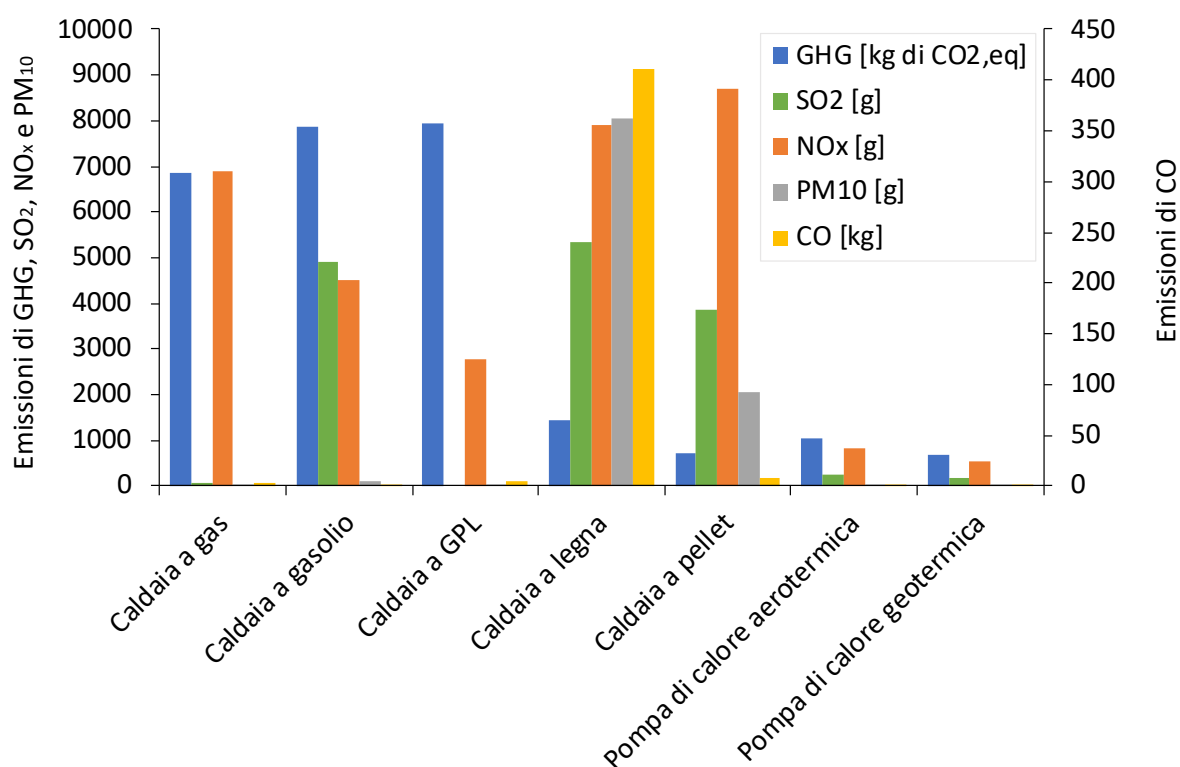


Figura A.35 – Emissioni relative ai diversi impianti nel caso di ristrutturazione importante a Cuneo.

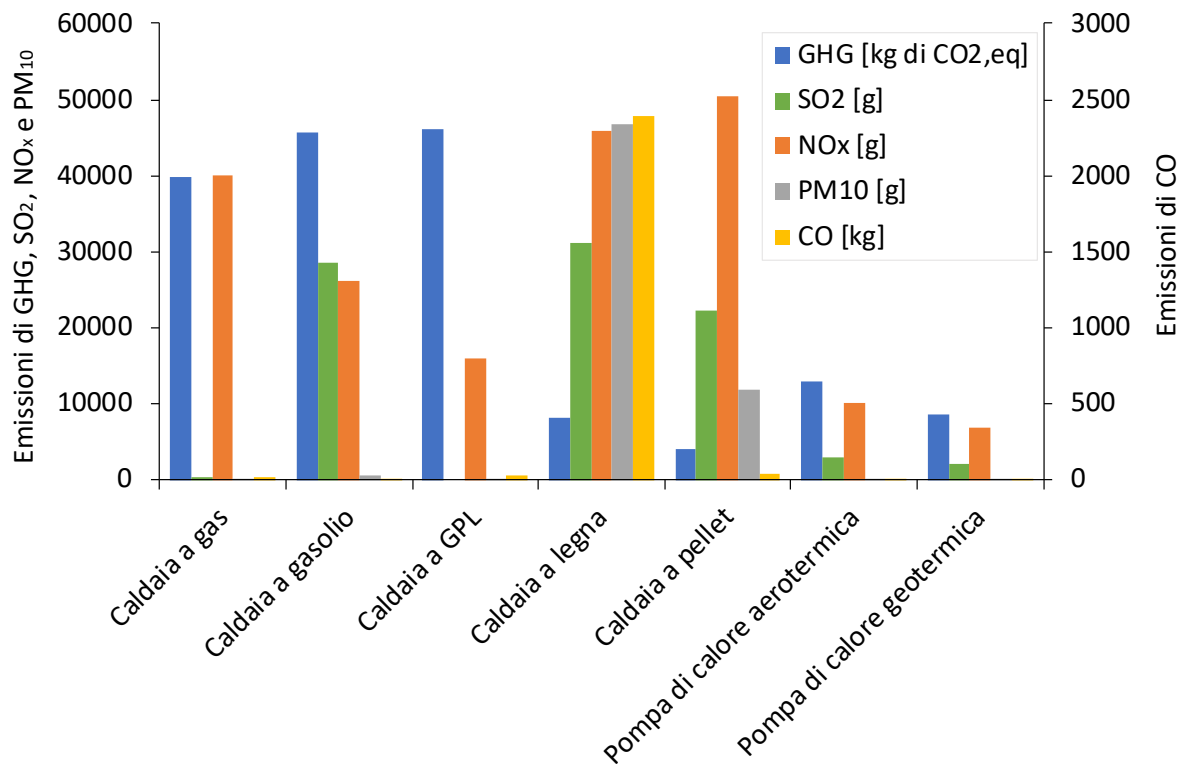


Figura A.36 – Emissioni relative ai diversi impianti nel caso di riqualificazione energetica a Oulx.

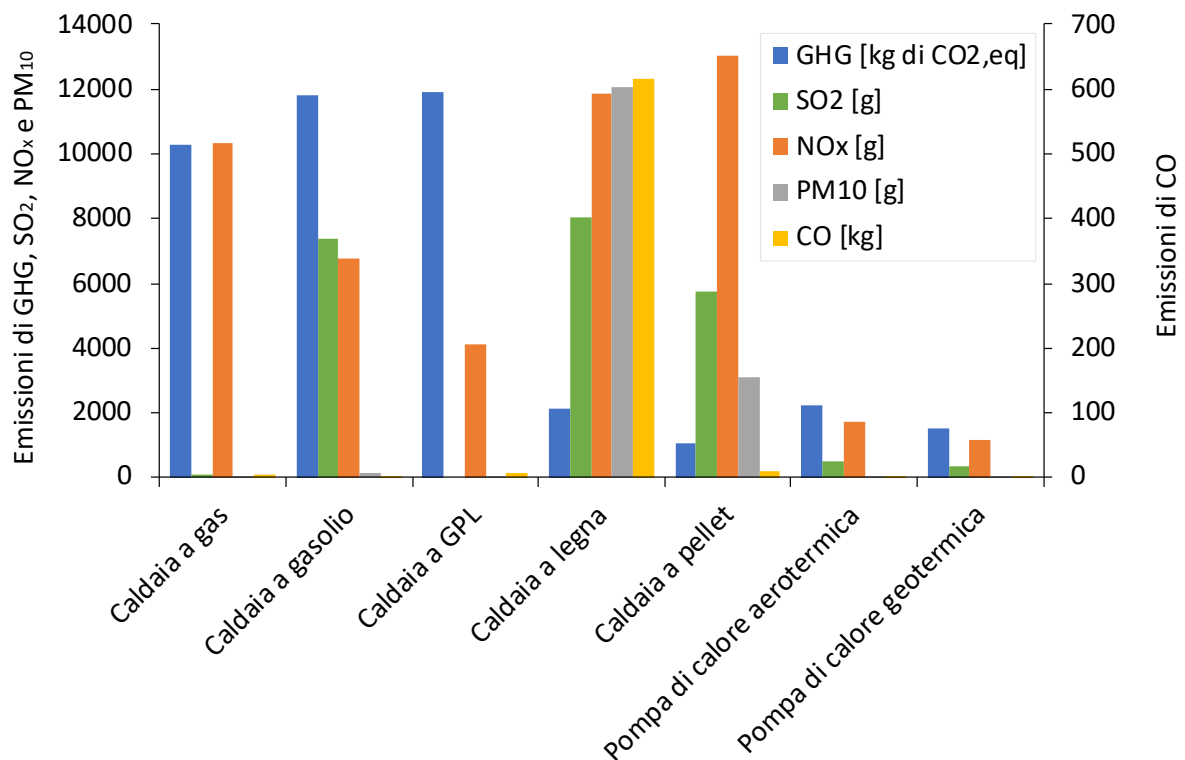


Figura A.37 – Emissioni relative ai diversi impianti nel caso di ristrutturazione importante a Oulx.

B Impianti con riscaldamento e raffrescamento

B.1 Fabbisogno di raffrescamento

B.1.1 Edificio monofamiliare

Tabella B.1 – Fabbisogno di raffrescamento dell'edificio a Torino in seguito all'intervento di ristrutturazione importante. Legenda: dispersioni per trasmissione (Q_{tras}), dispersioni verso cielo (Q_{cielo}), dispersioni per ventilazione (Q_{vent}), apporti solari trasparenti (Q_{st}), apporti solari opachi (Q_{so}), apporti interni (Q_i), fabbisogno di riscaldamento (Q_{nd}), fabbisogno di riscaldamento dell'edificio di riferimento ($Q_{nd,rif}$).

Mese	Q_{tras} [kWh]	Q_{cielo} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{st} [kWh]	Q_{so} [kWh]	Q_i [kWh]	Q_{nd} [kWh]	$Q_{nd,rif}$ [kWh]
Gennaio	2878	25	747	401	29	334	0	0
Febbraio	2401	24	623	473	37	302	0	0
Marzo	2054	25	533	601	52	334	0	0
Aprile	1575	31	409	628	58	324	0	0
Maggio	926	32	241	747	69	334	108	112
Giugno	432	34	112	811	75	324	632	645
Luglio	273	40	71	851	82	334	883	907
Agosto	397	29	103	734	72	334	612	649
Settembre	769	26	200	624	58	324	103	122
Ottobre	1586	23	412	523	44	334	0	0
Novembre	2154	19	559	349	27	324	0	0
Dicembre	2705	23	702	356	27	334	0	0
Annuale	18150	333	4713	7098	630	3936	2338	2435

Tabella B.2 – Fabbisogno di raffrescamento dell'edificio a Cuneo in seguito all'intervento di ristrutturazione importante. Legenda: dispersioni per trasmissione (Q_{tras}), dispersioni verso cielo (Q_{cielo}), dispersioni per ventilazione (Q_{vent}), apporti solari trasparenti (Q_{st}), apporti solari opachi (Q_{so}), apporti interni (Q_i), fabbisogno di riscaldamento (Q_{nd}), fabbisogno di riscaldamento dell'edificio di riferimento ($Q_{nd,rif}$).

Mese	Q_{tras} [kWh]	Q_{cielo} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{st} [kWh]	Q_{so} [kWh]	Q_i [kWh]	Q_{nd} [kWh]	$Q_{nd,rif}$ [kWh]
Gennaio	2618	31	764	569	41	334	0	0
Febbraio	2187	29	638	546	43	302	0	0
Marzo	1955	37	571	688	60	334	0	0
Aprile	1611	34	470	628	58	324	0	0
Maggio	1073	33	313	705	64	334	26	22
Giugno	568	33	166	755	69	324	391	381
Luglio	398	38	116	799	76	334	657	662
Agosto	580	27	169	694	68	334	332	342
Settembre	980	25	286	603	56	324	17	19
Ottobre	1531	27	447	541	46	334	0	0
Novembre	2037	22	595	422	32	324	0	0
Dicembre	2600	28	759	451	34	334	0	0
Annuale	18138	364	5295	7400	648	3936	1423	1425

Tabella B.3 – Fabbisogno di raffrescamento dell'edificio a Oulx in seguito all'intervento di ristrutturazione importante. Legenda: dispersioni per trasmissione (Q_{tras}), dispersioni verso cielo (Q_{cielo}), dispersioni per ventilazione (Q_{vent}), apporti solari trasparenti (Q_{st}), apporti solari opachi (Q_{so}), apporti interni (Q_i), fabbisogno di riscaldamento (Q_{nd}), fabbisogno di riscaldamento dell'edificio di riferimento ($Q_{nd,rif}$).

Mese	Q_{tras} [kWh]	Q_{cielo} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{st} [kWh]	Q_{so} [kWh]	Q_i [kWh]	Q_{nd} [kWh]	$Q_{nd,rif}$ [kWh]
Gennaio	3098	27	893	402	29	334	0	0
Febbraio	2619	25	755	474	37	302	0	0
Marzo	2356	28	679	601	52	334	0	0
Aprile	1908	33	550	628	58	324	0	0
Maggio	1340	34	386	747	69	334	0	0
Giugno	878	36	253	812	75	324	123	119
Luglio	752	42	217	852	82	334	294	292
Agosto	862	29	249	734	72	334	98	104
Settembre	1182	27	341	624	58	324	0	0
Ottobre	1934	26	558	523	44	334	0	0
Novembre	2429	22	700	349	27	324	0	0
Dicembre	2942	26	848	357	27	334	0	0
Annuale	22300	355	6428	7102	630	3936	514	515

B.1.2 Edificio multifamiliare

Tabella B.4 – Fabbisogno di raffrescamento dell'edificio a Torino in seguito all'intervento di ristrutturazione importante. Legenda: dispersioni per trasmissione (Q_{tras}), dispersioni verso cielo (Q_{cielo}), dispersioni per ventilazione (Q_{vent}), apporti solari trasparenti (Q_{st}), apporti solari opachi (Q_{so}), apporti interni (Q_i), fabbisogno di riscaldamento (Q_{nd}), fabbisogno di riscaldamento dell'edificio di riferimento ($Q_{nd,rif}$).

Mese	Q_{tras} [kWh]	Q_{cielo} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{st} [kWh]	Q_{so} [kWh]	Q_i [kWh]	Q_{nd} [kWh]	$Q_{nd,rif}$ [kWh]
Gennaio	9696	171	4014	1820	408	3082	0	0
Febbraio	8087	159	3348	2204	476	2783	0	0
Marzo	6920	168	2865	2842	604	3082	0	0
Aprile	5305	206	2196	3119	604	2982	319	366
Maggio	3121	214	1292	4010	675	3082	3152	3163
Giugno	1455	232	602	4487	721	2982	5901	5921
Luglio	921	272	381	4647	775	3082	6930	6989
Agosto	1336	196	553	3822	702	3082	5521	5645
Settembre	2591	175	1073	3047	622	2982	2820	2948
Ottobre	5343	157	2212	2491	532	3082	168	212
Novembre	7256	131	3004	1643	348	2982	0	0
Dicembre	9112	158	3772	1607	370	3082	0	0
Annuale	61141	2238	25312	35738	6836	36284	24812	25244

Tabella B.5 – Fabbisogno di raffrescamento dell'edificio a Cuneo in seguito all'intervento di ristrutturazione importante. Legenda: dispersioni per trasmissione (Q_{tras}), dispersioni verso cielo (Q_{cielo}), dispersioni per ventilazione (Q_{vent}), apporti solari trasparenti (Q_{st}), apporti solari opachi (Q_{so}), apporti interni (Q_i), fabbisogno di riscaldamento (Q_{nd}), fabbisogno di riscaldamento dell'edificio di riferimento ($Q_{nd,rif}$).

Mese	Q_{tras} [kWh]	Q_{cielo} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{st} [kWh]	Q_{so} [kWh]	Q_i [kWh]	Q_{nd} [kWh]	$Q_{nd,rif}$ [kWh]
Gennaio	8612	338	4105	2458	680	3082	0	0
Febbraio	7193	323	3428	2438	669	2783	0	0
Marzo	6432	408	3066	3133	878	3082	0	0
Aprile	5298	369	2525	3144	792	2982	184	245
Maggio	3530	364	1682	3822	860	3082	2234	2316
Giugno	1869	358	891	4198	919	2982	4981	5172
Luglio	1310	415	624	4389	1001	3082	6122	6412
Agosto	1908	301	909	3660	897	3082	4520	4831
Settembre	3222	273	1536	2893	786	2982	1694	1935
Ottobre	5037	294	2400	2512	687	3082	102	181
Novembre	6702	242	3194	1877	513	2982	0	0
Dicembre	8555	310	4077	1970	553	3082	0	0
Annuale	59670	3994	28438	36494	9234	36284	19838	21092

Tabella B.6 – Fabbisogno di raffrescamento dell'edificio a Oulx in seguito all'intervento di ristrutturazione importante. Legenda: dispersioni per trasmissione (Q_{tras}), dispersioni verso cielo (Q_{cielo}), dispersioni per ventilazione (Q_{vent}), apporti solari trasparenti (Q_{st}), apporti solari opachi (Q_{so}), apporti interni (Q_i), fabbisogno di riscaldamento (Q_{nd}), fabbisogno di riscaldamento dell'edificio di riferimento ($Q_{nd,rif}$).

Mese	Q_{tras} [kWh]	Q_{cielo} [kWh]	Q_{vent} [kWh]	Q_{st} [kWh]	Q_{so} [kWh]	Q_i [kWh]	Q_{nd} [kWh]	$Q_{nd,rif}$ [kWh]
Gennaio	10347	138	4796	1820	326	3082	0	0
Febbraio	8746	129	4054	2204	380	2783	0	0
Marzo	7867	140	3647	2842	482	3082	0	0
Aprile	6371	168	2953	3119	483	2982	0	19
Maggio	4474	173	2074	4010	539	3082	1178	1286
Giugno	2932	182	1359	4487	576	2982	3578	3654
Luglio	2510	212	1163	4647	619	3082	4464	4591
Agosto	2880	148	1335	3822	561	3082	3111	3301
Settembre	3947	139	1829	3047	497	2982	814	957
Ottobre	6459	133	2994	2491	425	3082	0	0
Novembre	8113	113	3761	1643	278	2982	0	0
Dicembre	9825	131	4555	1607	296	3082	0	0
Annuale	74473	1805	34522	35738	5461	36284	13144	13809

B.2 Energia in ingresso al sistema di generazione

In Tabella B.7 è stata riportata l'energia annuale in ingresso al sistema di generazione (espressa in MWh) suddivisa per tipologia di impianto. Ovviamente il contributo elettrico relativo alle caldaie è, in realtà, riferito alle pompe di calore installate all'interno dello stesso sistema. È stata riportata, inoltre, la differenza rispetto alla casistica di solo riscaldamento.

Tabella B.7 – Energia annuale in ingresso al sistema di generazione (MWh) e variazione rispetto al caso solo riscaldamento.

Edificio	Località	Impianto	Energia termica	Energia elettrica	$\Delta_{\text{term vs SL}}$	$\Delta_{\text{elet vs SL}}$
Monofamiliare	Torino	Gas	10903	934	0	845
		GPL	10903	940	0	852
		Gasolio	10903	945	0	851
		Legna	11379	986	0	852
		Pellet	10750	986	0	852
		Aerotermica	0	4499	0	1391
		Geotermica	0	3496	0	1250
	Cuneo	Gas	10526	640	0	552
		GPL	10526	640	0	552
		Gasolio	10526	643	0	553
		Legna	10984	687	0	553
		Pellet	10377	687	0	553
		Aerotermica	0	4225	0	1383
		Geotermica	0	3262	0	1088
	Oulx	Gas	14499	372	0	254
		GPL	14499	372	0	254
		Gasolio	14499	372	0	254
		Legna	15149	391	0	254
		Pellet	14312	391	0	254
		Aerotermica	0	5440	0	1084
		Geotermica	0	3890	0	532
Multifamiliare	Torino	Gas	32141	9909	0	9648
		GPL	32141	9918	0	9656
		Gasolio	32141	9937	0	9664
		Legna	33267	9822	0	9664
		Pellet	31443	9822	0	9664
		Aerotermica	0	19793	0	10014
		Geotermica	0	14463	0	7255
	Cuneo	Gas	29941	8227	0	7984
		GPL	29941	8230	0	7986
		Gasolio	29941	8238	0	7984
		Legna	31128	8014	0	7862
		Pellet	29413	8141	0	7989
		Aerotermica	0	17043	0	7659
		Geotermica	0	13514	0	6490
	Oulx	Gas	45470	5983	0	5613
		GPL	45470	5983	0	5613
		Gasolio	45470	5999	0	5613
		Legna	47077	5796	0	5613
		Pellet	44507	5796	0	5613
		Aerotermica	0	22191	0	7629
		Geotermica	0	16030	0	5543

B.3 Energia prodotta *extra situ* e acquistata

In Tabella B.8 è stata riportata l'energia prodotta *extra situ* ed effettivamente acquistata (espressa in MWh) suddivisa per tipologia di impianto. È importante evidenziare come tale quantità di energia non debba necessariamente corrispondere a quella in ingresso al sistema di generazione. Una quota dell'energia elettrica, infatti, è fornita dai pannelli fotovoltaici e, pertanto, non presente in quanto autoprodotta. Per un approfondimento in merito si rimanda all'Appendice A.10. È d'uopo notare che, similmente al paragrafo precedente, il contributo elettrico relativo alle caldaie è, in realtà, riferito alle pompe di calore installate all'interno dello stesso sistema e le ultime due colonne riportano la variazione rispetto alla casistica di solo riscaldamento.

Tabella B.8 – Energia annuale prodotta *extra situ* e acquistata (espressa in MWh) suddivisa per tipologia di impianto. Per le pompe di calore, l'energia è elettrica; per le altre tipologie, è energia termica.

Edificio	Località	Impianto	Energia termica	Energia elettrica	$\Delta_{\text{term vs SL}}$	$\Delta_{\text{elet vs SL}}$
Monofamiliare	Torino	Gas	10903	0	0	0
		GPL	10903	0	0	0
		Gasolio	10903	0	0	0
		Legna	11379	0	0	0
		Pellet	10750	0	0	0
		Aerotermica	0	2057	0	520
		Geotermica	0	1136	0	303
	Cuneo	Gas	10526	0	0	0
		GPL	10526	0	0	0
		Gasolio	10526	0	0	0
		Legna	10984	0	0	0
		Pellet	10377	0	0	0
		Aerotermica	0	1626	0	718
		Geotermica	0	798	0	367
	Oulx	Gas	14499	0	0	0
		GPL	14499	0	0	0
		Gasolio	14499	0	0	0
		Legna	15149	0	0	0
		Pellet	14312	0	0	0
		Aerotermica	0	3029	0	474
		Geotermica	0	1862	0	316

Edificio	Località	Impianto	Energia termica	Energia elettrica	$\Delta_{\text{term vs SL}}$	$\Delta_{\text{elet vs SL}}$
Multifamiliare	Torino	Gas	32141	3570	0	3570
		GPL	32141	3578	0	3578
		Gasolio	32141	3588	0	3588
		Legna	33267	3592	0	3592
		Pellet	31443	3592	0	3592
		Aerotermica	0	6071	0	1421
		Geotermica	0	3102	0	152
	Cuneo	Gas	29941	3528	0	3528
		GPL	29941	3509	0	3509
		Gasolio	29941	3531	0	3531
		Legna	31128	3415	0	3415
		Pellet	29413	3537	0	3537
		Aerotermica	0	4034	0	630
		Geotermica	0	2537	0	253
	Oulx	Gas	45470	2238	0	2238
		GPL	45470	2238	0	2238
		Gasolio	45470	2240	0	2240
		Legna	47077	2236	0	2236
		Pellet	44507	2236	0	2236
		Aerotermica	0	10254	0	2884
		Geotermica	0	5510	0	561

B.4 Costi di installazione

La Tabella B.9 evidenzia la composizione del costo totale delle pompe di calore geotermiche suddividendo i contributi della macchina in sé, delle sonde e i restanti (I.V.A., manodopera e accessori). La Tabella B.10, invece, riporta i costi di installazione delle restanti tecnologie.

Tabella B.9 – Costo di installazione delle pompe di calore geotermiche totale e suddiviso per componenti.

Edificio	Intervento	Località	Conduttività	Costo totale	Costo macchina			Costo sonde	I.V.A., manodopera e accessori	
Edificio mono-familiare	Ristrutturazione importante	Torino	Bassa	17 047.19 €	4 096.06 €	24%	4 350.00 €	26%	8 601.13 €	50%
			Media	16 193.19 €	4 096.06 €	25%	3 650.00 €	23%	8 447.13 €	52%
			Alta	15 705.19 €	4 096.06 €	26%	3 250.00 €	21%	8 359.13 €	53%
		Cuneo	Bassa	17 127.56 €	4 096.06 €	24%	4 450.00 €	26%	8 581.50 €	50%
			Media	16 334.56 €	4 096.06 €	25%	3 800.00 €	23%	8 438.50 €	52%
			Alta	15 846.56 €	4 096.06 €	26%	3 400.00 €	21%	8 350.50 €	53%
		Oulx	Bassa	20 702.69 €	4 096.06 €	20%	7 300.00 €	35%	9 306.63 €	45%
			Media	18 384.69 €	4 096.06 €	22%	5 400.00 €	29%	8 888.63 €	48%
			Alta	17 530.69 €	4 096.06 €	23%	4 700.00 €	27%	8 734.63 €	50%
Edificio multi-familiare	Ristrutturazione importante	Torino	Bassa	39 952.34 €	5 956.11 €	15%	18 000.00 €	45%	15 996.22 €	40%
			Media	33 547.34 €	5 956.11 €	18%	12 750.00 €	38%	14 841.22 €	44%
			Alta	31 046.34 €	5 956.11 €	19%	10 700.00 €	34%	14 390.22 €	46%
		Cuneo	Bassa	34 175.26 €	5 956.11 €	17%	13 350.00 €	39%	14 869.15 €	44%
			Media	30 088.26 €	5 956.11 €	20%	10 000.00 €	33%	14 132.15 €	47%
			Alta	27 770.26 €	5 956.11 €	21%	8 100.00 €	29%	13 714.15 €	49%
		Oulx	Bassa	41 562.14 €	6 708.52 €	16%	17 850.00 €	43%	17 003.63 €	41%
			Media	38 085.14 €	6 708.52 €	18%	15 000.00 €	39%	16 376.63 €	43%
			Alta	35 340.14 €	6 708.52 €	19%	12 750.00 €	36%	15 881.63 €	45%

Tabella B.10 – Costo di installazione delle altre tecnologie (I.V.A. e manodopera incluse).

Edificio	Intervento	Località	Caldaia a gas	Caldaia a gasolio	Caldaia a GPL	Caldaia a legna	Caldaia a pellet	Pompa di calore aerotermica
Edificio mono-familiare	Ristrutturazione importante	Torino	9 186.30 €	9 186.30 €	11 176.24 €	9 378.45 €	12 130.77 €	9 628.80 €
		Cuneo	9 186.30 €	9 186.30 €	11 176.24 €	9 378.45 €	12 130.77 €	9 587.17 €
		Oulx	9 186.30 €	9 186.30 €	11 176.24 €	9 378.45 €	12 130.77 €	9 685.30 €
Edificio multi-familiare	Ristrutturazione importante	Torino	19 796.65 €	19 796.65 €	21 786.60 €	19 988.80 €	22 741.12 €	19 535.86 €
		Cuneo	19 796.65 €	19 796.65 €	21 786.60 €	19 988.80 €	22 741.12 €	19 431.79 €
		Oulx	19 796.65 €	19 796.65 €	21 786.60 €	19 988.80 €	22 741.12 €	21 631.43 €

B.5 Spesa annuale per le fonti energetiche

Nella tabella seguente è stata riportata la spesa annuale per l'energia prodotta *extra situ* e acquistata suddivisa per tipologia di impianto.

Tabella B.11 – Spesa annuale per l'energia prodotta *extra situ* ed acquistata suddivisa per tipologia di impianto.

Edificio	Località	Impianto	Ristrutturazione importante
Monofamiliare	Torino	Gas	1 018.33 €
		GPL	2 508.08 €
		Gasolio	1 475.24 €
		Legna	461.29 €
		Pellet	623.50 €
		Aerotermica	518.59 €
		Geotermica	286.36 €
	Cuneo	Gas	983.17 €
		GPL	2 421.47 €
		Gasolio	1 424.30 €
		Legna	445.29 €
		Pellet	601.87 €
		Aerotermica	409.99 €
		Geotermica	201.10 €
	Oulx	Gas	1 354.19 €
		GPL	3 335.27 €
		Gasolio	1 961.79 €
		Legna	614.13 €
		Pellet	830.08 €
		Aerotermica	569.10 €
		Geotermica	435.87 €
Multifamiliare	Torino	Gas	3 831.52 €
		GPL	8 225.00 €
		Gasolio	5 182.58 €
		Legna	2 183.36 €
		Pellet	2 658.39 €
		Aerotermica	542.17 €
		Geotermica	303.94 €
	Cuneo	Gas	3 622.53 €
		GPL	7 709.13 €
		Gasolio	4 877.83 €
		Legna	2 061.31 €
		Pellet	2 534.02 €
		Aerotermica	355.67 €
		Geotermica	287.37 €

Edificio	Località	Impianto	Ristrutturazione importante
		Gas	4 766.93 €
		GPL	10 979.87 €
		Gasolio	6 673.03 €
	Oulx	Legna	2 428.18 €
		Pellet	3 101.06 €
		Aerotermica	951.67 €
		Geotermica	634.90 €

B.6 LCOH e spesa annuale: valori a confronto

B.6.1 Edificio monofamiliare

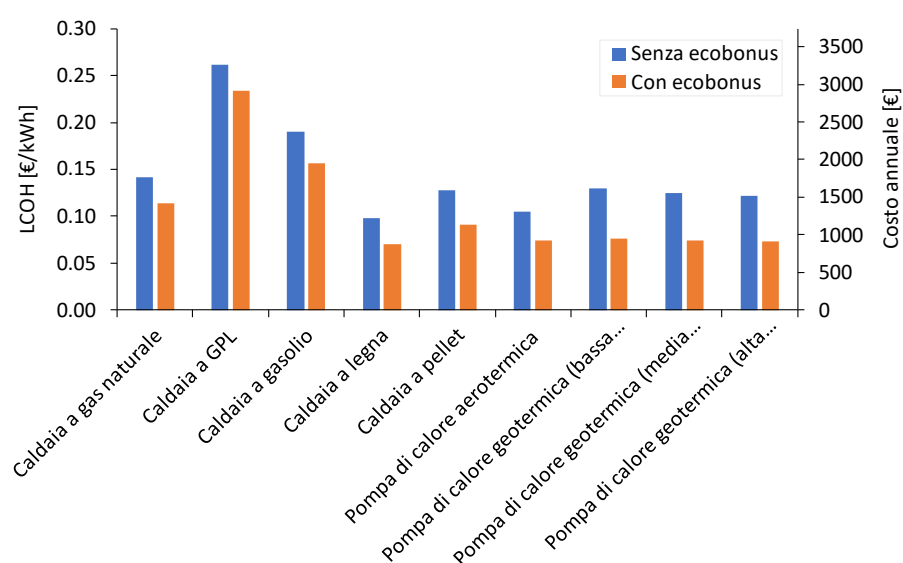


Figura B.1– LCOH relativi ai diversi impianti nel caso di ristrutturazione importante a Torino.

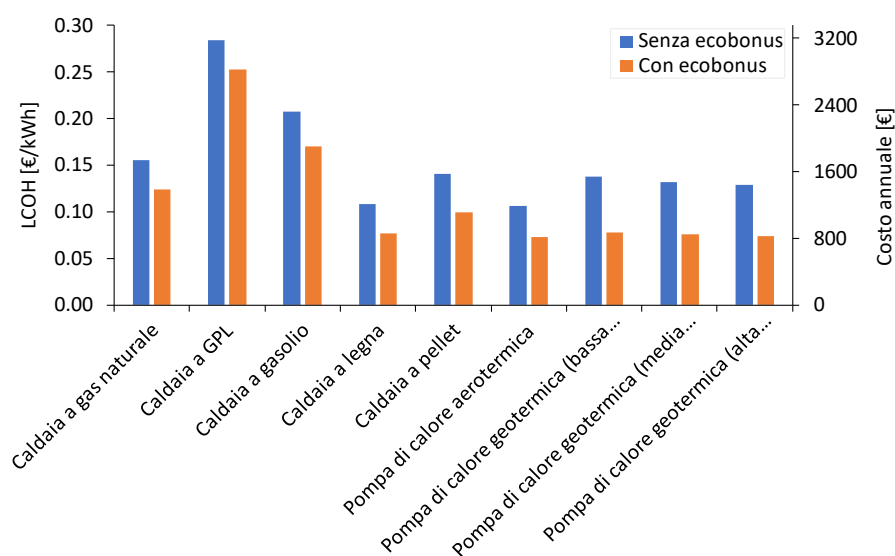


Figura B.2– LCOH relativi ai diversi impianti nel caso di ristrutturazione importante a Cuneo.

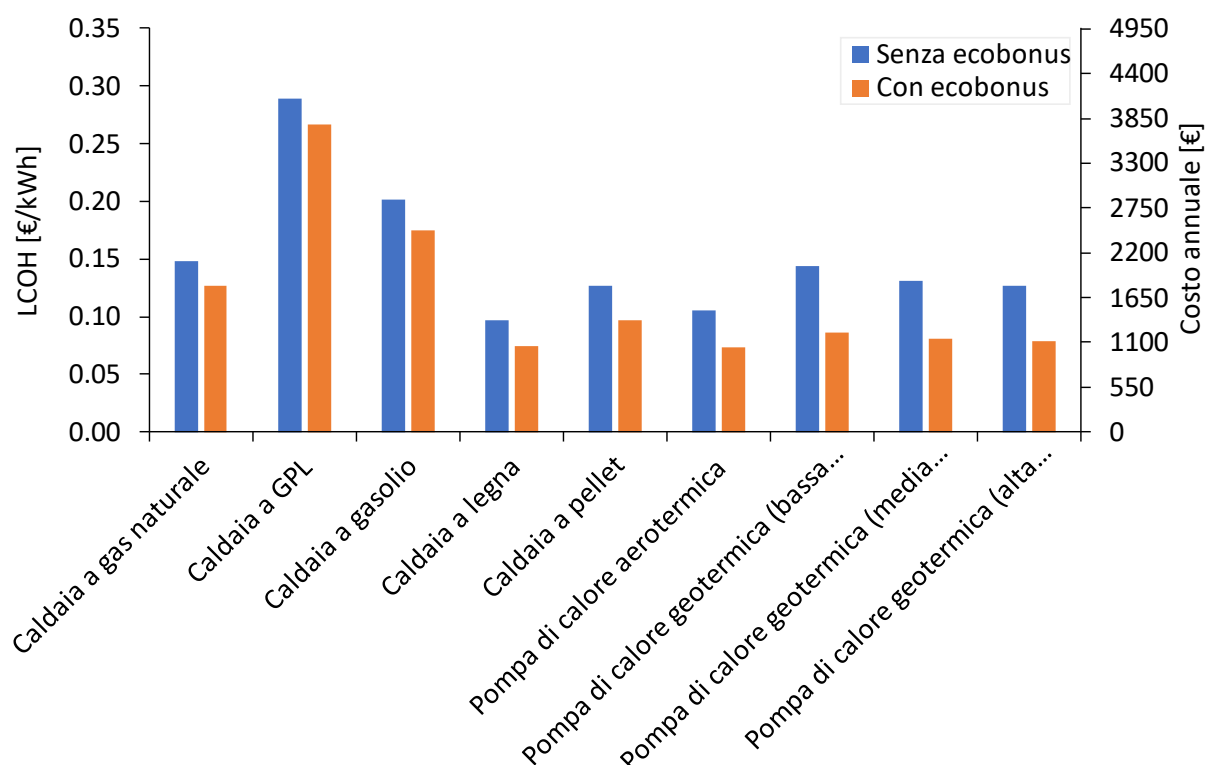


Figura B.3– LCOH relativi ai diversi impianti nel caso di ristrutturazione importante a Oulx.

B.6.2 Edificio multifamiliare

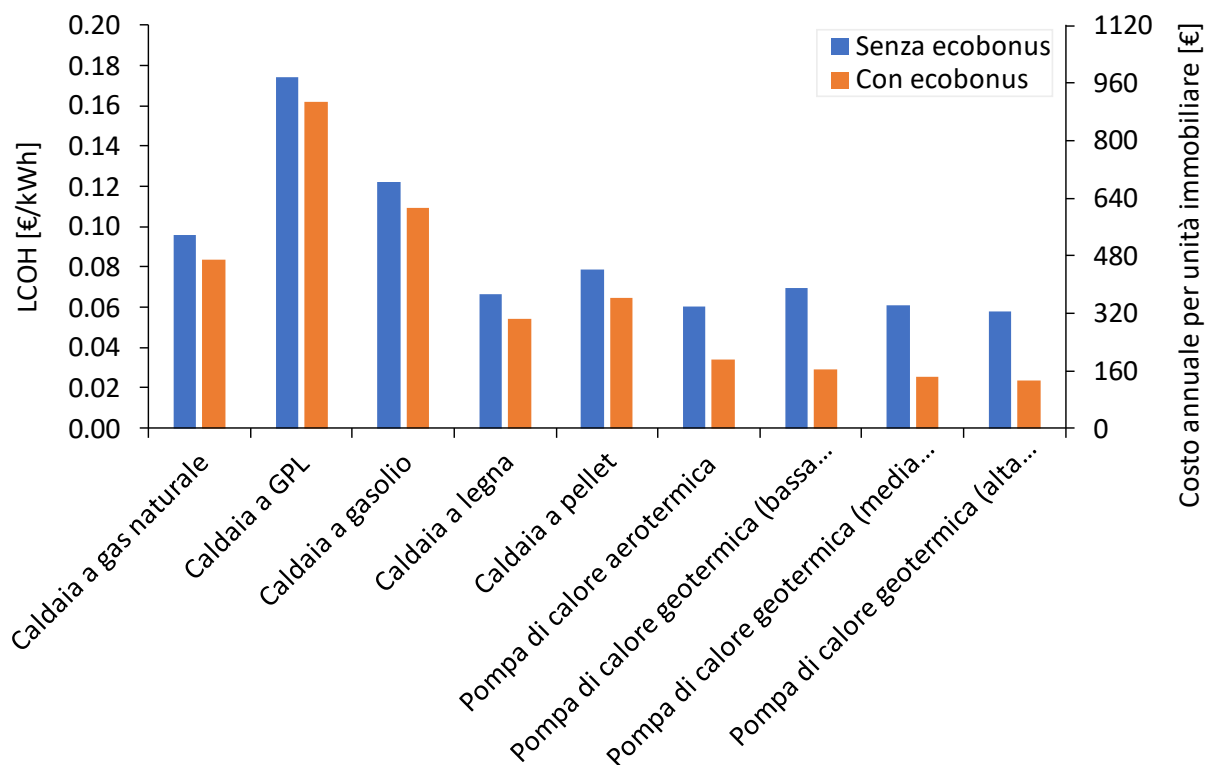


Figura B.4– LCOH relativi ai diversi impianti nel caso di ristrutturazione importante a Torino.

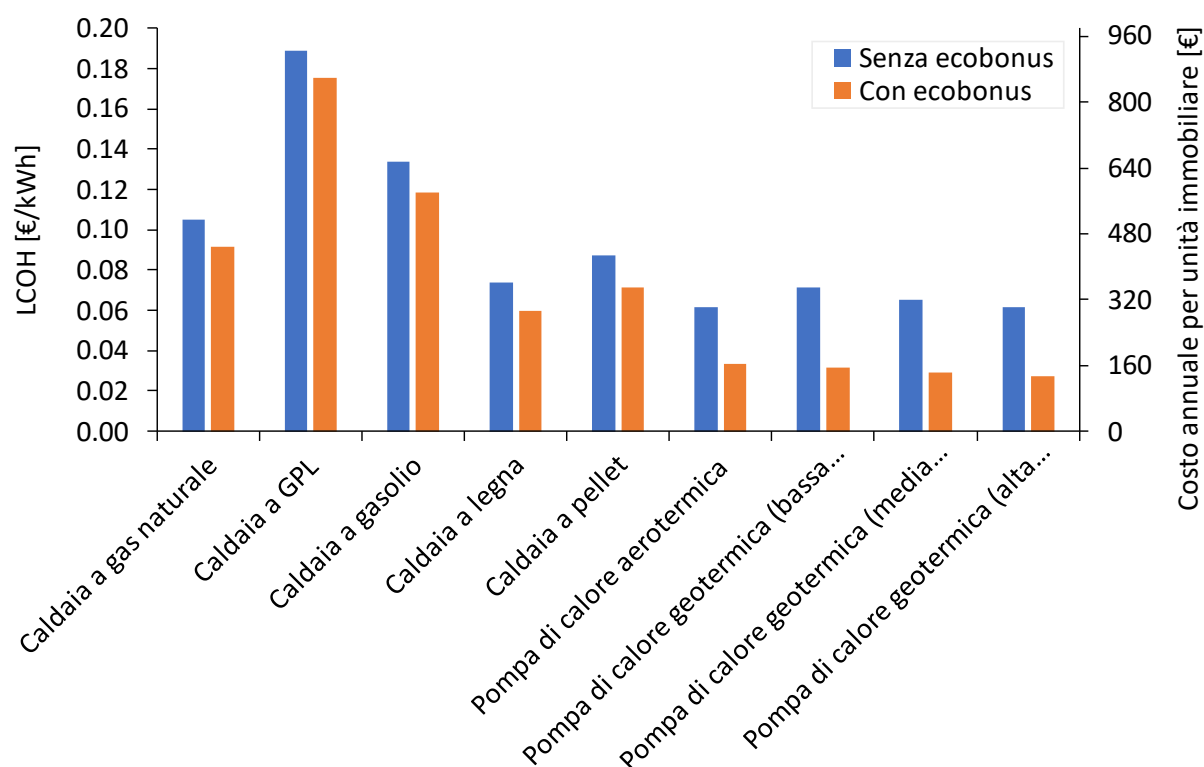


Figura B.5– LCOH relativi ai diversi impianti nel caso di ristrutturazione importante a Cuneo.

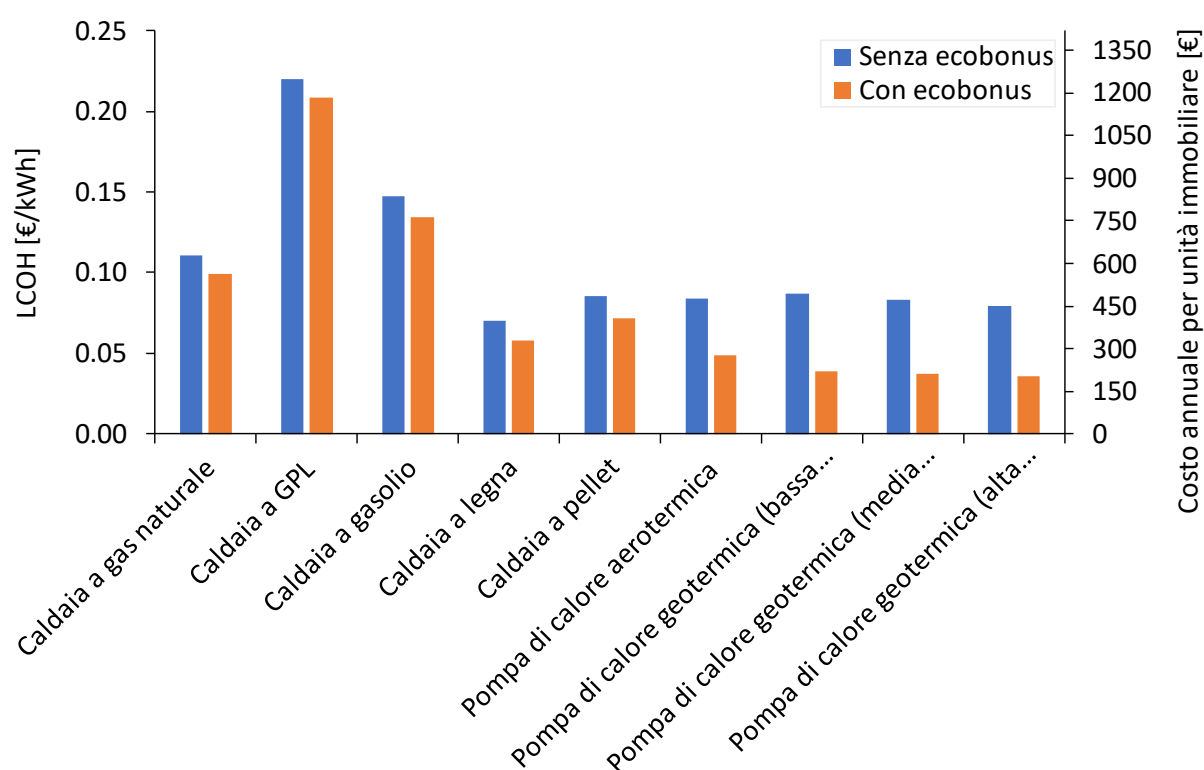


Figura B.6– LCOH relativi ai diversi impianti nel caso di ristrutturazione importante a Oulx.

B.6.3 Minimi, massimi e variazioni relative del LCOH

Tabella B.12 – Dettaglio dei valori di LCOH e relativi valori minimi, massimi e medi per ogni tipologia di impianto o per ogni caso studio.

Edificio	Intervento	Località	Incentivo	Gas naturale	GPL	Gasolio	Legna	Pellet	Aerotermica	Geotermica (bassa conduttività)	Geotermica (media conduttività)	Geotermica (alta conduttività)	Valore minimo	Valore massimo	Valore mediano		
Monofamiliare	Ristrutturazione importante	Torino	No	141.8	261.3	190.2	98.3	127.5	104.3	129.3	124.3	121.4	98.3	261.3	127.5		
			Sì	114.1	233.6	156.3	70.0	90.6	74.4	76.4	74.0	72.7	70.0	233.6	76.4		
		Cuneo	No	155.1	283.9	207.7	108.2	140.3	106.4	137.2	132.0	128.8	106.4	283.9	137.2		
			Sì	124.2	253.0	169.9	76.7	99.2	73.2	77.8	75.4	73.9	73.2	253.0	77.8		
		Oulx	No	148.6	288.5	201.8	97.3	126.8	105.1	143.3	131.3	126.9	97.3	288.5	131.3		
			Sì	126.7	266.6	174.5	74.9	96.9	73.7	86.7	81.1	79.0	73.7	266.6	86.7		
		Multifamiliare	Ristrutturazione importante	Torino	No	95.6	174.0	122.3	66.4	78.5	60.3	69.3	60.9	57.7	57.7	174.0	69.3
					Sì	83.8	162.2	109.1	54.5	64.7	34.3	29.1	25.2	23.7	23.7	162.2	54.5
Cuneo	No			105.2	188.7	133.8	73.6	87.4	61.5	71.3	65.2	61.7	61.5	188.7	73.6		
	Sì			91.7	175.2	118.7	59.9	71.5	33.7	31.8	28.9	27.3	27.3	175.2	59.9		
Oulx	No			110.8	220.3	147.0	69.9	85.3	83.6	87.3	82.8	79.2	69.9	220.3	85.3		
	Sì			99.2	208.6	134.0	58.1	71.7	49.0	39.1	37.0	35.3	35.3	208.6	58.1		
Valore minimo			No	95.59	173.96	122.29	66.44	78.51	60.34	69.30	60.93	57.66					
			Sì	83.80	162.17	109.12	54.51	64.68	33.67	29.15	25.20	23.66					
			Valore massimo			No	155.12	288.51	207.65	108.24	140.30	106.45	143.33	131.99	128.79		
						Sì	126.71	266.62	174.47	76.68	99.21	74.45	86.72	81.07	78.98		
			Valore mediano			No	126.34	240.79	168.58	85.46	107.09	93.96	108.29	103.54	100.34		
						Sì	106.68	221.13	145.15	64.96	81.15	61.10	57.73	55.49	53.98		

Tabella B.13 – Rapporto tra il valore del LCOH di ogni casistica e quello della relativa soluzione più economicamente conveniente.

Edificio	Intervento	Località	Incentivo	Gas naturale	GPL	Gasolio	Legna	Pellet	Aerotermica	Geotermica (bassa conduttività)	Geotermica (media conduttività)	Geotermica (alta conduttività)
Monofamiliare	Ristrutturazione importante	Torino	No	1.4	2.7	1.9	1.0	1.3	1.1	1.3	1.3	1.2
			Sì	1.6	3.3	2.2	1.0	1.3	1.1	1.1	1.1	1.0
		Cuneo	No	1.5	2.7	2.0	1.0	1.3	1.0	1.3	1.2	1.2
			Sì	1.7	3.5	2.3	1.0	1.4	1.0	1.1	1.0	1.0
		Oulx	No	1.5	3.0	2.1	1.0	1.3	1.1	1.5	1.3	1.3
			Sì	1.7	3.6	2.4	1.0	1.3	1.0	1.2	1.1	1.1
Multifamiliare	Ristrutturazione importante	Torino	No	1.7	3.0	2.1	1.2	1.4	1.0	1.2	1.1	1.0
			Sì	3.5	6.9	4.6	2.3	2.7	1.4	1.2	1.1	1.0
		Cuneo	No	1.7	3.1	2.2	1.2	1.4	1.0	1.2	1.1	1.0
			Sì	3.4	6.4	4.4	2.2	2.6	1.2	1.2	1.1	1.0
		Oulx	No	1.6	3.2	2.1	1.0	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1
			Sì	2.8	5.9	3.8	1.6	2.0	1.4	1.1	1.0	1.0

Tabella B.14 – Differenza percentuale tra il LCOH di ogni casistica e quello della relativa pompa di calore geotermica installata in un terreno a media conduttività.

Edificio	Intervento	Località	Incentivo	Gas naturale	GPL	Gasolio	Legna	Pellet	Aerotermica	Geotermica (bassa conduttività)	Geotermica (media conduttività)	Geotermica (alta conduttività)
Monofamiliare	Ristrutturazione importante	Torino	No	14%	110%	53%	-21%	3%	-16%	4%	0%	-2%
			Sì	54%	216%	111%	-5%	22%	1%	3%	0%	-2%
		Cuneo	No	18%	115%	57%	-18%	6%	-19%	4%	0%	-2%
			Sì	65%	236%	125%	2%	32%	-3%	3%	0%	-2%
		Oulx	No	13%	120%	54%	-26%	-3%	-20%	9%	0%	-3%
			Sì	56%	229%	115%	-8%	20%	-9%	7%	0%	-3%
Multifamiliare	Ristrutturazione importante	Torino	No	57%	186%	101%	9%	29%	-1%	14%	0%	-5%
			Sì	233%	543%	333%	116%	157%	36%	16%	0%	-6%
		Cuneo	No	61%	190%	105%	13%	34%	-6%	9%	0%	-5%
			Sì	217%	506%	311%	107%	147%	16%	10%	0%	-6%
		Oulx	No	34%	166%	78%	-16%	3%	1%	5%	0%	-4%
			Sì	168%	464%	262%	57%	94%	32%	6%	0%	-5%

B.6.4 Spesa annuale complessiva

Nelle tabelle seguenti vengono riportati i valori della spesa annuale calcolati come il prodotto tra il LCOH [€/kWh] e il fabbisogno annuale [kWh]. In particolare, nella Tabella B.16 sono riportati i costi totali, nella Tabella B.16 quelli per unità immobiliare.

Tabella B.15 – Spesa annuale totale per le varie soluzioni analizzate.

Edificio	Intervento	Località	Incentivo	Gas naturale	GPL	Gasolio	Legna	Pellet	Aerotermica	Geotermica (bassa conduttività)	Geotermica (media conduttività)	Geotermica (alta conduttività)
Monofamiliare	Ristrutturazione importante	Torino	No	1 768.29 €	3 258.03 €	2 370.97 €	1 225.32 €	1 589.16 €	1 300.97 €	1 612.18 €	1 549.61 €	1 513.87 €
			Sì	1 423.15 €	2 912.89 €	1 948.79 €	872.74 €	1 130.01 €	928.16 €	952.15 €	922.65 €	905.80 €
		Cuneo	No	1 733.12 €	3 171.42 €	2 320.03 €	1 209.32 €	1 567.53 €	1 189.31 €	1 532.80 €	1 474.71 €	1 438.96 €
			Sì	1 387.98 €	2 826.28 €	1 897.85 €	856.74 €	1 108.39 €	818.12 €	869.66 €	842.27 €	825.42 €
		Oulx	No	2 104.14 €	4 085.22 €	2 857.52 €	1 378.16 €	1 795.73 €	1 488.84 €	2 029.47 €	1 859.67 €	1 797.10 €
			Sì	1 794.12 €	3 775.20 €	2 470.45 €	1 060.69 €	1 371.70 €	1 043.43 €	1 227.91 €	1 147.85 €	1 118.36 €
Multifamiliare	Ristrutturazione importante	Torino	No	5 358.75 €	9 752.23 €	6 855.59 €	3 724.66 €	4 401.32 €	3 382.60 €	3 885.03 €	3 415.83 €	3 232.61 €
			Sì	4 697.61 €	9 091.09 €	6 117.40 €	3 056.08 €	3 626.17 €	1 922.06 €	1 634.01 €	1 412.79 €	1 326.41 €
		Cuneo	No	5 149.76 €	9 236.36 €	6 550.83 €	3 602.61 €	4 276.95 €	3 010.84 €	3 489.67 €	3 190.27 €	3 020.46 €
			Sì	4 488.61 €	8 575.21 €	5 812.64 €	2 934.03 €	3 501.80 €	1 648.22 €	1 556.21 €	1 415.06 €	1 334.99 €
		Oulx	No	6 294.17 €	12 507.10 €	8 346.04 €	3 969.48 €	4 843.99 €	4 745.01 €	4 955.67 €	4 700.95 €	4 499.87 €
			Sì	5 633.02 €	11 845.96 €	7 607.84 €	3 300.90 €	4 068.84 €	2 780.84 €	2 219.83 €	2 099.74 €	2 004.93 €

Tabella B.16 – Spesa annuale per unità abitativa per le varie soluzioni analizzate.

Edificio	Intervento	Località	Incentivo	Gas naturale	GPL	Gasolio	Legna	Pellet	Aerotermica	Geotermica (bassa conduttività)	Geotermica (media conduttività)	Geotermica (alta conduttività)
Monofamiliare	Ristrutturazione importante	Torino	No	1 768.29 €	3 258.03 €	2 370.97 €	1 225.32 €	1 589.16 €	1 300.97 €	1 612.18 €	1 549.61 €	1 513.87 €
			Sì	1 423.15 €	2 912.89 €	1 948.79 €	872.74 €	1 130.01 €	928.16 €	952.15 €	922.65 €	905.80 €
		Cuneo	No	1 733.12 €	3 171.42 €	2 320.03 €	1 209.32 €	1 567.53 €	1 189.31 €	1 532.80 €	1 474.71 €	1 438.96 €
			Sì	1 387.98 €	2 826.28 €	1 897.85 €	856.74 €	1 108.39 €	818.12 €	869.66 €	842.27 €	825.42 €
		Oulx	No	2 104.14 €	4 085.22 €	2 857.52 €	1 378.16 €	1 795.73 €	1 488.84 €	2 029.47 €	1 859.67 €	1 797.10 €
			Sì	1 794.12 €	3 775.20 €	2 470.45 €	1 060.69 €	1 371.70 €	1 043.43 €	1 227.91 €	1 147.85 €	1 118.36 €
Multifamiliare	Ristrutturazione importante	Torino	No	535.88 €	975.22 €	685.56 €	372.47 €	440.13 €	338.26 €	388.50 €	341.58 €	323.26 €
			Sì	469.76 €	909.11 €	611.74 €	305.61 €	362.62 €	192.21 €	163.40 €	141.28 €	132.64 €
		Cuneo	No	514.98 €	923.64 €	655.08 €	360.26 €	427.69 €	301.08 €	348.97 €	319.03 €	302.05 €
			Sì	448.86 €	857.52 €	581.26 €	293.40 €	350.18 €	164.82 €	155.62 €	141.51 €	133.50 €
		Oulx	No	629.42 €	1 250.71 €	834.60 €	396.95 €	484.40 €	474.50 €	495.57 €	470.10 €	449.99 €
			Sì	563.30 €	1 184.60 €	760.78 €	330.09 €	406.88 €	278.08 €	221.98 €	209.97 €	200.49 €

B.7 Emissioni di GHG e di inquinanti dell'aria

B.7.1 Edificio monofamiliare

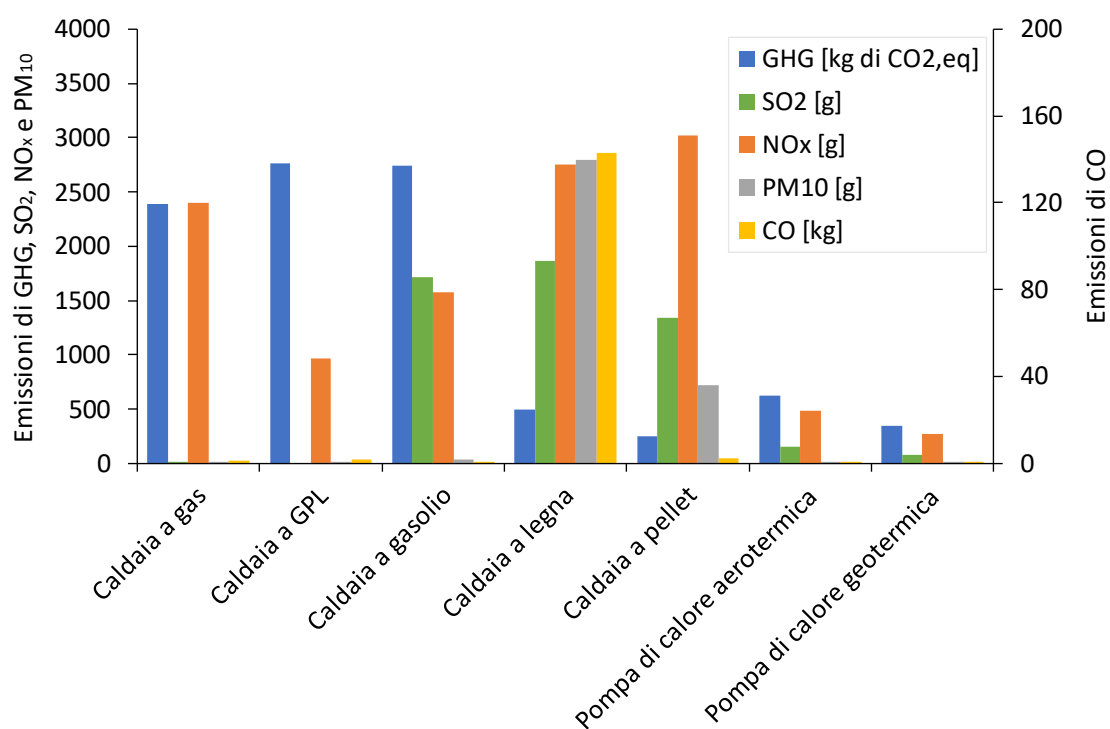


Figura B.7 – Emissioni relative ai diversi impianti nel caso di ristrutturazione importante a Torino.

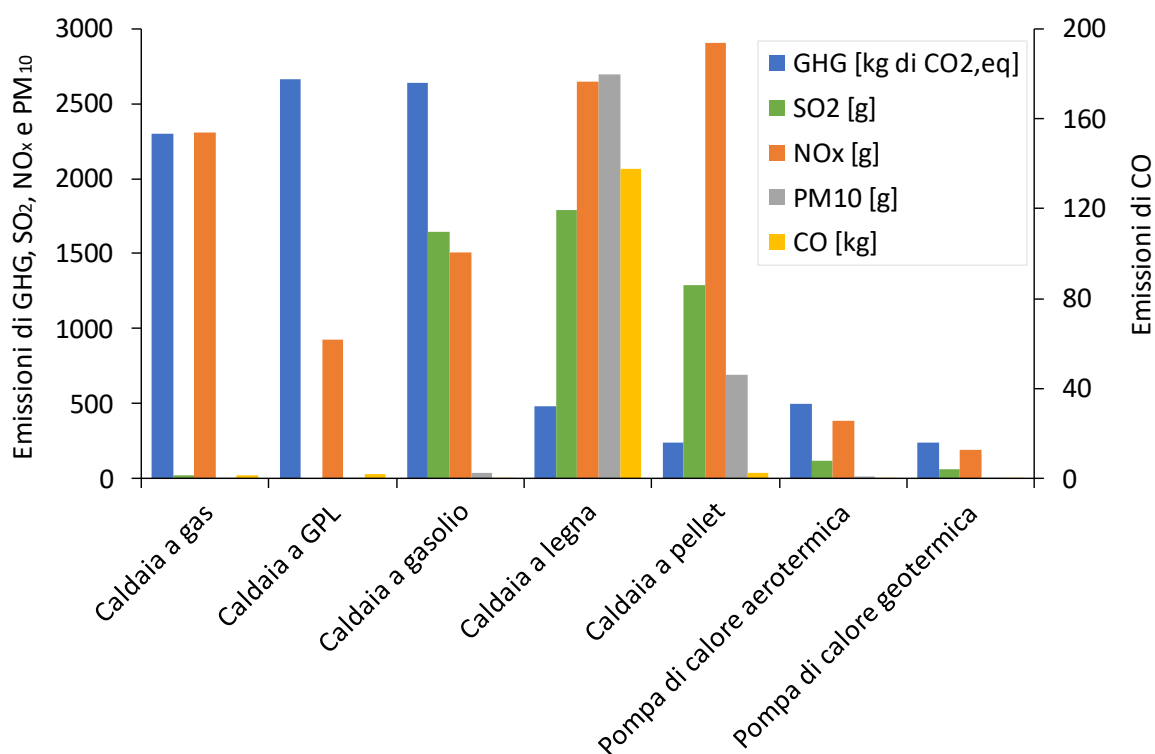


Figura B.8 – Emissioni relative ai diversi impianti nel caso di ristrutturazione importante a Cuneo.

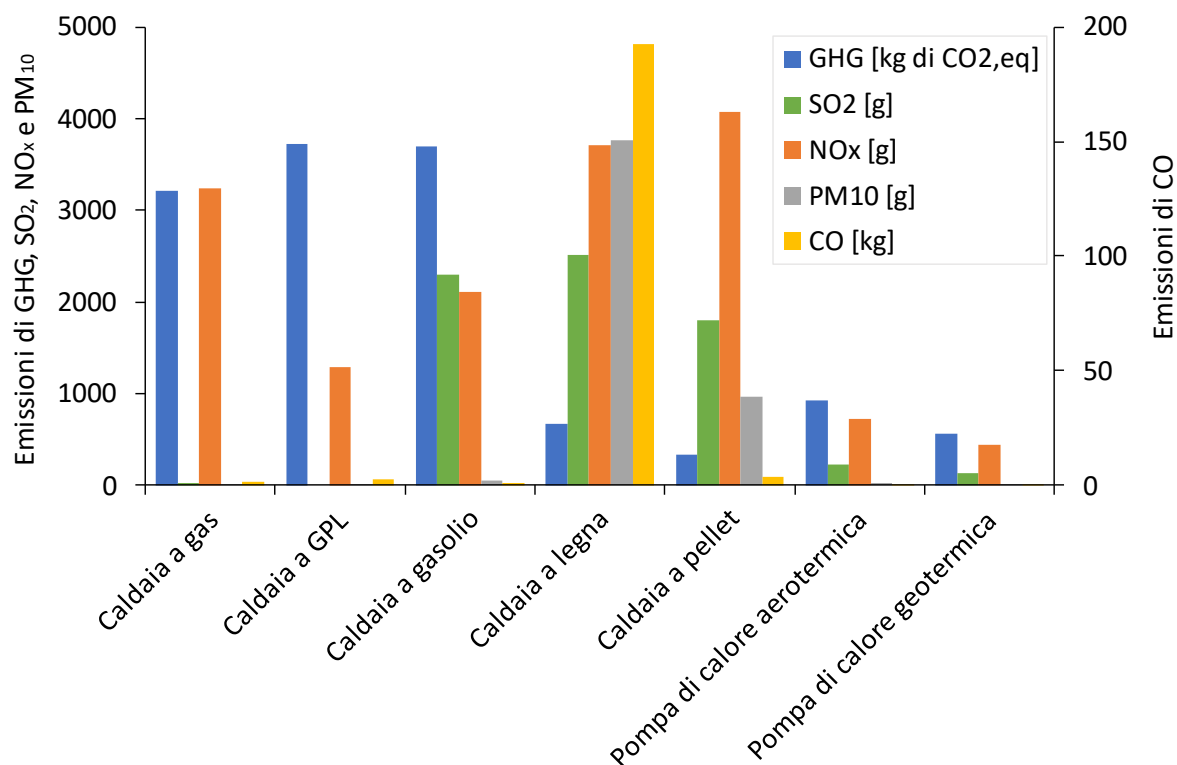


Figura B.9 – Emissioni relative ai diversi impianti nel caso di ristrutturazione importante a Oulx.

B.7.2 Edificio multifamiliare

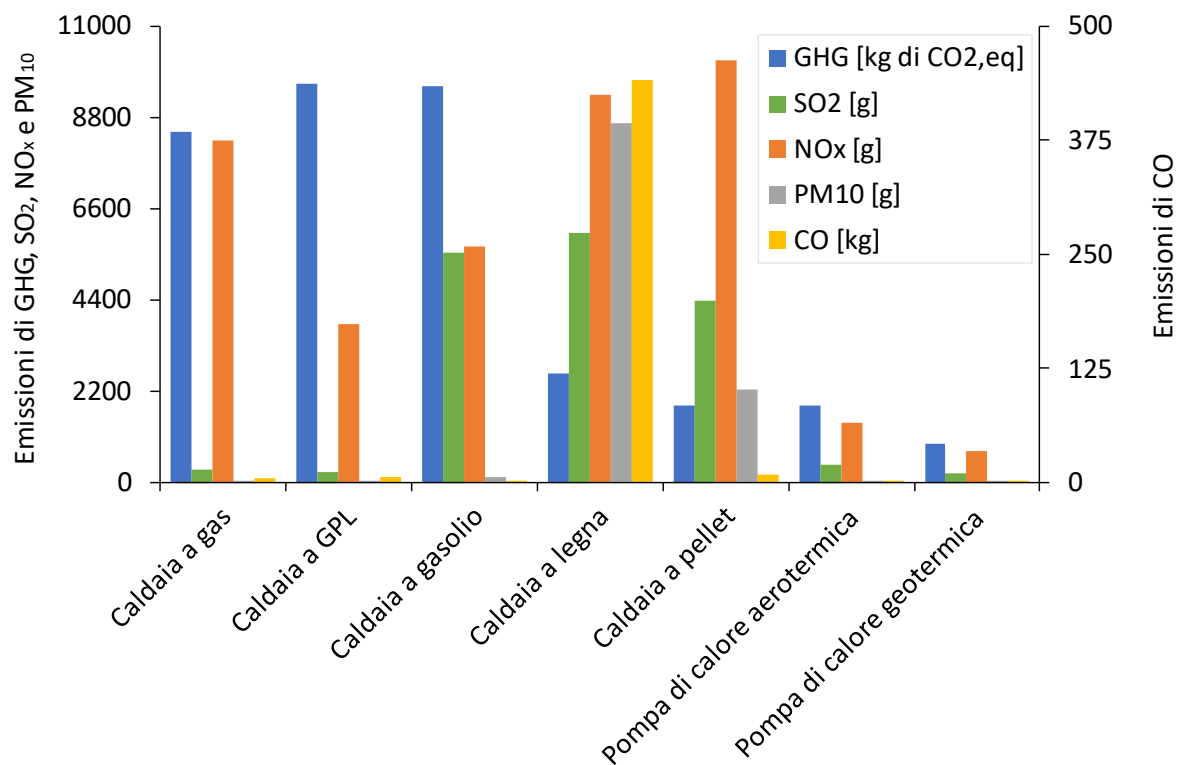


Figura B.10 – Emissioni relative ai diversi impianti nel caso di ristrutturazione importante a Torino.

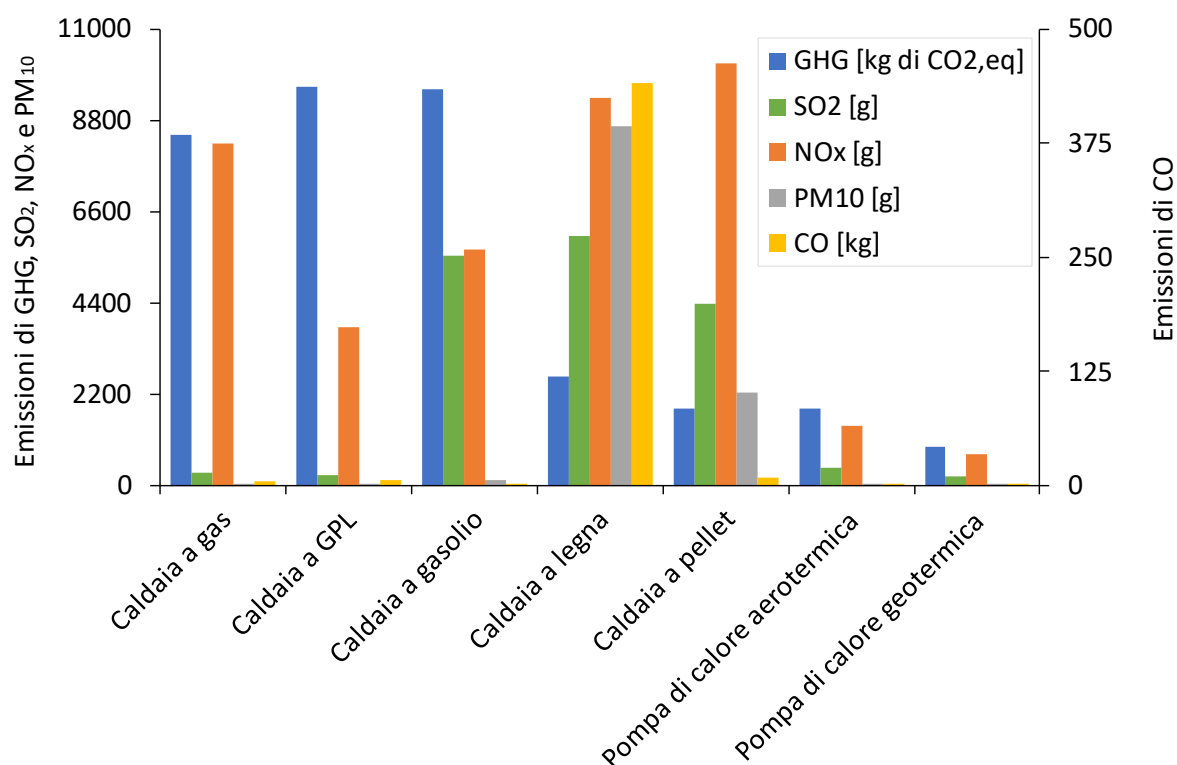


Figura B.11 – Emissioni relative ai diversi impianti nel caso di ristrutturazione importante a Cuneo.

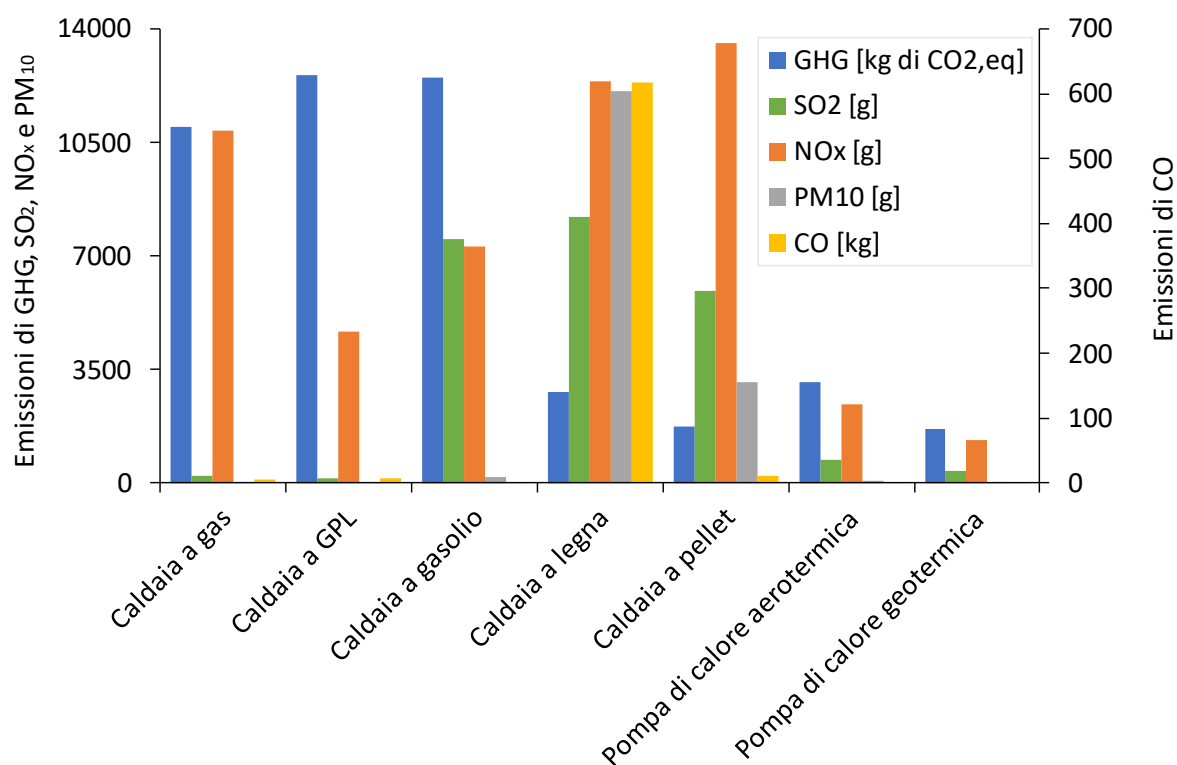


Figura B.12 – Emissioni relative ai diversi impianti nel caso di ristrutturazione importante a Oulx.

C Proprietà termiche delle formazioni litologiche del Piemonte

Tabella C.1 – Conducibilità e capacità termica: valori assegnati alle formazioni litologiche mappate nella Carta Geologica del Piemonte 1:250000 (Piana et al., 2017 [37], [119]) e fonti bibliografiche di riferimento.

Unità litologica	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	ρc [MJ·m ⁻³ K ⁻¹]	Riferimento
"Complessi di base", Formazione di S. Bartolomeo	2.13	2.25	Clay-mudstone [35], [119]
Anfiboliti - Unita Kinzigitica	2.9	2.15	Amphibolite [35]
Anfiboliti - Zona Strona-Ceneri	2.9	2.15	Amphibolite [35]
Anfiboliti del Complesso Bousset-Valmasque	2.9	2.15	Amphibolite [35]
Anfiboliti del Monte Spinarda	2.9	2.15	Amphibolite [35]
Anfiboliti della Zona Sesia-Lanzo	2.9	2.15	Amphibolite [35]
Anfiboliti e prasiniti del Dominio Vallesano	2.9	2.15	Amphibolite [35]
Arenarie di Diano di Alba	2.6	2.2	Sandstone [35]
Arenarie di Fenera Annunziata, Dolomie di San Salvatore, Dolomia Principale	3.58	2.25	Dolomite [35]
Arenarie di Monte Vallassa	2.6	2.2	Sandstone [35]
Arenarie di Moransengo	2.8	2.1	Conglomerate [44]
Arenarie di Rio Trebbio, Formazione di Grue, Formazione di Dernice	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Arenarie di San Quirico, Calcarei Spongolitici	2.04	2.25	Marlstone [35]
Arenarie di Scabiazza	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Areniti di Tonengo	2.6	2.2	Sandstone [35]
Argille azzurre a	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Argille Azzurre b	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Argilliti di Mignanego	2.6	2.2	Sandstone [35]
Argilliti di Pagliaro	2.6	2.2	Sandstone [35]
Argilloscisti di Costagiutta	2.3	2.1	Slate [120]
Argilloscisti di Murta	2.3	2.1	Slate [120]
Aureole di contatto	2.9	2.4	Hornfels [121]

Unità litologica	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	ρc [MJ·m ⁻³ K ⁻¹]	Riferimento
Basalti Unita Chenaillet	1.82	2.45	Basalt [35]
Brecce tettoniche	2.2	2.1	Breccia [44]
Calcari del Puriac, Marne Nere	2.04	2.25	Marlstone [35]
Calcari del Testas, Calcari del Garbella	2.5	2.25	Limestone [35]
Calcari di Gallaneto	2.5	2.25	Limestone [35]
Calcari di Voltaggio	2.5	2.25	Limestone [35]
Calcari Val Tanarello, Calcari Rio Nava	2.5	2.25	Limestone [35]
Calcescisti	2.5	2.1	Calceschist [44]
Calcescisti Unita Zermatt-Saas	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti cretacici dell'Unita Chaberton-Grand Hoche	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti cretacici dell'Unita Re Magi	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti cretacici dell'Unita Valfredda	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti cretacici Unita Gad	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti cretacici Unita Vallonetto	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti del Dominio Vallesano	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti del Turchino	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti e micascisti Moncucco-Orselina-Isorno	2.95	2.1	Gneiss [35]
Calcescisti eclogitici delle Valli di Susa e Lanzo	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti filladici Unita Albergian-Bouchet	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti Unita Aigle	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti Unita Albergian-Bouchet	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti Unita Alpi Liguri	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti Unita Bassa Val Varaita	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti Unita Cerogne	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti Unita Chialmo-Plum	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti Unita Cima Lubin-Roccenie	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti Unita Combin	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti Unita della Bassa Val di Susa, Valli di Lanzo e Rocciaivre	2.53	2.3	Micaschists [35]

Unità litologica	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	ρc [MJ·m ⁻³ K ⁻¹]	Riferimento
Calcescisti Unita della Rognosa	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti Unita Dora-Maira	3.32	2.75	Schist and quartzite [122]
Calcescisti Unita Fenestrelle	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti Unita Lago Nero	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti Unita Monviso	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti Unita Palavas- Rocca Bianca	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti Unita Rocciamelone	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti Unita Testa di Garitta-San Damiano Macra	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti Unita Val Soana-Lanzo	2.53	2.3	Micaschists [35]
Calcescisti Valle Maira	2.53	2.3	Micaschists [35]
Ceneri Gneiss - Zona Strona-Ceneri	2.95	2.1	Gneiss [35]
Charnokiti - Complesso Mafico	2.74	2.55	Granite [35]
Complesso Berisal	2.95	2.1	Gneiss [35]
Complesso caotico della Valle Versa	1.6	2	Gypsum [35]
Complesso caotico di La Pietra	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Complesso caotico Monte Lisone	2.04	2.25	Marlstone [35]
Complesso carbonatico-metapelitico di Valosio	2.53	2.3	Micaschists [35]
Complesso Cervandone-Geissfpad	2.95	2.1	Gneiss [35]
Complesso degli gneiss ad Albite e Clorite	2.95	2.1	Gneiss [35]
Complesso degli Gneiss minuti del Gran Paradiso	2.95	2.1	Gneiss [35]
Complesso degli Gneiss occhiadini del Gran Paradiso	2.95	2.1	Gneiss [35]
Complesso dei Micascisti, Unita Ambin	2.53	2.3	Micaschists [35]
Complesso di Pietra Parcellara	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Complesso gneissico di Valosio	2.95	2.1	Gneiss [35]
Complesso Monometamorfico Unita Dora-Maira	2.95	2.1	Gneiss [35]
Complesso monometamorfico, Unita Brossasco-Isasca	2.95	2.1	Gneiss [35]
Complesso polimetamorfico, Unita Brossasco-Isasca	2.5	2	Marble [35]
Complesso Sanfront-Pinerolo	2.53	2.3	Micaschists [35]

Unità litologica	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	ρc [MJ·m ⁻³ K ⁻¹]	Riferimento
Conglomerati di La Morra	2.8	2.1	Conglomerate [44]
Conglomerati di Savignone	2.8	2.1	Conglomerate [44]
Dioriti - Complesso Mafico	2.4	2.9	Diorite [35]
Dolomie del M. Gazzo	3.58	2.25	Dolomite [35]
Eclogiti della Zona Sesia-Lanzo	2.53	2.3	Micaschists [35]
Filladi del Carbonifero	2.3	2.1	Slate [120]
Flysch di Aisone	2.6	2.2	Sandstone [35]
Flysch di Monte Cassio	2.04	2.25	Marlstone [35]
Flysch Sanremo-M.Saccarello, Arenarie di Bordighera	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Formazione del Monte Antola	2.6	2.2	Sandstone [35]
Formazione della Vena del Gesso	1.6	2	Gypsum [35]
Formazione di Antognola	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Formazione di Baldissero	2.6	2.2	Sandstone [35]
Formazione di Bistagno	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Formazione di Bruggi-Selvapiana	2.8	2.1	Conglomerate [44]
Formazione di Cardona	2.8	2.1	Conglomerate [44]
Formazione di Casale Monferrato	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Formazione di Cassano Spinola	2.6	2.2	Sandstone [35]
Formazione di Cassinasco, Formazione di Murazzano	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Formazione di Castagnola	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Formazione di Contignaco	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Formazione di Cortemilia, Formazione di Costa Areasa	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Formazione di Eze	2.9	2.15	Amphibolite [35]
Formazione di Gremiasco, Membro di Nivione	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Formazione di Gremiasco, Membro di Nivione - litozona pelitica	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Formazione di Lequio	2.6	2.2	Sandstone [35]
Formazione di Molare	2.8	2.1	Conglomerate [44]
Formazione di Monastero	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]

Unità litologica	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	ρc [MJ·m ⁻³ K ⁻¹]	Riferimento
Formazione di Murialdo	2.53	2.3	Micaschists [35]
Formazione di Ranzano	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Formazione di Rigoroso	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Formazione di San Paolo	2.6	2.2	Sandstone [35]
Formazione di Serole	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Formazione di Serravalle	2.6	2.2	Sandstone [35]
Formazione di Termofoura	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Formazione di Upega	2.04	2.25	Marlstone [35]
Formazione di Variano	2.6	2.2	Sandstone [35]
Formazione di Visone	2.6	2.2	Sandstone [35]
Formazione Kinzigitica	2.95	2.1	Gneiss [35]
Gabbri, granuliti basiche - Complesso Mafico	2.41	2.6	Gabbro [35]
Gessi e anidriti in corrispondenza di contatti tettonici	1.6	2	Gypsum [35]
Gneiss aplitico, Unita Ambin	2.95	2.1	Gneiss [35]
Gneiss del M.Leone	2.95	2.1	Gneiss [35]
Gneiss del Vannino	2.95	2.1	Gneiss [35]
Gneiss di Antigorio, con subordinati micascisti e anfiboliti	2.95	2.1	Gneiss [35]
Gneiss di Charbonnel	2.95	2.1	Gneiss [35]
Gneiss e micascisti a granato del Canavese	2.95	2.1	Gneiss [35]
Gneiss e micascisti a relitti prealpini, Unita di Clarea	2.95	2.1	Gneiss [35]
Gneiss e micascisti con grafite del Complesso grafítico Sanfront-Pinerolo	2.95	2.1	Gneiss [35]
Gneiss e micascisti monometamorfici Unita Dora-Maira	2.95	2.1	Gneiss [35]
Gneiss e micascisti, Unita di Clarea	2.95	2.1	Gneiss [35]
Gneiss granitici migmatitici (anatestiti auct.)	2.7	2.1	Migmatite [44]
Gneiss minuti - Zona Strona-Ceneri	2.95	2.1	Gneiss [35]
Gneiss tipo Luserna	2.95	2.1	Gneiss [35]
Gneiss Unita Val Soana-Lanzo	2.95	2.1	Gneiss [35]
Gneiss, micascisti e miloniti della Rocca Canavese	2.95	2.1	Gneiss [35]

Unità litologica	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	ρc [MJ·m ⁻³ K ⁻¹]	Riferimento
Graniti del Biellese e Valsessera, Alzo, Roccapietra, Quarna, Montorfano, Baveno e Mottarone	2.74	2.55	Granite [35]
Graniti del Canavese	2.74	2.55	Granite [35]
Graniti del Torrente Letimbro	2.74	2.55	Granite [35]
Graniti e granodioriti - Complesso Mafico	2.74	2.55	Granite [35]
Granito centrale e corpi granitici simili	3	2.1	Granitoid gneiss [44]
Granito del Plutone di Biella (Valle Orco)	2.74	2.55	Granite [35]
Granitoidi del complesso Bousset-Valmasque	2.7	2.1	Migmatite [44]
Granitoidi Unita Dora-Maira	3	2.1	Granitoid gneiss [44]
Granuliti basiche di alta pressione, eclogiti del Lago del Frisson	2.9	2.15	Amphibolite [35]
Gres d'Annot, Flysch Noir	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Kinzigiti della Seconda Zona Dioritico-Kinzigitica	2.53	2.3	Micaschists [35]
Kinzigiti della Zona Sesia-Lanzo	2.53	2.3	Micaschists [35]
Marmi - Unita Kinzigitica	2.5	2	Marble [35]
Marmi a silicati Unita Rocciamezone	2.5	2	Marble [35]
Marmi del Dominio Vallesano	2.5	2	Marble [35]
Marmi del Lebedun	2.5	2	Marble [35]
Marmi della Zona Sesia-Lanzo	2.5	2	Marble [35]
Marmi di Valdieri	2.5	2	Marble [35]
Marmi e dolomie, Unita Acceglio-Longet	2.5	2	Marble [35]
Marmi Unita Albergian-Bouchet	2.5	2	Marble [35]
Marmi Unita Dora-Maira	2.5	2	Marble [35]
Marmi Unita Lago Nero	2.5	2	Marble [35]
Marmi, dolomie e calcescisti, Unita Acceglio-Longet	2.5	2	Marble [35]
Marmi, quarziti e calcescisti lungo i contatti tettonici delle Unita Lepontine	2.5	2	Marble [35]
Marna di Paroldo	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Marne a Globigerina, Calcarei a Nummuliti, F. a Microcodium, F. di Trucco, Calcarei della Madonna dei Cancelli	2.04	2.25	Marlstone [35]

Unità litologica	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	ρc [MJ·m ⁻³ K ⁻¹]	Riferimento
Marne a Pteropodi inferiori	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Marne di Cessole	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Marne di Mincengo	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Marne di Monte Brugi	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Marne di Monte Piano	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Marne di S. Agata Fossili	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Marne di Vigoponzo	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Membri di Rocca Crovaglia, di Ronchi e di C. Garino, Formazione di Costa Montada	2.6	2.2	Sandstone [35]
Membro calcareo, Formazione di Montechiaro d'Acqui	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Membro delle arenarie di Case Mazzurini, F.ne Rocchetta-Monesiglio	2.6	2.2	Sandstone [35]
Membro delle arenarie di Cassinelle, Formazione di Rigoroso	2.6	2.2	Sandstone [35]
Membro delle arenarie di Castelnuovo di Ceva, Formazione Rocchetta-Monesiglio	2.6	2.2	Sandstone [35]
Membro delle arenarie di Gottasecca, Formazione Rocchetta-Monesiglio	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Membro delle arenarie di Noceto, Formazione Rocchetta-Monesiglio	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Membro delle arenarie di Piantivello, Formazione Rocchetta-Monesiglio	2.6	2.2	Sandstone [35]
Membro di Cascina Colombara, Formazione di Costa Montada	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Membro di Case Poggi, Formazione Rocchetta-Monesiglio	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Membro di Nizza Monferrato, Formazione Vena del Gesso	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Membro siliceo, Formazione di Montechiaro d'Acqui	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Metabasalti di Cravasco	1.82	2.45	Basalt [35]
Metabasiti - Unita Figogna	1.82	2.45	Basalt [35]
Metabasiti - Zona di Furgg	2.53	2.3	Micaschists [35]
Metabasiti dei complessi monometamorfici Unita Dora-Maira	2.9	2.15	Amphibolite [35]
Metabasiti della Zona Sesia-Lanzo	3	2.1	Chlorite [44]
Metabasiti dell'Unita Combin	2.9	2.15	Amphibolite [35]
Metabasiti dell'Unita Zermatt-Saas	2.5	2.1	Metamorphic rock [35]
Metabasiti di Rossiglione	2.5	2.1	Metamorphic rock [35]
Metabasiti pre-alpine Unita Clarea	2.5	2.1	Diorite [35]

Unità litologica	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	ρc [MJ·m ⁻³ K ⁻¹]	Riferimento
Metabasiti Unita Aigle	2.9	2.15	Amphibolite [35]
Metabasiti Unita Albergian-Bouchet	2.5	2.1	Metamorphic rock [35]
Metabasiti Unita Ambin	2.4	2.9	Diorite [35]
Metabasiti Unita Cerogne	2.9	2.15	Amphibolite [35]
Metabasiti Unita Chialmo-Plum	2.5	2.1	Metamorphic rock [35]
Metabasiti Unita Cima Lubin-Roccenie	2.5	2.1	Metamorphic rock [35]
Metabasiti Unita Dora-Maira	2.9	2.15	Amphibolite [35]
Metabasiti Unita Monviso	2.9	2.15	Amphibolite [35]
Metabasiti Unita Palavas-Rocca Bianca	2.5	2.1	Metamorphic rock [35]
Metabasiti Unita Puys-Venaus	2.5	2.1	Metamorphic rock [35]
Metabasiti, Unita Clarea	2.5	2.1	Diorite [35]
Metadioriti Unita Dora-Maira	2.95	2.1	Gneiss [35]
Metagabbri del Monte Lecco	2.41	2.6	Gabbro [35]
Metagabbri dell'Unita della Bassa Val di Susa, Valli di Lanzo e Rocciafredda	2.41	2.6	Gabbro [35]
Metagabbri di Monastero	2.41	2.6	Gabbro [35]
Metagabbri e anfiboliti. Unita di Antrona	2.9	2.15	Amphibolite [35]
Metagabbri eclogitici della Colma, Metagabbri del Bric Mazzapiè, Metagabbri eclogitici di Prato del Gatto	2.41	2.6	Gabbro [35]
Metagabbri Unita di Antrona	2.9	2.15	Amphibolite [35]
Metagranito della Val Sangone	2.95	2.1	Gneiss [35]
Metagranito di Borgone	2.95	2.1	Gneiss [35]
Micascisti eclogitici della Zona Sesia-Lanzo	2.53	2.3	Micaschists [35]
Micascisti Monte Rosa	2.53	2.3	Micaschists [35]
Micascisti, gneiss e quarzomicascisti, Unita Dora-Maira	2.53	2.3	Micaschists [35]
Micascisti, paragneiss - Scisti dei Laghi	2.53	2.3	Micaschists [35]
Migmatiti - Unita Kinzigitica	2.7	2.1	Migmatite [44]
Migmatiti anfiboliche	2.95	2.1	Gneiss [35]
Miloniti - Massiccio Argentera	5.18	2.1	Quartzite [35]

Unità litologica	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	ρc [MJ·m ⁻³ K ⁻¹]	Riferimento
Monzonite del Plutone di Biella (Valle Orco)	2.5	2.1	Diorite [35]
Neocomiano a Cefalopodi, Barra Titonica, Terre Nere, Calcari a Cancellophycus	2.5	2.25	Limestone [35]
Ortoderivati Unita Dora-Maira	2.95	2.1	Gneiss [35]
Ortoderivati Unita Dora-Maira. Successione vulcanoclastica	2.95	2.1	Gneiss [35]
Ortogneiss - Scisti dei Laghi	2.95	2.1	Gneiss [35]
Ortogneiss del Gran San Bernardo	2.95	2.1	Gneiss [35]
Ortogneiss della Zona Sesia-Lanzo	2.95	2.1	Gneiss [35]
Ortogneiss di Nucetto	2.95	2.1	Gneiss [35]
Ortogneiss di Verampio	2.95	2.1	Gneiss [35]
Ortogneiss e paragneiss di Unita Camughera	2.95	2.1	Gneiss [35]
Ortogneiss Moncucco-Orselina-Isorno	2.95	2.1	Gneiss [35]
Ortogneiss Monte Rosa	2.95	2.1	Gneiss [35]
Ortogneiss tipo Freidour	2.95	2.1	Gneiss [35]
Paraderivati migmatitici	2.7	2.1	Migmatite [44]
Paragneiss del Gran San Bernardo	2.95	2.1	Gneiss [35]
Paragneiss e ultramafiti Moncucco-Orselina-Isorno	3.5	2.1	Peridotite [120]
Paragneiss migmatitici	2.7	2.1	Migmatite [44]
Peliti del Bec Matlas, Scisti ad Equisetum, Formazione del Monte Agnelet, Dolomie di S. Pietro dei Monti, Calcari di Costa Losera	2.5	2.25	Dolomite [35]
Peliti di Case Valmarenca, Quarziti di Ponte di Nava, Quarzareniti della Valette du Sa-bion	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Peridotiti di Baldissero - Complesso Mafico	2.52	2.1	Serpentinite [35]
Peridotiti Iherzolitiche del Monte Tobbio	3.5	2.1	Peridotite [120]
Peridotiti mantelliche - Complesso Mafico	3.5	2.1	Peridotite [120]
Peridotiti serpentizzate e brecciate, oficalci e filoni albititici	2.52	2.1	Serpentinite [35]
Peridotiti Unita della Bassa Val di Susa, Valli di Lanzo e Rocciavre	3.5	2.1	Peridotite [120]
Peridotiti, serpentiniti - Complesso Mafico	3.5	2.1	Peridotite [120]
Pietra da Cantoni	2.6	2.2	Sandstone [35]

Unità litologica	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	ρc [MJ·m ⁻³ K ⁻¹]	Riferimento
Plutone Brosso-Traversella	2.4	2.9	Diorite [35]
Porfiroidi del Melogno, Vulcaniti della Rocca del Abisso	2.96	2.1	Rhyolite [35]
Prasiniti Unita della Bassa Val di Susa, Valli di Lanzo e Rocciavre	3	2.1	Chlorite [44]
Prasiniti Unita della Rognosa	2.5	2.1	Metamorphic rock [35]
Quarziti del Dominio Vallesano	5.18	2.1	Quartzite [35]
Quarziti di Val Grana - Pradleves	3.5	2.2	Quartzite – micaschist [35]
Quarziti e micascisti de 'Ensemble Sampeyre'	5.18	2.1	Quartzite [35]
Quarziti Unita Cerogne	5.18	2.1	Quartzite [35]
Quarziti Unita Chialmo-Plum	5.18	2.1	Quartzite [35]
Quarziti Unita Lago Nero	5.18	2.1	Quartzite [35]
Quarziti Unita Palavas- Rocca Bianca	5.18	2.1	Quartzite [35]
Quarziti Unita Testa di Garitta-San Damiano Macra	5.18	2.1	Quartzite [35]
Quarziti, Unita Acceglio-Longet	3.5	2.2	Quartzite – micaschist [35]
Rocce carbonatiche coinvolte in zone tettonizzate	2.5	2.25	Limestone [35]
Sabbie di Asti a (Pocapaglia)	2.6	2.2	Sandstone [35]
Sabbie di Asti b	2.6	2.2	Sandstone [35]
Scisti di Baceno	2.53	2.3	Micaschists [35]
Scisti di Gorra	2.53	2.3	Micaschists [35]
Scisti filladici del Monte Larvego	2.3	2.1	Slate [120]
Scisti filladici Unita Montenotte	2.3	2.1	Slate [120]
Serpentiniscisti antigoritici del Bric del Dente	2.52	2.1	Serpentine [35]
Serpentine di Pesmonte	2.52	2.1	Serpentine [35]
Serpentiniti del Bric dei Corvi	2.52	2.1	Serpentine [35]
Serpentiniti dell'Unita Combin	2.52	2.1	Serpentine [35]
Serpentiniti dell'Unita Zermatt-Saas	2.52	2.1	Serpentine [35]
Serpentiniti di Case Bardane	2.52	2.1	Serpentine [35]

Unità litologica	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	ρc [MJ·m ⁻³ K ⁻¹]	Riferimento
Serpentiniti di Pesmonte	2.52	2.1	Serpentinite [35]
Serpentiniti e peridotiti Unita Albergian-Bouchet	2.52	2.1	Serpentinite [35]
Serpentiniti e peridotiti Unita Bassa Val Varaita	2.52	2.1	Serpentinite [35]
Serpentiniti e peridotiti Unita Chialmo-Plum	2.52	2.1	Serpentinite [35]
Serpentiniti e peridotiti Unita della Bassa Val di Susa, Valli di Lanzo e Rocciavre	2.52	2.1	Serpentinite [35]
Serpentiniti e peridotiti Unita della Rognosa	2.52	2.1	Serpentinite [35]
Serpentiniti e peridotiti Unita Lago Nero	2.52	2.1	Serpentinite [35]
Serpentiniti e peridotiti Unita Monviso	2.52	2.1	Serpentinite [35]
Serpentiniti Unita Aigle	2.52	2.1	Serpentinite [35]
Serpentiniti Unita Alpi Liguri	2.52	2.1	Serpentinite [35]
Serpentiniti Unita Cerogne	2.52	2.1	Serpentinite [35]
Serpentiniti Unita Tour Real	2.52	2.1	Serpentinite [35]
Serpentiniti. Unita di Antrona	3.5	2.1	Peridotite [120]
Sienite della Balma	3	2.1	Granitoid gneiss [44]
Stronaliti - Unita Kinzigitica	3	2.1	Granitoid gneiss [44]
Substrato permiano della successione di Margine Distale	2.53	2.3	Micaschists [35]
Substrato retico-hettangiano della successione di Margine Distale	2.5	2	Marble [35]
Substrato triassico medio della successione di Margine Distale	2.5	2	Marble [35]
Substrato triassico sup. della successione di Margine Distale	3.58	2.25	Dolomite [35]
Successione arenacea vulcanoclastica del Permiano	2.6	2.2	Sandstone [35]
Successione cretacea di Margine Distale	2.53	2.3	Micaschists [35]
Successione giurassica di Margine Distale	2.53	2.3	Micaschists [35]
Successione giurassica sup. di Margine Distale	2.53	2.3	Micaschists [35]
Successione mesozoica indifferenziata del Canavese	5.18	2.1	Quartzite [35]
Successione metasedimentaria triassico-cretacea	3.5	2.2	Quartzite – micaschist [35]
Suite vulcano-sedimentaria di Biella	1.43	2.45	Andesite [35]
Tettoniti	2.53	2.3	Micaschists [35]
Tonalite Miagliano	2.73	2.1	Tonalite [123]

Unità litologica	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	ρc [MJ·m ⁻³ K ⁻¹]	Riferimento
Tonaliti Unità Dora-Maira	2.95	2.1	Gneiss [35]
Unità delle Baragge Biellesi e Novaresi	2.6	2.2	Sandstone [35]
Unità metasedimentarie calcaree	2.5	2.25	Limestone [35]
Unità metasedimentarie calcareo-dolomitiche	3.58	2.25	Dolomite [35]
Unità metasedimentarie calcareo-dolomitiche. Unità Ambin	2.5	2	Marble [35]
Unità metasedimentarie calcareo-marnose	2.53	2.3	Micaschists [35]
Unità metasedimentarie eoceniche delle Alpi Marittime e Liguri	2.04	2.25	Marlstone [35]
Unità metasedimentarie quarzitiche	2.3	2.1	Slate [120]
Unità metasedimentarie quarzitiche. Unità Ambin	3.5	2.2	Quartzite – micaschist [35]
Unità metasedimentarie silicoclastiche delle Alpi Marittime e Liguri	2.13	2.25	Clay-mudstone [35]
Unità metasedimentarie vulcanoclastiche delle Alpi Marittime e Liguri	2.96	2.1	Rhyolite [35]
'Villafranchiano a': Sabbie di S.Albano Stura	2.6	2.2	Sandstone [35]
Villafranchiano b: Sabbie di Ferrere e Silt di S.Martino	2.6	2.2	Sandstone [35]
Villafranchiano b: Unità di La Cassa	2.6	2.2	Sandstone [35]
Villafranchiano c: Unità di Cascina Gherba, Unità di Maretto	2.6	2.2	Sandstone [35]
Villafranchiano c: Unità di Maranzana	2.6	2.2	Sandstone [35]
Villafranchiano c: Unità di Morialdo, Unità di Buttigliera	2.6	2.2	Sandstone [35]
Vulcaniti del Canavese	2.74	2.55	Granite [35]
Vulcaniti e vulcanoclastiti del Complesso dei Porfidi Quarziferi	2.8	2.1	Conglomerate [44]
Vulcaniti e vulcanoclastiti Unità Acceglio-Longet	2.96	2.1	Rhyolite [35]

Bibliografia

- [1] A. Casasso e R. Sethi, «Groundwater-Related Issues of Ground Source Heat Pump (GSHP) Systems: Assessment, Good Practices and Proposals from the European Experience», *Water*, vol. 11, n. 8, pag. 1573, lug. 2019, doi: 10.3390/w11081573.
- [2] Euroimpianti S.N.C., «Riscaldamento a pannelli radianti», *Termoidraulica, Condizionamento Impianti industriali - Euroimpianti S.N.C.* <https://bit.ly/2RJUXxh> (consultato mag. 26, 2021).
- [3] Aermec S.p.A., «Ventilconvettore», *Aermec*. <https://global.aermec.com/it/> (consultato mag. 26, 2021).
- [4] OBI Italia, «Radiatore», *OBI Italia*. <https://www.obi-italia.it/> (consultato mag. 26, 2021).
- [5] Weber, J., Ganz, B., Schellschmidt, R., Sanner, B., Schulz, R., «Geothermal Energy Use in Germany», presentato al Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, apr. 2015. [Online]. Disponibile su: <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2015/01045.pdf>
- [6] SVIM - Sviluppo Marche Srl, «Impianti geotermici a bassa entalpia». Consultato: giu. 02, 2021. [Online]. Disponibile su: <https://empowering2020.eu/wp-content/uploads/impianti-geotermici-a-bassa-entalpia.pdf>
- [7] M. Rivoire, A. Casasso, B. Piga, e R. Sethi, «Assessment of Energetic, Economic and Environmental Performance of Ground-Coupled Heat Pumps», *Energies*, vol. 11, n. 8, pag. 1941, lug. 2018, doi: 10.3390/en11081941.
- [8] P. Blum, G. Campillo, W. Münch, e T. Kölbel, «CO2 savings of ground source heat pump systems – A regional analysis», *Renew. Energy*, vol. 35, n. 1, pagg. 122–127, gen. 2010, doi: 10.1016/j.renene.2009.03.034.
- [9] «Making a Difference: Geothermal Heat Pumps», *Energy.gov*. <https://www.energy.gov/eere/articles/making-difference-geothermal-heat-pumps> (consultato giu. 02, 2021).
- [10] S. Caserini *et al.*, «Fattori di emissione di CO2 per consumi energetici e trasporti per gli inventari i gas serra degli atenei italiani», *Ing. Dell'Ambiente*, vol. 6, n. 1, pagg. 43–59, apr. 2019, doi: 10.32024/ida.v6i1.207.
- [11] «Fattori di emissione per la produzione ed il consumo di energia elettrica in Italia». <http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni/fattori-di-emissione-per-la-produzione-ed-il-consumo-di-energia-elettrica-in-italia/view> (consultato giu. 07, 2021).
- [12] A. Casasso, P. Capodaglio, F. Simonetto, e R. Sethi, «Environmental and Economic Benefits from the Phase-out of Residential Oil Heating: A Study from the Aosta Valley Region (Italy)», *Sustainability*, vol. 11, n. 13, pag. 3633, lug. 2019, doi: 10.3390/su11133633.
- [13] S. K. Saarikoski, M. K. Sillanpää, K. M. Saarnio, R. E. Hillamo, A. S. Pennanen, e R. O. Salonen, «Impact of Biomass Combustion on Urban Fine Particulate Matter in Central and Northern Europe», *Water, Air, Soil Pollut.*, vol. 191, n. 1–4, pagg. 265–277, giu. 2008, doi: 10.1007/s11270-008-9623-1.
- [14] D. A. Sarigiannis, S. P. Karakitsios, e M. V. Kermenidou, «Health impact and monetary cost of exposure to particulate matter emitted from biomass burning in large cities»,

- Sci. Total Environ.*, vol. 524–525, pagg. 319–330, 2015, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.108>.
- [15] D. Saner, R. Juraske, M. Kübert, P. Blum, S. Hellweg, e P. Bayer, «Is it only CO₂ that matters? A life cycle perspective on shallow geothermal systems», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, pagg. 1798–1813, 2010.
- [16] L. Eppelbaum, I. Kutasov, e A. Pilchin, *Applied Geothermics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. doi: 10.1007/978-3-642-34023-9.
- [17] A. Casasso e R. Sethi, «G.POT: A quantitative method for the assessment and mapping of the shallow geothermal potential», *Energy*, vol. 106, pagg. 765–773, lug. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.03.091.
- [18] P. Eskilson, «Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes», *PhD Thesis - Lund University*, 1987. <http://bit.ly/2JCl6Be>
- [19] G. Hellstrom e B. Sanner, *Earth Energy Designer, User Manual Version 2.0*. 2000.
- [20] M. Philippe, Pe. Michel Bernier PhD, e D. Marchio, «Sizing calculation spreadsheet: Vertical geothermal borefields», *Ashrae J.*, vol. 52, pag. 20, 2010.
- [21] UNI, «Norma UNI 11466:2012. Sistemi geotermici a pompa di calore - Requisiti per il dimensionamento e la progettazione», 2012. <https://bit.ly/3704oYC>
- [22] A. Acquaviva *et al.*, «Energy Signature Analysis: Knowledge at Your Fingertips», in *2015 IEEE International Congress on Big Data*, New York City, NY, USA, giu. 2015, pagg. 543–550. doi: 10.1109/BigDataCongress.2015.85.
- [23] ARPA Piemonte, «Annali meteorologici ed idrologici - Banca dati meteorologica». https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/accesso-ai-dati/annali_meteoidrologici/annali-meteo-idro/banca-dati-meteorologica.html (consultato apr. 26, 2021).
- [24] H. S. Carslaw e J. C. Jaeger, *Conduction of heat in solids*, 2nd ed. Oxford [Oxfordshire] : New York: Clarendon Press ; Oxford University Press, 1986.
- [25] A. Casasso *et al.*, «Ground source heat pumps in Aosta Valley (NW Italy): Assessment of existing systems and planning tools for future installations», *Rendiconti Online Soc. Geol. Ital.*, vol. 46, pagg. 59–66, 2018, doi: 10.3301/ROL.2018.53.
- [26] J. E. Low, F. A. Loveridge, W. Powrie, e D. Nicholson, «A comparison of laboratory and in situ methods to determine soil thermal conductivity for energy foundations and other ground heat exchanger applications», *Acta Geotech.*, vol. 10, n. 2, pagg. 209–218, 2015.
- [27] J. Luo *et al.*, «Determination of the thermal conductivity of sandstones from laboratory to field scale», *Environ. Earth Sci.*, vol. 75, n. 16, pag. 1158, ago. 2016, doi: 10.1007/s12665-016-5939-0.
- [28] C. Sáez Blázquez, A. Farfán Martín, I. Martín Nieto, P. Carrasco García, L. S. Sánchez Pérez, e D. González Aguilera, «Thermal conductivity map of the Avila region (Spain) based on thermal conductivity measurements of different rock and soil samples», *Geothermics*, vol. 65, pagg. 60–71, gen. 2017, doi: 10.1016/j.geothermics.2016.09.001.
- [29] W. F. Waite, L. Y. Gilbert, W. J. Winters, e D. H. Mason, «Estimating thermal diffusivity and specific heat from needle probe thermal conductivity data», *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 77, n. 4, pag. 044904, 2006.
- [30] Y. A. Popov, D. F. C. Pribnow, J. H. Sass, C. F. Williams, e H. Burkhardt, «Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning», *Geothermics*, vol. 28, pagg. 253–276, apr. 1999, doi: Doi 10.1016/S0375-6505(99)00007-3.

- [31] S. Xu *et al.*, «Thermal properties of carbon nanofiber reinforced high-density polyethylene nanocomposites», *J. Compos. Mater.*, vol. 49, n. 7, pagg. 795–805, mar. 2015, doi: 10.1177/0021998314525980.
- [32] GRETA, «GRETA. Near-surface Geothermal Resources in the Territory of the Alpine Space», 2018. <https://www.alpine-space.eu/projects/greta> (consultato set. 03, 2021).
- [33] J. D. Spitler e S. E. A. Gehlin, «Thermal response testing for ground source heat pump systems—An historical review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 50, pagg. 1125–1137, ott. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.05.061.
- [34] Verein Deutsche Ingenieure (VDI), «VDI 4640 sheet 2. Thermal use of the underground - Ground source heat pump systems», *Verein Deutsche Ingenieure (VDI)*, 2015. <http://bit.ly/30z50zm>
- [35] G. Dalla Santa *et al.*, «An updated ground thermal properties database for GSHP applications», *Geothermics*, vol. 85, pag. 101758, mag. 2020, doi: 10.1016/j.geothermics.2019.101758.
- [36] CNR-IGG e ARPA Piemonte, «GeoPiemonte - Carta Geologica 1:250.000», *WebGIS ARPA Piemonte*, 2017. <https://bit.ly/3mVzQ3y> (consultato set. 02, 2021).
- [37] F. Piana *et al.*, «Geology of Piemonte region (NW Italy, Alps–Apennines interference zone)», *J. Maps*, vol. 13, n. 2, pagg. 395–405, nov. 2017, doi: 10.1080/17445647.2017.1316218.
- [38] Regione Piemonte, «Piano di Tutela delle Acque della Regione Piemonte», Regione Piemonte, 2007. [Online]. Disponibile su: <https://bit.ly/37UOSyq>
- [39] S. Lo Russo, «La Carta Idrogeologica schematica del Piemonte: strumento per la pianificazione delle risorse idriche sotterranee», Politecnico di Torino, Torino, 2004.
- [40] A. Bove *et al.*, «Idrogeologia della Pianura Piemontese (Hydrogeology of the Piemonte Plain, NW Italy)», Regione Piemonte, Università degli Studi di Torino - DST, 2005. Consultato: lug. 04, 2019. [Online]. Disponibile su: http://www.datigeo-piem-download.it/direct/Geoportale/RegionePiemonte//Acqua/Idrogeologia_pianura_piemonte_se.pdf
- [41] G. P. Beretta *et al.*, «Progetto interregionale sorveglianza e monitoraggio acque sotterranee PRISMAS-Risultati metodologici», ARPA Umbria, 2000.
- [42] R. Balsotti *et al.*, «PRISMAS: Il monitoraggio delle Acque Sotterranee nella Regione Piemonte», 2004.
- [43] M. Civita *et al.*, «Provincia di Cuneo - Studio e valutazione della vulnerabilità intrinseca delle acque sotterranee.», Provincia di Cuneo, 2005.
- [44] E. Di Sipio *et al.*, «Subsurface thermal conductivity assessment in Calabria (southern Italy): a regional case study», *Environ. Earth Sci.*, vol. 72, n. 5, pagg. 1383–1401, set. 2014, doi: 10.1007/s12665-014-3277-7.
- [45] D. Banks, J. G. Withers, G. Cashmore, e C. Dimelow, «An overview of the results of 61 *in situ* thermal response tests in the UK», *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.*, vol. 46, n. 3, pagg. 281–291, ago. 2013, doi: 10.1144/qjgeh2013-017.
- [46] M. Gwadera, B. Larwa, e K. Kupiec, «Undisturbed Ground Temperature - Different Methods of Determination». https://www.researchgate.net/publication/320979466_Undisturbed_Ground_Temperature_-Different_Methods_of_Determination (consultato apr. 26, 2021).
- [47] D. Banks, *An introduction to thermogeology: ground source heating and cooling*. New York: John Wiley & Sons, 2012.

- [48] ARPA Piemonte, «Indagine geotermometrica sui piezometri della rete di monitoraggio quantitativa regionale», 2009. <https://bit.ly/3l5QEnr>
- [49] MISE, «Zonazione geotermica del territorio italiano», 1994. <https://bit.ly/3l4aeRd>
- [50] MISE, «Inventario delle risorse geotermiche nazionali», 1994. <https://bit.ly/2WvifV3>
- [51] H. N. Pollack, S. J. Hurter, e J. R. Johnson, «Heat flow from the earth's interior: analysis of the global data set», *Rev. Geophys.*, vol. 31, pagg. 267–280, 1993, doi: 10.1029/93RG01249.
- [52] M. Ouzzane, P. Eslami-Nejad, M. Badache, e Z. Aidoun, «New correlations for the prediction of the undisturbed ground temperature», *Geothermics*, vol. 53, pagg. 379–384, gen. 2015, doi: 10.1016/j.geothermics.2014.08.001.
- [53] Signorelli, S., Kohl, T., «Regional ground surface temperature mapping from meteorological data», *Glob. Planet. Change*, vol. 40, n. 3–4, pagg. 267–284, nov. 2003, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2003.08.003>.
- [54] I. Al-Hinti, A. Al-Muhtady, e W. Al-Kouz, «Measurement and modelling of the ground temperature profile in Zarqa, Jordan for geothermal heat pump applications», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 123, pagg. 131–137, ago. 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.107.
- [55] D. Barbero *et al.*, «Underground temperature logs for well field monitoring», *GNGTS 2016*, 2016. <https://bit.ly/39gE5PD> (consultato mar. 26, 2021).
- [56] S. K. Shah, L. Aye, e B. Rismanchi, «Undisturbed ground temperature in Melbourne», Dhaka, Bangladesh, 2019, pag. 080001. doi: 10.1063/1.5115928.
- [57] P. D. Pouloupatis, G. Florides, e S. Tassou, «Measurements of ground temperatures in Cyprus for ground thermal applications», *Renew. Energy*, vol. 36, n. 2, pagg. 804–814, feb. 2011, doi: 10.1016/j.renene.2010.07.029.
- [58] A. Fernández, E. Mands, S. Burkhard, M. Sauer, e L. Novelle, «Underground diurnal and seasonal energy storage for a cooling and heating system in a retail building in Jerez de la Frontera / Spain», presentato al The 12th International Conference on Energy Storage, Lleida, Spain, 2012. [Online]. Disponibile su: <https://www.ingeo.es/files/noticias/2.pdf>
- [59] S. Javed, J. D. Spitler, e P. Fahlén, «An Experimental Investigation of the Accuracy of Thermal Response Tests Used to Measure Ground Thermal Response», *ASHRAE Trans.*, vol. 117(1), pagg. 13–21.
- [60] UNI, «UNI 10349-1:2016. Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradianza solare nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata», 2016. <https://bit.ly/3DyMnQy> (consultato ago. 30, 2021).
- [61] ISPRA, «Consumi energetici e heating degree days (HDD) a confronto. Proiezioni al 2050 degli HDD in differenti scenari climatici», 2017. https://www.isprambiente.gov.it/files2018/pubblicazioni/rapporti/R_277_17_Consumienergetici_HDD.pdf (consultato ago. 30, 2021).
- [62] ARPA Piemonte, «Indicatori climatici». http://rsaonline.arpa.piemonte.it/meteo-clima50/clima_ed_indicatori_02.htm (consultato giu. 01, 2021).
- [63] P. Baggio, «Nuove norme sui dati climatici: l'aggiornamento delle UNI 10349», 2017. <https://bit.ly/3zuRDSG> (consultato set. 03, 2021).

- [64] E. Fabrizio, M. Ferrara, G. Urone, S. P. Corgnati, S. Pronati, e M. Filippi, «Performance Assessment of a Solar Assisted Ground Source Heat Pump in a Mountain Site», *Energy Procedia*, vol. 78, pagg. 2286–2291, nov. 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.366.
- [65] A. Casasso e R. Sethi, «Efficiency of closed loop geothermal heat pumps: A sensitivity analysis», *Renew. Energy*, vol. 62, pagg. 737–746, 2014, doi: 10.1016/j.renene.2013.08.019.
- [66] A. Casasso e R. Sethi, «Sensitivity Analysis on the Performance of a Ground Source Heat Pump Equipped with a Double U-pipe Borehole Heat Exchanger», *Energy Procedia*, vol. 59, pagg. 301–308, 2014, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.381>.
- [67] A. Angelotti, L. Alberti, I. La Licata, e M. Antelmi, «Energy performance and thermal impact of a Borehole Heat Exchanger in a sandy aquifer: Influence of the groundwater velocity», *Energy Convers. Manag.*, vol. 77, pagg. 700–708, 2014, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.10.018>.
- [68] V. Corrado, I. Ballarini, e S. P. Corgnati, «Fascicolo sulla Tipologia Edilizia Italiana», Politecnico di Torino, Torino, 2014. Consultato: gen. 08, 2021. [Online]. Disponibile su: <https://episcopo.eu/building-typology/country/it.html>
- [69] I. Ballarini, S. P. Corgnati, e V. Corrado, «Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock: The experience of TABULA project», *Energy Policy*, vol. 68, pagg. 273–284, mag. 2014, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.027>.
- [70] ISTAT, «I consumi energetici delle famiglie (Energetic consumption of Italian families, divided by Region)», dic. 15, 2014. <https://www.istat.it/it/archivio/142173> (consultato set. 17, 2018).
- [71] TEP S.r.l., *Software ANIT*. Italia: ANIT, 2021. Consultato: mar. 29, 2021. [Online]. Disponibile su: <https://www.anit.it/software-anit/>
- [72] Regione Piemonte, «Prezzario», 2020. Consultato: mar. 31, 2021. [Online]. Disponibile su: <https://www.regione.piemonte.it/web/temi/protezione-civile-difesa-suolo-opere-pubbliche/opere-pubbliche/prezzario>
- [73] Blocon AB, *EED – Earth Energy Designer*. [Online]. Disponibile su: <https://buildingphysics.com/eed-2/>
- [74] Eurostat, «Database - Energy», *Eurostat - Your key to European statistics*, 2020. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/database> (consultato set. 17, 2021).
- [75] Camera di Commercio di Torino, «Listino quindicinale prezzi», 2020. <https://www.to.camcom.it/listino-quindicinale> (consultato feb. 25, 2021).
- [76] Camera di commercio di Cuneo, «Home page». <https://www.cn.camcom.it/> (consultato mag. 25, 2021).
- [77] Camera di Commercio di Piacenza, «Home page». <https://www.pc.camcom.it/> (consultato mag. 25, 2021).
- [78] Camera di Commercio di Avellino, «Home page». <https://www.av.camcom.it/> (consultato mag. 25, 2021).
- [79] Camera di commercio di Alessandria, «Home page». <http://www.al.camcom.gov.it/> (consultato mag. 25, 2021).
- [80] Camera di Commercio Biella e Vercelli - Novara Varbano Cusio Ossola, «Listino settimanale dei prezzi all'ingrosso sulla piazza di Vercelli». [Online]. Disponibile su: <https://www.pno.camcom.it/>
- [81] Camera di Commercio di Cremona, «Home page». <https://www.cr.camcom.it/> (consultato mag. 25, 2021).

- [82] Agraria Tocco, «Agraria Tocchio - Pellets & legna». <https://agrariatocchio.jimdo-free.com/> (consultato mag. 24, 2021).
- [83] Silver Solutions, «Vendita legna da ardere, pellets e prodotti per riscaldamento e combustibili». <http://www.silversolutions.it/> (consultato mag. 24, 2021).
- [84] OpusSiena, «OPUS - Caminetti e stufe», *Opus*. <https://www.opussiena.it/caminetti-e-stufe/> (consultato mag. 24, 2021).
- [85] La Veneta Agricola s.r.l., «La Veneta Agricola - Home», *La Veneta Agricola*. <http://www.veneta-agricola.it/> (consultato mag. 24, 2021).
- [86] Timber Yard s.r.l.s., «Timberyard - Vendita pellet online». <http://www.timberyardsrl.com/> (consultato mag. 24, 2021).
- [87] GT Carburanti s.n.c., «Pellet – GT Carburanti». <https://www.gtcarburanti.it/pellet/> (consultato mag. 24, 2021).
- [88] BluEnergy s.r.l., «BluEnergy - Vendita pellet». <https://www.bluenergy.eu/prodotti-e-servizi/vendita-pellet-in-sacchetti-e-big-bag.html> (consultato mag. 24, 2021).
- [89] Pelletbo distribuzione s.r.l., «PelletBO - Home». <https://pelletbo.it/> (consultato mag. 24, 2021).
- [90] Agrimondo - Carelli s.n.c., «Pellet». <https://www.agri-mondo.it/categoria-prodotto/pellet/> (consultato mag. 24, 2021).
- [91] Pellet a casa tua - Logistica Maceratese s.r.l., «Pellet a casa tua - Home». <https://www.pelletacasatua.it/> (consultato mag. 24, 2021).
- [92] Maison Pellet, «Maison Pellet - Home». <https://www.maisonpellet.it/> (consultato mag. 24, 2021).
- [93] Gestore dei Mercati Energetici GME S.p.A., «Esiti Mercati». <https://www.mercatoelettrico.org/it/> (consultato feb. 25, 2021).
- [94] ENEA, «Potere calorifico». <https://www.enea.it/it/seguici/le-parole-dellenergia/glossario/parole/potere-calorifico> (consultato giu. 07, 2021).
- [95] Regione Piemonte, «L'energia del legno - Nozioni, concetti e numeri di base». Regione Piemonte, 2004. Consultato: giu. 07, 2021. [Online]. Disponibile su: https://www.regione.piemonte.it/web/sites/default/files/media/documenti/2018-12/energia_del_legno._nozioni_concetti_e_numeri_di_base.pdf
- [96] Commissione Europea, «Piano per la ripresa dell'Europa», *Commissione europea - European Commission*. https://ec.europa.eu/info/strategy/recovery-plan-europe_en (consultato mag. 05, 2021).
- [97] KPMG, «Equity Market Risk Premium – Research Summary». <https://indialogue.io/clients/reports/public/5d9da61986db2894649a7ef2/5d9da63386db2894649a7ef5> (consultato mag. 05, 2021).
- [98] Il Sole 24 Ore, «Obbligazioni BTP 10A - Analisi obbligazionari - Il Sole 24 Ore». ilsole24ore.com/finanza/obbligazioni/spread/GBITL10J.MTS (consultato mag. 05, 2021).
- [99] Il Sole 24 Ore, «IRS | 24 Ore Mutui Online». <https://mutuionline.24oreborsaonline.ilsole24ore.com/guide-mutui/irs.asp#storico> (consultato mag. 05, 2021).
- [100] Regione Piemonte, «Piano Regionale di Qualità dell'Aria (PRQA)», *Regione Piemonte*. <https://www.regione.piemonte.it/web/temi/ambiente-territorio/ambiente/aria/piano-regionale-qualita-dellaria-prqa> (consultato giu. 04, 2021).
- [101] Regione Piemonte, «Catasto impianti termici», *Servizionline*. <https://servizi.regione.piemonte.it/catalogo/catasto-impianti-termici> (consultato apr. 07, 2021).

- [102] ENEA, «Archivio Pubblicazioni - Rapporti annuali detrazioni fiscali». <https://www.energiaenergetica.enea.it/pubblicazioni/archivio-pubblicazioni.html> (consultato apr. 07, 2021).
- [103] «RSG - Registro regionale delle Sonde Geotermiche». <https://www.regione.lombardia.it/wps/portal/istituzionale/HP/DettaglioServizio/servizi-e-informazioni/Enti-e-Operatori/Ambiente-ed-energia/Energia/Fonti-rinnovabili/rsg-registro+sonde-geotermiche/rsg-registro-sonde-geotermiche> (consultato apr. 08, 2021).
- [104] Assoclimate, «Studi di mercato». <https://www.anima.it/associazioni/elenco/assoclimate/attivita/pubblicazioni/studi-di-mercato.kl> (consultato apr. 07, 2021).
- [105] J. W. Lund e A. N. Toth, «Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review», *Geothermics*, vol. 90, pag. 101915, feb. 2021, doi: 10.1016/j.geothermics.2020.101915.
- [106] European Heat Pump Association (EHPA), «Heat pump sales overview». http://www.stats.ehpa.org/hp_sales/story_sales/ (consultato apr. 07, 2021).
- [107] EurObserv'ER, «All Heat pumps barometers - Archives», *EurObserv'ER*. <https://www.eurobserv-er.org/category/all-heat-pumps-barometers/> (consultato apr. 07, 2021).
- [108] P. Johansson, «A Silent Revolution: The Swedish Transition towards Heat Pumps, 1970-2015», 2017.
- [109] Gehlin, S., Andersson, O., «Geothermal Energy Use, Country Update for Sweden», presentato al European Geothermal Congress 2019, Den Haag, The Netherlands, giu. 2019. [Online]. Disponibile su: <http://europeangeothermalcongress.eu/wp-content/uploads/2019/07/CUR-28-Sweden.pdf>
- [110] Boissavy, C., Henry, L., Genter, A., Pomart, A., Rocher, P., Schmidlé-Bloch, V., «Geothermal Energy Use, Country Update for France», presentato al European Geothermal Congress 2019, Den Haag, The Netherlands, giu. 2019. [Online]. Disponibile su: https://www.researchgate.net/publication/343837526_Geothermal_Energy_Use_Country_Update_for_France
- [111] «3/02301: CAMERA - ITER ATTO». <https://aic.camera.it/aic/scheda.html?numero=3-02301&ramo=C&leg=18> (consultato lug. 08, 2021).
- [112] Regione Piemonte, «Proposta di Piano Energetico Ambientale Regionale», 2019. [Online]. Disponibile su: https://www.regione.piemonte.it/web/sites/default/files/media/documenti/2020-05/pear_8_11_2019_def.pdf
- [113] Luce-gas, «Contratto Serbatoio GPL: comodato d'uso, affitto o proprietà?», *Luce-gas*. <https://luce-gas.it/gpl/serbatoio/contratto> (consultato feb. 24, 2021).
- [114] Gestore dei Servizi Energetici GSE S.p.A., «Sostituzione di impianti di climatizzazione invernale esistenti con sistemi ibridi a pompa di calore.» Consultato: ott. 11, 2021. [Online]. Disponibile su: https://www.gse.it/servizi-per-te_site/efficienza-energetica_site/conto-termico_site/interventi-incentivabili_site/Documents/Gli%20IM-PIANTI%20IBRID%20A%20POMPA%20DI%20CALORE%20%282E%29%20nelle%20REGOLE%20APPLICATIVE.pdf
- [115] ENEA, «Vademecum: Sistemi ibridi». gen. 25, 2021. Consultato: ott. 11, 2021. [Online]. Disponibile su: https://www.energiaenergetica.enea.it/media/attachments/2021/02/12/sistemi_ibridi.pdf
- [116] IEA, «Heat pumps», giu. 2020. <https://www.iea.org/reports/heat-pumps> (consultato ott. 11, 2021).

- [117] Sorgenia, «SCAMBIO SUL POSTO: COME FUNZIONA», *Sorgenia*, ott. 06, 2020. <https://www.sorgenia.it/guida-energia/scambio-sul-posto-come-funziona> (consultato feb. 25, 2021).
- [118] Gestore dei Servizi Energetici GSE S.p.A., «Scambio sul posto», 2019. <https://www.gse.it/servizi-per-te/fotovoltaico/scambio-sul-posto> (consultato mag. 05, 2021).
- [119] F. Piana *et al.*, «Geological Map of Piemonte Region at 1:250,000 scale. Explanatory Notes», 2017. <https://bit.ly/374a0Bh>
- [120] USGS, «Thermal properties of rocks», 1988. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr88441>
- [121] BGS, «Ground Source Heat Pumps: Development of GeoReports for potential site characterisation», *British Geological Survey*, 2004. <http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/509813/1/CR04268N.pdf>
- [122] A. Casasso *et al.*, «Ground Source Heat Pumps in Aosta Valley (NW Italy): assessment of existing systems and planning tools for future installations», *Rendiconti Online Della Soc. Geol. Ital.*, vol. 46, pagg. 59–66, nov. 2018, doi: 10.3301/ROL.2018.53.
- [123] SKB, «Thermal properties. Side descriptive modelling Forsmark - stage 2.2», 2007. <https://bit.ly/3l6DZAO>