

Geotermia a bassa entalpia: aspetti ambientali, energetici ed economici

Il Progetto INTERREG Spazio Alpino GRETA in Valle d'Aosta

Settembre 2018

Progetto cofinanziato dal Fondo Europeo di Sviluppo Regionale attraverso il programma Spazio Alpino 2014-2020



Geotermia a bassa entalpia: aspetti ambientali, energetici ed economici

////////////////////////////////////

Il Progetto Interreg Alpine Space GRETA in Valle d'Aosta

Settembre 2018



This project is co-financed by the European Regional Development Fund through the Interreg Alpine Space programme

Progetto cofinanziato dal Fondo Europeo di Sviluppo Regionale attraverso il programma Spazio Alpino 2014-2020

Testi a cura di: Pietro Capodaglio (ARPA Valle d'Aosta), Alessandro Baietto (GDP Consultants), Alessandro Casasso e Simone Della Valentina (Politecnico di Torino- DIATI), con contributi di:

- Par. B.3.2: Eugenio Andorno e Daniele Caldera (Geonovis srl) per il caso studio di Valtournenche; Maurizio Saggese (consulente Regione Autonoma Valle d'Aosta) per i casi studio di Maison Lostan, Saint-Martin-de-Corléans e Pian di Verra
- Par. B.3.3: Dušan Rajver (GEOZS Servizio Geologico Sloveno)
- Par. B.3.4 e B.3.5: Arianna Bucci (Politecnico Torino – DIATI) e Fabian Boettcher(TUM- Università Tecnica di Monaco di Baviera)
- Par. B.3.6: Pietro Zambelli, Valentina d'Alonzo e Roberto Vaccaro (EURAC Bolzano)
- Par. B.3.7: Marcela Olmedo (mediatore scientifico del progetto GRETA)

Si ringraziano inoltre Sylvie Chaussod (assistenza tecnica del progetto GRETA), Rosalia Guglielminotti (COA Energia Finaosta) e Raoul Cavorsin (Assessorato Attività Produttive, Energia, Politiche del lavoro e Ambiente della Regione Autonoma Valle d'Aosta)

Editing grafico: Kiya Grafica (Donnas)

Le figure con fonte BRGM sono state realizzate espressamente dallo studio “Œil pour Œil” per il progetto GRETA

Stampa: Tipografia Duc (Aosta)

In copertina: perforazione di sonde geotermiche in Comune di Nus (AO) – Archivio ARPA Valle d'Aosta.

Riproduzione autorizzata citando la fonte.

Si declina ogni responsabilità per l'utilizzo dei dati presentati nel testo.

Le dinamiche ambientali sono parte integrante delle sfide, delle trasformazioni, dei rischi e delle opportunità, dei problemi e dei drammi del mondo globalizzato contemporaneo. Il ruolo da esse giocato è centrale, ma non ancora adeguatamente percepito o riconosciuto.

In questo contesto, un ruolo importante che compete ad un'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente è lo sviluppo di procedure e tecniche volte al risparmio energetico ed alla riduzione complessiva degli impatti sull'ambiente connessi alla presenza e attività umana. In particolare, le attività di ricerca e sperimentazione scientifica e tecnica hanno oggi trovato esplicita affermazione nell'istituzione del Sistema Nazionale a rete per la Protezione dell'Ambiente – SNPA, con la legge 132 del 2016. Sul piano della ricerca finalizzata un valore fondamentale dell'azione di un'Agenzia per l'ambiente è dato dal radicamento sul proprio territorio, dalla conoscenza diretta delle sue caratteristiche peculiari e delle sue complesse specificità.

Tutto questo trova, per l'ARPA Valle d'Aosta, pieno riscontro e realizzazione nelle attività del progetto Interreg Spazio Alpino GRETA. La concretezza operativa per lo sviluppo di tecniche per l'utilizzo dell'energia geotermica a bassa temperatura è sviluppata con specifico riferimento all'ambiente alpino, sia per quanto riguarda natura e disponibilità della risorsa energetica rinnovabile, che per quanto attiene alle particolari esigenze di riscaldamento di un territorio montano, e alle conseguenti necessità di contenimento delle emissioni in atmosfera in aree divenute oggi particolarmente sensibili agli effetti dei cambiamenti climatici in corso.

Giovanni Agnesod

Direttore Generale ARPA Valle d'Aosta



SOMMARIO

PREMESSA.....	8
---------------	---

GENERALITÀ SUGLI IMPIANTI GEOTERMICI A BASSA ENTALPIA10

A.1 LE RISORSE GEOTERMICHE A BASSA ENTALPIA11

A.1.1 » LA TEMPERATURA NEL SOTTOSUOLO SUPERFICIALE.....	12
A.1.2 » FUNZIONAMENTO E COMPONENTI DI UN IMPIANTO GEOTERMICO.....	14
A.1.2.1 » Lo scambiatore geotermico.....	14
A.1.2.2 » La pompa di calore.....	15
A.1.2.3 » Il circuito di distribuzione.....	16
A.1.3 » EFFICIENZA DEGLI IMPIANTI GEOTERMICI.....	16
A.1.4 » SISTEMI A CIRCUITO CHIUSO (closed loop).....	17
A.1.5 » SISTEMI A CIRCUITO APERTO (open loop).....	20
A.1.6 » PERFORAZIONI.....	22
A.1.7 » PRINCIPALI ASPETTI TECNICI.....	23
A.1.8 » ASPETTI ECONOMICI.....	24

A.2 ASPETTI AMBIENTALI CONNESSI ALLA GEOTERMIA A BASSA ENTALPIA 25

A.2.1 » FATTORI LIMITANTI.....	25
A.2.2 » INDAGINI PRELIMINARI.....	26
A.2.3 » DATI PROGETTUALI RELATIVI AL SOTTOSUOLO.....	27
A.2.3.1 » Sistemi a circuito chiuso (closed loop).....	27
A.2.3.2 » Sistemi a circuito aperto (open loop).....	29
A.2.4 » RISCHI AMBIENTALI E RELATIVE PRECAUZIONI PREVENTIVE.....	30
A.2.4.1 » Alterazioni termiche nel sottosuolo.....	30
A.2.4.2 » Operazioni di perforazione.....	32
A.2.4.3 » Rottura della sonda geotermica.....	33
A.2.5 » INTERAZIONE CON LE ACQUE SOTTERRANEE.....	34
A.2.5.1 » Sistemi a circuito chiuso (closed loop).....	34
A.2.5.2 » Sistemi a circuito aperto (open loop).....	35

A.3 PRO E CONTRO..... 36

LA GEOTERMIA A BASSA ENTALPIA IN VALLE D'AOSTA41

B.1 ATTITUDINE DEL TERRITORIO VALDOSTANO AD OSPITARE APPLICAZIONI GEOTERMICHE..... 42

B.2 RISULTATI DI STUDI SPERIMENTALI PREGRESSI44

B.3 ATTIVITÀ DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE CONDOTTE NELL'AMBITO DEL PROGETTO GRETA46

B.3.1 » CENSIMENTO DEGLI IMPIANTI ESISTENTI.....	46
B.3.2 » CASI STUDIO.....	49
B.3.2.1 » Bar Pit Stop – Cervinia.....	49
B.3.2.2 » Maison Lostan – Aosta.....	50
B.3.2.3 » Museo di Saint-Martin-de-Corléans – Aosta.....	51
B.3.2.4 » Progetto di Pian di Verra (Alta Valle d'Ayas).....	52
B.3.3 » DETERMINAZIONE DELLA CONDUCIBILITÀ TERMICA SU CAMPIONI DI ROCCIA.....	54
B.3.4 » POTENZIALE GEOTERMICO DEGLI IMPIANTI A CIRCUITO CHIUSO.....	57
B.3.5 » POTENZIALE GEOTERMICO DEGLI IMPIANTI A CIRCUITO APERTO.....	60
B.3.6 » PIANIFICAZIONE ENERGETICA.....	65
B.3.6.1 » Introduzione alle analisi.....	65
B.3.6.2 » Metodologia sviluppata.....	66
B.3.6.3 » Risultati ottenuti.....	69
B.3.6.4 » Discussione dei risultati.....	74
B.3.7 » ASPETTI SOCIOLOGICI.....	76
B.3.7.1 » Contesto normativo.....	76
B.3.7.2 » Contesto finanziario.....	77
B.3.7.3 » Criticità e opportunità.....	77
B.3.7.4 » Considerazioni sull'investimento iniziale.....	78

B.4 CENNI NORMATIVI 79

B.4.1 » LEGISLAZIONE NAZIONALE.....	79
B.4.2 » LEGISLAZIONE REGIONALE IN VALLE D'AOSTA.....	80
B.4.2.1 » Impianti a circuito chiuso.....	80
B.4.2.2 » Impianti a circuito aperto.....	81

BIBLIOGRAFIA..... 82

SITOGRAFIA DEL PROGETTO GRETA 85

PREMESSA

L'energia geotermica a bassa temperatura (o bassa entalpia), contenuta nel terreno e nelle falde idriche a profondità inferiori a 200 m, è una fonte energetica rinnovabile sfruttabile per il riscaldamento e il raffrescamento di edifici, la produzione di acqua calda sanitaria e di caldo e/o freddo in processi industriali. Per portare l'energia termica estratta dal sottosuolo ad un livello utile per uno di questi utilizzi, si utilizza la pompa di calore, una macchina che trasferisce calore da un corpo a temperatura più bassa ad uno a temperatura più alta (processo che in natura non può avvenire spontaneamente). Le prime pompe di calore furono costruite a metà Ottocento e la sorgente termica più utilizzata è l'aria (PDC aerotermiche); tuttavia, negli ultimi 40 anni si sono diffuse le pompe di calore geotermiche. Dal punto di vista ambientale, il ricorso alle pompe di calore comporta principalmente il vantaggio di non causare alcuna emissione diretta di inquinanti in atmosfera; a scala globale, le pompe di calore portano ad una riduzione delle emissioni di gas serra rispetto ai combustibili fossili, e tale beneficio è maggiore con le pompe di calore geotermiche, più efficienti rispetto alle aerotermiche. Si tratta di una tecnologia che possiede grandi margini di espansione, soprattutto in virtù del fatto che il suo utilizzo è possibile pressoché ovunque sul territorio.

Tuttavia, rispetto alle reali potenzialità, lo sviluppo attuale delle pompe di calore geotermiche risulta limitato da una serie di fattori quali: l'elevato costo di installazione (pur compensato dai risparmi operativi), una scarsa conoscenza di base delle tecnologie geotermiche per la climatizzazione, una legislazione frammentaria e spesso complicata, nonché l'assenza della geotermia a bassa temperatura dalla pianificazione energetica locale e nazionale.

Per far fronte a queste criticità specifiche è nato il progetto **GRETA - near surface Geothermal Resources in the Territory of the Alpine space**; un intervento cofinanziato dal Programma di cooperazione transnazionale Spazio alpino 2014-2020 con l'obiettivo di migliorare l'utilizzo sostenibile delle risorse geotermiche a bassa entalpia per ottenere riduzioni sostanziali di emissioni di CO₂. Una finalità che si iscrive nel quadro della strategia "Europa 2020", che in ambito energetico ha individuato due obiettivi da realizzare entro il 2020: ridurre del 20% i consumi totali di energia e le emissioni di gas climalteranti (con riferimento al 1990) e portare la produzione di energia da fonti rinnovabili al 20% rispetto fabbisogno totale. Nell'ottica di una crescita sostenibile si promuove quindi l'uso efficiente delle risorse disponibili, sia attraverso il contenimento nell'uso di materie prime (ad esempio con il riciclo e il riuso), sia stimolando una progressiva transizione verso un'economia a basse emissioni di gas climalteranti (CO, CO₂, NO_x, SO_x ecc.). L'Italia ha già raggiunto la sua quota di produzione rinnovabile (17,4% nel 2016), ma nuovi e più ambiziosi obiettivi sono già stati fissati dall'UE per il 2030 (riduzione gas serra del 40% e riduzione dei consumi energetici del 27% rispetto al 1990, quota di produzione da fonti rinnovabili al 27%).

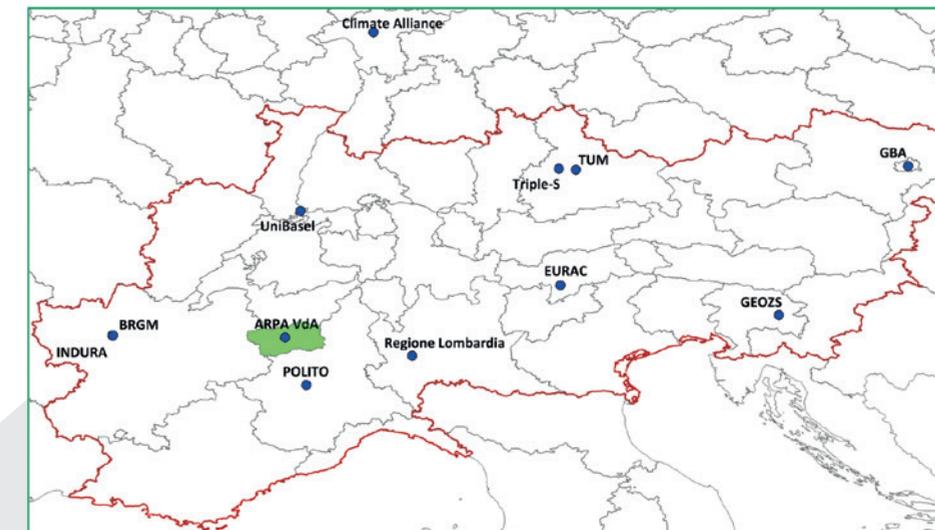
Il presente volume vuole illustrarne a grandi linee sia le ricadute ambientali positive che deriverebbero da un utilizzo più diffuso delle pompe di calore geotermiche, sia i risultati ottenuti dalla sperimentazione effettuata nell'ambito del

progetto GRETA sul territorio della Valle d'Aosta, una delle tre aree pilota sulle quali si sono concentrate alcune attività specifiche. Ciò al fine di fornire agli operatori locali del settore uno strumento di supporto decisionale utile per valutare preliminarmente l'opportunità di ricorrere alle pompe di calore geotermiche per climatizzare gli edifici in maniera sostenibile. In questa direzione, il progetto **GRETA** intende promuovere un contributo concreto della geotermia a bassa temperatura per l'autosufficienza energetica nelle regioni alpine, nelle quali sono particolarmente sentite le problematiche connesse ai cambiamenti climatici e, per motivi climatici, le spese energetiche per il riscaldamento degli edifici sono particolarmente elevate.

È chiaro che in questo contesto la geotermia a bassa entalpia può giocare un ruolo importante, in quanto risorsa rinnovabile, disponibile ovunque e priva di emissioni in atmosfera. Per coloro che volessero approfondire dal punto di vista tecnico alcune tematiche particolari si rimanda alla sitografia del progetto GRETA illustrata in appendice.

Il progetto Interreg **GRETA** (2016-2018) riunisce 12 partner europei di diversa estrazione provenienti da 6 paesi:

- tre istituti universitari (Università Tecnica di Monaco di Baviera-TUM, capofila del progetto; Politecnico di Torino-DIATI; Università di Basilea);
- tre servizi geologici nazionali (GBA, Austria; GEOZS, Slovenia; BRGM, Francia);
- due enti regionali (Regione Lombardia e ARPA Valle d'Aosta);
- due enti di ricerca (EURAC Bolzano e Climate Alliance);
- due enti privati (INDURA, Francia; TripleS, Germania).



GENERALITÀ SUGLI IMPIANTI GEOTERMICI A BASSA ENTALPIA

Il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici costituiscono la maggior parte della domanda finale di energia nell'Unione europea (circa l'80% in ambito domestico). Attualmente, la grande maggioranza di questa energia è generata dalla combustione di combustibili fossili, a sua volta responsabile di una quantità molto elevata di emissioni di CO₂ e di altri inquinanti nell'atmosfera.

Pertanto, nella prospettiva di ridurre le emissioni di CO₂ e di conseguenza contenere i cambiamenti climatici in corso, è importante trovare soluzioni efficienti basate sulle risorse rinnovabili non solo per la produzione di energia elettrica, ma anche per la climatizzazione degli edifici.

I sistemi geotermici a bassa entalpia rappresentano una tecnologia efficace e sostenibile per il riscaldamento e il raffreddamento degli edifici, grazie all'utilizzo di una sorgente energetica – il calore nel sottosuolo – disponibile ovunque, e sfruttabile senza produrre emissioni inquinanti in atmosfera.

A.1 LE RISORSE GEOTERMICHE A BASSA ENTALPIA

La geotermia a bassa temperatura (o, secondo il D.Lgs. 22/2010, a “bassa entalpia”) è una risorsa di energia termica rinnovabile che utilizza quale fonte energetica il calore a temperatura inferiore a 90°C. Gli impianti geotermici a pompa di calore, in particolare, sfruttano l'energia termica naturalmente disponibile nella porzione superficiale di sottosuolo (entro 200 m da piano campagna). Nella letteratura internazionale ci si riferisce a questo tipo di risorsa geotermica come *Near Surface Geothermal Energy (NSGE)* oppure *Shallow Geothermal Energy (SGE)*, sebbene anche le diciture Low Temperature e Low Enthalpy siano diffuse. Nella letteratura tecnico-scientifica italiana è comunemente utilizzata l'espressione “geotermia a bassa entalpia” e, riferendosi agli impianti, “pompe di calore geotermiche”.

Le risorse geotermiche a bassa entalpia sono utilizzate principalmente per il riscaldamento e il raffrescamento di edifici, la produzione di acqua calda sanitaria e di caldo e/o freddo nei processi industriali e per la conservazione alimentare. Nel caso di riscaldamento, di produzione di acqua calda sanitaria e di “caldo” di processo, il sottosuolo a basse profondità (primi 200 m circa) costituisce una sorgente per l'estrazione del calore; nel caso di raffrescamento e di “freddo” di processo, il sottosuolo costituisce invece uno scarico per la dissipazione del calore.

Il trasferimento del calore può essere effettuato tramite pozzi per acqua, sonde verticali, fondazioni speciali o anche scavi superficiali sviluppati orizzontalmente.

A.1.1 » LA TEMPERATURA NEL SOTTOSUOLO SUPERFICIALE

In generale l'energia geotermica è reperibile a differenti profondità e temperature, e quindi sfruttabile con diverse tecnologie: le risorse geotermiche di media (90-150°C) e alta temperatura (>150°C) sono rinvenibili solo in aree geologicamente attive come quelle vulcaniche o termali, mentre le risorse geotermiche a bassa entalpia sono sfruttabili in condizioni geologiche del tutto "normali" e a profondità inferiori a 200 m.

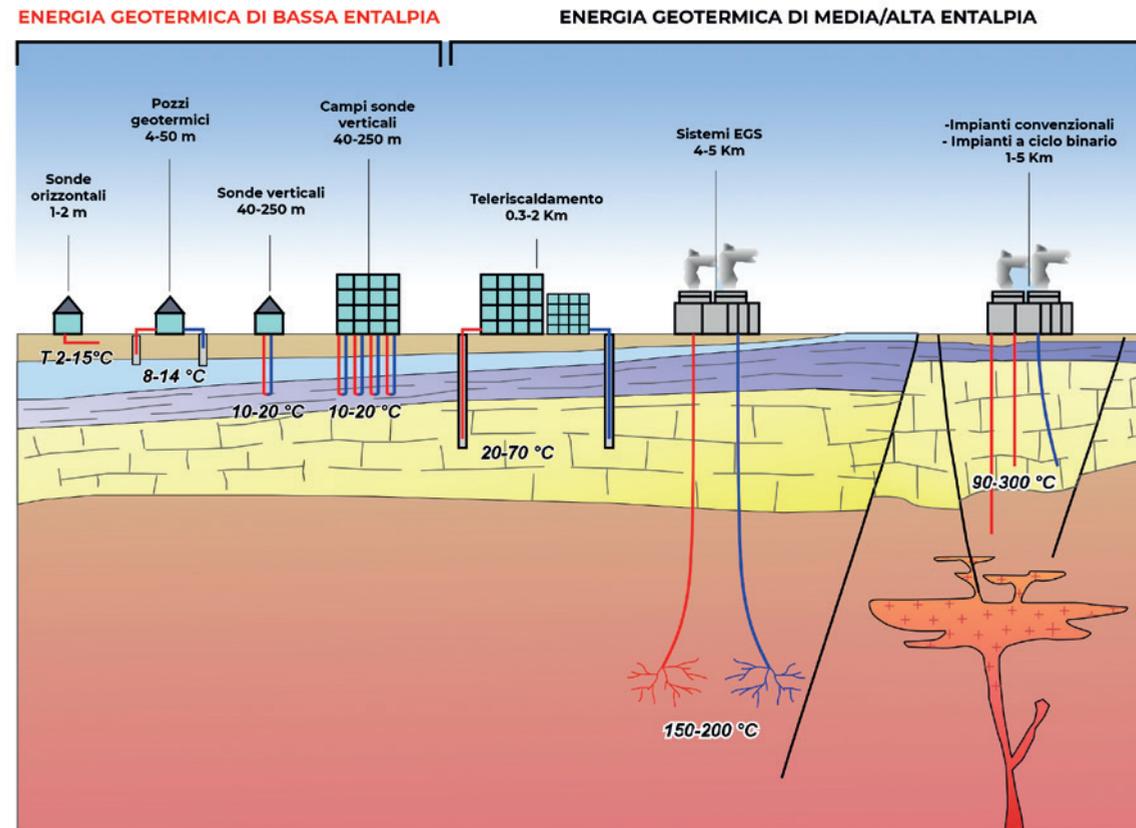


Fig. 1: Sezione ideale semplificata dei diversi sistemi geotermici e loro profondità e temperatura. Fonte GDP

I primi 15-20 m del sottosuolo risentono della temperatura dell'aria esterna e delle sue variazioni, seppur smorzate nel tempo, mentre al di sotto di questa fascia la temperatura subisce un incremento funzione del gradiente geotermico, pari tipicamente a circa 3°C ogni 100 m di profondità, rimanendo pressoché costante tutto l'anno ad una data profondità (Fig. 2). Tale stabilità rende il sottosuolo una sorgente estremamente adatta per scambiarsi calore: il terreno risulta più caldo dell'aria durante l'inverno e più fresco dell'aria durante l'estate, e questo spiega la maggiore efficienza delle pompe di calore geotermiche rispetto a quelle aerotermiche.

Il calore delle risorse geotermiche a bassa temperatura proviene, in misura prevalente, dalla radiazione solare e, in misura inferiore, dal flusso geotermico proveniente dagli strati inferiori della crosta terrestre, e dovuto sia all'energia liberata dalla Terra alla sua formazione e intrappolata nella parte interna (nucleo e mantello), sia al decadimento degli isotopi radioattivi presenti nella rosta stessa.

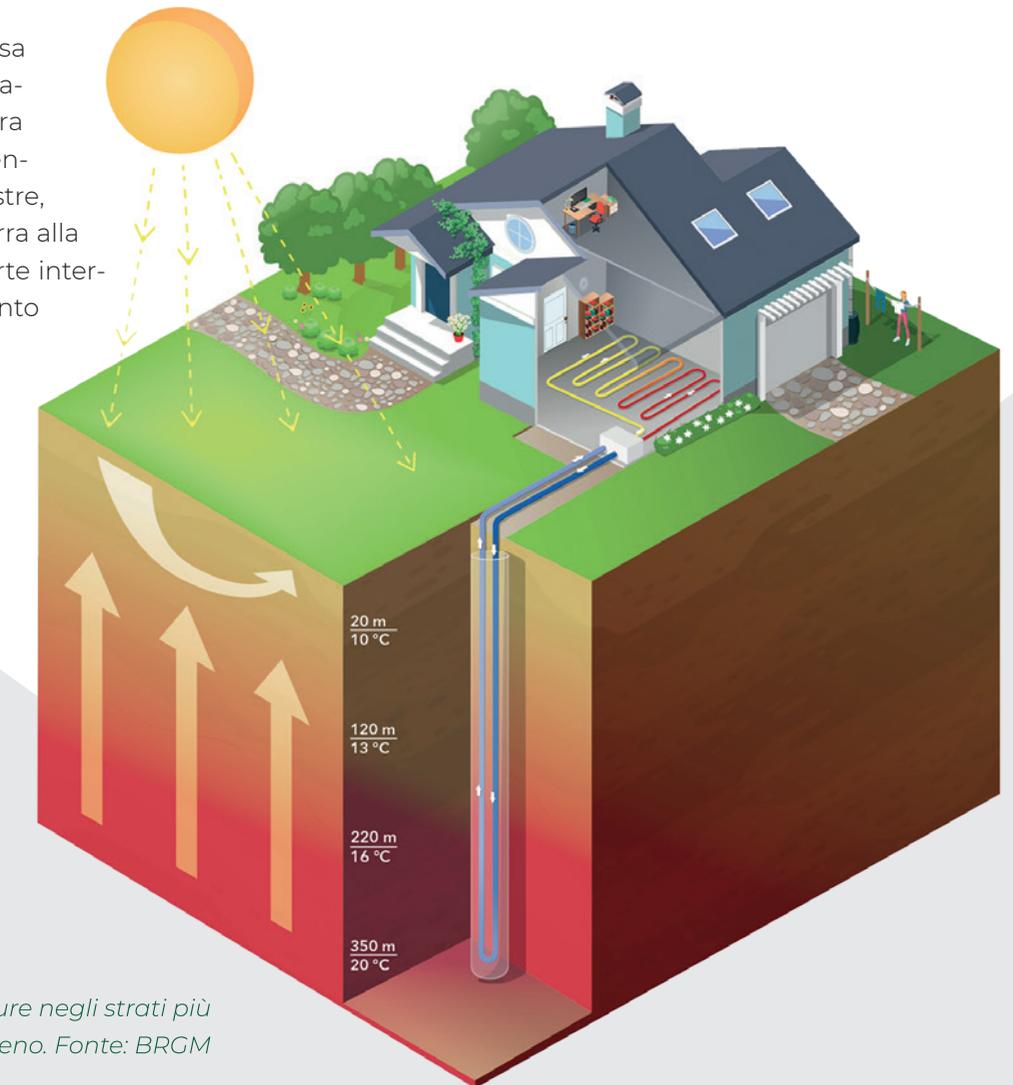


Fig. 2: Distribuzione delle temperature negli strati più superficiali del terreno. Fonte: BRGM

A.1.2 » FUNZIONAMENTO E COMPONENTI DI UN IMPIANTO GEOTERMICO

Un impianto geotermico a bassa entalpia è costituito da tre componenti principali: lo scambiatore geotermico, la pompa di calore e il circuito di distribuzione (Fig. 3).

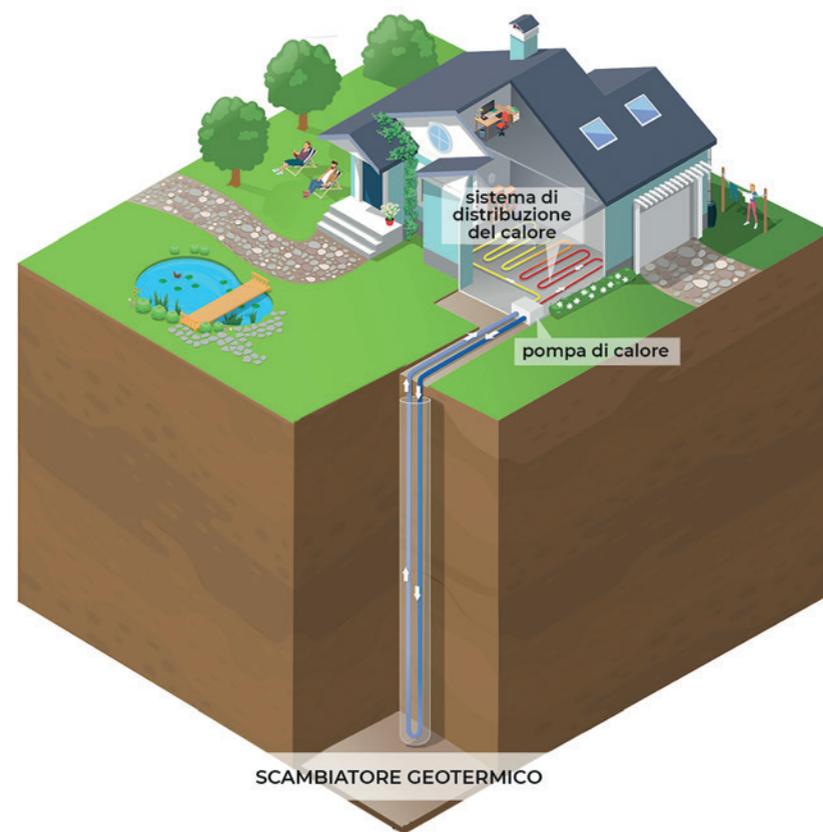


Fig. 3: Componenti di un impianto geotermico a pompa di calore. Fonte: BRGM

A.1.2.1 » Lo scambiatore geotermico

Lo scambiatore geotermico è adibito a catturare (o a dissipare) il calore nel sottosuolo utilizzando l'acqua di falda, o un fluido termovettore circolante in tubazioni chiuse (orizzontali o verticali). Gli impianti geotermici si dividono in due categorie: a circuito aperto (descritti in dettaglio al par. A.1.4) e a circuito chiuso (par. A.1.5).

I sistemi a circuito aperto sfruttano l'acqua di falda per lo scambio termico con la pompa di calore e sono tipicamente costituiti da un doppietto di pozzi (presa e resa) o un maggior numero di pozzi negli impianti più grandi. I sistemi a circuito chiuso, invece, scambiano calore con il terreno tramite un fluido termovettore circolante in tubi installati nel sottosuolo, di diverse tipologie: sonde verticali, serpentine orizzontali e geostrutture.

A.1.2.2 » La pompa di calore

La pompa di calore è un dispositivo, alimentato da energia elettrica, in grado di trasferire calore da una sorgente a temperatura minore ad un ambiente a temperatura maggiore: un processo che, per il secondo principio della termodinamica, in natura non può avvenire spontaneamente. Il funzionamento della pompa di calore, come quello di un comune frigorifero domestico, è basato sulla circolazione di un fluido refrigerante che assorbe e cede calore nei passaggi di fase, rispettivamente, liquido-vapore e vapore-liquido, in un ciclo termodinamico illustrato in Fig. 4. In modalità riscaldamento, il refrigerante passa dapprima in un **evaporatore** sotto forma di liquido a bassa temperatura ed evapora, assorbendo calore dalla sorgente (acqua o sottosuolo) a bassa temperatura; il vapore passa in un **compressore** che provoca un notevole incremento della sua pressione e temperatura; il vapore caldo passa nel **condensatore** dove, trasformandosi in liquido, cede l'energia termica ad una temperatura sufficientemente alta da potere essere usata per scaldare un edificio (o per produrre acqua calda sanitaria); infine, il liquido caldo passa in una **valvola di espansione** riducendo la sua pressione e temperatura, per tornare un liquido freddo e riprendere il ciclo. Nel periodo estivo il funzionamento della pompa di calore può essere invertito (in questo caso la pompa di calore viene definita **reversibile**): il calore viene sottratto all'edificio (che quindi si raffresca cedendo calore all'evaporatore) e reimpresso nel sottosuolo (il quale subisce quindi un riscaldamento relativo, ricevendo calore dal condensatore tramite lo scambiatore geotermico).

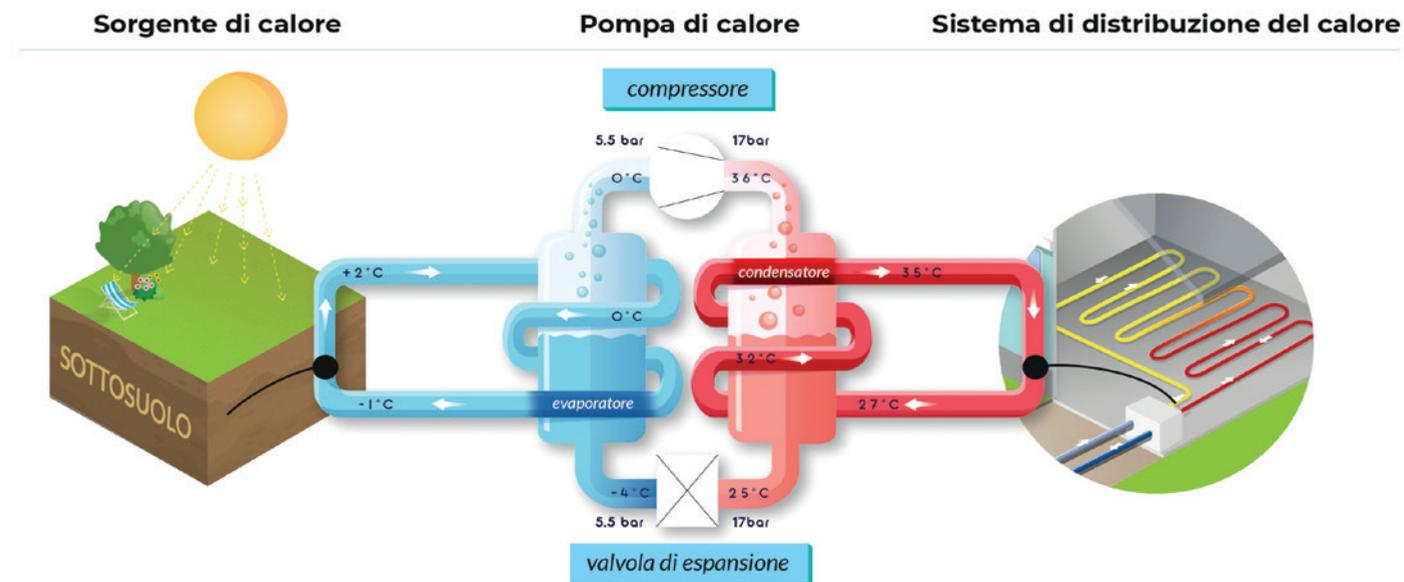


Fig. 4: Schema di funzionamento della pompa di calore. Fonte: BRGM

A.1.2.3 » *Il circuito di distribuzione*

Il circuito di distribuzione è adibito alla distribuzione del calore e/o del freddo all'interno dell'edificio. L'acqua riscaldata o raffrescata dalla pompa di calore viene fatta circolare in un impianto radiante (a parete o a pavimento) o in ventilconvettori, sistemi per i quali sono sufficienti temperature dell'ordine dei 30-45°C. Non sono invece indicati i termosifoni, che richiedono una temperatura di mandata attorno ai 70 °C.

A.1.3 » **EFFICIENZA DEGLI IMPIANTI GEOTERMICI**

Rispetto ai sistemi convenzionali di climatizzazione (caldaia a metano/GPL + chiller ad aria), le pompe di calore geotermiche offrono una riduzione dei consumi di energia primaria del 30-70% in riscaldamento e del 20-50% in raffrescamento.

In riscaldamento, infatti, la pompa di calore è in grado di estrarre dalla sorgente (aria, terreno o acqua) una quantità di energia molto maggiore (da 3 a 5 volte) dell'energia elettrica consumata: il rapporto tra l'energia termica fornita dall'impianto di distribuzione e l'energia elettrica consumata dalla pompa di calore è detto COP (Coefficient Of Performance). Se, ad esempio, COP=4, per fornire 4 kWh di energia all'edificio è sufficiente 1 kWh di energia elettrica (che aziona il compressore e infine si converte in calore), mentre gli altri 3 kWh termici sono estratti dal terreno. Mentre il COP di una pompa di calore aerotermica è generalmente intorno a 3, quello di una pompa di calore geotermica è attorno a 4 negli impianti a circuito chiuso e può arrivare a 5 in quelli a circuito aperto.

In raffrescamento, il rapporto tra il calore estratto dall'edificio (tramite i terminali) e l'energia elettrica consumata si chiama Energy Efficiency Ratio (EER). Anche in questo caso, le pompe di calore geotermiche permettono generalmente di raggiungere valori più alti di EER rispetto alla tipologia aerotermica.

A.1.4 » **SISTEMI A CIRCUITO CHIUSO (closed loop)**

I sistemi a circuito chiuso si distinguono in scambiatori orizzontali, geostrutture e sonde geotermiche (Fig. 5). Queste ultime sono decisamente più diffuse perché hanno una maggiore efficienza energetica e non necessitano, contrariamente alla prima tipologia, di un'ampia superficie per la loro installazione (sulla quale poi si devono rispettare pesanti vincoli d'uso). Le geostrutture rappresentano un mercato a tutt'oggi di nicchia poiché la loro applicazione è possibile solo nelle nuove costruzioni; i circuiti di scambio termico sono installati direttamente nelle opere di fondazione dell'edificio come i pali di fondazione, le platee, i diaframmi e, più recentemente, conci di galleria.

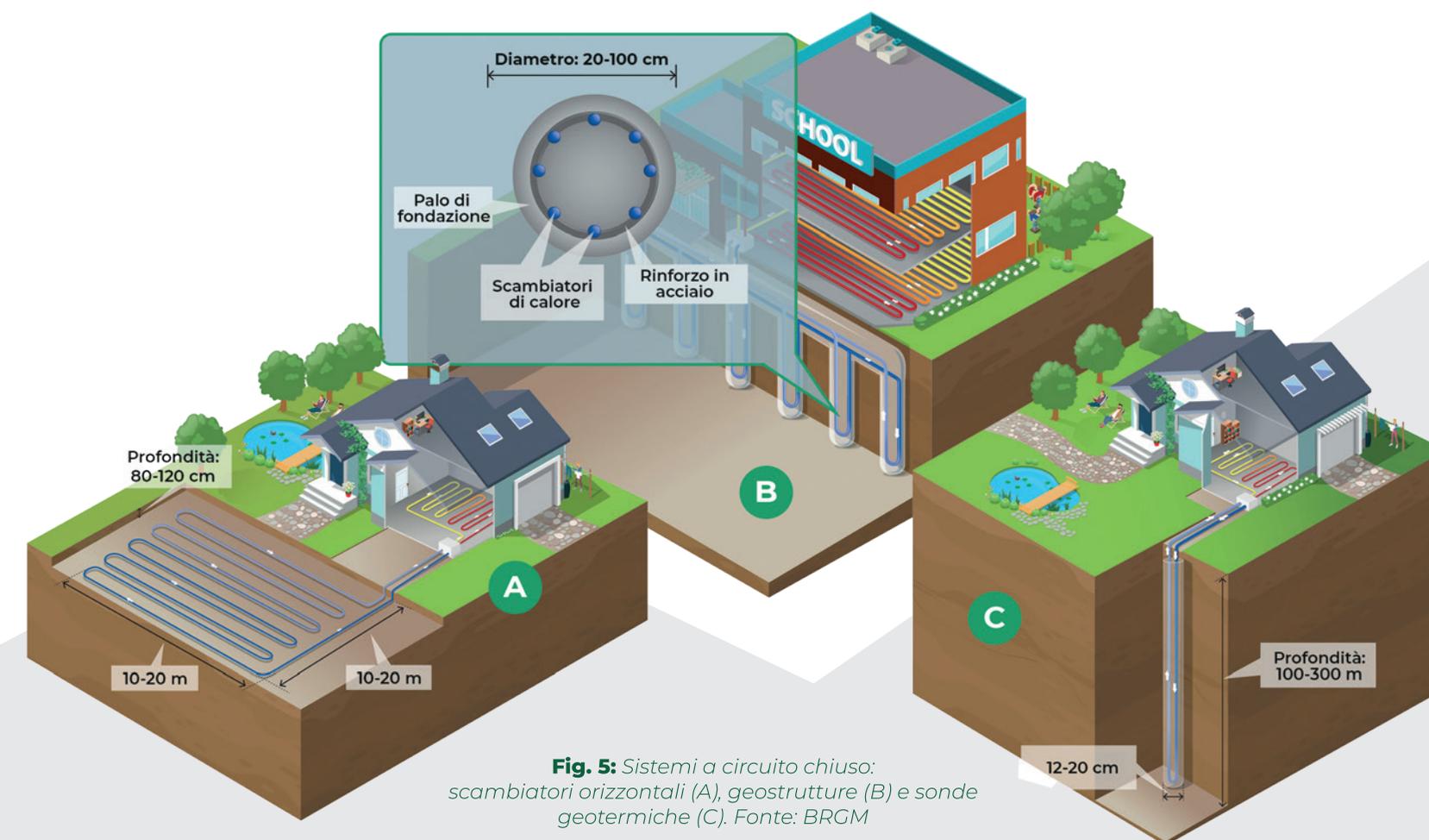


Fig. 5: Sistemi a circuito chiuso: scambiatori orizzontali (A), geostrutture (B) e sonde geotermiche (C). Fonte: BRGM

Nelle **sonde geotermiche** (note in letteratura come **Borehole Heat Exchangers, BHE**) lo scambio termico col sottosuolo si effettua mediante un fluido termovettore che, fatto continuamente circolare all'interno di tubi cementati all'interno di sondaggi verticali, trasferisce il calore captato dal sottosuolo (operando in modalità riscaldamento) verso la superficie e di qui alla pompa di calore. La cementazione della sonda è realizzata con apposite malte cementizie, definite **grout**, che hanno una funzione di protezione meccanica, di isolamento dei diversi acquiferi eventualmente attraversati, e di garantire la continuità fisica dello scambio termico tra il terreno, i tubi ed il fluido termovettore circolante al loro interno. Le sonde geotermiche hanno profondità comprese tra i 50 e i 250 m (tipicamente 100 m) a seconda delle locali condizioni geologiche ed idrogeologiche e un diametro di 100÷200 mm. Indicativamente, per un impianto domestico può essere sufficiente una sola sonda da 100 m di profondità, mentre per un impianto condominiale, o per un utenza commerciale, potrebbe essere necessaria anche la perforazione di alcune decine di sondaggi. Le tubazioni inserite nelle perforazioni (normalmente costituite da polietilene ad alta densità – PEAD - o polietilene reticolato - PEX) possono avere differenti configurazioni (Fig. 6):

- con tubazione a U singola, costituite da una mandata e un ritorno collegati tra loro al piede della sonda con un tubo curvo a forma di U;
- con doppia tubazione a U, costituite da due coppie di tubi mandata-ritorno collegati da giunzione a U;
- coassiale, costituito da due tubi concentrici di diverso diametro, generalmente quello esterno per la mandata e quello interno per il ritorno.

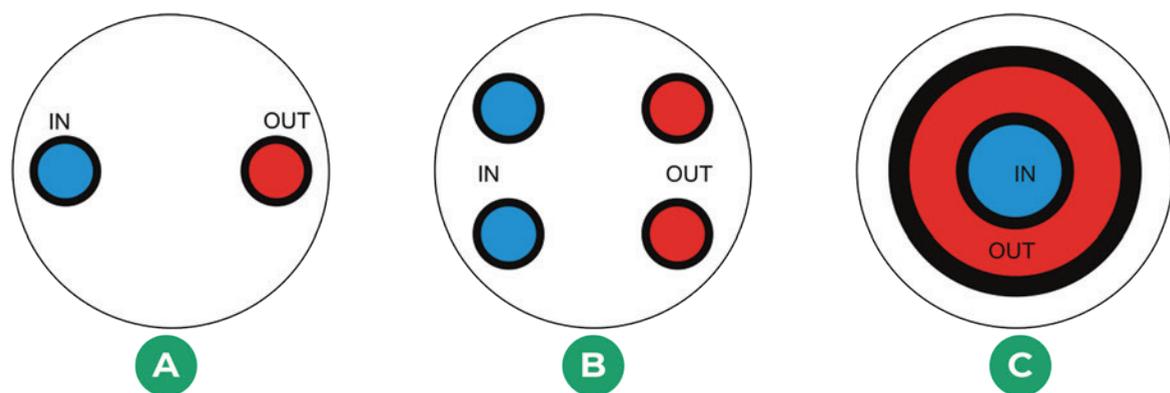


Fig. 6: Sezioni trasversali di sonde geotermiche: a U singola (A), a doppia U (B), coassiale (C).

Nel caso di più sonde, i tubi vengono collegati in superficie ad un collettore, a sua volta collegato alla pompa di calore (Fig. 7A). Per far circolare il fluido vettore in tale circuito è necessario dotare il sistema di una o più pompe di circolazione (Fig. 7B).



Fig. 7: Collettore idraulico per tubi di mandata e ritorno delle sonde (A); pompe di circolazione (B).

Nei **sistemi orizzontali** a circuito chiuso (noti in letteratura come **Shallow Heat Collectors – SHC**) lo scambio termico avviene invece con il terreno a ridotte profondità (generalmente 2-3 m), mediante tubazioni in polietilene da 32 mm o 40 mm di diametro. La posa dei tubi può avvenire secondo differenti configurazioni (a serpentina, in trincea, basket geotermici, come da Fig. 8) e anche in questo caso per praticità si realizzano diversi circuiti che convergono in collettori di mandata e di ritorno, da cui parte il collegamento con la pompa di calore. La superficie verde occupata da un sistema a sonde orizzontali è, indicativamente, almeno doppia rispetto alla superficie da riscaldare nell'edificio (pur variando in base alla tipologia del terreno, la superficie necessaria è di circa 25 mq per 1 kW installato).



Fig. 8: Sistemi orizzontali a circuito chiuso: serpentina (A), lineare in trincea (B), basket geotermico (C).

I sistemi orizzontali sono, almeno in Italia, molto meno diffusi di quelli verticali, sia per ragioni logistiche (come detto si necessita di ampie superfici) sia per una complessiva minore efficienza del sistema, dovuta al fatto che nella porzione più superficiale del sottosuolo (fino a 15-20 m) c'è comunque un'influenza climatica, per cui le temperature subiscono delle fluttuazioni, a discapito dell'efficienza della pompa di calore.

A.1.5 » **SISTEMI A CIRCUITO APERTO (open loop)**

Nei sistemi a circuito aperto (noti in letteratura come **Groundwater Heat Pump – GWHP**) lo scambio termico viene effettuato con l'acqua di falda circolante nel sottosuolo (Fig. 9): l'acqua sotterranea viene dapprima prelevata da un pozzo, inviata alla pompa di calore per lo scambio termico e successivamente scaricata ad una temperatura lievemente variata rispetto a quella originaria: più fredda in periodo invernale (quando il calore viene sottratto al sottosuolo), più calda in periodo estivo (quando il calore viene immagazzinato nel sottosuolo). L'acqua può essere sia reintrodotta nuovamente in falda tramite un pozzo di resa per non depauperare l'acquifero, oppure scaricata in un adiacente corpo idrico superficiale.

Gli impianti a circuito aperto sono spesso impiegati a servizio di edifici con fabbisogni termici importanti, come centri commerciali, musei, cinema o grandi condomini. Questo perché questi impianti richiedono uno studio preliminare per l'installazione dei pozzi, e un lungo iter autorizzativo, che comportano costi di progettazione difficilmente ammortizzabili su impianti di piccola taglia. Al di sotto di una certa taglia (alcune decine di kW, a seconda della profondità della falda), la trivellazione dei pozzi e le successive operazioni di manutenzione periodica possono inoltre essere più costose rispetto alla trivellazione di sonde geotermiche.

Gli impianti a circuito aperto necessitano di ingenti portate – indicativamente 1 l/s ogni 20 kW - e devono essere installati in presenza di una falda potente e produttiva. Il pozzo di resa è uguale al pozzo di presa, ma senza pompa installata poiché la reiniezione viene effettuata a gravità. È però importante che il tubo di reiniezione resti sotto battente d'acqua, per evitare che l'acqua prelevata incrementi il suo contenuto di ossigeno a contatto con l'aria, favorendo la crescita di ruggine e alghe.

Gli impianti a circuito aperto sono generalmente più energeticamente efficienti di quelli a circuito chiuso, poiché la temperatura della sorgente termica (acqua di falda) si mantiene stabile nel tempo mentre negli impianti a circuito chiuso il terreno si raffredda durante l'utilizzo per riscaldamento e si riscalda durante l'utilizzo per raffrescamento. Tuttavia, in fase di progettazione dei pozzi, il distanziamento tra le opere va accuratamente dimensionato in modo da evitare che l'acqua reiniettata in falda (a temperatura alterata) possa essere recuperata, anche solo in parte, dal pozzo di presa, nel qual caso si determinerebbe un cortocircuito termo-idraulico tra i due, a danno del rendimento energetico della pompa di calore (cfr. par. A.2.4.1.)



Fig. 9: Sistema geotermico a circuito aperto: pompa di calore, pozzo di presa e pozzo di resa. Fonte: BRGM

A.1.6 » **PERFORAZIONI**

In generale, le tecnologie di scavo più utilizzate per le perforazioni sono due:

- **a percussione**, in cui l'attrezzatura di scavo (scalpello), assicurata all'estremità di un'asta, sgretola progressivamente il terreno agendo o per gravità (tramite cicli di sollevamento e caduta) o tramite l'azione di aria compressa (martello a fondo foro);
- **a rotazione**, in cui viene invece allo scalpello viene trasmesso un moto rotatorio. Lo scalpello può essere un attrezzo tagliente (tricono, corona diamantata) che frantuma la roccia (**perforazione a distruzione di nucleo**) o un carotiere cavo cilindrico che fresa progressivamente recuperando campioni più o meno integri di roccia (**perforazione a carotaggio continuo**). L'avanzamento dello scalpello e il recupero dei detriti sono agevolati dalla circolazione un fluido (generalmente acqua, talvolta addizionata con fanghi bentonitici; in roccia, aria compressa). Il fluido può essere iniettato dall'asta di perforazione (**circolazione diretta**) o aspirato (**circolazione inversa**).

Per le perforazioni in roccia viene utilizzata anche la tecnica a rotopercussione che combina la rotazione dell'asta con la percussione operata da un martello pneumatico.

In ogni caso è necessario un argano di manovra e un'antenna di altezza tale da permettere il montaggio e lo smontaggio, progressivamente col procedere delle operazioni di scavo, della batteria delle aste di perforazione.

In questo quadro, nell'ambito della geotermia di bassa temperatura è solitamente utilizzata:

- la perforazione a percussione nei pozzi per gli impianti a circuito aperto. L'allestimento consiste in questo caso nella messa in opera di una tubazione parzialmente finestrata, solitamente in acciaio, all'interno del perforo (diametro tipico 300÷500 mm);
- la perforazione a distruzione di nucleo nel caso delle sonde geotermiche, con tecnica a rotazione con circolazione diretta o, in roccia, a rotopercussione.

La perforazione a carotaggio continuo, che dà informazioni molto più precise circa la composizione del sottosuolo, a fronte però di tempi e costi molto maggiori, può essere effettuata ad esempio su un solo sondaggio nel caso di impianti di grossa taglia che prevedano la realizzazione di molte perforazioni.

Nel caso dei sistemi a circuito chiuso, l'allestimento dello scambiatore termico nel perforo consiste nella posa in opera di una tubazione in HDPE per la circolazione del fluido termovettore e della successiva cementazione dello spazio restante, e consta schematicamente delle seguenti fasi:

- estrazione delle aste di perforazione;
- la tubazione in HDPE a U singola o doppia viene zavorrata sul fondo per essere calata all'interno del perforo, e successivamente viene riempita d'acqua;
- sigillatura della sonda con miscela bentonitica, tramite tubo di cementazione con malta premiscelata all'interno del foro, dal basso verso l'alto;
- esecuzione del test di tenuta sulla sonda.

A.1.7 » **PRINCIPALI ASPETTI TECNICI**

Nella progettazione e dimensionamento di un impianto geotermico di bassa temperatura sono da valutare congiuntamente sia i fattori ambientali intrinseci connessi all'utilizzo del sottosuolo o delle acque sotterranee (esaminati al par. A.2), sia quelli termotecnici e costruttivi. Tra questi ultimi i principali sono:

- il fabbisogno energetico totale e di picco richiesto dall'edificio;
- la potenza della pompa di calore;
- i materiali e caratteristiche della sonda o del pozzo.

Negli impianti a circuito chiuso vanno quindi valutati, oltre alla profondità della sonda, diversi altri aspetti (diametro del perforo; materiale, diametro e configurazione dei tubi; cementazione del perforo) che vanno a determinare la resistenza termica del perforo, la quale dovrebbe essere minimizzata al fine di massimizzare lo scambio termico.

Per gli impianti a circuito aperto, un fattore costruttivo importante dei pozzi di presa e di reimmissione è relativo alla granulometria e spessore del dreno, funzione della granulometria dell'acquifero, e al diametro e lunghezza del tratto finestrato della tubazione, che dipendono dalla resa (portata per unità di lunghezza) ottenibile.

A.1.8 » ASPETTI ECONOMICI

Come già detto l'ostacolo principale alla diffusione delle installazioni geotermiche di bassa temperatura risiede nell'alto costo di investimento iniziale, comportato dalla realizzazione delle perforazioni (siano esse pozzi per acqua, geosonde a circuito chiuso o scavi orizzontali superficiali) e dalla pompa di calore.

Al fine di fornire un ordine di grandezza sui costi indicativi di un impianto privato si può dire che

- per sistemi verticali a circuito chiuso, il costo di una singola sonda può essere mediamente stimato nell'ordine dei 40÷60 €/m di perforazione. Pertanto approssimando, per un impianto domestico residenziale, per la perforazione ed allestimento di una sonda da 100 m si ha una spesa compresa dai 4000 ai 6000 €
- per sistemi verticali a circuito aperto, il costo di un pozzo può essere mediamente stimato nell'ordine dei 200÷300 €/m di perforazione. Per la perforazione ed allestimento (inclusa pompa sommersa per il pompaggio dell'acqua) di un pozzo da 20 m si può stimare una spesa attorno ai 5000-6000 €.

In linea di massima, quindi, in presenza di una falda superficiale produttiva, la differenza economica tra un impianto a circuito chiuso composto da una sola sonda e un impianto a circuito aperto è irrilevante per un impianto domestico privato di piccola taglia; tuttavia, mentre per un impianto a circuito chiuso le operazioni di manutenzione sono piuttosto ridotte, i pozzi potrebbero richiedere frequenti interventi (sviluppo, spurgo, sostituzione della pompa o dello scambiatore termico).

Indicativamente, il costo per un impianto completo di piccola taglia (10 kW circa) basato sulla geotermia di bassa temperatura può variare dai 9000 € ai 13000 €.

Altre voci importanti riguardano il quadro elettrico (circa 1000 €) e le pratiche autorizzative, i cui costi sono variabili in funzione del tipo di installazione scelto (maggiore nel caso di circuito aperto, che necessita di un'autorizzazione ambientale allo scarico) e dalla legislazione locale (regionale, talvolta con regolamenti provinciali).

La convenienza economica dell'installazione di una pompa di calore geotermica, sia per una ristrutturazione che per una nuova costruzione, deve essere ovviamente valutata tenendo anche presenti tutte le spese che la geotermia consente di evitare. Gli impianti geotermici possono da questo punto di vista rappresentare un'alternativa economicamente molto conveniente specie in quelle aree non raggiunte dalla rete di distribuzione del gas metano, ove i principali competitor hanno costi ben più elevati (gasolio da riscaldamento e GPL) o sono più scomodi da usare (legna

da ardere e pellet); queste risorse energetiche concorrenti pongono inoltre il problema dell'approvvigionamento e dei rischi connessi di incendio, esplosione, perdite di combustibile dalle cisterne, inquinamento e dismissione dei serbatoi abbandonati.

Dal punto di vista climatico va inoltre evidenziato che in regioni montane, dove il fabbisogno termico è maggiore rispetto ad aree con clima mite e la stagione di riscaldamento è più lunga, il tempo di ritorno dell'investimento sarà minore poiché i risparmi conseguiti sono più elevati. A seconda del tipo di edificio o della zona climatica, l'impianto può inoltre avere un utilizzo per raffrescamento (con rendimenti più elevati rispetto al chiller ad aria), che fornisce un ulteriore margine di risparmio. Nelle aree con clima mite e negli edifici scarsamente utilizzati (ad es. seconde case), la pompa di calore geotermica rappresenta un investimento molto oneroso rispetto al risparmio ottenibile.

A.2 ASPETTI AMBIENTALI CONNESSI ALLA GEOTERMIA A BASSA ENTALPIA

La geotermia di bassa temperatura, a differenza degli altri sistemi di riscaldamento, richiede una conoscenza ed una valutazione preliminare, sia di ordine geologico che energetico, dell'ambiente sotterraneo nel quale verrà installato il sistema di scambio termico con il terreno.

A.2.1 » FATTORI LIMITANTI

In linea di massima gli impianti geotermici di bassa temperatura possono essere installati nella maggior parte delle situazioni geologiche. Esistono tuttavia alcuni fattori naturali limitanti che vanno attentamente valutati prima della realizzazione di un impianto, descritti nel dettaglio dal Deliverable 4.1.1 del progetto GRETA (Casasso et al. 2018 [2]):

- aree di frana o dissesto: dissesti attivi, anche non palesi ma continui nel tempo (ad esempio fenomeni lenti di "creeping" superficiale), possono compromettere l'integrità delle sonde geotermiche poste nel sottosuolo, sino eventualmente a causarne la rottura;
- zone con rocce carsiche o gessifere: tali aree sono notoriamente problematiche per le perforazioni in genere a causa della possibile presenza di cavità sotterranee o l'instaurarsi di fenomeni di rigonfiamento. La terebrazione e l'allestimento delle sonde in questi contesti può pertanto essere difficoltosa o impossibile;
- alta montagna: in questo ambiente il dimensionamento e la progettazione degli impianti deve essere particolar-

mente scrupoloso, in quanto con temperature molto basse si potrebbe verificare - nel caso dei circuiti chiusi - il congelamento del fluido termovettore, con conseguente rottura dei tubi in polietilene. Nel caso di impianti a circuito aperto, le acque di falda potrebbero avere una temperatura troppo bassa per consentire un efficace scambio termico.

Di seguito, inoltre, si fornisce un elenco indicativo di ubicazioni di nuovi impianti potenzialmente critiche, per le quali sono da prevedere a titolo cautelativo, prima della realizzazione, approfondimenti e confronti con gli enti pubblici dal punto di vista geologico e idrogeologico:

- interno ad una zona di rispetto di un'opera di captazione d'acqua potabile (pozzo, sorgente, corso d'acqua);
- in prossimità di sito potenzialmente contaminato o con contaminazione accertata;
- con distanza da corso d'acqua inferiore a 10 m;
- in prossimità di altri impianti simili;
- in prossimità di una discarica di RSU o di altri potenziali disturbi termici;
- in prossimità di volumi interrati;
- in prossimità di fosse settiche, impianti di subirrigazione, fondazioni esistenti, reti fognarie, reti servizi vari;
- in prossimità di area naturale protetta.

Queste interferenze sono solitamente regolate da leggi nazionali e regionali e talvolta da regolamenti provinciali o locali (si veda anche il Deliverable 2.1.1 [3]).

A.2.2 » **INDAGINI PRELIMINARI**

Il livello d'approfondimento delle conoscenze sulla condizione originale del serbatoio geotermico deve essere commisurato alla dimensione del sistema progettato e dei rischi connessi alla sua costruzione ed esercizio. Per impianti privati domestici, generalmente le indagini preliminari potranno limitarsi alla raccolta di dati geologici ed idrogeologici esistenti, mentre per impianti di grossa taglia, o nel caso in cui si ricada nelle situazioni di cui al precedente par. A.2.1, vanno valutate in fase di progettazione e dimensionamento le variazioni termiche indotte nel sottosuolo. A tale fine si potranno eseguire:

- indagini dirette, eseguite con carotaggi o perforazioni per misure della conducibilità idraulica;

- indagini indirette, eseguite con tecniche geofisiche;
- studi di dettaglio eseguiti per la definizione delle proprietà delle falde (direzione, gradiente, velocità di flusso in condizioni statiche e dinamiche, temperatura, etc.) e dei valori di variazione naturale della temperatura nelle matrici ambientali;
- prelievo di campioni di roccia per misure in laboratorio della conducibilità termica;
- test di Risposta Termica per misure dirette di conducibilità termica;
- simulazioni modellistiche finalizzate a compiere previsioni di dettaglio dell'evoluzione nel tempo della diffusione di calore nelle falde, stimandone ampiezza, durata e modalità di propagazione. Questa valutazione consente di definire la configurazione ottimale del sistema di estrazione di calore dal sottosuolo e di comprendere gli effetti del trasferimento di energia da e verso il serbatoio termico. Per acquistare valore, i modelli e le simulazioni devono essere validati, per cui i dati previsti dalle simulazioni vanno comparati con i dati effettivamente misurati. Al fine di valutare la diffusione delle variazioni termiche a breve, medio e lungo termine in condizioni cicliche, si deve usare uno strumento capace di eseguire simulazioni in regime transitorio. In tal caso si rende necessario servirsi di codici di tipo numerico (come FEFLOW, MODFLOW, MT3D); tuttavia il loro impiego non è garanzia sufficiente per ottenere risultati affidabili in mancanza dei dati necessari, o per impropria elaborazione, interpretazione e definizione delle condizioni al contorno.

A.2.3 » **DATI PROGETTUALI RELATIVI AL SOTTOSUOLO**

Nell'ambito del progetto GRETA, sono stati analizzati i fattori che influenzano maggiormente il rendimento degli impianti geotermici (si veda il Deliverable 3.1.1, autori Bottig et al. 2016 [4]). Di seguito si riporta un riassunto dei principali risultati del lavoro svolto.

A.2.3.1 » *Sistemi a circuito chiuso (closed loop)*

Un primo parametro fondamentale da considerare in fase di progettazione di un impianto geotermico è rappresentato dalla **temperatura iniziale del sottosuolo**, che può essere valutato empiricamente attraverso lo studio dei valori medi annuali di temperatura minima e massima dell'aria, in correlazione con l'altitudine, oppure con metodi più raffinati, considerando anche altri dati (radiazione solare, copertura nevosa,...). Nei primi 100 m di profondità, la temperatura del terreno è generalmente simile alla media annua della temperatura dell'aria; ad alta quota, però, la temperatura del terreno può essere più alta rispetto a questo riferimento, poiché la copertura nevosa fornisce un isolamento termico nel periodo più freddo dell'anno. Scendendo in profondità, inoltre, compare l'effetto del gradiente geotermico.

La conducibilità termica, definibile come la proprietà di una sostanza a trasferire calore, dà un'indicazione sulla quantità di calore estraibile dal sottosuolo per unità di lunghezza della sonda. Essa dipende dalla composizione mineralogica, dall'isotropia e omogeneità, dalla presenza d'acqua nei pori, dalla pressione e dalla temperatura. Per le rocce cristalline silicatiche ricche di ferro e magnesio (es. gabbro e basalto) si hanno in genere bassi valori di conducibilità termica, mentre si hanno valori più alti per le rocce ricche di quarzo e alluminio. I terreni sciolti hanno invece valori molto più bassi rispetto alle rocce, in quanto la presenza di spazi vuoti rallenta il passaggio del calore. Se questi pori sono riempiti o meno da acqua la conducibilità può variare sensibilmente, rimanendo molto bassa per i terreni insaturi, maggiore per quelli saturi ma comunque sensibilmente minore che per le rocce compatte. In pratica i valori della Conducibilità termica possono variare da minimi dell'ordine dei 0,7 W/m/°C in sedimenti sciolti, sino a massimi dell'ordine dei 2,5÷6,6 W/m/°C in rocce ignee o metamorfiche. A tali valori di Conducibilità termica corrispondono potenze di estrazione (o rese termiche) variabili rispettivamente all'incirca tra i 20 W/m (sedimenti sciolti insaturi) e i 70 W/m (graniti, gneiss). A titolo di esempio, pertanto, considerando che per una casa nuova e ben isolata da 100-150 mq sia necessaria una potenza termica di 5 kW, se il sottosuolo può fornire una potenza di estrazione di 50 W/m sarà necessaria la perforazione di una sonda da 100 m.

In Tab. 1 sono illustrati, per alcuni tipi di rocce e sedimenti, i valori della Conducibilità termica nonché la corrispondenza tra proprietà idrauliche e termiche.

Roccia	Proprietà idrogeologiche		Proprietà termiche	
	Conducibilità idraulica (m/s)	Porosità	Conducibilità termica (W/m/K)	Capacità calorica volumetrica 10 ⁶ (J/m ³ /°C)
Ghiaia	3 · 10 ⁻⁴ -3 · 10 ⁻²	0.24 - 0.38	0.70 - 0.90	
Sabbia Grossa	9 · 10 ⁻⁷ -6 · 10 ⁻³	0.31 - 0.46	0.70 - 0.90	
Sabbia fine	2 · 10 ⁻⁷ -2 · 10 ⁻⁴	0.26 - 0.53	0.70 - 0.90	
Limo	1 · 10 ⁻⁹ -2 · 10 ⁻⁵	0.34 - 0.61	1.20 - 2.40	2.4 - 3.3
Argilla	1 · 10 ⁻¹¹ -4.7 · 10 ⁻⁹	0.34 - 0.60	0.85 - 1.10	3.0 - 3.6
Calcere, Dolomia	1 · 10 ⁻⁹ -6.6 · 10 ⁻⁶	0.34 - 0.60	1.50 - 3.30	21.3 - 5.5
Calcere carsificato	1 · 10 ⁻⁶ -1 · 10 ⁻²	0.05 - 0.50	2.50 - 4.30	21.3 - 5.5

Arenaria	3 · 10 ⁻¹⁰ -6 · 10 ⁻⁶	0.05 - 0.30	2.30 - 6.50	21.3 - 5.5
Argillite	1 · 10 ⁻¹³ -2 · 10 ⁻⁹	0 - 0.10	1.50 - 3.50	2.38 - 5.5
Rocce ignee e metamorfiche fessurate	8 · 10 ⁻¹⁹ -3 · 10 ⁻⁴	0 - 0.10	2.50 - 6.60	
Rocce ignee e metamorfiche	3 · 10 ⁻¹³ -2 · 10 ⁻¹⁰	0 - 0.05	2.50 - 6.60	

Tab. 1: Proprietà idrauliche (conducibilità idraulica, porosità) e termiche (conducibilità e capacità termica) di diverse litologie. fonte: ref. [5].

La conducibilità termica media del terreno può essere misurata, dopo la realizzazione delle perforazioni per la posa della sonda, con un test di risposta termica (**Thermal Response Test – TRT**; più raramente, **Ground Response Test – GRT**). Il TRT si basa sull'immissione (o, più raramente, l'estrazione) di una potenza termica nota all'interno della sonda, per una durata di 2-3 giorni, misurando le temperature di mandata e ritorno del fluido. La potenza termica deve essere simile a quella prevista in condizioni di esercizio e il più possibile costante. Per i TRT in immissione di calore, che è la modalità standard, il calore viene fornito da una resistenza elettrica. Dalla serie temporale della temperatura media tra mandata e ritorno, è possibile ricavare tramite opportune interpretazioni la conducibilità del terreno e la resistenza termica della sonda geotermica. Tali test rappresentano concettualmente l'equivalente delle prove di pompaggio di lunga durata effettuate sui pozzi per misurare la trasmissività dell'acquifero. E' importante che i suddetti test siano effettuati una volta avvenuta la completa maturazione del cemento (che comporta reazioni esotermiche) di riempimento del perforo (idealmente, quindi, a distanza di circa un mese dal completamento delle perforazioni). In alternativa la Conducibilità termica può essere definita a scala di singolo campione mediante apposite misure di laboratorio (si veda a titolo di esempio il par. B.3.3).

A.2.3.2 » Sistemi a circuito aperto (open loop)

Nel caso degli impianti a circuito aperto, la possibilità di emungere dal pozzo la portata necessaria è ovviamente un presupposto imprescindibile per la realizzazione dei sistemi a circuito aperto. Altri fattori da considerare sono la temperatura indisturbata, che se troppo bassa può limitare l'utilizzo in riscaldamento, e la soggiacenza della falda idrica, che se molto profonda fa aumentare i costi per il pompaggio. E' importante inoltre conoscere la piezometria dell'area e le condizioni al contorno (limiti impermeabili, corsi d'acqua) che la condizionano, per poter simulare con software numerici o con formule analitiche l'impatto piezometrico e termico dell'impianto, e verificarne la sostenibilità.

A.2.4 » RISCHI AMBIENTALI E RELATIVE PRECAUZIONI PREVENTIVE

In sintesi gli aspetti ambientali potenzialmente critici connessi all'uso del terreno come serbatoio termico sono illustrati di seguito.

A.2.4.1 » Alterazioni termiche nel sottosuolo

L'efficienza dello scambio termico dipende dalla conservazione della capacità di rinnovamento della risorsa di calore nel sottosuolo, che si realizza se non subisce alterazioni termiche eccessive. Queste alterazioni possono dipendere da assunzioni sbagliate in fase di progettazione; anche la gestione di un impianto con modalità difformi da quanto previsto in progettazione (ad esempio, utilizzo più frequente o più sbilanciato su riscaldamento o raffreddamento) può inficiare la sua sostenibilità nel lungo periodo.

Dal punto di vista ambientale, le variazioni di temperatura teoricamente possono comportare nel sottosuolo una modificazione nella solubilità di alcuni minerali presenti e nella popolazione batterica, anche patogena, presente nell'acquifero. Tuttavia la letteratura scientifica ha finora smentito che tali variazioni possano essere apprezzabili, in presenza dei normali salti termici (3÷6°C) adottati negli impianti a circuito aperto.

Dal punto di vista termico si possono determinare – in caso di errato dimensionamento, o a seguito di un eccessivo proliferare di impianti contigui - variazioni inattese ed eccessive della temperatura nel sottosuolo e nelle acque sotterranee in esso circolanti; più in particolare:

- nel caso di un sistema a circuito chiuso, un sovrasfruttamento della risorsa termica (causata ad esempio da un'eccessiva densità di impianti) potrebbe portare, almeno a livello teorico, al "congelamento" di una porzione di sottosuolo insaturo;
- nel caso di un sistema a circuito aperto, attorno al pozzo di resa si sviluppa un "pennacchio" (*plume*) termico e in parte a monte (dove può tornare al pozzo di presa, originando il fenomeno del cortocircuito termico). Se la propagazione del pennacchio termico a valle rappresenta un aspetto da valutare per il rispetto degli utilizzi preesistenti della falda (anche non geotermici), il cortocircuito termico rappresenta una seria minaccia alla possibilità stessa dell'impianto di funzionare.

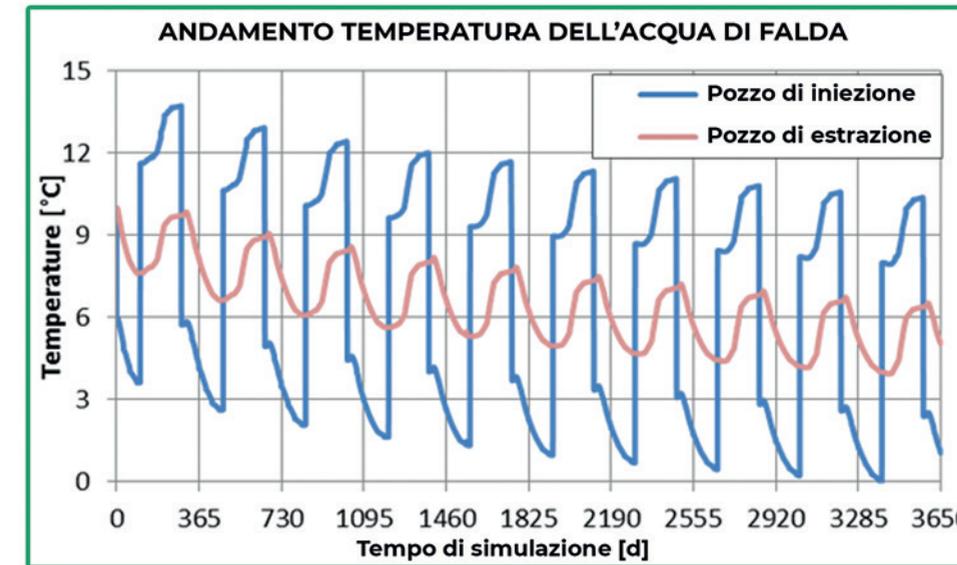


Fig. 10: Sistema geotermico a circuito aperto: pompa di calore, pozzo di presa e pozzo di resa. Fonte: DIATI

iniezione; parimenti, per i circuiti chiusi va prevista un'adeguata interdistanza reciproca tra le sonde (indicativamente 10 m e comunque non inferiore a 5 m).

Più in particolare, nei circuiti aperti è importante distanziare quanto più possibile i pozzi di presa a monte e resa a valle, allineandoli con la direzione di flusso; si possono inoltre adottare tipologie particolari di coppie di pozzi di emungimento/restituzione, quali:

- a destinazione alterna, in cui i due pozzi sono utilizzati alternativamente in pompaggio e in ricarica secondo le stagioni (tale sistema necessita di allestire ambedue i pozzi con tubazioni di mandata);
- pozzi anisotropi finestrati a diversa profondità all'interno di acquiferi particolarmente spessi. Molte legislazioni regionali, però, vietano la reiniezione in un acquifero diverso da quello del pozzo di presa, per evitare la miscelazione di acque con differente chimismo.

In ogni caso, l'alternanza stagionale dei cicli raffreddamento/raffreddamento in linea di principio garantisce di per sé la sostenibilità ambientale sul lungo periodo dei sistemi geotermici di bassa temperatura, sufficiente per evitare una deriva delle temperature dell'acquifero nel corso dei decenni. Per questo motivo è importante caratterizzare in modo accurato il fabbisogno termico dell'edificio, per quantificare lo squilibrio nel bilancio tra calore estratto e immesso nel

sottosuolo nell'arco dell'anno. In presenza di particolari condizioni geologiche e idrogeologiche, è possibile ricorrere alla metodologia dello stoccaggio termico nel sottosuolo (noto in letteratura come **Underground Thermal Energy Storage – UTES**) effettuabile attraverso sonde verticali (**Borehole Thermal Energy Storage – BTES**) oppure in acquifero attraverso pozzi d'acqua (**Aquifer Thermal Energy Storage - ATES**). Questa metodologia è sfruttabile nel caso in cui vi sia l'esigenza di convogliare nel sottosuolo o in acquifero il calore in eccesso accumulato nel periodo estivo (derivante ad esempio da raffrescamento di edifici, pannelli solari), o il calore prodotto da industrie (es. calore di processo, raffrescamento di datacenters) per poi sfruttare tale calore nel periodo invernale. I sistemi BTES hanno avuto una discreta diffusione in Germania, mentre gli ATES sono diffusi in Olanda e Belgio dove la falda idrica è poco mobile e, pertanto, il calore accumulato non si propaga eccessivamente. Tuttavia, per questi sistemi è importante contenere l'innalzamento di temperatura nel terreno e nella falda in modo da evitare alterazioni geochimiche.

A.2.4.2 » Operazioni di perforazione

A seguito delle perforazioni delle sonde geotermiche o dei pozzi per acqua (le cui modalità di esecuzione sono state sommariamente illustrate al par. A.1.6), potrebbe determinarsi l'interconnessione di unità idrogeologiche differenti, o la contaminazione della falda a seguito di sversamenti accidentali dai macchinari. Va peraltro precisato che tale rischio non è legato specificatamente alla geotermia ma insito a priori in ogni operazione di perforazione geologica o di scavo pozzi.

Al fine di minimizzare i rischi ambientali intrinseci, le perforazioni devono essere eseguite sulla base di una conoscenza geologica di base del territorio, integrata se necessario (ad esempio nel caso di grossi impianti) da indagini preliminari (par.A.2.2). E' quindi opportuno che un geologo esegua, sulla base dei dati disponibili, una valutazione del contesto sotterraneo adeguata alla complessità del caso, definendo le caratteristiche geologiche e idrogeologiche del sito allo scopo di prevedere l'eventuale insorgere di problemi operativi ed ambientali. Si ricorda che per tutte le perforazioni di profondità superiori a 30 m vige l'obbligo di darne notifica ad ISPRA (L. 464/1984). Inoltre le perforazioni devono ottemperare a determinati requisiti e standard qualitativi, i quali devono tra l'altro prevedere che:

- il fluido di perforazione, costituito da una miscela di bentonite e acqua, debba essere preparato con apposito miscelatore, controllandone il pH prima dell'uso;
- la posa delle tubazioni, in materiale atossico, debba essere eseguita senza interruzione e in un'unica soluzione;
- la cementazione del foro in cui sono alloggiato le sonde debba avvenire dal basso verso l'alto, fino allo spiazzamento totale del fluido usato per la perforazione. La cementazione (o grouting) deve essere eseguita in modo da ga-

rantire un perfetto isolamento idraulico tra diversi acquiferi (eventualmente incontrati durante la perforazione) e un buon contatto termico tra le sonde e il terreno circostante. Normalmente, la cementazione avviene tramite iniezione di una sospensione di cemento, acqua e bentonite;

- per proteggere la falda dal rischio di contaminazione attraverso la testa dei pozzi è opportuno colmare la parte sommitale dell'intercapedine per un'altezza minima di 3 m dal p.c. con un isolamento impermeabile, resistente al gelo e al ritiro come una miscela di acqua, cemento e bentonite con conducibilità idraulica inferiore a 10⁻⁹ m/s. Le miscele per l'isolamento saranno a base di cemento, sabbia, bentonite ed acqua;
- in caso di installazione in alta montagna, al fine di minimizzare il rischio di congelamento del fluido termovettore va previsto l'isolamento termico di almeno i primi 5 m di sonda.

Inoltre, ai fini della salvaguardia ambientale per le perforazioni a distruzione di nucleo a scopi geotermici è auspicabile l'utilizzo di una macchina specifica "a doppia testa" diversa da una perforatrice convenzionale, capace di perforare sia a acqua che a aria, con cui si può alternare la tecnica di perforazione in funzione della tipologia di terreno progressivamente incontrata.

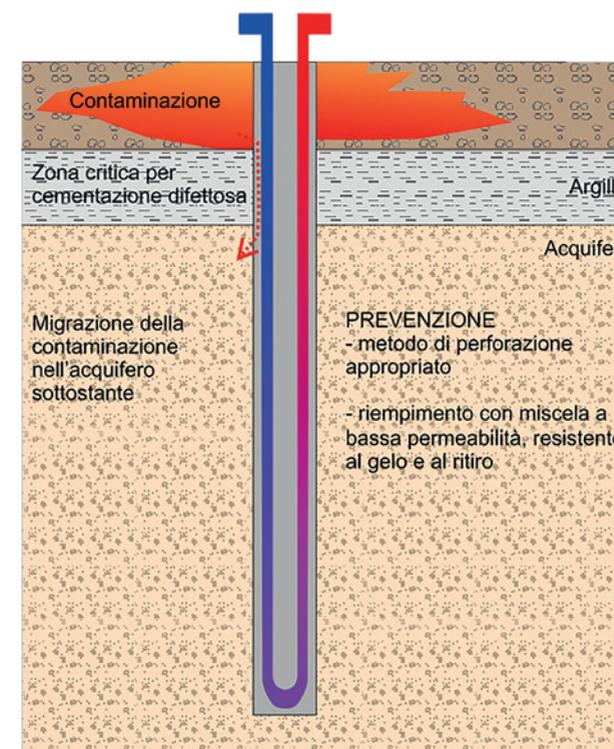


Fig. 11: Sversamento di liquido antigelo a seguito della rottura della sonda. Fonte: ref. [6]

A.2.4.3 » Rottura della sonda geotermica

Solo nel caso dei circuiti chiusi, i fluidi termovettori contenuti all'interno della sonda (addizionati in genere all'acqua in concentrazioni del 15-20%, per assicurare un punto di congelamento attorno ai -10°C) potrebbero contaminare la falda in caso di rottura. È necessario pertanto prevedere una verifica di integrità e continuità del circuito idraulico sotterraneo subito dopo l'esecuzione del sondaggio e la posa della sonda, mediante appositi test di pressione sulle sonde geotermiche, da eseguire con aria (durata minima della prova di 1 ora ad una pressione minima di 10 bar) o acqua (durata minima della prova di 4 ore con una pressione di almeno 6 bar). Qualora la sonda non risulti a tenuta, essa dovrà essere ricolmata definitivamente con miscela di cemento, acqua e bentonite. Il fluido termovettore circolante nelle sonde è comunemente costituito da una soluzione di acqua e fluido antigelo. Gli additivi antigelo comunemente adottati sono il glicole etilenico (C₂H₆O₂), il glicole propilenico (C₃H₈O₂), il cloruro di calcio (CaCl₂) e l'alcool etilico (C₂H₅OH). In Europa, gli anticongelanti principalmente utilizzati sono il glicole propilenico e il glicole etilenico. Il glicole propilenico, in particolare, è preferibile per le sue migliori prestazioni termiche e per il fatto di essere atossico, tant'è che viene utilizzato anche nell'industria alimentare.

È necessario ricorrere a queste soluzioni qualora si prevedano temperature del fluido in uscita dalla pompa di calore vicine o inferiori a 0 °C. Per i problemi evidenziati poc'anzi e per il costo non indifferente degli additivi antigelo (alcune centinaia di euro per sonda), che deve essere periodicamente sostituito, alcuni installatori optano per l'utilizzo di acqua pura come fluido termovettore. In questo caso è però necessario un dimensionamento più generoso delle sonde e bisogna prestare particolare attenzione all'isolamento termico dei tratti più superficiali di tubazione.

A.2.5 » INTERAZIONE CON LE ACQUE SOTTERRANEE

A.2.5.1 » Sistemi a circuito chiuso (closed loop)

Benché i sistemi a circuito chiuso funzionino anche in assenza di un acquifero, tuttavia la presenza di un flusso di falda rappresenta un fattore positivo per il loro rendimento, in quanto essa contribuisce col suo moto a dissipare continuamente la "bolla" di alterazione termica nel sottosuolo attivando, oltre alla conduzione termica, i meccanismi dell'advezione e della dispersione termica. Inoltre, nella parte satura dell'acquifero il valore della conducibilità termica aumenta sensibilmente, poiché gli spazi intergranulari sono completamente riempiti di acqua, 30 volte più conduttiva dell'aria.

I metodi di dimensionamento più utilizzati, come il metodo ASHRAE (riportato anche nella norma UNI 11466:2012 [7]) e il metodo di Eskilson [8] (implementato nel software Earth Energy Designer [9]), non tengono conto della presenza di flusso di falda e ciò va a favore di sicurezza nel dimensionamento degli impianti a sonde.

A livello progettuale, l'influenza del flusso delle acque sotterranee sull'efficienza dell'impianto da realizzare può essere stimata con soluzioni analitiche [10] e con software numerici. E' però necessario conoscere con buona precisione i parametri idrodinamici dell'acquifero per evitare di sovrastimare l'effetto dell'advezione e della dispersione termica.

A.2.5.2 » Sistemi a circuito aperto (open loop)

L'utilizzo delle acque sotterranee nei sistemi aperti comporta una loro variazione esclusivamente termica (solitamente dell'ordine dei 3-6°C) e non chimica; come detto, tale variazione termica può essere adeguatamente prevista e modellizzata a priori, inoltre essa può essere inoltre monitorata sperimentalmente in corso d'esercizio dell'impianto mediante appositi piezometri ubicati a valle (rispetto alla direzione principale di deflusso della falda) dell'impianto.

Non essendoci uno scadimento chimico dell'acqua utilizzata, la reimmissione in falda non rappresenta in linea di principio una problematica ambientale di rilievo, anzi rappresenta un'azione virtuosa che va a compensare dal punto di vista quantitativo i volumi estratti (opzione preferibile alla reimmissione in corpo idrico superficiale).

Va tuttavia considerato che un'eventuale torbidità o alte concentrazioni di Ferro o Manganese nelle acque sotterranee potrebbero instaurare fenomeni di incrostazione o proliferazione batterica nel pozzo di reimmissione. A tale proposito è opportuno prevedere periodiche operazioni di manutenzione dei pozzi (ad esempio tramite pistonaggio dei filtri e/o air-lift).

Inoltre vanno valutate attentamente (anche dal punto di vista amministrativo) le situazioni in cui gli impianti ricadono all'interno di aree contaminate, per evitare che i pozzi causino migrazioni indesiderate di contaminazioni.

A.3 PRO E CONTRO

Riassumendo quanto sopra illustrato, di seguito vengono schematicamente riassunti i principali vantaggi e svantaggi dei diversi impianti geotermici di bassa temperatura, sia rispetto ad altri sistemi di riscaldamento sia tra di loro.

ENERGIA GEOTERMICA SUPERFICIALE IN GENERALE

(in comparazione con altri sistemi di riscaldamento/raffrescamento)

PRO	CONTRO
<p>Sostenibilità ambientale: nessuna emissione diretta in atmosfera (né CO₂ né altri inquinanti). Riduzione delle emissioni globali rispetto ai combustibili fossili.</p>	<p>Costo iniziale di investimento: perforazione e installazione degli scambiatori geotermici o dei pozzi. Inoltre, a parità di potenza una pompa di calore è più cara di una caldaia.</p>
<p>Alta efficienza (riscaldamento): anche se buona parte dell'energia elettrica è tutt'ora prodotta con combustibili fossili, le pompe di calore permettono di utilizzare l'energia primaria in modo più efficiente rispetto ai combustibili fossili.</p>	<p>Costi di progettazione: a differenza dei sistemi classici di riscaldamento/raffrescamento, le installazioni geotermiche richiedono valutazioni geologiche.</p>
<p>Alta efficienza (raffrescamento): rispetto ai chiller con condensazione ad aria o evaporativi, si raggiungono valori di EER più elevati e quindi si riduce il consumo elettrico.</p>	<p>Limitazioni: l'installazione può essere difficoltosa o impossibile in determinate condizioni logistiche (es. sito inaccessibile alla perforazione per mancanza di spazio, presenza di sottoservizi...) o in particolari condizioni geologico-geomorfologiche (es. aree di frana, presenza di rocce rigonfianti...)</p>

PRO	CONTRO
<p>Riscaldamento & raffrescamento: entrambi garantiti da un'unica pompa di calore. Molte pompe di calore prevedono inoltre la produzione di acqua calda sanitaria.</p>	<p>Interferenze reciproche: impianti contigui potrebbero creare un sovrasfruttamento della risorsa geotermica, causando una minore efficienza sino a un malfunzionamento del sistema. Tale aspetto richiede una progettazione accurata, specie nel caso di grandi impianti.</p>
<p>No stoccaggi combustibile: per le aree non metanizzate, rispetto alle caldaie a gasolio, GPL o biomasse, si evita di stoccare grandi quantità di combustibile, con conseguente occupazione di spazi e rischi di incendio e scoppio.</p>	<p>Scarso adattamento per vecchi edifici: la presenza di terminali di riscaldamento ad alta temperatura (radiatori) può rendere impossibile l'utilizzo di pompe di calore.</p>
<p>Applicazioni in aree remote poiché si evita il trasporto di combustibili. E' però necessaria la fornitura di elettricità.</p>	<p>Regolamentazione frammentaria: le differenze a livello di regolamentazione locale possono rappresentare, in modo più o meno significativo, perdite di tempo e soldi per i professionisti chiamati ad ottemperare alle autorizzazioni.</p>
<p>Bassi costi di esercizio: si consuma dal 25% al 50% in meno di elettricità rispetto ai sistemi convenzionali.</p>	<p>Applicazioni in alta montagna: in climi molto freddi la progettazione deve essere particolarmente accurata, per il rischio di congelamento del fluido termovettore all'interno della geosonda.</p>
<p>Silenziosità: a differenza della tipologia aerotermica, la pompa di calore geotermica può essere installata in un locale chiuso e isolato acusticamente.</p>	
<p>Integrazione con altre energie rinnovabili: possibile accoppiamento con fotovoltaico o solare.</p>	

CIRCUITI VERTICALI CHIUSI

PRO	CONTRO
COMPARATI AI SISTEMI ORIZZONTALI:	COMPARATI AI SISTEMI CHIUSI ORIZZONTALI:
Maggiore efficienza garantita dalla stabilità delle temperature trovate a 100-200 m di profondità, rispetto a quelle sfruttabili a pochi m dalla superficie.	Costo iniziale d'investimento dovuto alle operazioni di perforazione.
Meno spazio richiesto: le dimensioni di un cantiere di perforazione sono ca 10 mq.	
Durata dell'impianto molto alta (pari a quella dell'edificio).	
COMPARATI AI CIRCUITI APERTI:	COMPARATI AI SISTEMI APERTI:
Non è necessaria la presenza di acqua sotterranea (benchè quest'ultima comunque migliori l'efficienza).	Costo iniziale d'investimento: per impianti medio-grandi, per i circuiti chiusi è necessario un numero maggiore di scambiatori di calore rispetto ai circuiti aperti.
Bassa manutenzione	

SISTEMI CHIUSI ORIZZONTALI

PRO	CONTRO
COMPARATI AI SISTEMI VERTICALI:	COMPARATI AI SISTEMI VERTICALI:
Minori costi: non sono richieste operazioni di perforazione nel sottosuolo, solo scavi lineari limitati a ca 2 m dalla superficie.	Minore efficienza: le temperature nei primi m del sottosuolo (a differenza di quelle a 100-200 m di profondità) sono instabili essendo influenzate dal clima, ciò comporta una minore efficienza globale.
	Più spazio richiesto: richiesta la disponibilità di alcune centinaia di mq di terreno su cui potere effettuare scavi sino a ca 2 m di profondità

CIRCUITI APERTI A ACQUA DI FALDA

PRO	CONTRO
COMPARATI AI SISTEMI CHIUSI:	COMPARATI AI SISTEMI CHIUSI:
Maggiore efficienza: 1-2 pozzi sono generalmente sufficienti anche per grossi impianti industriali.	Disponibilità di acqua di falda necessaria (meglio con piccola profondità della tavola d'acqua, per minimizzare i costi della pompa).
Migliore prestazione termica della pompa di calore.	Maggiori costi di esercizio legati al funzionamento della pompa nel pozzo (specie con alte profondità della tavola d'acqua).

PRO	CONTRO
<p>Minori costi di perforazione</p>	<p>Restituzione dell'acqua emunta: l'acqua estratta dal pozzo deve essere reimpressa nell'acquifero (mediante un apposito pozzo di reimmissione) oppure scaricata nel reticolo idrografico superficiale (o in fognatura). Ciò comporta:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Solitamente procedure autorizzative più o meno complesse, sia per l'estrazione che per la restituzione 2. L'acqua sotterranea reimpressa ha una temperatura diversa (solitamente di più o meno 3°-4°C, a seconda che si stia operando in modalità raffreddamento o riscaldamento) rispetto alla temperatura originale dell'acquifero. Sono quindi necessarie valutazioni ambientali preliminari 3. Per evitare problemi di interferenza tra i pozzi di estrazione e reimmissione, è necessario uno spazio sufficiente tra di essi 4. In alcune condizioni idrogeologiche il pozzo di reimmissione può essere soggetto a occlusione dei filtri

LA GEOTERMIA A BASSA ENTALPIA IN VALLE D'AOSTA

B.1 ATTITUDINE DEL TERRITORIO VALDOSTANO AD OSPITARE APPLICAZIONI GEOTERMICHE

A livello generale, la morfologia del territorio valdostano è peculiarmente caratterizzata da un fondovalle relativamente stretto circondato dai rilievi più alti d'Europa. Ciò dà luogo, in prima approssimazione, a due situazioni ben differenziate dal punto di vista idrogeologico: nelle zone montane (cioè la grande maggioranza del territorio), la circolazione idrica avviene in roccia mentre in corrispondenza dei settori più ampi di fondovalle, caratterizzati dalla presenza di depositi alluvionali quaternari ghiaioso-sabbiosi, sono ospitati acquiferi alluvionali molto produttivi, sfruttati da numerosi pozzi (Fig. 12).

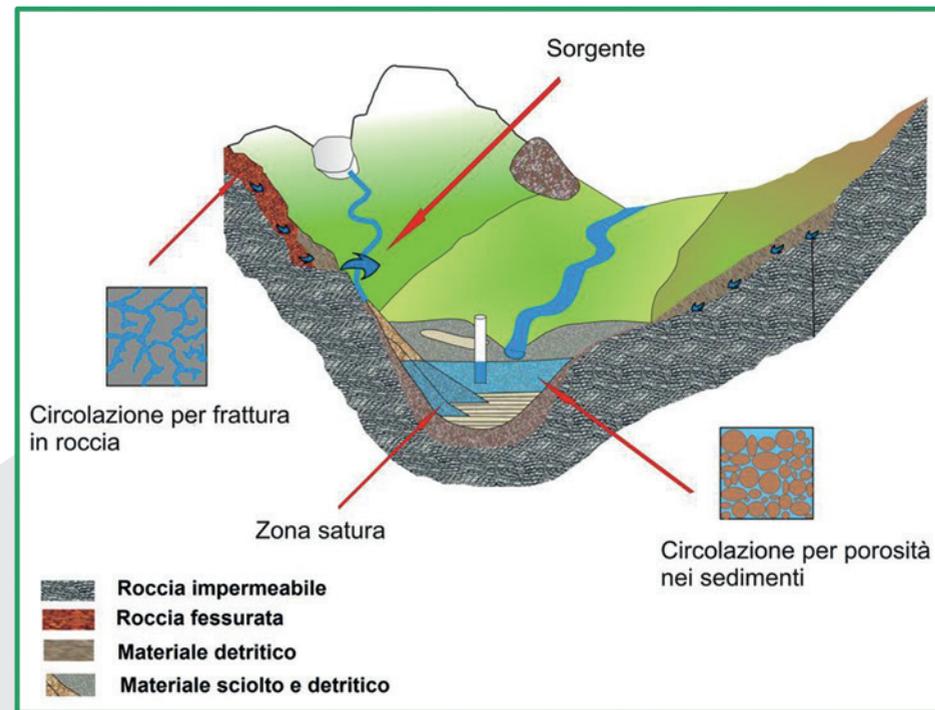


Fig. 12: Schema semplificato della geologia del fondovalle.
Fonte: Arpa Valle d'Aosta

In questo quadro, a livello generale si può affermare che, a livello di scambio termico con il terreno, per i circuiti aperti il territorio regionale offre senza dubbio condizioni ottimali nelle zone alluvionali di fondovalle, in cui c'è ampia disponibilità di emungimento delle falde, mentre per i circuiti chiusi si troveranno condizioni sicuramente buone sia nelle suddette aree di fondovalle sia nelle zone montane impostate in roccia.

Con riferimento al par. A.2.1, i principali fattori negativi sono rappresentati dalle zone di frana e dall'altitudine, in quanto come detto in alta montagna va attentamente valutato il rischio di gelo del fluido termovettore. Indicativamente la quota di attenzione può essere individuata al di sopra dei 2000 m, quindi il problema si pone per applicazioni particolari quali rifugi, alpeggi, etc. Punti favorevoli sono invece rappresentati dall'assenza di fenomeni carsici di rilievo e di acquiferi artesiani confinati (salvo situazioni locali) sul fondovalle principale; tali due fattori rappresentano infatti notoriamente potenziali problematiche nelle operazioni di perforazione.

Dal punto di vista geologico, come noto tutta la regione, ubicata al cuore delle unità tettoniche più deformate dall'orogenesi alpina, è interamente impostata in corrispondenza di rocce metamorfiche, con l'eccezione del massiccio granitico del Monte Bianco all'estremità nord-ovest.

Più in particolare dalla carta tettonica semplificata di Fig. 13 si può desumere come emerga la prevalenza di rocce gneissiche (zona Sesia Lanzo e dei Lembi sradicati, basamento del Gran San Bernardo, falde pennidiche del M. Rosa e Gran Paradiso), ofioliti e calcescisti (appartenenti alla Zona Piemontese) e rocce metasedimentarie nel settore nord-ovest (Zona Sion Courmayeur e sistema Ultraelvético).

In carta è altresì indicata l'ubicazione di 13 campioni di roccia prelevati per la determinazione in laboratorio della conducibilità termica; a tale proposito si rimanda al par. B.4.1

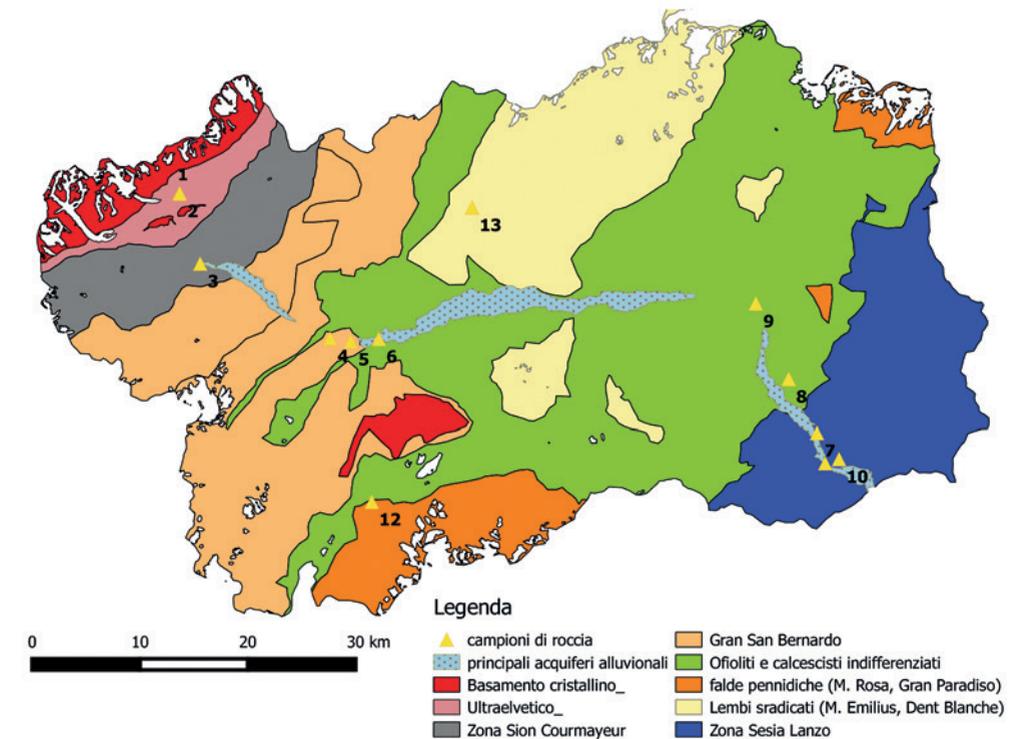


Fig. 13: Carta tettonica semplificata e ubicazione di n. 13 campioni di roccia.
Fonte: Arpa Valle d'Aosta

B.2 RISULTATI DI STUDI SPERIMENTALI PREGRESSI

Nel triennio 2010-2012 ARPA VdA ha effettuato, assieme al raggruppamento temporaneo di imprese formato da ESI Italia – E.GEO.- Studio ER – Servizio Ambiente, uno studio sperimentale sul territorio valdostano inerente le problematiche ambientali connesse all'applicazione di sistemi geotermici chiusi, che è stato condotto mediante la costruzione di tre sonde geotermiche, destinate ad un utilizzo esclusivamente sperimentale, presso altrettanti siti pilota rappresentativi di tre diversi contesti dal punto di vista altimetrico, climatico, morfologico e per le previste condizioni di saturazione del terreno [6].

Presso ciascuno dei tre siti pilota le attività sperimentali (si veda la mappa in Fig. 14), dopo la posa della sonda geotermica, si sono svolte nel seguente modo:

- esecuzione di TRT della durata di 80 ore per definire i valori di conducibilità termica media e di temperatura del terreno;
- applicazione per tre mesi di cicli temporali di estrazione di calore dal sottosuolo, prolungati e intervallati con spegnimenti dell'impianto, per valutare la risposta del serbatoio geotermico allo sfruttamento nelle diverse condizioni;
- a 2 m di distanza dalla sonda geotermica, posa in opera di una sonda per misurare le variazioni termiche nel sottosuolo a diverse profondità (monitoraggio termico).

Dopo l'esecuzione dei TRT, per simulare il funzionamento in modalità riscaldamento di una pompa di calore geotermica, è stata impostata un'unità frigorifera per l'estrazione di calore dalla sonda, con dispersione in aria del calore estratto. Il risultato è stato differente in base alle caratteristiche specifiche dei diversi bacini geotermici e delle sonde; più in particolare la sperimentazione ha dimostrato che:

- la presenza di terreno saturo e di circolazione d'acqua (condizioni verificate nel sito di St. Christophe) consente un uso continuativo della risorsa senza che si determinino rischi di deriva termica, con tempi di recupero rapidi;
- viceversa, la presenza di terreno insaturo, la limitazione di profondità e l'assenza di circolazione d'acqua nel sottosuolo (condizioni verificate nel sito di Arvier) sono tutti elementi che sfavoriscono l'uso continuativo della

risorsa e che determinano rischi di deriva termica, con tempi di recupero lenti che limitano l'efficienza dello scambio termico. In tali situazioni, inoltre, la condizione sbilanciata dello scambio di calore può rendere conveniente usare il terreno per l'immagazzinamento di calore durante l'estate;

- dal punto di vista ambientale, l'inerzia dimostrata dalla sperimentazione nel terreno insaturo induce a prevedere che, se lo scambio non viene fatto con pompa di calore reversibile, nelle condizioni climatiche tipiche della porzione montana della Valle d'Aosta si può determinare un raffreddamento progressivo del terreno che, viceversa, può non verificarsi nelle zone di fondovalle.

Per quanto riguarda il monitoraggio termico, è stato riscontrato un effetto di raffreddamento del terreno sul punto di monitoraggio situato a 2 m di distanza. L'ampiezza complessiva della bolla di calore, ovvero della zona che ha subito una variazione termica dopo 3 mesi di sperimentazione in termini di estrazione di calore, è pari a circa 10 m dalla sonda, dato in accordo coi riferimenti generalmente esistenti per individuare indicativamente l'interdistanza minima tra sonde geotermiche contigue.

In Tab. 2 vengono riassunti le caratteristiche principali delle sonde geotermiche e i risultati ottenuti dai TRT. I valori ottenuti di Conducibilità termica sono in linea con quelli disponibili in letteratura per quei tipi di depositi.

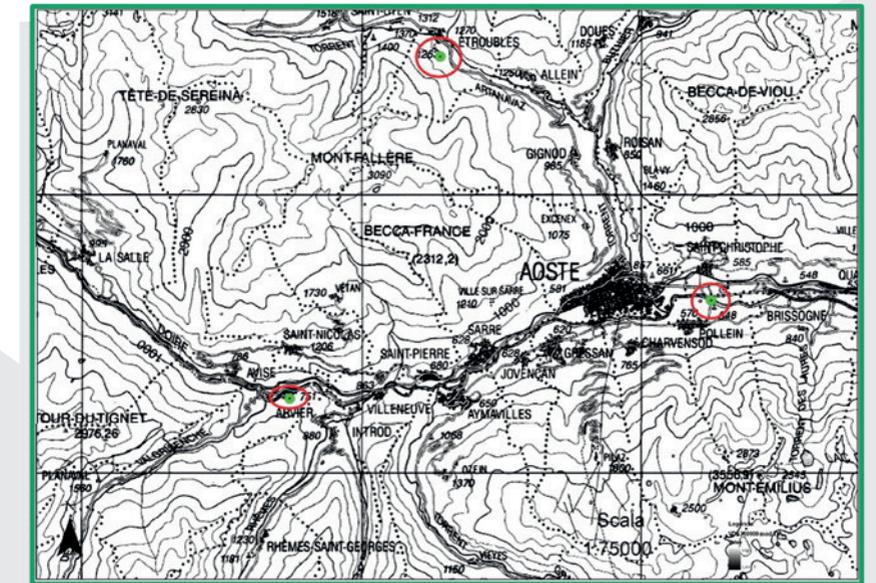


Fig. 14: Ubicazione dei tre siti pilota.
Modificato da ref. [6]

Sito	Quota (m s.l.m.)	Litologia	Presenza falda	Profondità sonda (m)	Temperatura terreno indisturbato °C	Conducibilità termica del terreno W/m/K	Resistenza termica sonda-terreno W/m/K
Saint-Christophe	550	Depositi alluvionali	Sì	90	12,9	3,14 (min 2,75 max 3,51)	0,080
Arvier	726	Depositi morenici	No	50	13,3	2,27 (min 1,87 max 2,69)	0,071
Etroubles	1.326	Depositi morenici	Sì (da 40 m)	50	10,0	2,76 (min 2,39 max 3,24)	0,060

Tab. 2: Caratteristiche delle sonde e parametri del terreno nei 3 siti di prova.

B.3 ATTIVITÀ DI RICERCA E SPERIMENTAZIONE CONDOTTE NELL'AMBITO DEL PROGETTO GRETA

B.3.1 » CENSIMENTO DEGLI IMPIANTI ESISTENTI

Nel 2016-2017 è stato effettuato – in collaborazione con COA Finaosta e Politecnico Torino - un primo censimento delle installazioni geotermiche presenti sul territorio regionale, nell'ambito di una tesi di laurea (Di Feo 2017, [11]).

Il censimento ha dapprima preso in considerazione il database regionale delle certificazioni energetiche, in Valle d'Aosta obbligatorie dal 2011. Dal database sono state estratte tutte le certificazioni nelle quali veniva citata la presenza di un impianto in pompa di calore. Tali dati sono stati quindi verificati contattando i certificatori energetici operanti sul

territorio, diverse aziende installatrici e geologi operanti sul territorio.

L'indagine effettuata ha rilevato la presenza in totale di n. 71 installazioni, di cui 44 a circuito chiuso e 27 a circuito aperto (Fig. 15).

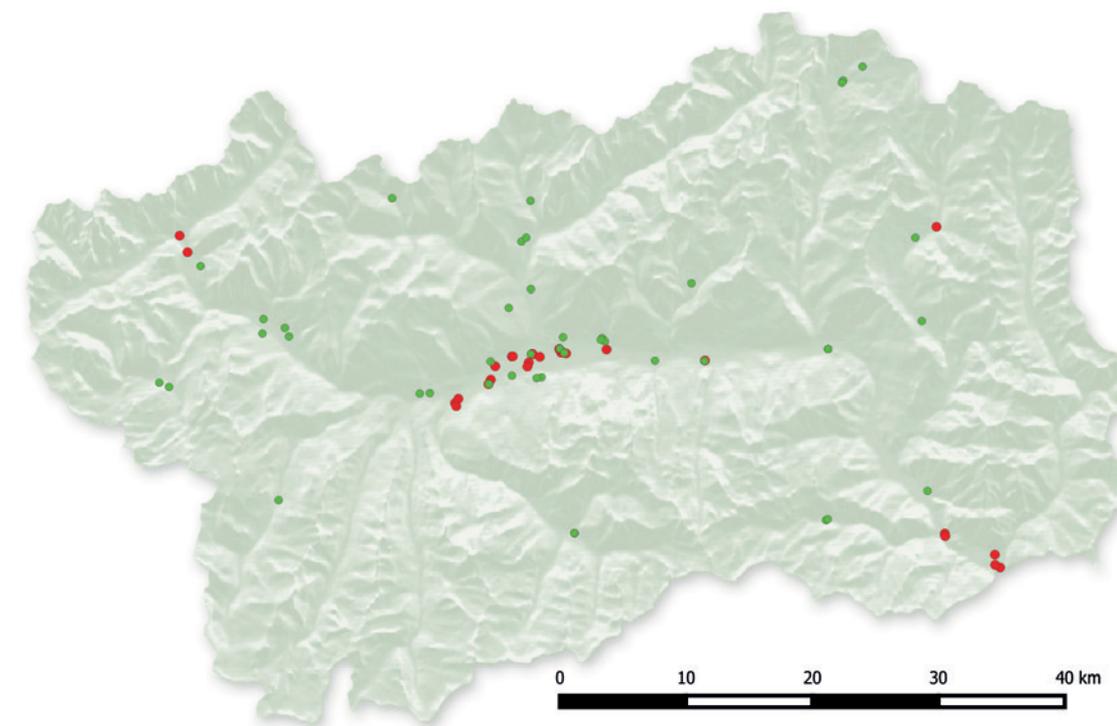


Fig. 15: Installazioni geotermiche censite in Valle d'Aosta (pallini rossi = impianti open loop; pallini verdi = impianti closed loop). Modificato da Casasso et al. 2018 [12].

Ulteriori dati e considerazioni:

- la potenza totale installata è pari a quasi 4 MW; la somma di questi impianti permette di evitare ogni anno l'emissione di 840 tonnellate di anidride carbonica;
- sebbene i sistemi a circuito aperto siano solo il 36% del totale, essi coprono quasi l'80% della potenza installata e della produzione di calore;

- gli impianti privati domestici rappresentano circa l'80% dei circuiti chiusi e il 50% dei circuiti aperti;
- la maggior parte degli impianti è usata solo per riscaldamento;
- nel settore pubblico sono stati censiti n. 5 impianti a circuito aperto (tutti di proprietà regionale) e n. 5 a circuito chiuso. Di questi ultimi, n. 2 sono edifici scolastici;
- nel settore industriale risulta un solo impianto, a circuito aperto;
- nel settore turistico sono stati rilevati:
 - per quanto riguarda gli alberghi, solo n. 1 impianto a circuito aperto e n. 2 impianti a circuito chiuso;
 - per quanto riguarda i residence, n. 2 impianti a circuito chiuso;
 - altri n. 4 impianti a circuito aperto in altre strutture;
- per quanto riguarda l'ubicazione, i circuiti chiusi sono distribuiti equamente tra fondovalle principale e vallate laterali, mentre i circuiti aperti sono tutti ubicati (salvo due impianti) sul fondovalle principale;
- al di sopra dei 2000 m di quota sono stati censiti n. 3 impianti, tutti nel comune di Valtournenche (vedasi par. B.4 per dettagli di uno di essi);
- il comune con il maggior numero di installazioni di sistemi geotermici è Aosta con n. 7 impianti in funzione. Il più importante impianto presente è quello del museo regionale nell'area megalitica di Saint Martin con una potenza nominale installata pari a circa 717 kW. Come detto, il potenziale per gli impianti a circuito aperto nell'area di Aosta è elevato e mostra come il capoluogo potrebbe sostenibilmente convertire una buona parte del suo fabbisogno energetico a impianti geotermici, con un miglioramento della qualità dell'aria urbana e una riduzione di emissioni a effetto serra;
- nel territorio del Parco Nazionale del Gran Paradiso risultano n. 3 impianti;
- in più della metà dei Comuni non si è rilevata la presenza di impianti geotermici.

Anche se il numero di impianti installati per numero di residenti pone la Regione Valle d'Aosta al di sopra della media nazionale, tuttavia si evince che la densità sul territorio è ancora estremamente bassa e non si pongono assolutamente potenziali problemi connessi a un eccessivo proliferare degli impianti. Inoltre, considerata la vocazione turistica e naturalistica del territorio regionale, la tecnologia della geotermia a bassa temperatura ha ancora enormi potenzialità di sviluppo soprattutto in questo settore (alberghi, rifugi).

Al paragrafo seguente vengono descritti in dettaglio gli impianti più particolari.

B.3.2 » CASI STUDIO

Nell'ambito del progetto GRETA, sono stati individuati circa 30 impianti geotermici con caratteristiche ottimali in termini di efficienza energetica e innovazione tecnologica (definiti per questo come "good practices") nei 6 Paesi partecipanti al progetto. Le informazioni dettagliate su queste installazioni sono reperibili nel Deliverable 3.1.1 del progetto (Bottig et al. 2016 [13]). Di seguito si descrivono gli impianti recensiti nel progetto, installati in Regione.

B.3.2.1 » Bar Pit Stop – Cervinia

L'edificio è un locale ad uso commerciale situato nel Comune di Valtournenche a 2400 m di altitudine; si tratta senz'altro di uno degli impianti geotermici più alti d'Europa. Nel 2014 sono stati completati i lavori di ristrutturazione, rendendolo dal punto di vista energetico molto efficiente, con elevato grado di coibentazione. Il fabbisogno energetico per riscaldamento ambientale viene soddisfatto attraverso un sistema a pompa di calore geotermico a circuito chiuso ed al recupero del calore dai reflui della cucina. Per reintegrare parzialmente il calore prelevato durante la stagione invernale, è stato installato un sistema solare termico che restituisce al sottosuolo il calore richiesto.

Nell'ottica di una riduzione dei costi di gestione e manutenzione, sono stati implementati all'interno dell'edificio vari sistemi integrati che permettono il controllo da remoto delle prestazioni dell'edificio, riducendo gli sprechi. Il sistema geotermico è composto da una pompa di calore da 60 kW (COP=3.5) che lavora nella stagione invernale per circa 1200 h con un consumo medio annuo di energia elettrica pari a 21000 kWh. Il campo geotermico è composto da 6 sonde con diametro 40 mm a doppia U e di lunghezza 200 m ciascuna. A valle del sistema di sonde sono stati installati due serbatoi di stoccaggio del calore da 1500 e 500 l che provvedono al fabbisogno energetico complessivo durante i periodi di picco. Per evitare rischi di congelamento, per il fluido termovettore utilizzato nel circuito chiuso si utilizza una miscela di acqua e glicole in soluzione al 35% con un punto di congelamento a circa -19 °C.



Fig. 16: Bar "PIT STOP" sulle piste di Cervinia.

B.3.2.2 » *Maison Lostan – Aosta*



Fig. 17: *Maison Lostan - Aosta.*

per una portata unitaria di circa 70 m³/h.

L'impianto è costituito da due pompe di calore ad inversione del ciclo per la produzione contemporanea di energia termica e frigorifera per una potenza fornita all'utenza, da ogni macchina, di circa il 75% della potenza termica totale massima richiesta, in modo che il mancato funzionamento di una pompa di calore non implichi difficoltà di climatizzazione dell'edificio. Il sistema prevede inoltre l'adozione di un sistema di "free cooling" che permette il raffrescamento dell'edificio, nei periodi medio stagionali, con l'utilizzazione dell'acqua dai pozzi in scambio diretto con il circuito di raffreddamento, evitando quindi di consumare energia elettrica con la pompa di calore. Le centrali tecnologiche principali sono realizzate in un corpo ipogeo indipendente, in contiguità con il complesso edilizio storico.

L'edificio Maison Lostan, posto nel centro storico di Aosta ed oggetto di restauro e riqualificazione funzionale da parte della Regione Autonoma Valle d'Aosta per destinarlo a nuova sede della Sovrintendenza, sorse nel XIII secolo nell'area del Foro romano e intorno al 1529 fu interamente ricostruito. L'edificio conserva particolari architettonici di pregio, in pietra finemente lavorata. Il progetto di restauro ha previsto, sin dalle prime fasi, l'inserimento di un impianto di climatizzazione a bassa temperatura con pompa di calore, con sorgente geotermica per la climatizzazione estiva ed invernale di tutti gli ambienti. Tale scelta, oltre che per questioni più squisitamente energetiche, è stata influenzata dalla volontà di ridurre l'impatto possibile con il contesto storico, evitando l'inserimento di elementi tecnici (dissipatori di calore, camini,...). Ad una prima proposta di realizzazione di un impianto con sorgente geotermica di tipo "chiuso" – mediante l'adozione di sonde geotermiche ad una profondità di 150-200 m, puntualmente verificate dal punto di vista archeologico – è stata preferita una soluzione del tipo a ciclo "aperto" per le notevoli difficoltà realizzative che si sono presentate nello specifico contesto storico. Sono quindi stati realizzati due pozzi di prelievo dell'acqua di falda - uno alternativo all'altro – ad una profondità di circa 55 m che prelevano acqua ad una temperatura non inferiore gli 11°C,

Gli impianti per la climatizzazione degli ambienti sono costituiti da sistemi di pannelli radianti a pavimento (alimentazione a circa 40°C), integrati da pannelli radianti a parete, nei casi in cui il carico termico non possa essere compensato dalle sole superfici di scambio disponibili con la superficie dei pavimenti esistenti. Impianti a radiatori sono previsti nei servizi igienici ed un numero molto limitato di fan-coil sono installati nelle zone in cui non erano disponibili spazi sufficienti a pavimento per la posa dei pannelli radianti. L'impianto di supervisione permette il monitoraggio dell'intero processo di produzione dell'energia per la climatizzazione del complesso sia dal punto di vista elettrico che termico, avendo provveduto ad installare apparecchiature di controllo (multimetri elettrici, integratori dell'energia termica, misuratori di portata e temperatura dell'acqua di falda).

B.3.2.3 » *Museo di Saint-Martin-de-Corléans – Aosta*

Il sito archeologico di Saint-Martin-de-Corléans, collocato nella porzione occidentale della città di Aosta, sorge a ridosso di una chiesa medioevale, che nel 1969 fu oggetto di lavori per l'edificazione di alcuni edifici residenziali. Durante la fase di sbancamento, le ruspe intercettarono la parte sommitale di una stele decorata e dei montanti di un dolmen. Il riconoscimento e identificazione di questi elementi litici portarono all'immediata sospensione dei lavori.

Data l'estensione e il notevole valore storico-documentario e culturale dei reperti, l'Amministrazione regionale della Valle d'Aosta procedette all'acquisizione dell'area. In breve tempo iniziarono le ricerche sistematiche, con annuali campagne di scavo proseguite per oltre un ventennio e riprese per ulteriori approfondimenti nel 2001, tra il 2006 e il 2008, sino a sondaggi di microscavo condotti negli ultimi anni.

Al fine di tutelare, conservare e permettere un'adeguata valorizzazione dell'area, nel 2007 iniziarono gli interventi edilizi relativi all'esecuzione del Parco e Museo Archeologico di Saint-Martin-de-Corléans, aperto al pubblico nel 2016.

Per quanto attiene l'impiantistica destinata alla climatizzazione degli ambienti, questa ha una particolare valenza perché finalizzata al mantenimento di condizioni ottimali per la conservazione dei reperti.

L'impianto di climatizzazione è costituito da un sistema con pompe di calore la cui sorgente geotermica è rappresentata da due pozzi geotermici profondi 55 m; l'acqua di falda viene utilizzata dai gruppi frigoriferi a pompa di calore per la produzione di acqua calda (circa 55° C) e



Fig. 18: *Interno del museo di Saint-Martin-de-Corléans (Aosta).*

acqua refrigerata (circa 7 °C) in relazione alle esigenze di climatizzazione del Museo. Il sistema a pompa di calore risulta sostanzialmente autosufficiente per tutto l'anno: solo nei periodi invernali con temperature esterne particolarmente rigide oppure in caso di anomalie o manutenzione della centrale, può venire in soccorso alle pompe di calore una centrale termica a gas metano – composta da due generatori a condensazione modulanti da 370 kW.

L'acqua emunta dai pozzi geotermici viene utilizzata all'interno della centrale a pompa di calore per le esigenze di climatizzazione: il suo passaggio all'interno di scambiatori di calore a piastre in acciaio inox causa unicamente una variazione della sua temperatura, contenuta all'interno di un gradiente positivo o negativo non superiore ai 4-5 °C. In seguito l'acqua viene reimpressa in un canale superficiale appartenente alla rete dei canali del Mere des Rives.

Un complesso sistema di scambiatori e di regolazione - gestito interamente da un sistema molto capillare di supervisione - permette la commutazione dei gruppi frigoriferi per il funzionamento in "caldo – pompa di calore" o in "freddo – gruppo frigorifero" a seconda delle esigenze del sistema Museale ed in relazione alle condizioni esterne.

Un elemento di grande importanza dal punto di vista impiantistico è costituito dal sistema di supervisione implementato nell'intero complesso tecnologico – meccanico ed elettrico – a servizio del Museo. Il sistema risulta infatti distribuito in modo molto capillare e governa, controlla e gestisce tutti gli elementi tecnologici posti all'interno del complesso espositivo secondo un programma modificabile nel tempo e studiato in modo specifico per le esigenze museali.

Il sistema interagisce sia con i sistemi di sicurezza sia con i sistemi di allestimento per la gestione dell'illuminazione, garantendo così una efficiente integrazione di tutti i sistemi di controllo dell'apparato museale.

B.3.2.4 » Progetto di Pian di Verra (Alta Valle d'Ayas)

Il Pian di Verra è un ampio pianoro posto ai piedi del ghiacciaio del Monte Rosa (alta Valle di Ayas). Si suddivide in Pian di Verra Inferiore (Fig. 19), posto a circa 2100 m slm e caratterizzato dalla presenza di due baite e di una stalla, e in Pian di Verra Superiore posto ad una quota di quasi 2400 m slm.

Oltre ad essere un'area sfruttata per l'allevamento e il pascolo, esso costituisce anche una frequentata meta turistica sia nel periodo estivo sia in quello invernale. Il progetto di riqualificazione del Pian di Verra si propone di realizzare una rivalutazione ambientale, paesaggistica ed energetica. La situazione attuale degli edifici esistenti risulta particolarmente impattante dal punto di vista ambientale per due motivi: in primo luogo, essi sono caratterizzati da una

bassa efficienza energetica dovuta ad uno scarso isolamento termico. Secondo, l'alimentazione delle utenze è attualmente gestita da fonti energetiche inquinanti e poco efficienti: l'energia elettrica è fornita da un gruppo elettrogeno mentre il riscaldamento è alimentato in parte a GPL in parte tramite stufe a legna.

Il progetto di riqualificazione del Pian di Verra si propone quindi di:

- riportare il paesaggio allo stato originario poco antropizzato abbattendo gli edifici esistenti e costruendo una struttura semi-i-pogea ad altissima efficienza energetica: questo consentirà di estendere l'utilizzo delle strutture anche alla stagione invernale incrementando quindi l'attività turistica, ma riducendo allo stesso tempo l'impatto ambientale;
- rendere energeticamente autosufficiente l'intera area del Pian di Verra Inferiore utilizzando esclusivamente energia prodotta da fonti rinnovabili.

Il raggiungimento di questi obiettivi sarà possibile grazie alla costruzione di una centrale idroelettrica che permetterà non solo di fornire direttamente energia alle diverse strutture, ma anche di accumulare energia sotto forma di idrogeno e di alimentare un sistema di pompe di calore. Uno degli obiettivi è quello di estendere la fornitura di energia anche al periodo invernale, quando la portata del torrente non sarebbe sufficiente a soddisfare il fabbisogno totale del comprensorio; a tale proposito l'energia idroelettrica in eccesso prodotta durante la stagione estiva verrà utilizzata per alimentare, oltre alle utenze, anche una cella elettrolitica: l'idrogeno così prodotto verrà stoccato in bombole per essere invece usato nel periodo invernale, quando la produzione di energia dovrà essere integrata dalla riconversione dell'idrogeno in energia elettrica grazie alle celle a combustibile.

La produzione di idrogeno permetterà di escludere completamente l'uso di energia derivante da fonti non rinnovabili. Anche per quanto riguarda la mobilità, sarà infatti vietato a qualsiasi mezzo alimentato da combustibili fossili di raggiungere e attraversare il Pian di Verra; i mezzi circolanti dovranno quindi essere alimentati dall'idrogeno prodotto dalla cella elettrolitica e stoccato presso il Pian di Verra Inferiore.

Per quanto riguarda invece la produzione dell'energia termica, necessaria sia per il riscaldamento sia per l'acqua calda sanitaria, è invece previsto l'uso di pompe di calore alimentate direttamente dalla centrale idroelettrica o dalla cella a combustibile, a seconda della stagione. E' inoltre previsto anche lo sfruttamento del calore residuo derivato negli altri processi: sia la cella elettrolitica sia le celle a combustibile, infatti, durante il processo di conversione dell'energia disperdono calore che può essere utilizzato per il riscaldamento degli ambienti e la preparazione dell'acqua calda igienico sanitaria.



Fig. 19: Pian di Verra inferiore (Vista da monte).

Per riassumere, quindi, l'impianto che renderà il Pian di Verra energeticamente autosufficiente sarà composto da:

- una centrale idroelettrica che durante la stagione primaverile ed estiva produrrà energia elettrica a pieno regime e sarà in grado non solo di soddisfare il fabbisogno energetico di tutti i fabbricati, ma anche di fornire sufficiente energia per alimentare una cella elettrolitica per la produzione e lo stoccaggio di idrogeno. Durante l'inverno tale centrale continuerà a lavorare e produrre una piccola parte dell'energia necessaria ad alimentare le varie utenze;
- una cella elettrolitica che sarà alimentata direttamente dalla centrale idroelettrica e che in estate convertirà in idrogeno l'energia in eccesso consentendo quindi lo stoccaggio di energia in vista del periodo invernale. Il calore prodotto dalla centralina verrà inoltre utilizzato per il riscaldamento dell'acqua degli ambienti e dell'acqua calda sanitaria;
- una o più celle a combustibile che serviranno, durante il periodo invernale, per riconvertire l'idrogeno in energia elettrica e termica. Anche in questo caso, il calore prodotto nel processo verrà riutilizzato per riscaldare l'acqua massimizzando l'efficienza del processo. L'idrogeno prodotto potrà inoltre essere utilizzato per l'alimentazione dei mezzi di trasporto autorizzati a raggiungere il Pian di Verra;
- un sistema di pompe di calore di tipo geotermico e a circuito chiuso che saranno alimentate, a seconda della stagione, tramite energia elettrica prodotta dalla centralina o dalle celle a combustibile e che permetteranno di produrre energia termica utilizzabile sia per il riscaldamento degli ambienti, sia per l'acqua calda sanitaria.

B.3.3 » DETERMINAZIONE DELLA CONDUCEBILITÀ TERMICA SU CAMPIONI DI ROCCIA

La conducibilità termica (TC), ovvero l'attitudine di una sostanza a trasferire calore, e la diffusività termica (TD), da cui dipende la velocità con la quale il calore si dissipa attraverso il materiale considerato, sono due parametri cruciali per la valutazione della fattibilità e del dimensionamento di un impianto geotermico a bassa entalpia. Ai fini di una modellizzazione più precisa del potenziale di geoscambio nel territorio valdostano, area pilota del progetto GRETA, si è quindi deciso di non affidarsi solo a valori di letteratura ma di determinare sperimentalmente tali valori.

Le determinazioni dei due suddetti parametri sono state effettuate presso il laboratorio del Servizio Geologico Sloveno (partner del progetto GRETA) usando un apparecchio TCS (Thermal Conductivity Scanning) basato sulla scansione sulla superficie piana di un campione di roccia mediante una sorgente di calore che emette raggi infrarossi e sensori che

misurano la temperatura prima e dopo il riscaldamento. La determinazione di TC e TD è basata sul confronto tra le temperature di standard certificati con le temperature dei campioni di roccia riscaldati dal TCS. In particolare sono stati prelevati n. 13 campioni (si veda la mappa in Fig. 13), riferiti ai contesti litologici più diffusi sul territorio regionale; con l'eccezione di un campione (granito del M. Bianco), si tratta di campioni di rocce metamorfiche. I risultati mostrano che i valori di TC sono mediamente elevati, ovvero sempre maggiori di 3 W/mK salvo due campioni (scisti della zona Ultraelevetica e metabasalti), relativamente meno ricchi in quarzo. Si osserva inoltre una buona corrispondenza con i valori noti in letteratura per tali tipi di rocce.



Fig. 20: Dispositivo per la determinazione della conducibilità termica. Due campioni di roccia sono posti sulla linea di scansione a infrarossi tra due standard di riferimento.

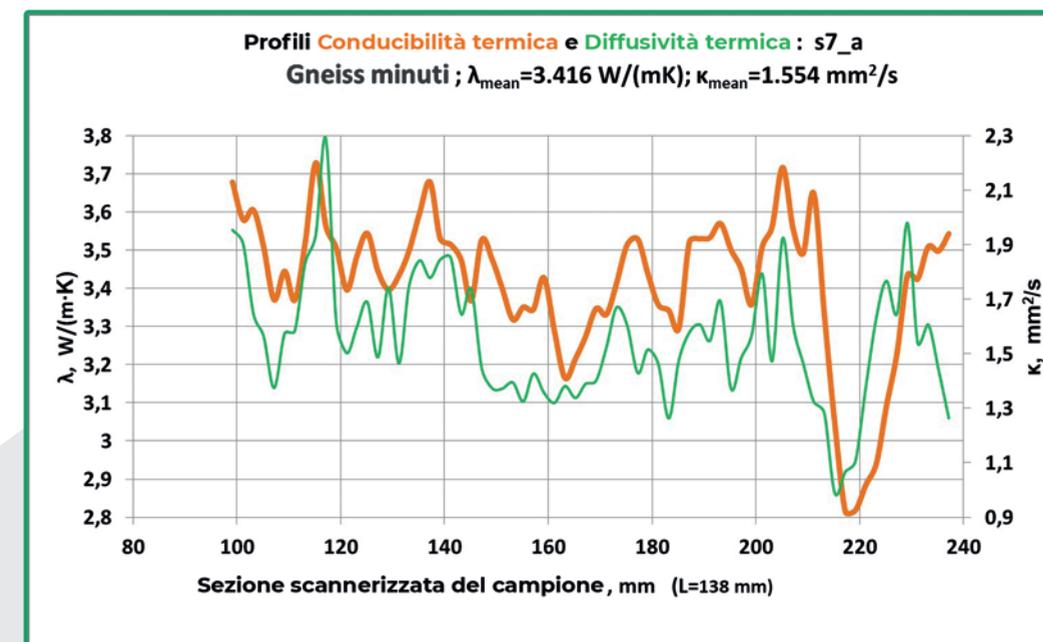


Fig. 21: Risultati della scansione (parallela alla foliazione) del campione 7 (Gneiss minuti).

B.3.4 » **POTENZIALE GEOTERMICO DEGLI IMPIANTI A CIRCUITO CHIUSO**

Campione	Litologia	TC (W/m/K)			TD (mm ² /s)		
		TC med	TC min	TC max	TD med	TD min	TD max
1	Graniti del Monte Bianco	3.12	2.72	3.74	1.62	0.83	3.80
2	Scisti Ultraelvetici	2.82	2.40	3.11	1.12	0.85	1.68
3	Flysch della zona di Sion-Courmayeur	3.23	2.90	3.59	1.14	0.88	1.99
4	Micascisti del Brianzonese esterno	4.04	2.78	6.31	1.04	0.58	2.04
5	Micascisti del Brianzonese interno	3.12	2.01	5.29	0.94	0.56	2.00
6	Calcescisti della zona Piemontese	3.41	2.63	3.92	1.27	0.62	2.46
7	Gneiss minuti	3.42	2.82	3.73	1.42	0.96	2.29
8	Metabasalti	2.46	1.99	2.94	0.81	0.52	1.01
9	Serpentiniti	3.41	3.16	3.78	0.95	0.73	1.22
10	Metagranitoidi Eclogitici	3.26	1.74	4.40	1.49	0.88	2.49
11	Metagranitoidi Eclogitici	3.44	3.09	3.96	1.82	0.64	3.93
12	Gneiss del Gran Paradiso	3.43	2.97	3.80	1.32	0.79	2.03
13	Ortogneiss	3.33	2.89	3.69	1.51	1.34	1.80

Tab. 3: Valori medi, minimi e massimi di conducibilità (TC) e diffusività (TD) termica dei 13 campioni di roccia.

Come detto, le sonde geotermiche hanno il grande vantaggio di poter essere installate praticamente ovunque, tuttavia la medesima sonda installata in luoghi diversi scambierà con il sottosuolo una diversa quantità di calore, in funzione delle caratteristiche del terreno. La capacità del sottosuolo di scambiare calore con la sonda viene definita “potenziale geotermico”, da cui dipende, quindi, il numero di sonde (o i metri di perforazione) da installare per soddisfare il fabbisogno termico di un edificio. In letteratura vi sono diversi metodi di valutazione del potenziale geotermico a circuito chiuso: nell'ambito del progetto GRETA è stato adottato il metodo G.POT (Geothermal POTential) (Casasso e Sethi 2016 [14]) nelle diverse aree pilota del progetto, tra cui la Valle d'Aosta. Questo metodo consente di valutare la quantità annua di energia sostenibilmente scambiabile tra una sonda e l'edificio in funzione di una serie di variabili sia lato terreno che lato scambiatore/edificio. Tra le prime, la **temperatura del terreno** (vedi par. A.1) e la **conducibilità termica del terreno** (vedi par. A.2.3) giocano un ruolo determinante; lunghezza della sonda e modalità di utilizzo (lunghezza della stagione di riscaldamento) sono altre variabili importanti, mentre capacità termica del terreno e altre caratteristiche costruttive dell'impianto (diametro dei tubi, resistenza termica della sonda) giocano un ruolo meno importante. G.POT ipotizza un carico termico con andamento sinusoidale con un tempo di ciclo pari alla lunghezza della stagione di riscaldamento. Si ipotizza inoltre un terreno omogeneo isotropo e quindi i valori dei parametri termici del terreno devono essere calcolati come media ponderata sulla profondità della sonda ipotizzata.

Dalle mappe del potenziale geotermico è possibile valutare, in fase preliminare di preventivazione dei costi, il numero di sonde necessario per soddisfare la richiesta termica dell'edificio, ma non quanta energia elettrica sia necessaria per far funzionare la pompa di calore. Il consumo della pompa di calore, infatti, dipende dall'efficienza (SPF) della stessa e dalle modalità di funzionamento dell'impianto di distribuzione.

Analogamente a quanto accade per la temperatura dell'aria, più si sale di quota è più si abbassa anche la temperatura del suolo, quindi sarà più difficile scambiare calore con esso in modalità riscaldamento. Tuttavia, a quote elevate, ci sono altri fattori che influenzano la temperatura del suolo, come la copertura nevosa, che agisce da isolante termico del terreno nei mesi freddi, e l'esposizione dei versanti alla radiazione solare. Per questo motivo, la mappa delle temperature del suolo presentata di seguito è limitata a quote inferiori ai 2000 m s.l.m., oltre le quali la stima risulterebbe poco attendibile. La mappa in Fig. 22 è stata realizzata tenendo conto della temperatura media annua dell'aria rilevata in 38 stazioni meteorologiche della valle, correlata con la quota delle stazioni stesse e ponderata tenendo conto del gradiente geotermico.

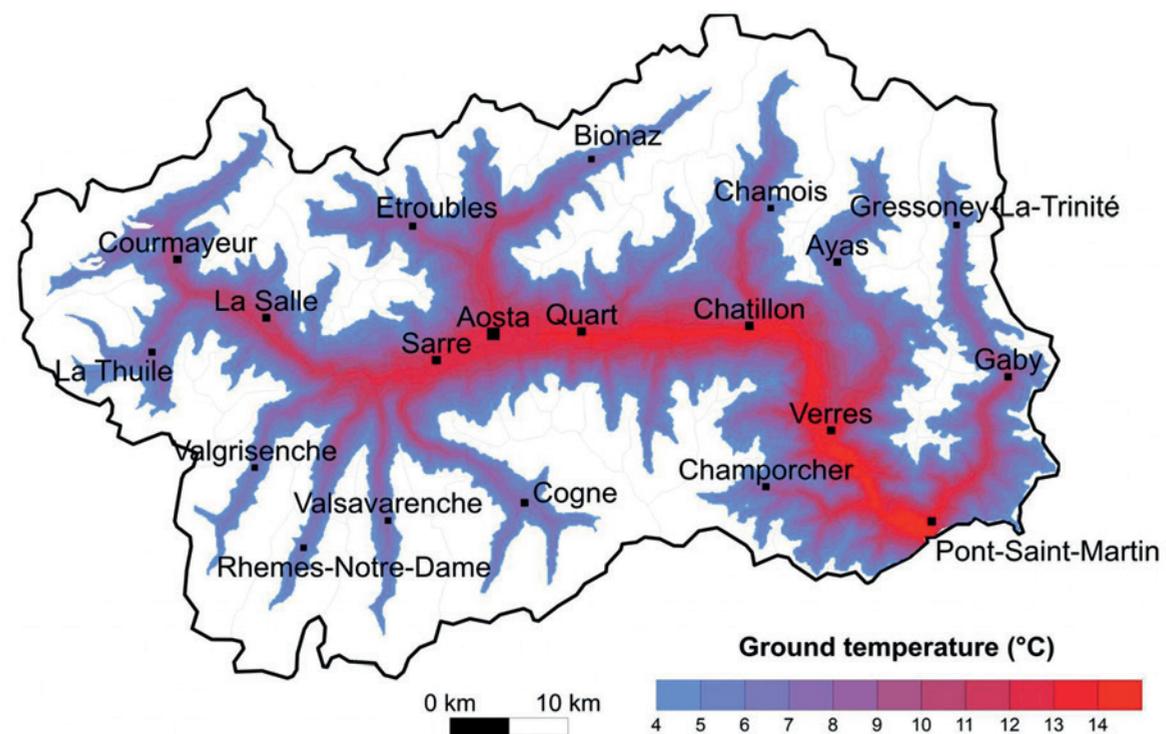


Fig. 22: Carta della temperatura del suolo a quote inferiori ai 2000 m.
Fonte: Diati

L'energia scambiata da una sonda dipende in maniera determinante dalla durata della stagione di riscaldamento: più il fabbisogno termico è elevato (e questo si verifica soprattutto a quote elevate) maggiore sarà anche la quantità di energia scambiata dalla sonda. Per questo motivo l'effetto della bassa temperatura del terreno a quote elevate è parzialmente compensato da una più lunga stagione di riscaldamento, che rende il potenziale comunque significativo anche a quote più alte. Maggiori dettagli sulla mappatura del potenziale geotermico a circuito chiuso sono disponibili in un articolo di prossima pubblicazione sulla rivista Rendiconti Online della Società Geologica Italiana (Casasso et al. 2018 [12]).

In Fig. 23 è riportata la mappa del potenziale geotermico della valle d'Aosta per il territorio al di sotto dei 2000 m slm. Si notano generalmente due effetti: una graduale diminuzione dei valori con la quota, e nette variazioni in funzione delle caratteristiche geologiche. Il variare dei valori di conducibilità termica (analizzati da test di laboratorio su campioni di roccia, esposti nel par. B.3.3) gioca infatti un ruolo decisivo, in particolare in quelle aree dove la carta geologica 1:100000 di ISPRA utilizzata per questa elaborazione indica la presenza di spessi depositi quaternari di origine fluviale o glaciale.

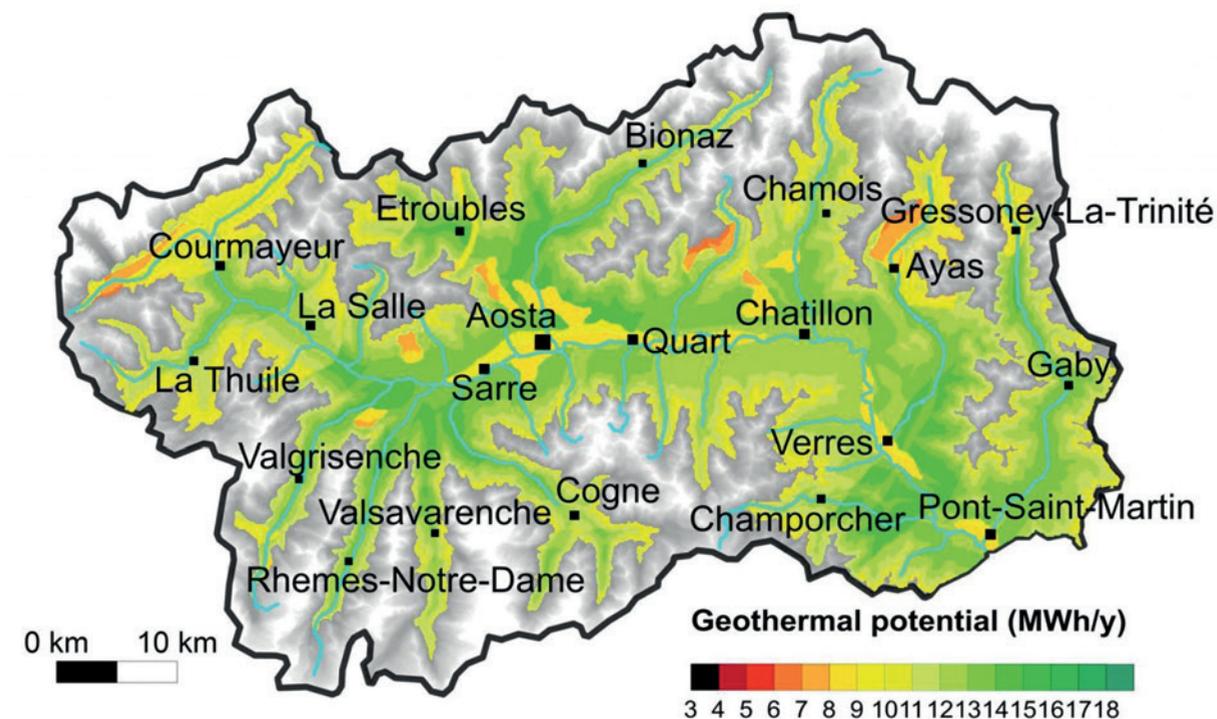


Fig. 23: Carta del potenziale geotermico quote inferiori ai 2000 m.
Fonte: Diati

I valori sono generalmente alti (anche maggiori di 10 MWh/anno, soglia oltre la quale il potenziale geotermico è considerabile come buono) specie nelle valli laterali, caratterizzate dalla presenza di rocce metamorfiche particolarmente conduttive, mentre si attestano su valori minori (tra gli 8 e i 10 MWh/anno) nelle piane alluvionali del fondovalle principale. Anche in questo caso si tratta di valori comunque buoni, grazie alle temperature del sottosuolo piuttosto elevate.

Proprio in queste zone, inoltre, la presenza di un potente acquifero superficiale permette l'installazione di impianti geotermici a circuito aperto molto efficienti. Nel paragrafo seguente si analizza nel dettaglio quale sia il potenziale geotermico per impianti a circuito aperto proprio in questa zona.

B.3.5 » POTENZIALE GEOTERMICO DEGLI IMPIANTI A CIRCUITO APERTO

Il potenziale geotermico per impianti a circuito aperto è diverso da quello relativo al circuito chiuso, e in particolare rappresenta la massima quantità di energia sostenibilmente scambiata da un impianto con l'acquifero. Ciò è dovuto al meccanismo di scambio termico, profondamente diverso: mentre la sonda geotermica scambia calore con il terreno posto nelle immediate vicinanze, e quindi il potenziale dipende principalmente dalla capacità del terreno di dissipare l'alterazione termica, gli impianti a circuito aperto lavorano estraendo acqua proveniente da una zona molto più ampia, e reiniettando acqua termicamente alterata che si propagherà a valle. La limitazione è quindi data non tanto dalla quantità di calore scambiato, ma dalla portata che è possibile estrarre (e reiniettare in falda, se ciò è permesso; non è questo il caso della Valle d'Aosta, ma di tutto il resto d'Italia), e quindi dalle caratteristiche idrauliche dell'acquifero. L'utilizzo dell'impianto può però avvenire durante tutto l'anno, e ciò ad esempio è di grande interesse per utenze di solo raffrescamento come i data center.

Trattandosi di un valore massimo, il potenziale geotermico a circuito aperto raggiunge valori molto maggiori di quello delle sonde a circuito chiuso e la relativa mappa serve principalmente per capire se in una zona si possa o meno installare un impianto di una certa taglia. È da notare che, mentre per gli impianti a circuito chiuso basta aumentare il numero di sonde per soddisfare una maggiore richiesta energetica (se è disponibile un'area sufficiente per farlo), per gli impianti a circuito aperto questo spesso non vale, perché il numero di pozzi installabili è difficilmente aumentabile a causa delle interazioni reciproche tra i pozzi (sovrapposizione dei "coni di depressione della falda").

L'energia scambiabile con l'acquifero dipende dalla quantità di acqua che si può sostenibilmente prelevare e dall'alterazione termica massima ammissibile (quest'ultima usualmente definita per regolamento o in sede di approvazione dell'impianto). Per mappare il potenziale di scambio termico è dunque necessario determinare la massima portata d'acqua prelevabile dall'acquifero, tale per cui non si verificano i seguenti tre fenomeni identificati come critici:

- L'abbassamento della falda nell'intorno del pozzo di prelievo;
- L'innalzamento della falda nei dintorni del pozzo di reiniezione (scongiurando eventuali allagamenti in strutture sotterranee);

- Il cortocircuito termico tra il pozzo di reiniezione e quello di prelievo (vedi par. A.2.4.1).

È stata scelta quale soglia un abbassamento limite della piezometrica di un terzo dello spessore saturo e un innalzamento al pozzo di reiniezione fino ad un massimo di 0,5 m al di sotto del piano campagna. Per ciascuna di queste tre condizioni è quindi possibile calcolare una portata massima ammissibile. La minore di queste tre portate massime, rappresenta la portata limite prelevabile sostenibilmente in una determinata area. Nota questa portata limite e definito un valore di alterazione termica accettabile, è possibile calcolare la potenza massima installabile e, dalla durata del periodo di funzionamento, anche l'energia scambiabile annualmente con l'acquifero.

La mappa del potenziale geotermico per impianti a circuito aperto è stata realizzata per la parte centrale della piana di Aosta, dove sono attualmente attivi la maggior parte di questi impianti e dove sono disponibili i dati caratteristici dell'acquifero, indispensabili per la valutazione del potenziale. In questa zona il fenomeno del cortocircuito termico si rivela essere quello limitante, poiché la falda è molto potente e non particolarmente superficiale, a scongiurare sia i rischi di eccessivo abbassamento che di allagamento di cui sopra. Il cortocircuito termico è strettamente legato alle caratteristiche costruttive dell'impianto ed in particolare alla distanza tra il doppietto di pozzi: se tale distanza è ridotta, a causa di spazi disponibili limitati, è più bassa la portata per la quale l'area di cattura del pozzo di prelievo e l'area di rilascio del pozzo di resa si sovrappongono, dando origine al cortocircuito termico. Aumentando la distanza, aumenta proporzionalmente la portata minima che attiva tale fenomeno. Una soluzione percorribile proprio in caso di spazi ridotti e per evitare il cortocircuito è, comunque, quella dello scarico in acque superficiali: peraltro, allo stato attuale, tale soluzione tecnica è obbligatoria in Valle d'Aosta, dove non è permessa la reiniezione in falda.

In Fig. 24 si riporta la mappa delle portate massime emungibili per evitare il cortocircuito termico tra un doppietto di pozzi installati a 10 m di distanza. Da questa mappa, considerando un raffreddamento dell'acqua reiniettata di 5°C e un tempo di funzionamento dell'impianto di 2000 ore equivalenti a pieno regime (valore tipico dei comuni in fascia climatica E, come Aosta) è possibile ricavare una mappa (Fig. 24) del potenziale geotermico, sia come potenza installabile che come energia annua scambiabile. I valori più importanti sono nelle zone del centro di Aosta e nei suoi dintorni e indicano che tale zona si presta bene all'installazione di pompe di calore geotermiche a circuito aperto. I valori più bassi sono quelli tipici di case uni-bifamiliari, oltre i 100 MWh/anno è un tipico piccolo condominio da meno di una decina di alloggi, una grande utenza commerciale potrebbe invece necessitare di alcune centinaia di MWh/anno. Va notato come questo potenziale vari linearmente con la distanza tra il doppietto di pozzi; potendo quindi disporre ad esempio di 20 m di distanza tra i due pozzi, questo potenziale sarà doppio. Riportiamo quindi in Fig. 26 anche la mappa del potenziale nel caso in cui la distanza tra i pozzi sia estendibile fino a 100 m.

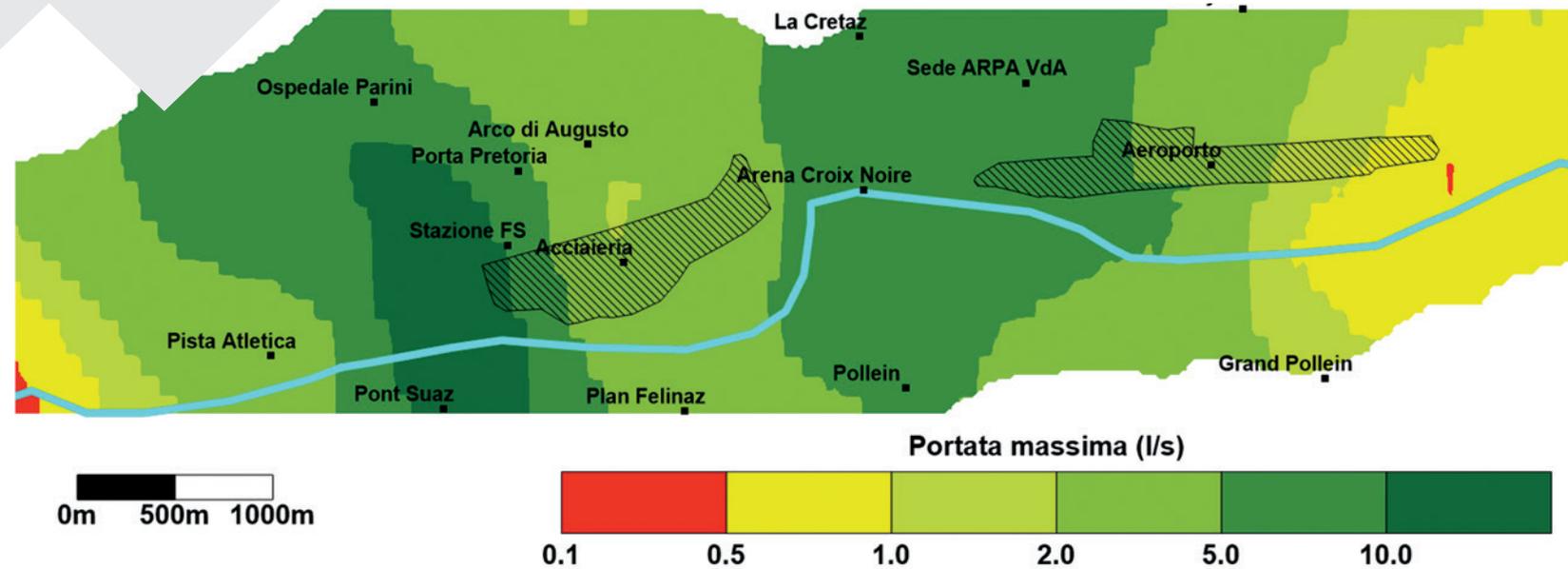


Fig. 24: Portata massima emungibile dall'acquifero nella zona centrale della piana di Aosta, per impianti a circuito aperto con distanza dei pozzi di 10 m. Fonte: DIATI

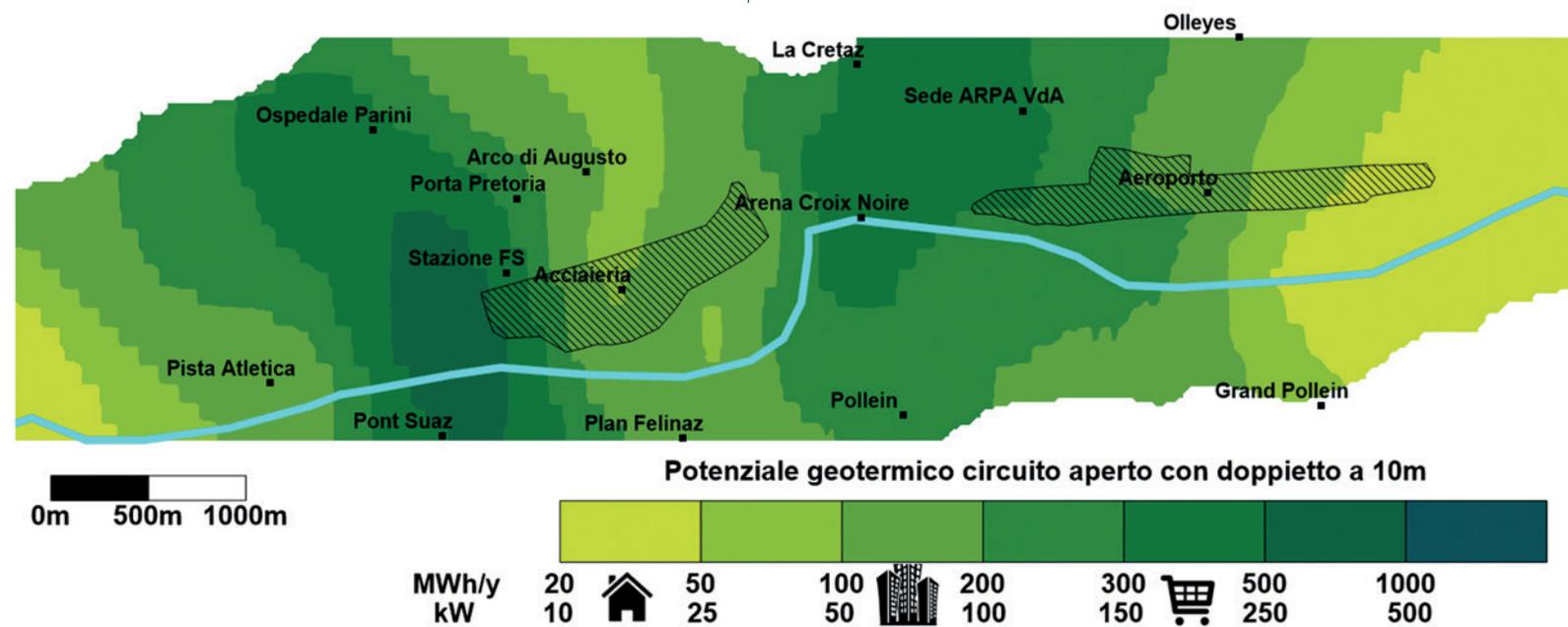


Fig. 25: Potenziale geotermico della zona centrale della piana di Aosta, per impianti a circuito aperto con distanza dei pozzi di 10 m e acqua restituita in falda più fredda di 5°C. Fonte: DIATI

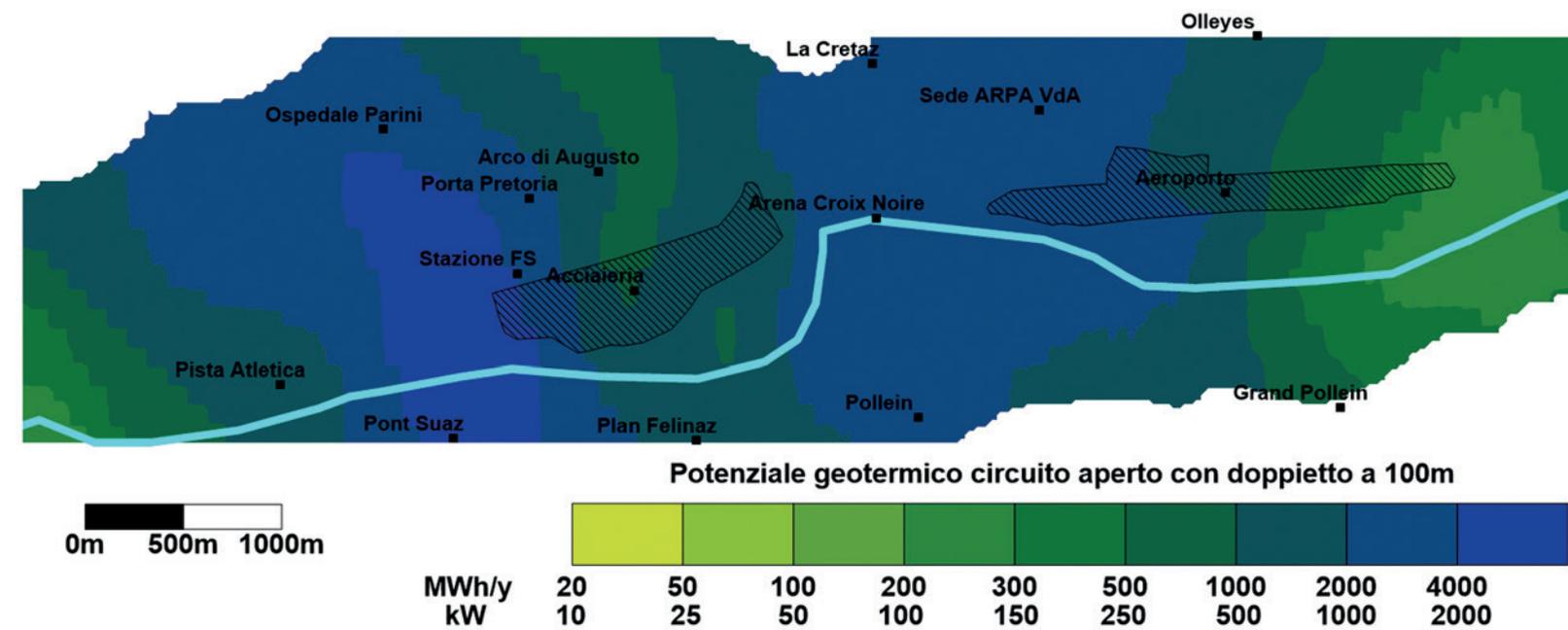


Fig. 26: Potenziale geotermico della zona centrale della piana di Aosta, per impianti a circuito aperto con distanza dei pozzi di 100 m e acqua restituita in falda più fredda di 5°C. Fonte: DIATI

B.3.6 » PIANIFICAZIONE ENERGETICA

B.3.6.1 » Introduzione alle analisi

La geotermia a bassa entalpia, sfruttabile attraverso l'uso di pompe di calore, può svolgere un ruolo strategico all'interno delle politiche energetiche valdostane nel soddisfare una quota importante della domanda termica da fonti rinnovabili, incrementando l'efficienza e la flessibilità dei sistemi di riscaldamento e raffreddamento degli edifici e dell'intero sistema energetico regionale, e contribuendo nel contempo a ridurre le emissioni di gas serra e di alcuni inquinanti atmosferici. Nonostante questi vantaggi, le pompe di calore geotermiche sono ancora poco considerate nella definizione di politiche e strategie energetiche (dalla scala europea a quella locale, non solo in Valle d'Aosta). È quindi importante aumentare la consapevolezza dei vantaggi che questa tecnologia offre a tutti i livelli, dal cittadino, ai tecnici/installatori/progettisti, fino ai decisori politici.

Il metodo descritto di seguito mira appunto a proporre una procedura, che abbia come obiettivo quello di fornire informazioni di supporto per la definizione di strategie e/o piani energetici regionali/locali che sappiano integrare efficacemente la risorsa geotermica. I risultati ottenuti dall'applicazione di questo metodo non possono invece sostituire le fasi di analisi in loco e progettazione finalizzate all'installazione di un impianto a pompa di calore geotermica a servizio di un dato edificio.

La metodologia proposta include esplicitamente la variabile spaziale in quanto sia la domanda di energia termica che l'energia sfruttabile attraverso le pompe di calore geotermiche sono dipendenti dalla posizione. Il processo tiene in considerazione anche gli aspetti legislativi, ambientali e tecnico-finanziari (analizzati e descritti nei deliverables del progetto GRETA) per l'introduzione delle pompe di calore geotermiche a scala di edificio. Pertanto, dopo aver verificato il rispetto dei vincoli legislativi ed ambientali, per ogni edificio viene effettuato un dimensionamento di massima delle principali componenti di un impianto geotermico, tenendo in considerazione le caratteristiche geofisiche del terreno, la domanda di energia termica dell'edificio e la presenza nelle vicinanze di altre installazioni che possono interferire tra loro.

All'interno del progetto GRETA sono stati sviluppati alcuni "moduli" computazionali specifici, che verranno rilasciati come open-source, per fornire gli strumenti necessari a ripercorrere e riprodurre la metodologia descritta di seguito. La versione attuale fa uso principalmente di software quali GRASS GIS, Python e R. Tali "moduli" si inseriscono all'interno di una serie di strumenti per la valutazione spazializzata del potenziale di produzione energetica da fonti rinnovabili, in particolare per quanto riguarda la biomassa forestale (Sacchelli et al. 2016 [15], Zambelli et al. 2012 [16]) e l'idroelettrico ad acqua fluente (Garegnani et al. 2018 [17]).

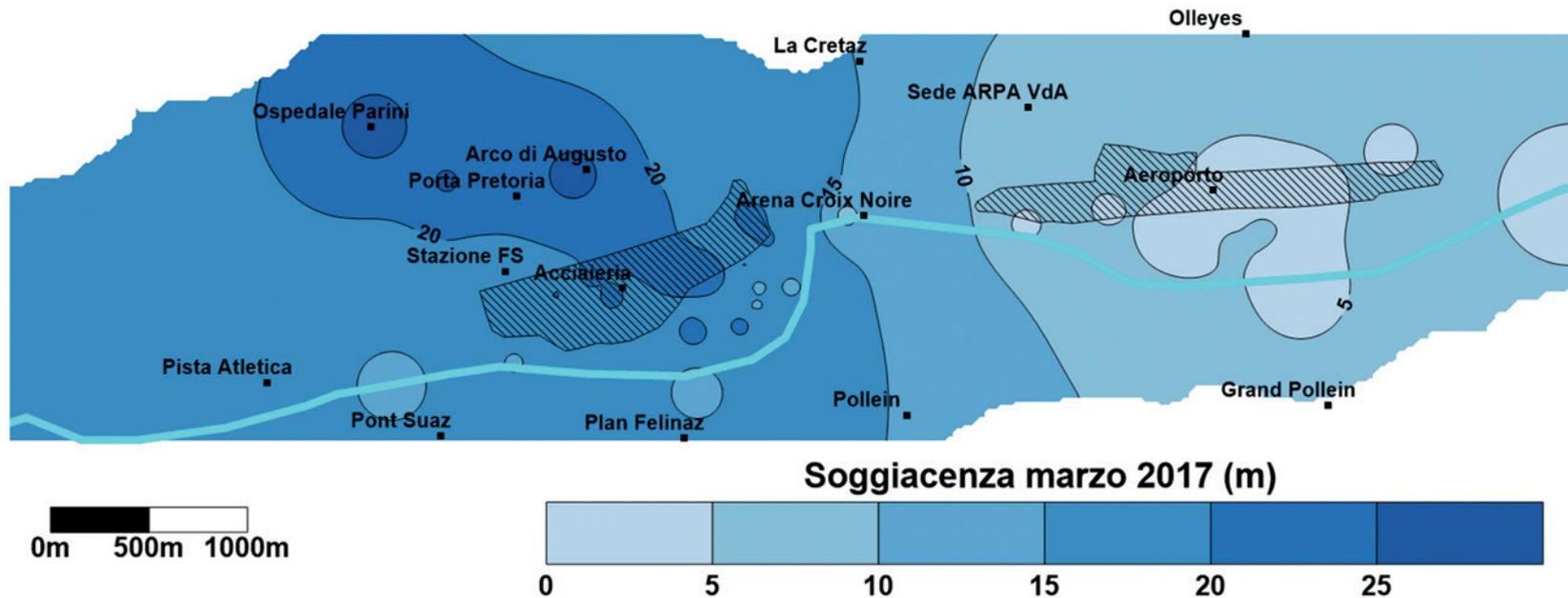


Fig. 27: Carta della soggiacenza della zona centrale della piana di Aosta. Fonte: DIATI

La profondità della superficie libera della falda (soggiacenza) è un importante fattore che influisce sui costi, sia di pompaggio che di installazione: più profonda sarà la falda maggiore sarà il costo per trivellazione e messa in posa del pozzo e maggiori i consumi della pompa di emungimento, che si andranno a sommare a quelli della pompa di calore. Dalla cartina in Fig. 27 si osserva che le condizioni sono tendenzialmente favorevoli in quanto la soggiacenza è generalmente limitata, salvo la zona del conoide del T. Buthier ove i valori sono oltre i 20 m. Dove la falda è più superficiale, come nei dintorni e a valle dell'aeroporto, i costi scendono ma sale il rischio di allagamento di scantinati e strutture sotterranee dovuti alla reiniezione dell'acqua in falda.

I parametri di base necessari per condurre questa analisi sono le mappe relative alle caratteristiche geofisiche del sottosuolo (fornite da ARPA Valle d'Aosta) e le mappe contenenti la domanda di energia termica degli edifici (elaborate da Eurac Research per ogni singolo edificio). Partendo da questi due dati di input è stato possibile dimensionare l'impianto geotermico di superficie, stimare i costi di tale sistema e confrontarli con i costi di tecnologie alternative (ad esempio caldaie a gas e a gasolio). In sintesi, l'analisi è in grado di fornire delle mappe a scala regionale/locale che indicano il grado di convenienza economica e di finanziabilità delle pompe di calore geotermiche confrontate con un sistema di riscaldamento alternativo, fornendo quindi uno strumento per quantificare la domanda termica degli edifici che può essere coperta con la geotermia di superficie a bassa entalpia.

B.3.6.2 » Metodologia sviluppata

La metodologia elaborata calcola la capacità del potenziale delle pompe di calore geotermiche di coprire la domanda termica dei singoli edifici. Il metodo si articola in quattro fasi principali: (1) esclusione di tutte le aree che presentano vincoli legislativi, ambientali o tecnici; (2) stima della domanda termica dell'edificio, se non disponibile come informazione misurata; (3) dimensionamento delle componenti dell'impianto geotermico, ed in particolare dimensionamento della potenza di picco e della lunghezza della sonda, nel caso di circuiti chiusi, o della portata massima di acqua da estrarre nel caso di circuiti aperti; (4) date le componenti dell'impianto, stima dei costi operativi, di investimento e manutenzione del sistema geotermico, e successivo confronto con i costi delle tecnologie alternative, calcolando alcuni indicatori finanziari per valutare la convenienza o meno della pompa di calore geotermica.

Nella prima fase si escludono dall'analisi tutte quelle aree in cui non è possibile l'uso della geotermia a causa di vincoli ambientali (ad es. siti contaminati), legali (ad es. distanza minima da rispettare da pozzi di adduzione dell'acquedotto) e tecnici (ad es. presenza di frane che potrebbero compromettere l'integrità della sonda dei sistemi a circuito chiuso).

La seconda fase richiede la caratterizzazione della domanda di energia termica degli edifici esistenti. Per poter valutare l'uso della geotermia di superficie è necessario infatti partire dalla domanda che deve essere soddisfatta con questa tecnologia. A differenza di altre fonti rinnovabili che producono energia elettrica, che può essere stoccata o dislocata e per le quali è quindi possibile stimare un potenziale teorico massimo "realizzabile" (ad esempio nel caso del fotovoltaico tale potenziale sarebbe principalmente funzione della superficie totale ricopribile) nel caso della geotermia a bassa entalpia, considerate le limitate possibilità di stoccaggio o di conferimento ad una rete, il potenziale teorico massimo risulterebbe meno indicato. Tale potenziale infatti, da una parte risulterebbe difficilmente esprimibile in quanto lo stesso, considerata una determinata area, dipenderebbe, oltre che dalle proprietà del terreno, dalla profondità rag-

giunta dalle singole sonde e quindi sarebbe variabile. Dall'altra, fissando una lunghezza delle sonde massima, il potenziale così calcolato non sarebbe rappresentativo, poiché potrebbe indicare dei quantitativi di energia non sfruttabili/sfruttati localmente e quindi non rilevanti per la pianificazione. Per quello che riguarda la geotermia di bassa entalpia quindi, il vincolo per la quantificazione del potenziale non è principalmente dimensionale (come è il caso della massima superficie ricopribile dal fotovoltaico) ma bensì operativo-economico ed è dato dalla soluzione impiantistica che ottimizza la dimensione dell'impianto in funzione della domanda termica da soddisfare. La caratterizzazione della domanda energetica degli edifici può essere basata su dati di consumo reale (ad es. dati raccolti dalle aziende che si occupano della distribuzione di metano, GPL, gasolio, ecc.). Tuttavia, nel caso di territori ampi come quello in esame (un'intera regione Italiana), tali informazioni sono difficilmente reperibili. Una seconda possibilità è quella di utilizzare i dati contenuti negli Attestati di Prestazione Energetica (APE) degli edifici che stimano la domanda annuale di energia per metro quadro. Le informazioni fornite dagli APE non sono comunque sufficienti per caratterizzare in modo completo la domanda termica, in quanto sarebbe necessario definire anche quale porzione dell'edificio sia utilizzata in modo continuativo e quale sia utilizzata solo in alcuni periodi (ad es. seconde case) o rimanga totalmente inutilizzata. Inoltre, per poter utilizzare le informazioni degli APE, è necessario che questi dati siano raccolti in modo sistematizzato e georiferiti.

Nello svolgimento delle attività progettuali inerenti il caso di studio della Valle d'Aosta, non è stato possibile reperire i dati dei consumi energetici per ogni singolo edificio né accedere alle informazioni degli attestati energetici. Per caratterizzare la domanda termica si sono quindi utilizzati gli APE degli edifici della regione Lombardia (dataset CENED [18]), rilasciati come open-data. Sono stati selezionati gli attestati riguardanti solo interi edifici e relativi alla sola fascia climatica F (più del 70% dei comuni della Valle d'Aosta si trova in questa zona climatica); inoltre si sono esclusi dall'analisi tutti gli "outliers", ovvero tutti quegli edifici i cui valori di rapporto tra superficie disperdente e volume (S/V) ed efficienza dell'impianto di riscaldamento risultavano inferiori al secondo e superiori al novantottesimo percentile. Sono stati esclusi anche tutti gli edifici la cui superficie riscaldata era minore di 20 metri quadri. Dai dati così filtrati è stato calcolato il valore di trasmittanza termica globale per ogni singolo edificio certificato. Si sono poi incrociate queste informazioni con i dati ISTAT dell'ultimo censimento degli edifici (ISTAT 2011 [19]) riferiti alla Valle d'Aosta, dove per ogni sezione di censimento è disponibile il numero di edifici residenziali costruiti per epoca di costruzione. La procedura descritta è stata integrata con i dati puntuali degli agglomerati storici, assegnando l'epoca di costruzione più vecchia (fino al 1918) a tutti gli edifici che ricadevano in prossimità dall'agglomerato storico. Gli edifici ad uso prevalentemente residenziale sono stati estratti dalla carta tecnica regionale; ogni edificio è stato caratterizzato con: volume riscaldata, numero di piani, area riscaldata e rapporto S/V. Per ogni sezione di censimento della Valle d'Aosta, è stato quindi assegnato il valore di trasmittanza termica globale di un edificio "lombardo" (proveniente dal dataset CENED) all'edificio "valdostano" più simile per valori di superficie riscaldata totale e di rapporto S/V, a parità di epoca di costruzione. Ottenuto così il valore di trasmittanza termica, è stato fatto un bilancio energetico di ogni edificio che tenesse conto, da un lato, delle perdite dovute all'involucro e alla ventilazione e, dall'altro lato, includesse i carichi interni stimati e gli apporti solari attraverso le superfici vetrate (D.M. del 26/6/2009). I valori di domanda termica così ottenuti sono stati poi

B.3.6.3 » Risultati ottenuti

scalati per soddisfare i valori medi per epoca di costruzione e comune, forniti da COA Energia Finaosta. Dall'ultimo censimento della popolazione e delle abitazioni (ISTAT 2011 [19]) è stato inoltre possibile calcolare la percentuale di alloggi permanentemente occupati da persone residenti sul totale degli alloggi per epoca di costruzione, per ogni sezione di censimento. Gli alloggi utilizzati come seconda casa non sono stati esplicitamente censiti da ISTAT e non è stato possibile reperire altri dati a scala regionale riguardanti le seconde case. La domanda termica degli edifici, nei risultati che vengono presentati di seguito, è stata stimata assumendo altresì che l'intero edificio sia abitato e utilizzato, non includendo il suo effettivo livello di occupazione, difficilmente stimabile con le informazioni in nostro possesso.

La terza fase della metodologia consiste nel dimensionamento dell'impianto. Partendo dalla domanda energetica annuale viene calcolata la potenza massima che deve essere fornita dal sistema di riscaldamento. Per il dimensionamento degli impianti geotermici a circuito chiuso, si è utilizzato il metodo semplificato proposto da ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) (Philippe et al. 2010 [20]). L'ASHRAE tiene conto degli effetti cumulati sul terreno utilizzando come parametri di input: la potenza media più alta su sei ore, la potenza media più alta mensile e la potenza media annuale. Per stimare la potenza partendo dall'energia, si sono utilizzate delle curve di carico simulate con il software TRNSYS (elaborate dai partner del Politecnico di Torino; maggiori informazioni nell'articolo di Rivoire et al. 2018 [21], liberamente accessibile all'indirizzo indicato in sitografia) per due diverse tipologie di edificio residenziale (con buono e cattivo isolamento dell'involucro) e per le sei fasce climatiche (A-F). Mettendo a sistema la domanda annuale di energia termica e l'integrale della curva di carico oraria della potenza, è stata ricavata la potenza oraria specifica di ogni edificio. Per quanto riguarda invece i sistemi a circuito aperto, è stata calcolata la portata di acqua necessaria per soddisfare la domanda e si è confrontato questo valore di portata con quello presente nella mappa del potenziale della geotermia a circuito aperto (vedi par. B3.5).

Una volta dimensionate le componenti principali dell'impianto geotermico, nella quarta fase si procede alla stima della convenienza economica e della sostenibilità finanziaria dell'impianto stesso. Per quest'ultima analisi è importante definire i costi di investimento ed installazione e caratterizzare i costi operativi e di manutenzione dell'impianto. I sistemi di climatizzazione degli ambienti che sono stati considerati e messi a confronto sono: pompe di calore geotermiche (a circuito chiuso/aperto), sistema congiunto di caldaia a metano (per riscaldamento) e condizionatore (per raffrescamento), sistema congiunto di caldaia a gasolio (per riscaldamento) e condizionatore (per raffrescamento). Infine, sono stati utilizzati alcuni indicatori finanziari (Lu et al. 2017 [22]) per valutare la convenienza economica dei diversi sistemi nell'ipotesi di vita utile di 27 anni per il sistema a pompa di calore geotermica e di 20 anni per gli altri sistemi. Gli indicatori considerati sono: il periodo di ammortamento (*Discounted Payback Period - DPP*), il tasso di rendimento interno (*Internal Rate of Return - IRR*) ed il costo livellato dell'energia (*Levelized Cost of Energy - LCOE*).

L'applicazione di questa metodologia sul caso studio della regione Valle d'Aosta ha permesso di caratterizzare: la domanda termica degli edifici residenziali e l'idoneità tecnico-finanziaria dell'utilizzo della geotermia di superficie a scala di edificio.

Per quanto riguarda il primo risultato, la Fig. 28 rappresenta la stima dell'epoca di costruzione degli edifici, in cui sono state rispettate: le informazioni relative agli agglomerati storici presenti nel territorio regionale; la percentuale degli edifici costruiti nelle diverse epoche di costruzione, come rilevata dai dati del censimento ISTAT; la massima somiglianza per caratteristiche con gli edifici dei dati CENED. La Fig. 29 rappresenta invece la stima della domanda termica degli edifici (in kWh/mq), che rispetta il valore medio del numero di edifici per epoca di costruzione e comune proveniente dagli attestati di prestazione energetica.

Le aree presentate in Fig. 32, appartenenti ai comuni di Issogne e Verrès, sono riportate a solo titolo di esempio del lavoro svolto a scala regionale.

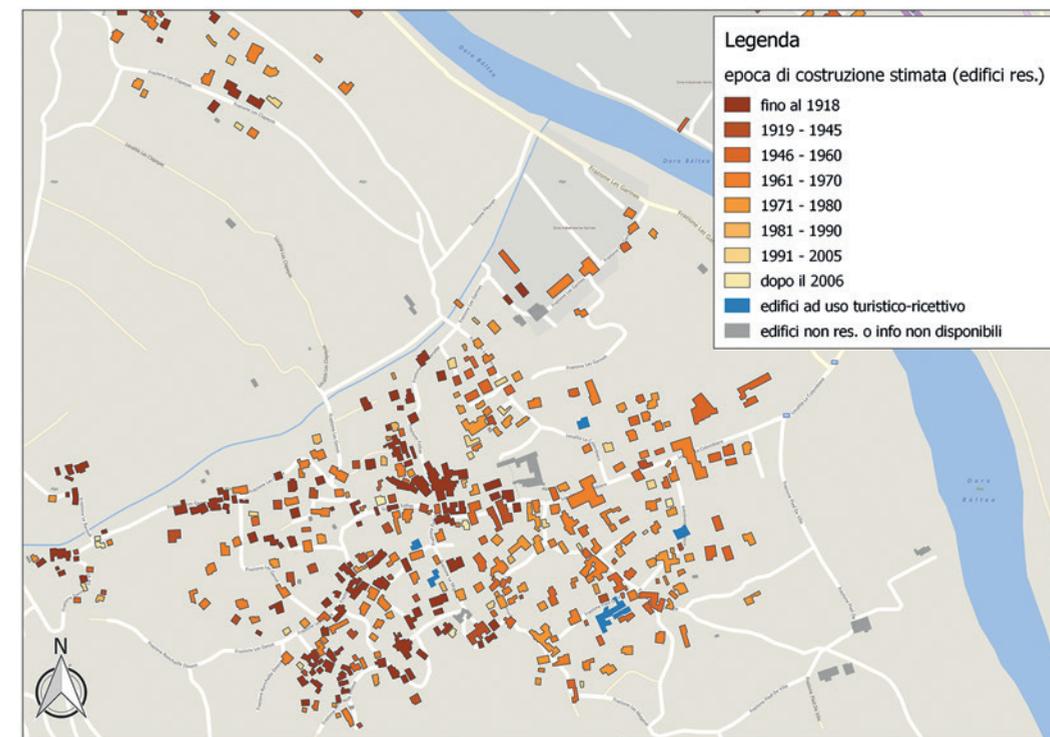


Fig. 28: Esempio di classificazione degli edifici residenziali valdostani per epoca di costruzione. La figura mostra il dato relativo al solo comune di Issogne. Fonti: EURAC Research, Bing mappe.

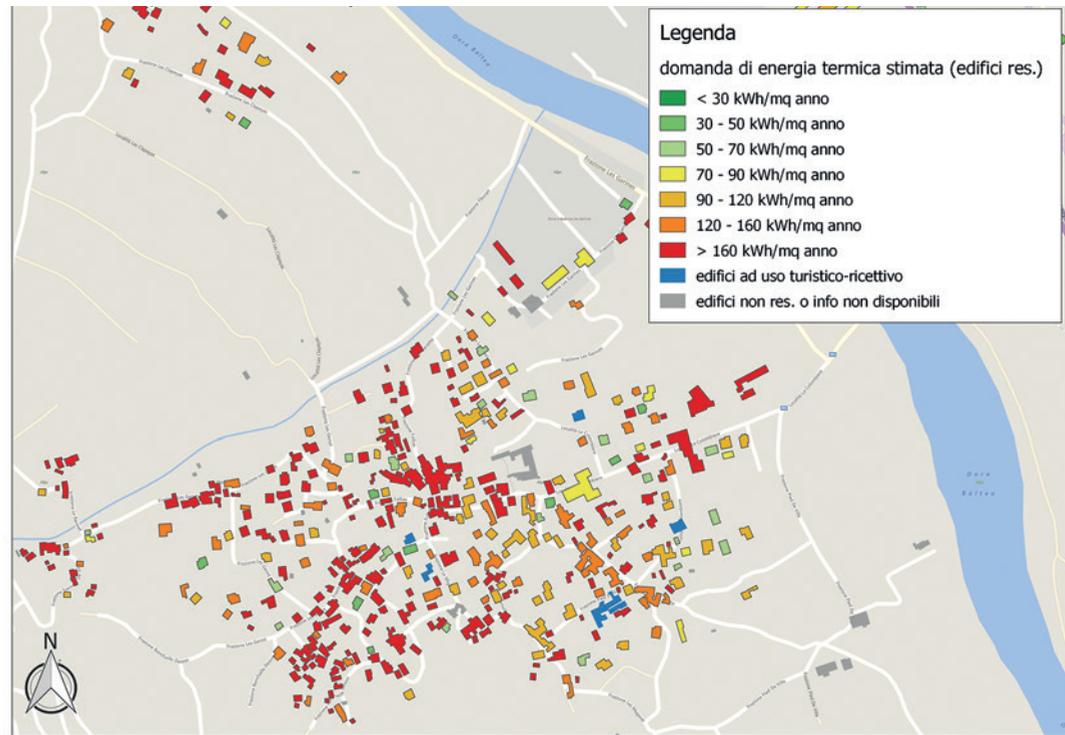


Fig. 29: Esempio di classificazione degli edifici residenziali valdostani per domanda termica annuale al metro quadro. La figura mostra il dato relativo al solo comune di Issogne. Fonti: EURAC Research, Bing mappe

Il secondo risultato riguarda la valutazione dell'idoneità tecnica e finanziaria delle pompe di calore geotermiche di soddisfare la domanda di energia termica del settore residenziale valdostano, sostituendo per quanto possibile le fonti di energia fossile nei sistemi di riscaldamento. In Fig. 30 è rappresentato il confronto tra il costo livellato dell'energia (LCOE) per le diverse tecnologie considerate nell'analisi economico-finanziaria: pompa di calore geotermica a bassa entalpia, sistema caldaia a gasolio e condizionatore, sistema caldaia a metano e condizionatore. Dalla figura emerge chiaramente la competitività della geotermia di superficie nei confronti dei sistemi con caldaie a gasolio e condizionatore. Per le pompe di calore geotermiche il costo al kWh termico è inferiore ai 6 centesimi di Euro nel caso di alcuni grandi edifici (con domanda termica alta), mentre nella maggior parte dei casi il costo è compreso tra i 6 e gli 8 centesimi di Euro.

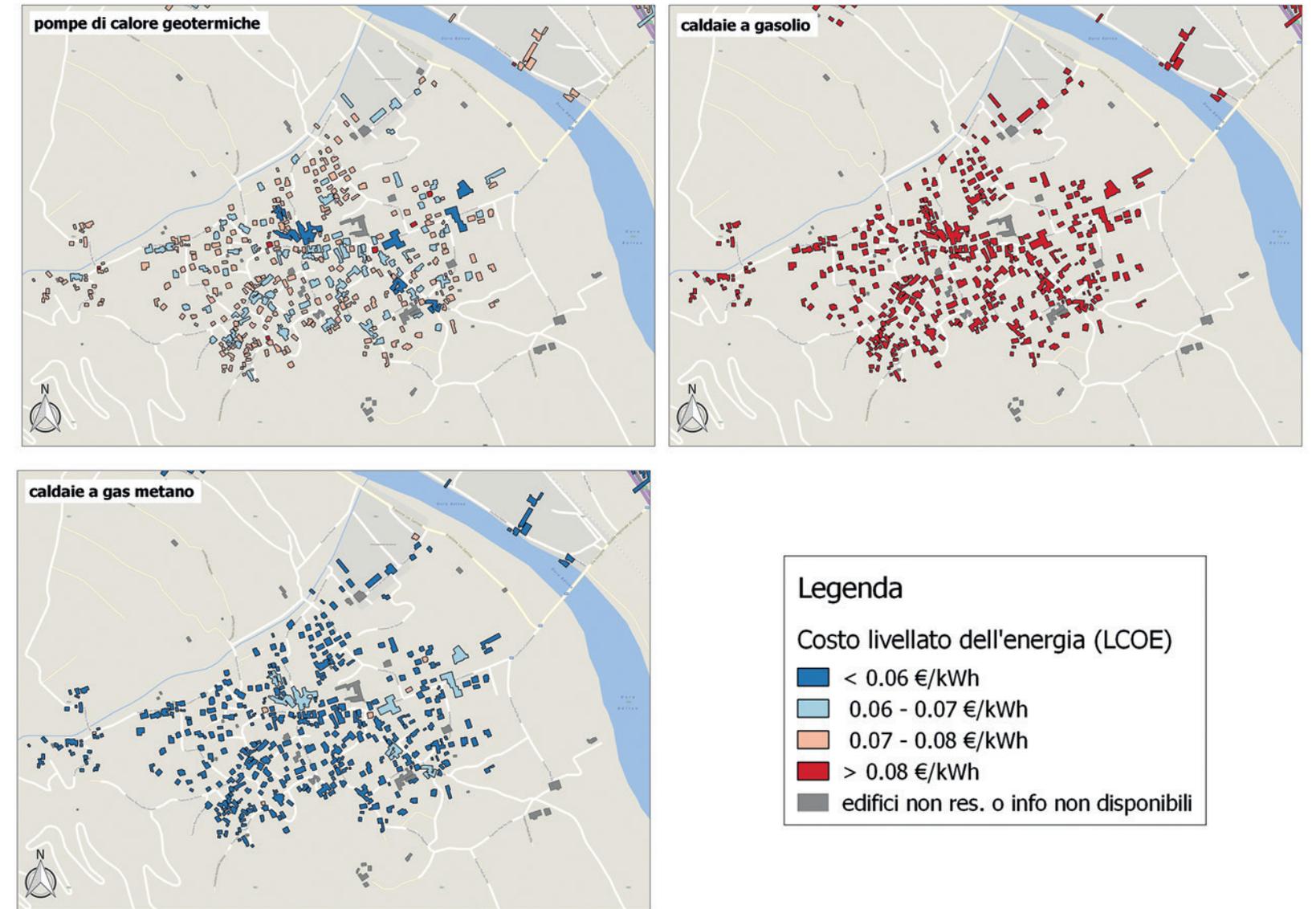


Fig. 30: Esempio di confronto tra i valori di LCOE per le diverse tecnologie considerate. La figura mostra il dato relativo al solo comune di Issogne. Fonti: EURAC Research, Bing mappe

In Fig. 31 è rappresentato invece il confronto tra il periodo di ammortamento (DPP) dell'installazione di un impianto a pompa di calore geotermica e, rispettivamente, un sistema caldaia a metano e condizionatore e un sistema caldaia a gasolio e condizionatore. L'indicatore del periodo di ammortamento mette in evidenza come un impianto a pompa di calore a circuito chiuso risulti sempre conveniente rispetto ad una caldaia a gasolio, con tempi di ritorno dell'investimento inferiori ai 7 anni per gli edifici più grandi, con una domanda termica maggiore. Mentre dal confronto con un sistema a metano emerge chiaramente come la scarsa differenza di costo per kWh tra le due fonti energetiche spesso non permetta di rientrare dall'investimento prima dei 20 anni. Ci sono anche molti casi in cui il tempo di ritorno dell'investimento è maggiore della durata utile della pompa di calore (da noi considerata di 27 anni).

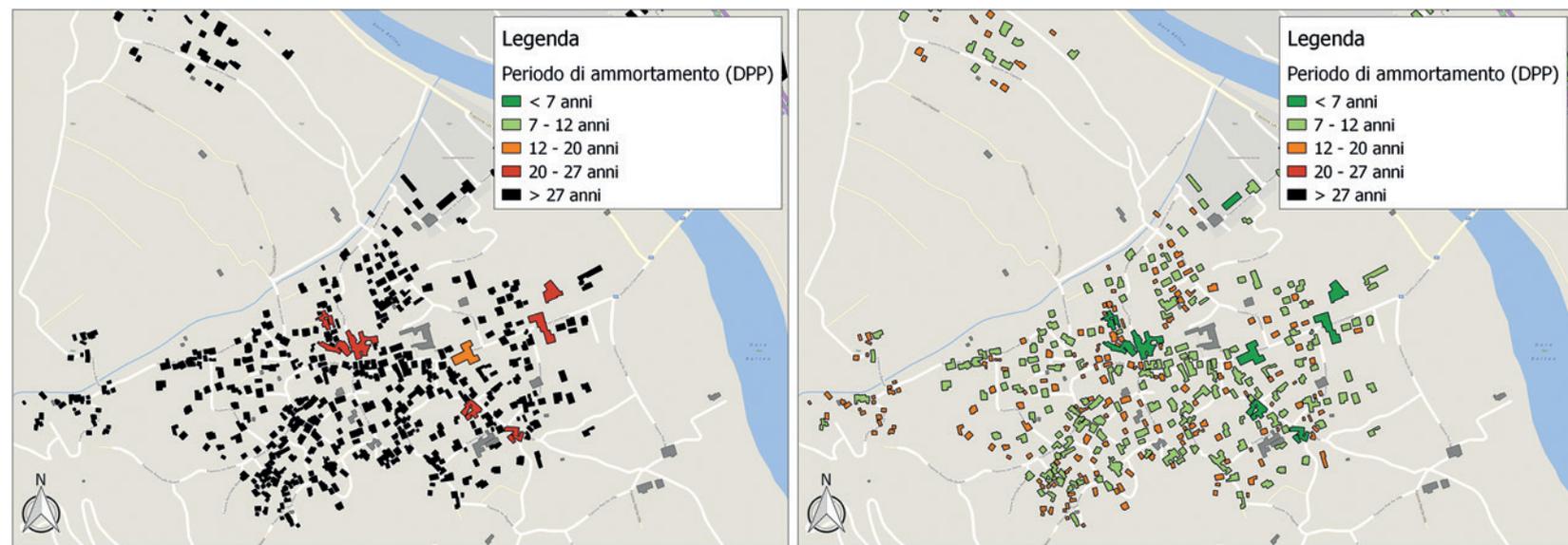


Fig. 31: Esempio di confronto tra i valori di DPP per l'installazione di pompe di calore geotermiche e le altre tecnologie considerate (metano a sx e gasolio a dx). la figura mostra il dato relativo al solo comune di Issogne.
 Fonti: EURAC Research, Bing mappe

I risultati riguardanti la stima della domanda termica possono essere utilizzati per classificare gli edifici residenziali dal punto di vista energetico e aiutare i decisori politici ad individuare le aree a cui dare priorità per possibili interventi di riqualificazione energetica del parco edilizio. I risultati relativi all'idoneità tecnica e finanziaria delle pompe di calore geotermiche possono invece essere utilizzati per identificare possibili obiettivi energetici e per la definizione di politiche energetiche locali che incentivino questa tecnologia.

La metodologia qui presentata è stata inoltre utilizzata per identificare le sezioni di censimento idonee alla realizzazione di una mini rete di teleriscaldamento alimentata dalla geotermia di superficie a bassa entalpia. Come soglia di densità di domanda termica sopra la quale potrebbe essere conveniente installare una "mini-grid" è stato individuato il valore di 150 MWh/ettaro all'anno (Hausladen e Hamacher 2011 [23]), come rappresentato in Fig. 32.

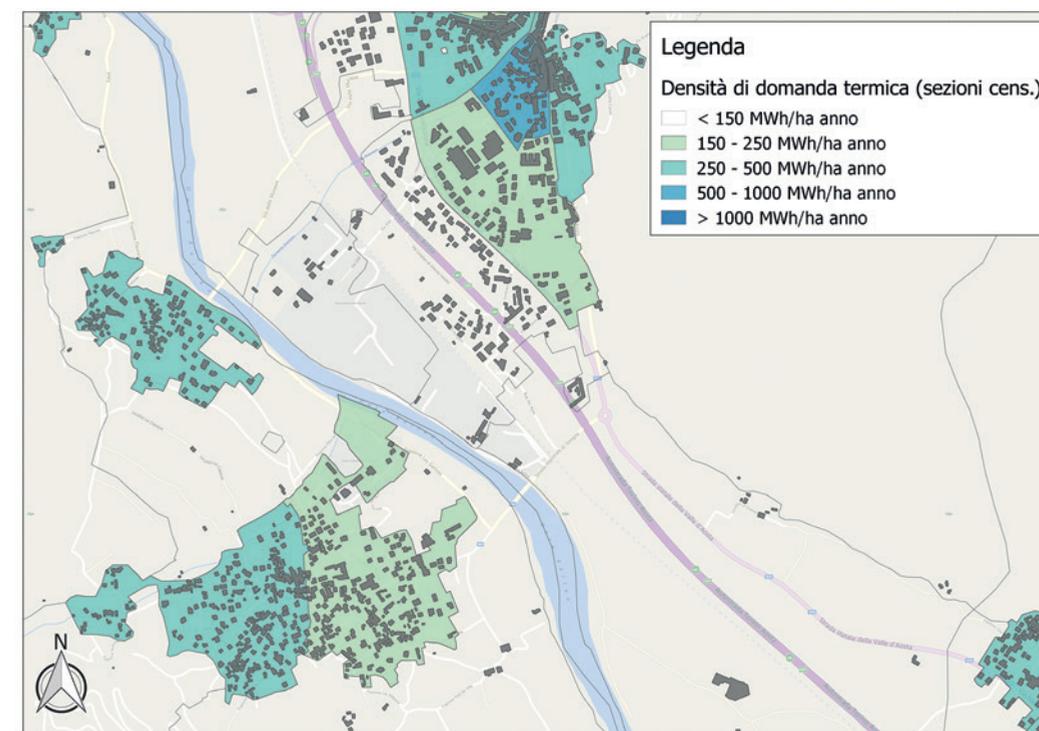


Fig. 32: Esempio di classificazione delle sezioni di censimento per densità di domanda termica (MWh/ettaro anno). La figura mostra il dato relativo ai comuni di Issogne e Verrès.
 Fonti: EURAC Research, Bing mappe

Le diverse fasi della metodologia sviluppata nell'ambito del progetto GRETA costituiscono i "moduli" di uno strumento di supporto alle decisioni per l'integrazione delle pompe di calore geotermiche nei piani e nelle strategie energetiche regionali. Tali "moduli" saranno disponibili come strumenti open-source e pubblicati nel software GRASS GIS o disponibili tramite piattaforma web.

B.3.6.4 » *Discussione dei risultati*

La metodologia qui presentata è in grado di stimare per singolo edificio i valori necessari alle elaborazioni, facendo in modo che i risultati siano in media coerenti con i dati disponibili a scala di sezione di censimento. Il metodo descritto consente di raggiungere un compromesso tra il numero di dati di input, il livello di dettaglio richiesto dai decisori politici e una stima affidabile dei principali indicatori finanziari ed economici. Al fine di definire obiettivi e strategie energetiche per il territorio regionale, questo livello di dettaglio risulta efficace ma richiede analisi più approfondite e mirate nel caso si vogliano definire interventi attuativi per specifici edifici o comparti. Condurre l'analisi alla scala di edificio lascia comunque grande flessibilità ai decisori politici nel definire e valutare differenti strategie energetiche. Ad esempio, alcuni sviluppi futuri dell'analisi potrebbero essere: valutare l'impatto sulla domanda termica di interventi di efficientamento energetico riferiti solo ad alcune tipologie edilizie; identificare dove può risultare conveniente creare od estendere delle reti di teleriscaldamento; simulare l'impatto che un diverso uso dell'energia da parte dell'utenza può avere sul sistema complessivo; valutare l'uso concorrente o combinato di diverse tecnologie rinnovabili e non. La raccolta delle informazioni e l'analisi dei dati per singolo edificio può altresì rappresentare un punto di incontro tra i processi di pianificazione territoriale (regionale e/o urbana) ed energetica, promuovendo sinergie nella definizione e nello sviluppo di strategie mirate alla transizione energetica alle diverse scale (quartiere, comune, valle, regione).

Il principale limite del metodo riguarda l'omogeneità e la disponibilità dei dati. Ad esempio, il livello di dettaglio spaziale dei dati di ISTAT (numero di edifici per epoca di costruzione, alloggi permanentemente occupati e totali, superficie riscaldata per epoca di costruzione, ecc.) è la sezione di censimento, mentre le caratteristiche dimensionali degli edifici sono state calcolate per ogni edificio (partendo da dati forniti dall'Ufficio Cartografico della Regione Valle d'Aosta). La combinazione tra queste due scale di analisi non è sempre facile e richiede alcune approssimazioni nel calcolo delle variabili che entrano in gioco nelle diverse fasi della metodologia. Inoltre, acquisire dati misurati di consumo energetico del patrimonio edilizio risulta fondamentale al fine di validare al meglio i valori stimati di domanda energetica. O ancora, ottenere informazioni a livello di edificio sulla reale occupazione degli alloggi residenziali (vedi ad esempio l'informazione parziale sulle seconde case) permetterebbe una migliore approssimazione del grado di utilizzo del parco edilizio. Infatti, il metodo proposto considera come residenziale l'intero volume degli edifici estratto dai dati dei voli

LIDAR (forniti anche questi dall'Ufficio Cartografico), ma nella realtà molti edifici sono ad uso misto, residenziale e non. Ad esempio, nei centri storici è molto difficile poter distinguere la domanda termica degli alloggi residenziali da quella di un negozio o di un ristorante al piano terra dell'edificio, o da quella di studi professionali presenti nello stesso edificio. Ciascuna di queste attività ha una curva di carico specifica che è diversa da quella residenziale; se queste informazioni fossero disponibili sarebbe possibile caratterizzare l'edificio con una curva di carico pesata sulle diverse attività. Purtroppo questi dati sono spesso difficili da raccogliere a scala di singolo edificio a causa di problemi di privacy o perché non vengono rilevati allo stesso livello di dettaglio dai diversi enti pubblici (ISTAT, regioni, province, comuni).

Quello di fornire un supporto alle decisioni in materia di pianificazione energetica costituisce uno degli scopi prioritari del progetto GRETA. Da questa prospettiva, i risultati di questo lavoro possono diventare una base dati per sviluppare ulteriormente l'analisi a scala regionale o a livello di valle/comune. I dati prodotti dal progetto possono infatti rappresentare un punto di partenza per integrare ed aggiornare le informazioni raccolte dal progetto con le informazioni già a disposizione dei diversi enti. Ad esempio, ulteriori dati che potrebbero essere raccolti ed integrati a scala di edificio sono: gli attestati di prestazione energetica (APE) degli alloggi ed edifici certificati, le informazioni relative agli interventi di riqualificazione energetica già effettuati, il numero di residenti presenti nell'edificio, il numero di utenze attive, il numero di alloggi non in uso, le attività commerciali presenti, ecc. In conclusione, il metodo ed i risultati qui presentati possono rappresentare un'importante opportunità per promuovere una raccolta sistematizzata, consistente ed uniforme delle informazioni ed autorizzazioni archiviate dai diversi enti presenti sul territorio.

B.3.7 » ASPETTI SOCIOLOGICI

Nell'ambito del progetto GRETA è stata effettuata un'indagine sociologica sulle tre aree pilota (tra cui quindi la Valle d'Aosta) finalizzata ad individuare bisogni, barriere e opportunità nel campo della geotermia percepiti dai vari Stakeholders (portatori di interesse), pubblici e privati, coinvolti nel progetto. Di seguito si riassumono i risultati dell'indagine riguardanti l'Italia, svolta tramite appositi incontri diretti (Focus Group tenutisi a Aosta e Milano) e interviste.

B.3.7.1 » Contesto normativo

I partecipanti a Focus Group e gli intervistati hanno evidenziato come principali ostacoli la mancanza di linee guida per i pianificatori, la necessità di migliorare la legislazione in termini di interferenze per gli impianti geotermici e di migliorare la regolamentazione per evitare lo sfruttamento indiscriminato delle falde acquifere. Normative non chiare e non unificate rendono le applicazioni più lente, influenzando sui tempi delle richieste di autorizzazione.

L'ente italiano di normazione (UNI) ha emanato tre norme (UNI 11466, 1467 e 11468) che, pur essendo piuttosto dettagliate e complete, dovrebbero essere presentate in modo più organico. Un'integrazione delle linee guida ad ogni livello legislativo e regolamentativo (nazionale, regionale, locale) aiuterebbe la comprensione generale e faciliterebbe l'implementazione di queste istruzioni. Anche il costo di queste norme rappresenta una barriera economica non trascurabile per i progettisti e installatori di impianti geotermici: le indicazioni di queste norme potrebbero essere parte di un decreto, in modo da eliminare questa voce di costo. Alcuni anni dopo un tentativo infruttuoso di creare un decreto relativo all'installazione di scambiatori di calore a pozzo, il Ministero dello Sviluppo Economico sta lavorando alle linee guida nazionali relative ai sistemi a circuito chiuso, previste come decreto attuativo del D. Lgs. 28/2011. Non sono invece ancora state emanate normative specifiche per i sistemi a ciclo aperto, sebbene recentemente sia stata emanata una normativa relativa ai pozzi per acqua (UNI 11590:2015). Una normativa in questo campo sarebbe auspicabile, anche per fornire un indirizzo comune nella valutazione delle pratiche amministrative per la loro autorizzazione (concessione di derivazione e permesso di scarico). Senza linee guida nazionali, infatti, l'intero processo di approvazione è affidato al funzionario che riceve l'istanza, nell'ambito di un procedimento ("Conferenza dei servizi") in cui diversi soggetti (residenti nella zona, Enti pubblici, associazioni) possono opporsi al progetto. In assenza di un regolamento specifico, la decisione in merito a queste opposizioni dipende completamente dal funzionario responsabile, le cui decisioni sono esposte a potenziali conseguenze legali (es. ricorsi al TAR). Le linee guida nazionali sarebbero di aiuto sia per i funzio-

nari pubblici per stabilire le giuste prescrizioni, sia per i candidati e per i progettisti per presentare i documenti tecnici appropriati. Al contrario di altri paesi, in Italia i tempi dipendono molto dal livello di preparazione e dall'orientamento verso la tecnologia dei funzionari pubblici che si occupano delle procedure. Inoltre in molte regioni sono ancora richieste copie cartacee di documenti; fa eccezione la Regione Lombardia, che ha velocizzato e facilitato la procedura geotermica digitalizzando tutta la documentazione necessaria per le richieste di autorizzazione.

B.3.7.2 » Contesto finanziario

Il contesto italiano vede i costi iniziali come un importante ostacolo alla diffusione dei sistemi geotermici a bassa entalpia. I pianificatori e gli installatori concordano per lo più su questo argomento, mentre i funzionari pubblici pongono l'accento sulla mancanza di incentivi. I costi a lungo termine di manutenzione rappresentano la seconda barriera segnalata per la realizzazione di un progetto geotermico, mentre la terza è rappresentata dal costo dei monitoraggi richiesti dalle autorità, che comportano sia spese che perdite di tempo.

La percezione dell'investimento svantaggia la tecnologia della geotermia. Il contesto culturale italiano, inoltre, è meno propenso ai prestiti rispetto ad altri paesi dove il credito al consumo è più diffuso, come gli USA; le aziende italiane, anche a causa del contesto economico-finanziario, hanno accesso a prestiti con alti tassi di interesse, che si giustificano con una redditività dell'investimento che gli impianti geotermici difficilmente possono dare.

Inoltre il fatto che l'energia geotermica sia poco conosciuta come soluzione energetica e quasi irrilevante su una scala di dibattito pubblico previene investimenti a lungo termine. Sarà probabilmente necessario del tempo per orientare maggiori investimenti verso una maggiore cultura geotermica.

B.3.7.3 » Criticità e opportunità

Sulla base di quanto sopra illustrato, emerge che i fattori più critici in Italia, sui quali agire al fine di promuovere lo sviluppo del settore geotermico, sono: la normativa non chiara o disomogenea, il costo iniziale delle installazioni e i tempi di richiesta delle autorizzazioni, dalla fase di progettazione fino alla realizzazione.

Inoltre esiste ancora una comune percezione culturale per cui la geotermia potrebbe inquinare le falde idriche; con una realizzazione a regola d'arte delle sonde o dei pozzi ciò non si verifica, e sarebbe necessario diffondere questa informazione.

Infine in Italia sarebbe molto importante includere l'energia geotermica a bassa entalpia nelle strategie nazionali e locali. La recente Strategia Energetica Nazionale 2017 (SEN 2017) riconosce l'importanza delle pompe di calore nell'incremento della produzione rinnovabile termica, ma senza differenziare per tipologia (elettrica o ad assorbimento) e sorgente termica (aria, terreno o acqua).

B.3.7.4 » Considerazioni sull'investimento iniziale

Il grande investimento iniziale richiesto dagli impianti geotermici è risultata la principale barriera allo sviluppo della geotermia di bassa entalpia, non solo in Italia ma anche nelle altre aree pilota in Germania e Slovenia. L'investimento può essere stimato in circa 8-10 volte più alto rispetto alle caldaie a metano e, per i privati ciò rappresenta un forte deterrente.

L'alto costo dell'elettricità in Italia, inoltre, riduce i margini di risparmio operativo delle pompe di calore. Attualmente, per gli utenti residenziali, i costi sono di circa 0,18-0,20 €/ kWh (in Austria e Slovenia da 0,20-0,28 €/kWh, mentre in Francia, Svezia e Finlandia il prezzo scende a circa 0,13 €/kWh). La differenza di queste cifre è dovuta principalmente a differenze di tassazione e, in misura minore, al tipo di fonte di energia per ottenere elettricità e al peso degli incentivi per la produzione da fonti rinnovabili. Francia, Svezia e Finlandia hanno ancora impianti nucleari; la Svezia inoltre ha una grande produzione di energia idroelettrica e, più recentemente, di energia eolica, con costi inferiori rispetto alle centrali termoelettriche. Sarebbe auspicabile una tassazione agevolata sull'elettricità per le pompe di calore, in virtù dei loro benefici ambientali.

Come detto, per le installazioni geotermiche le spese più elevate sono dovute ai costi di perforazione e al costo della pompa di calore stessa; si tratta in entrambi i casi di tecnologie mature, basate su molti anni di studi di ricerca. Per quanto riguarda le pompe di calore, si potrebbe ottenere una riduzione dei prezzi con economie di scala, aggregando la domanda di più edifici vicini tra loro; per quanto riguarda le sonde geotermiche, invece, non si ottengono economie di scala apprezzabili incrementando il numero delle sonde installate. La riduzione dei costi di perforazione è oggetto di alcuni progetti di ricerca, tra i quali GEOTeCH e Cheap-GSHPs, finanziati dal programma europeo Horizon 2020.

In un impianto a sonde geotermiche, le sonde pesano per circa il 40-50% del costo totale, la pompa di calore per circa il 20-30% e il resto è dovuto all'installazione e al sistema di distribuzione.

Il mercato più sviluppato per le pompe di calore geotermiche è quello svedese. Oltre ai bassi prezzi dell'elettricità, la Svezia ha anche una rete di gas poco sviluppata: i margini di risparmio delle pompe di calore nel confronto con gasolio e GPL sono molto più elevati rispetto a quelli del metano. A causa del clima freddo, è necessario tenere acceso l'impianto di riscaldamento per un numero più elevato di ore all'anno rispetto all'Italia; inoltre, poiché la temperatura dell'aria può scendere molto sotto gli 0°C e restarci per centinaia di ore all'anno, il rendimento delle pompe di calore aerotermiche è molto più basso di quello che si avrebbe nel nostro paese. L'insieme di questi fattori fa sì che, nonostante l'investimento iniziale richiesto, i sistemi geotermici a bassa entalpia si siano diffusi molti in questo paese.

Riassumendo, il principale ostacolo economico per le pompe di calore è rappresentato dall'investimento iniziale richiesto; per recuperarlo, è necessario agire sul costo dell'energia elettrica, ad esempio con tassazioni agevolate; le pompe di calore, soprattutto geotermiche, possono avere grandi margini di risparmio nelle aree non metanizzate e in

quelle più fredde. Di tutto ciò, sarà importante informare il pubblico affinché comprenda i vantaggi di questa tecnologia, evitando di farsi scoraggiare dall'alto costo di investimento.

B.4 CENNI NORMATIVI

In Italia manca a livello nazionale una normativa unitaria specifica sulla geotermia di bassa temperatura; inoltre anche il quadro legislativo locale è in generale caratterizzato da una marcata eterogeneità e frammentazione tra regioni (talora anche province) diverse. Ciò rappresenta sicuramente una delle principali barriere alla diffusione della tecnologia. Nell'ambito del progetto GRETA è stata svolta una ricognizione della legislazione e regolamentazione a vari livelli, all'interno dei 6 paesi partecipanti (Italia, Francia, Germania, Austria, Svizzera e Slovenia), riportata nel Deliverable 2.1.1 (Prestor et al. 2016 [3]).

B.4.1 » LEGISLAZIONE NAZIONALE

Il **D.Lgs. 152/2006**, detto Testo Unico Ambientale, emanato in ottemperanza della direttiva quadro europea 2000/60/EC (Water Framework Directive) all'art. 104 fa divieto di scaricare in acqua di falda qualsiasi tipo di refluo ad eccezione delle acque provenienti da impianti geotermici (comma 2) e di alcune altre tipologie.

Il D.Lgs. 22/2010 ha riordinato la legislazione in materia di geotermia in Italia, ridefinendo i concetti legislativi di alta, media e bassa entalpia delle risorse geotermiche che vengono così definite:

- risorse geotermiche ad alta entalpia (> 150 °C)
- risorse geotermiche a media entalpia (tra 90 °C e 150 °C)
- risorse geotermiche a bassa entalpia (<90 °C)

Nell'ambito di tale decreto sono ritenute "piccole utilizzazioni locali", per le quali sono competenti le Regioni o gli Enti da esse delegate, le risorse a bassa entalpia di potenza inferiore a 2 [MW] con riferimento a una temperatura di 15 [°C], ottenute mediante l'esecuzione di pozzi fino a 400 [m] di profondità, anche per produzione di energia elettrica, nonché le sonde geotermiche (per le quali non avviene quindi estrazione di fluidi geotermici).

Il **D.Lgs. 28/2011** è inerente la promozione dell'uso dell'energia da fonte rinnovabile in ottemperanza alla legislazione europea 2009/28/CE e precedenti. Tale D.Lgs. all'articolo 2 al punto c) definisce il concetto di energia geotermica. Al comma 2 invece sono demandati gli impianti a bassa entalpia che hanno un interesse prettamente locale e la potenza nominale non deve superare i 20 [MW] con una temperatura del fluido geotermico pari a 15 [°C]. Nonostante il decreto esprima all'art. 7 comma 4 l'obbligo di emanazione di un regolamento attuativo entro i tre mesi successivi alla sua emanazione, ad oggi tale obbligo non è stato ancora assolto producendo difficoltà burocratiche ed economiche agli attori del mercato interessato.

B.4.2 » LEGISLAZIONE REGIONALE IN VALLE D'AOSTA

“Linee guida autorizzazione unica FER” riguarda l'insieme delle procedure amministrative per l'installazione delle fonti rinnovabili. Nel documento viene specificato per ogni tecnologia rinnovabile le modalità operative di installazione e la procedura prevista in funzione della potenza che si vuole installare.

B.4.2.1 » Impianti a circuito chiuso

Per potenze inferiori a 50 [kW], ovvero tutti gli impianti ad uso residenziale mono e bifamiliare, è sufficiente comunicare al Comune di appartenenza ove si intende effettuare la ristrutturazione la Segnalazione Certificata di Inizio Attività (S.C.I.A.) corredata di una perizia geologica che comprovi l'idoneità del territorio a subire delle modificazioni senza comprometterne la solidità. Ricevuta la S.C.I.A., l'ufficio competente ha 15 giorni di tempo per verificare la completezza della richiesta e qualora ci fossero incongruenze o inesattezze potrebbe ordinare il momentaneo blocco alle operazioni di cantiere fino a quando la documentazione non sia stata correttamente redatta.

Per potenze comprese tra 50 [kW] a 1 [MW] si fa riferimento alla L.R. 11/1998. Per poter effettuare il miglioramento energetico con sistemi geotermici a bassa entalpia è necessario attendere il parere vincolante dell'ufficio tecnico dell'assessorato all'Ambiente che ha tempo 90 giorni, dalla data di presentazione della domanda compilata in modo corretto, per dare il suo benestare alla realizzazione dell'opera. In caso di esito positivo da parte dell'autorità competente si deve seguire la procedura precedentemente analizzata per il caso di impianti con potenza inferiore ai 50 [kW].

Per potenze superiori al [MW] è necessaria l'autorizzazione unica che viene rilasciata dagli uffici regionali preposti. Ad oggi non sono stati realizzati in Valle d'Aosta impianti di tale potenza.

B.4.2.2 » Impianti a circuito aperto

Non esiste una normativa ad hoc per gli impianti a circuito aperto che utilizzano acqua di falda come fluido termovettore e si fa riferimento alla documentazione richiesta per prelievo a scopo industriale.

Al fine di poter attingere alle acque di falda e superficiali è necessario ottenere dalle autorità competenti le concessioni e le subconcessioni di derivazione delle acque.

La richiesta per la concessione di utilizzo delle acque demaniali per scopi termici deve essere inoltrata all'ufficio di gestione del demanio idrico dell'Assessorato alle Opere Pubbliche. Entro 30 giorni dalla data di ricevimento della documentazione correttamente redatta, l'Ente fornirà una risposta, che in caso positivo darà la possibilità al committente di iniziare le opere di perforazione del terreno. Parallelamente ad esso, deve essere richiesto all'assessorato all'Territorio e Ambiente la possibilità di scaricare a valle le acque reflue del ciclo rispettando la normativa della tutela delle acque. Attualmente esiste il divieto di scarico delle acque a fine ciclo in prossimità della zona di prelievo o direttamente la reimmissione in falda (PTA 2006, Norme di attuazione, Titolo IV, Capo II, Art. 47 comma 2).

BIBLIOGRAFIA

[1] Casasso A., Piga B., Sethi R., Prestor J., Pestotnik S., Bottig M., Goetzi G., Zambelli P., D'Alonzo V., Vaccaro R., Capodaglio P., Olmedo M., Baietto A., Maragna C., Boettcher F., Zosseder K., The GRETA project: the contribution of near-surface geothermal energy for the energetic self-sufficiency of Alpine regions, *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*. 6 (2017) 1–12.

[2] Casasso A., Della Valentina S., Bucci A., Tiraferri A., Tosco T., Sethi R., Prestor J., Pestotnik S., Rajver D., Capodaglio P., Götzl G., Bottig M., Maragna C., Durst P., Zambelli P., Scaramuzzino C., Vianello A., D'Alonzo V., Böttcher F., Zosseder K., Assessment and mapping of potential interferences to the installation of NSGE systems in the Alpine Regions - GRETA project deliverable 4.1.1, TUM, Munich, 2018.

[3] Prestor J., Pestotnik S., Zosseder K., Böttcher F., Capodaglio P., Götzl G., Bottig M., Weilbold J., Maragna C., Martin J.-C., Durst P., Casasso A., Zambelli P., Vaccaro R., Gilbert J., Messina F., Spinolo F., Overview and analysis of regulation criteria and guidelines for NSGE applications in the Alpine region - GRETA project deliverable 2.1.1, TUM, Munich, 2016.

[4] Bottig M., Hoyer S., Prestor J., Pestotnik S., Rajver D., Zosseder K., Böttcher F., Capodaglio P., Maragna C., Casasso A., Piga B., Della Valentina S., Zambelli P., Catalogue of operational criteria and constraints for shallow geothermal systems in the Alpine environment - GRETA project deliverable 3.2.1, TUM, Munich, 2017.

[5] AA.VV., Atti del congresso GEAM "Geotermia a bassa entalpia - Aspetti teorici e pratici dei circuiti aperti e chiusi," in: 2011.

[6] S. ESI Italia, S. E. GEO, I.A. Studio ER, S. Servizio Ambiente, Consulenza Tecnico-Scientifica per Attività riguardanti le Problematiche di Salvaguardia delle Falde legate all'Utilizzo della Geotermia a Bassa Temperatura in Valle d'Aosta, 2012.

[7] UNI, UNI 11466:2012 Sistemi geotermici a pompa di calore - Requisiti per il dimensionamento e la progettazione [Heat pump geothermal systems - Design and sizing requirements], (2012).

[8] Eskilson P., Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes, Lund University (Sweden), 1987.

[9] Hellstrom G., Sanner B., Earth Energy Designer, User Manual Version 2.0, 2000.

[10] Wagner V., Blum P., Kübert M., Bayer P., Analytical approach to groundwater-influenced thermal response tests of grouted borehole heat exchangers, *Geothermics*. 46 (2013) 22–31. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2012.10.005>.

[11] Di Feo A., Primo censimento degli impianti geotermici a pompa di calore in Valle d'Aosta, Politecnico di Torino, 2017.

[12] Casasso A., Della Valentina S., Di Feo A.F., Capodaglio P., Cavorsin R., Guglielminotti R., Sethi R., Ground Source Heat Pumps in Aosta Valley: assessment of existing system and planning tools for future installations, (2018).

[13] Bottig M., Götzl G., Prestor J., Pestotnik S., Zosseder K., Böttcher F., Capodaglio P., Maragna C., Casasso A., Piga B., Tosco T., Zambelli P., Vaccaro R., Huggenberger P., Catalogue of techniques and best practices for the utilization of Near-Surface Geothermal Energy - GRETA project deliverable 3.1.1, TUM, Munich, 2016.

[14] Casasso A., Sethi R., G.POT: A quantitative method for the assessment and mapping of the shallow geothermal potential, *Energy*. 106 (2016) 765–773. doi:<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.091>.

[15] Sacchelli S., Garegnani G., Geri F., Grilli G., Paletto A., Zambelli P., Ciolli M., Vettorato D., Trade-off between photovoltaic systems installation and agricultural practices on arable lands: An environmental and socio-economic impact analysis for Italy, *Land Use Policy*. 56 (2016) 90–99. doi:[10.1016/j.landusepol.2016.04.024](https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.04.024).

[16] Zambelli P., Lora C., Spinelli R., Tattoni C., Vitti A., Zatelli P., Ciolli M., A GIS decision support system for regional forest management to assess biomass availability for renewable energy production, *Environmental Modelling & Software*. 38 (2012) 203–213. doi:[10.1016/j.envsoft.2012.05.016](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.05.016).

[17] Garegnani G., Sacchelli S., Balest J., Zambelli P., GIS-based approach for assessing the energy potential and the financial feasibility of run-off-river hydro-power in Alpine valleys, *Applied Energy*. 216 (2018) 709–723. doi:[10.1016/j.apenergy.2018.02.043](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.043).

[18] S. p. A. Infrastrutture Lombarde, Infrastrutture Lombarde S.p.A. - CENED - Certificazione ENergetica degli EDifici, (n.d.). <http://www.cened.it/home> (accessed August 31, 2018).

[19] ISTAT, Statistiche Istat - data warehouse del censimento della popolazione e delle abitazioni 2011, (2011). <http://dati-censimentopopolazione.istat.it/Index.aspx> (accessed August 31, 2018).

[20] Philippe M., Michel Bernier Pe. PhD, Marchio D., Sizing calculation spreadsheet: Vertical geothermal borefields,

Ashrae Journal. 52 (2010) 20.

[21] Rivoire M., Casasso A., Piga B., Sethi R., Assessment of Energetic, Economic and Environmental Performance of Ground-Coupled Heat Pumps, *Energies*. 11 (2018). doi:10.3390/en11081941.

[22] Lu Q., Narsilio G.A., Aditya G.R., Johnston I.W., Economic analysis of vertical ground source heat pump systems in Melbourne, *Energy*. 125 (2017) 107–117. doi:10.1016/j.energy.2017.02.082.

[23] Hausladen G., Hamacher T., Leitfaden Energienutzungsplan, 2011.

SITOGRAFIA DEL PROGETTO GRETA

Sito del progetto GRETA

<http://www.alpine-space.eu/projects/greta/en/home>

Contiene tutti i documenti tecnici (Deliverables) elaborati dai diversi partner nonché approfondimenti di diverso tipo (tra cui interviste a professionisti operanti nel campo della geotermia di bassa temperatura)

Ipertesto del progetto GRETA

http://wiki.cesba.eu/wiki/Shallow_Geothermal_Energy_Guidelines

Linee guida con percorsi di lettura differenziati per diverse tipologie di utente (Pubblico generico, Amministratori e Tecnici)

Mappe potenziale geotermico della Valle d'Aosta:

https://areeweb.polito.it/ricerca/groundwater/zip/GRETA_NSGE_potential/IT_VdA_openloop.zip

WebGIS del potenziale geotermico della Valle d'Aosta:

<http://greta.eurac.edu:81/maps/621/embed>

Materiale di supporto all'utilizzo dei dati:

http://www.alpine-space.eu/projects/greta/deliverables/d4.2.1_local-scale-maps-of-the-nsge-potential-in-the-case-study-areas.pdf

Articolo di “Acque Sotterranee” sul progetto GRETA:

<http://www.acquesotterranee.online/index.php/acque/article/view/265>



Technische
Universität
München



INDURA



Climate Alliance

eurac
research



GeoZS
Geološki zavod
Slovenije

Geoscience for a sustainable Earth
brgm

triple.s
Geological Survey of Austria

Regione
Lombardia

Universität
Basel