

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI SCIENZE MM. FF. NN.

Dipartimento di Geoscienze

Direttore: Prof. Domenico Rio

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

IN GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

**SISTEMI DI GEOSCAMBIO CON USO DIRETTO DI ACQUA
DI FALDA IN AREA URBANA, PROBLEMATICHE E
POTENZIALITÀ: L'ESEMPIO DELLA BASILICA
PALLADIANA DI VICENZA**

Relatore: *Prof. Antonio Galgaro*

Correlatori: *Dott. Roberto Pedron*

Dott. Matteo Cultrera

Dott.ssa Silvia Bertoldo

Laureando: *Alberto Frizziero*

ANNO ACCADEMICO 2011 / 2012

INDICE

INTRODUZIONE	7
CAPITOLO 1 : GEOTERMIA E GEOSCAMBIO	11
1.1 L'ENERGIA GEOTERMICA	11
1.2 IL SISTEMA GEOTERMICO	13
1.2.1 CLASSIFICAZIONE DEI SISTEMI GEOTERMICI	15
1.2.2 UTILIZZO DEL CALORE GEOTERMICO PER PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA	16
1.2.3 GLI IMPIANTI GEOTERMoeLETTTRICI	18
1.3 L'ESPLORAZIONE GEOTERMICA	22
1.3.1 OBIETTIVI DELL'ESPLORAZIONE	22
1.3.2 METODI DI ESPLORAZIONE	23
1.3.3 PROGRAMMA DI ESPLORAZIONE	25
1.4 LO SCAMBIO TERMICO CON IL SOTTOSUOLO: GEOSCAMBIO	26
1.4.1 GLI SCAMBIATORI TERMICI	28
1.4.2 LA POMPA DI CALORE	39
1.4.2.1 IL CICLO TERMODINAMICO	41
1.4.2.2 VANTAGGI E SVANTAGGI	43
1.4.3 SISTEMI DI GEOSCAMBIO A CIRCUITO CHIUSO	44
1.4.4 SISTEMI DI GEOSCAMBIO A CIRCUITO APERTO	47
1.4.5 SISTEMI DI GEOSCAMBIO A CONFRONTO	50
1.5 RIFERIMENTI NORMATIVI	51
1.5.1 QUADRO NORMATIVO UNIONE EUROPEA E ALTRE NAZIONI EUROPEE	51
1.5.2 QUADRO NORMATIVO ITALIANO: RENDICONTO ENERGETICO IN EDILIZIA	52
1.5.3 QUADRO NORMATIVO ITALIANO INERENTE ALLA GEOTERMIA	52
CAPITOLO 2 : LO SCAMBIO TERMICO	61
2.1 MECCANISMI DI TRASMISSIONE DEL CALORE	61
2.1.1 LA CONDUZIONE DEL CALORE	62

2.1.2 CONDUCTIBILITA' TERMICA	62
2.1.3 LA CONVEZIONE	63
2.1.4 IL COEFFICIENTE CONDUTTIVO	64
2.1.5 L'IRRAGGIAMENTO	64
2.1.6 L'ADDUZIONE	66
2.1.7 CALCOLO DELLA TRASMITTANZA U	67
2.2 FLUIDODINAMICA	70
2.2.1 FLUIDI COMPRIMIBILI E INCOMPRIMIBILI	70
2.2.2 MOTO LAMINARE E MOTO TURBOLENTO	70
2.2.3 LE EQUAZIONI DI NAVIER-STOKES	74
CAPITOLO 3 : METODI ANALITICI: CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI	93
3.1 CODICE DI ANALISI TERMICA ED IDRODINAMICA: FEFLOW 6	93
3.2 COSTRUZIONE DEL MODELLO IDROGEOLOGICO	93
3.2.1 COSTRUZIONE MESH	93
3.2.2 DATI DI INPUT	94
3.2.3 SIMULAZIONE	97
3.2.4 VISUALIZZAZIONE ED ANALISI DEI RISULTATI	98
CAPITOLO 4 : ANALISI DI SISTEMA DI GEOSCAMBIO CON USO DIRETTO DI ACQUA DI FALDA	99
4.1 OBIETTIVO DELLO STUDIO	99
4.2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO, GEOLOGICO E IDROGEOLOGICO	100
4.3 INDAGINI DI CAMPAGNA	111
4.3.1 PREMESSE	111
4.3.2 SONDAGGI	112
4.3.3 RILIEVO TOPOGRAFICO E POSIZIONAMENTO DEI DIVERS	117
4.3.4 MONITORAGGIO DEI LIVELLI DI FALDA	118
4.3.5 SLUG TEST E CAMPIONAMENTO ACQUE	119
4.3.6 POZZI	121
4.3.7 PROVE IN POZZO	123
4.4 RISULTATI DELLE INDAGINI	126
4.4.1 GEOLOGIA DI DETTAGLIO	127
4.4.2 IDROGEOLOGIA DI DETTAGLIO	131

4.4.2.1 FREATIMETRIA	131
4.4.2.2 SLUG TEST ED ANALISI DELLE ACQUE	136
4.4.2.3 MONITORAGGIO LIVELLO DI FALDA E TEMPERATURA	144
4.4.2.4 PUMP TEST	146
CAPITOLO 5 : IL MODELLO NUMERICO	159
5.1 PREMESSE	159
5.2 DOMINIO DI CALCOLO	161
5.3 COSTRUZIONE DELLA MAGLIA DEL MODELLO	166
5.4 CONDIZIONI AL CONTORNO	166
5.4.1 INPUT IDROGEOLOGICO	167
5.4.2 INPUT DEL TRASPORTO TERMICO	173
5.4.3 PROPRIETA' DEI MATERIALI	177
5.4.4 SIMULAZIONI	178
5.4.5 RISULTATI E DISCUSSIONE	179
5.4.6 SVILUPPI FUTURI	198
CONCLUSIONI	201
BIBLIOGRAFIA	203
SITOGRAFIA	208

INTRODUZIONE

Il nostro modo di vivere, di consumare, di comportarsi, decide la velocità del degrado ambientale, la velocità con la quale viene utilizzata l'energia utile e il periodo di sopravvivenza della specie umana.

Lo sviluppo dei sistemi economici industrializzati ha determinato problematiche di ordine economico, sociale e ambientale di non facile soluzione generando squilibri di varia natura.

Uno squilibrio territoriale: guardando alle realtà economiche internazionali, appare netto il divario tra zone ricche e zone povere. Il processo di crescita economica ha provocato un profondo squilibrio tra le diverse aree del pianeta; lo sviluppo ha riguardato determinate aree geografiche, soprattutto a nord dell'equatore.

Uno squilibrio distributivo: il 20% circa della popolazione mondiale dispone dell'87% circa delle risorse e, conseguentemente, l'80% della popolazione deve accontentarsi del 13% delle disponibilità; il reddito medio procapite dei paesi sviluppati è di circa 18.000 dollari l'anno, mentre quello dei paesi più poveri si aggira intorno ai 200 dollari.

Uno squilibrio ambientale: lo sviluppo dei paesi industrializzati è avvenuto in modo rapidissimo, inizialmente disinteressandosi dell'inevitabile impatto che avrebbe avuto sull'ambiente.

La crescita economica ha così innescato diverse minacce ecologiche quali l'inquinamento dell'acqua, l'inquinamento dell'aria, il buco dell'ozono, l'effetto serra, le piogge acide, la deforestazione e la desertificazione. Per decenni le risorse naturali sono state letteralmente saccheggiate per soddisfare l'inesauribile smania di profitto e senza che nessuno, tanto meno le pubbliche autorità, intervenisse per porre dei limiti.

Tutto ciò ha portato l'uomo a riflettere sul concetto di sviluppo economico e a prospettare un nuovo modello di sviluppo. Si arriva così al concetto di sostenibilità, intesa come l'insieme di relazioni tra le attività umane, la loro dinamica e l'ambiente. Queste relazioni devono essere tali da permettere alla vita umana di continuare, agli individui di soddisfare le loro necessità e alle diverse culture umane di svilupparsi, ma in modo tale che le variazioni apportate alla natura dall'uomo stiano entro certi limiti così da non distruggere il contesto biofisico globale. Se riusciremo ad arrivare a un'economia da equilibrio sostenibile, le future generazioni potranno avere almeno le stesse opportunità che la nostra generazione ha avuto: è un rapporto tra economia ed ecologia, in gran parte ancora da costruire, che passa dalla strada dell'equilibrio sostenibile.

Il Rapporto Brundtland del 1987, che prende il nome dalla presidente della Commissione, la norvegese Gro Harlem Brundtland, definisce "sviluppo sostenibile" quello sviluppo che

soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare quelli dell'avvenire.

Lo sviluppo sostenibile è una forma di sviluppo (che include la crescita economica) che non compromette la possibilità delle future generazioni di progredire, preservando la qualità e la quantità del patrimonio e delle riserve naturali. L'obiettivo è di mantenere uno sviluppo economico compatibile con l'equità sociale e gli ecosistemi, operando dunque in relazione ad un equilibrio ambientale.

In questo senso nel 1997 è stato creato il protocollo di Kyoto alla Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici, attraverso il quale 169 nazioni del mondo si sono impegnate a ridurre le emissioni di gas serra del 5.2% (nel periodo 2008-2012) rispetto alle emissioni del 1990, considerato come anno di partenza, per rimediare ai cambiamenti climatici in atto. Grandi assenti furono gli Stati Uniti (responsabili, da soli, del 24% delle emissioni mondiali), i primi produttori di gas serra nel mondo.

La Comunità europea ha firmato il protocollo il 29 aprile 1998. L'Italia lo ha ratificato attraverso la legge di ratifica n. 120 del 1 giugno 2002, nella quale viene illustrato il relativo Piano nazionale per la riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra. L'obiettivo di riduzione per l'Italia è pari al 6,5% rispetto ai livelli del 1990; pertanto, tenendo conto dei dati registrati al 1990, la quantità di emissioni assegnate all'Italia non potrà eccedere nel periodo 2008-2012 il valore di 487,1 Mt CO₂ equivalente (“valore obiettivo” per l'Italia).

Tra le fonti rinnovabili su cui puntare, una proposta interessante sembra venire dalla geotermia. La risorsa geotermica è una fonte naturale di energia pulita e praticamente inesauribile nella scala del tempo umano ed è in grado di contribuire ai crescenti bisogni energetici senza compromettere l'ambiente e le risorse per le generazioni future.

Nel presente lavoro di tesi vengono presentati e sviluppati il concetto di geotermia, le tipologie di energia geotermica esistenti e le modalità di sfruttamento ed utilizzo di tale risorsa naturale, pulita e rinnovabile. E' stata data particolare attenzione alla descrizione dei sistemi geotermici a bassa entalpia, che sono caratterizzati da un'alta efficienza e da una parziale rinnovabilità. L'elevata efficienza di questi sistemi deriva dagli alti valori di COP (coefficiente di prestazione) che raggiungono le pompe di calore, che sono in grado di produrre una maggiore quantità di energia di quella che necessitano per il funzionamento. Inoltre si tratta di una tecnologia parzialmente rinnovabile, in quanto, l'energia richiesta per il riscaldamento (o raffrescamento) viene prelevata in parte dal sottosuolo (risorsa rinnovabile) e in parte minore dalla rete elettrica (risorsa non rinnovabile). In realtà ci possono essere casi in cui un sistema di geoscambio sia completamente rinnovabile, nel caso in cui venga integrato

con sistemi che producono energia elettrica in modo “alternativo”, come le tecnologie dei pannelli solari termici o fotovoltaici.

Considerato che in Italia oltre il 40% dell’energia viene utilizzata nel settore termico, ovvero a fini di climatizzazione (riscaldamento/raffrescamento) degli edifici, viene illustrato un caso concreto di studio idrogeologico preliminare, comprensivo di raccolta, elaborazione dati e sviluppo di un modello interpretativo agli elementi finiti, atto allo studio dei fenomeni termici ed idrodinamici che si verificano nel sottosuolo nel caso in cui si utilizzi un impianto geotermico a bassa entalpia con uso diretto di acqua di falda.

CAPITOLO 1: GEOTERMIA E GEOSCAMBIO

1.1 L'ENERGIA GEOTERMICA

Il termine "geotermia" deriva dal greco "gê" e "thermòs", e significa "calore della Terra": l'energia geotermica è quella prodotta sfruttando tale calore, in parte originatosi durante la formazione del pianeta e in parte prodotto dal decadimento di isotopi radioattivi, presenti all'interno delle rocce che compongono le parti più profonde del globo terrestre.

Il calore aumenta proporzionalmente all'aumentare della profondità nella crosta terrestre. La variazione di temperatura con la profondità, detto gradiente geotermico, è in media di 3°C ogni 100 m di profondità, ossia 30°C ogni km; nei primi metri sotto la superficie la temperatura è 15°C, che corrisponde con buona approssimazione alla temperatura media annua dell'aria esterna. (Dickinson, Fanelli, 2004).

Sino alle profondità raggiungibili con le moderne tecniche di perforazione, il gradiente geotermico medio è 2,5°-3°C/100 m. Di conseguenza, se la temperatura nei primi metri sotto la superficie, che corrisponde, con buona approssimazione, alla temperatura media annua dell'aria esterna, è 15°C, si può prevedere che la temperatura sia 65°-75°C a 2000 m di profondità, 90°-105°C a 3000 m e via di seguito per alcune migliaia di metri. Vi sono, comunque, vaste regioni nelle quali il valore del gradiente geotermico si discosta sensibilmente da quello medio. In aree in cui il basamento rigido sprofonda e si forma un bacino che si riempie rapidamente di sedimenti geologicamente "molto giovani", il gradiente geotermico può essere anche inferiore a 1°C/100 m. Viceversa, in certe "aree geotermiche" il gradiente può raggiungere valori superiori a dieci volte quello normale. (Dickinson, Fanelli, 2004).

Il calore interno si dissipa con regolarità verso la superficie della Terra; si è calcolato che il flusso geotermico della Terra corrisponda ad una potenza complessiva di 30.000 GW (sulla base di una media pari a circa 0,06 W/m²) e che solo l'energia contenuta nei primi 2-3 km di crosta terrestre sia circa 2000 volte superiore a quella ottenibile da tutti i giacimenti di combustibili fossili. (Dickinson, Fanelli, 2004).

La quantità di calore è, dunque, enorme e praticamente inesauribile, tuttavia, solo parte dell'energia geotermica può o potrebbe essere estratta e sfruttata dall'uomo, perché risulta assai dispersa e solo raramente concentrata. L'energia termica della Terra ha, inoltre, il vantaggio di essere costante nel tempo e, quindi, di non subire le fluttuazioni giornaliere e/o stagionali che caratterizzano quasi tutte le fonti rinnovabili. Le aree geotermicamente attive

sono quelle dove il valore del gradiente geotermico si discosta sensibilmente da quello medio. (Dickinson, Fanelli, 2004).

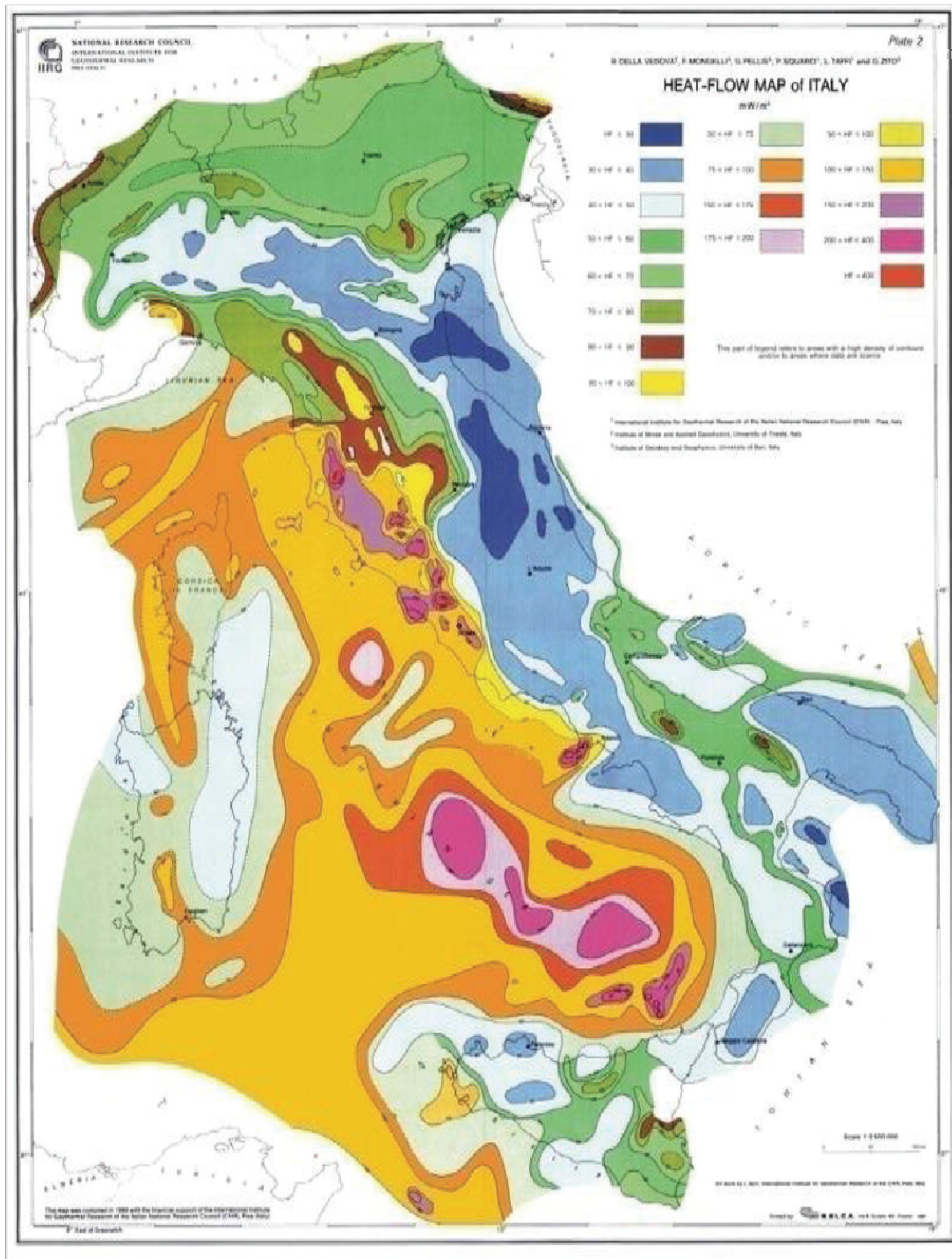


Figura 1: Distribuzione dei flussi di energia geotermica in Italia (UGI)

Esempi di aree geotermicamente attive sono zone vulcaniche, sorgenti termali, soffioni e geyser, serbatoi di calore, immagazzinato nella crosta terrestre, che fluisce verso l'esterno con l'ausilio di vettori termici come acqua e vapore. (Bertani, 2005).

L'energia termica in aree geotermicamente attive, quindi, è resa disponibile a profondità accessibili da vettori termici denominati fluidi geotermici. Tali fluidi possono essere già presente in natura, come ad esempio le acque sotterranee, oppure immessi artificialmente nel sottosuolo. (Bertani, 2005).

Una valutazione del potenziale geotermico nazionale, effettuata nel 1993 dall'ENEA, indica che in Italia le risorse per la produzione di energia elettrica (siti con temperatura delle rocce superiore a 200°C e profondità inferiore ai 3 km) ammontano a 4,7-5,3 GW nelle zone di forte anomalia del gradiente termico. La Figura 1 mostra la distribuzione termica del sottosuolo italiano, evidenziando le notevoli potenzialità di questa fonte.

Nell'area dei Campi Flegrei (Napoli) e di Larderello (Livorno) si riscontrano anomalie dell'ordine di 100; nella dorsale tirrenica sottomarina i valori di anomalia possono superare i 200, corrispondenti a flussi energetici pari a 5-10 W/m². (Bertani, 2005).

È opportuno sottolineare la distinzione tra la geotermia "classica" e la geotermia a bassa entalpia. La *geotermia "classica"*, di solito, sfrutta anomalie geologiche e vulcanologiche per produrre energia elettrica tramite il vapore estratto dal sottosuolo, come nel caso sopra riportato di Larderello in Toscana.

La *geotermia a bassa entalpia*, invece, sfrutta il calore dei primi metri sotto la superficie terrestre o delle falde acquifere per la realizzazione di impianti per il riscaldamento ed il raffrescamento degli ambienti mediante l'utilizzo di pompe di calore.

1.2 IL SISTEMA GEOTERMICO

Nel 1990 Hochenstein ha definito schematicamente un sistema geotermico come: "Un sistema acqueo convettivo, che, in uno spazio confinato della parte superiore della crosta terrestre, trasporta il calore da una sorgente termica al luogo, generalmente la superficie, dove il calore stesso è assorbito (disperso o utilizzato)". (Dickinson, Fanelli, 2004).

Un *sistema geotermico*, quindi, è costituito da una sorgente di calore che può essere dispersa o concentrata. E' dispersa quando l'aumento della temperatura è dovuto a un normale aumento della temperatura terrestre. E' concentrata nelle zone vulcaniche, dove la presenza di magma in superficie innalza localmente la temperatura della Terra. Vi è, poi, un fluido geotermico

costituito, in genere, da acqua meteorica allo stato liquido o vapore che, circolando tra le rocce del serbatoio, ne assorbe il calore e si riscalda fino a temperature anche superiori ad alcune centinaia di gradi. Talvolta il fluido risale in superficie lungo vie naturali come faglie e fratture, dando luogo a sorgenti termali, fumarole, geyser, ecc. Altrimenti dev'essere estratto per mezzo di un pozzo geotermico. Un serbatoio è, invece, una formazione di rocce permeabili, all'interno delle quali si muove il fluido geotermico. In genere, esso si trova tra due strati di rocce impermeabili che impediscono ai fluidi caldi di disperdersi in superficie. (Dickinson, Fanelli, 2004).

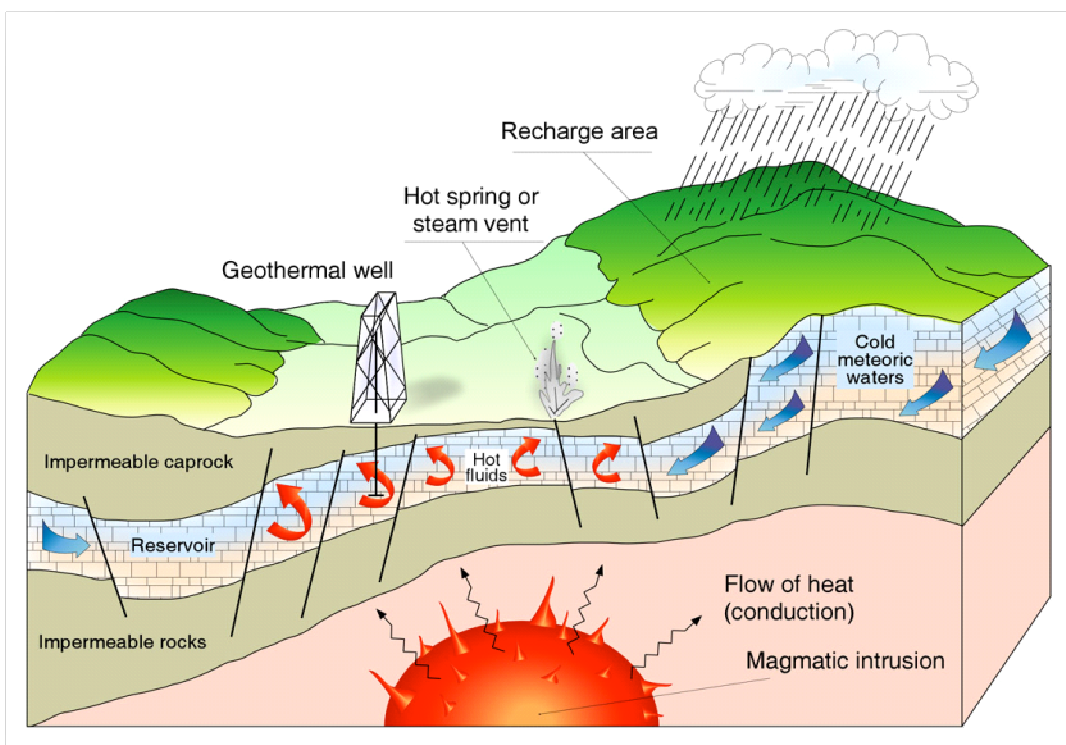


Figura 2: schema di un sistema geotermico (Dickinson, Fanelli, 2004; Bertani, 2005)

1.2.1 CLASSIFICAZIONE DEI SISTEMI GEOTERMICI

I sistemi idrotermali possono creare serbatoi contenenti acqua sia in fase liquida che di vapore, a seconda delle condizioni di temperatura e pressione: i primi sono detti “ad acqua dominante”, i secondi “a vapore dominante”. (Bertani, 2005).

- *Serbatoi “ad acqua dominante”* Questi sistemi geotermici producono acqua in fase liquida o miscele acqua-vapore. I campi di questo tipo sono i più diffusi nel mondo. Quelli “ad acqua calda” contengono acqua in fase liquida che, quando estratta, ha alla superficie temperature variabili tra 30 e 100°C. Generalmente il serbatoio non ha una copertura di rocce impermeabili, ed è situato a bassa profondità; in superficie questi sistemi sono spesso associati a manifestazioni termali, a temperature moderate. Quando invece il campo geotermico è racchiuso da una copertura impermeabile, l’acqua è in grado di raggiungere temperature maggiori di 100°C, pur restando ancora in fase liquida, come avviene in una pentola a pressione. Quando un pozzo raggiunge un serbatoio di questo tipo, l’acqua pressurizzata risale rapidamente verso la superficie, e comincia a bollire, a causa della rapida diminuzione della pressione (fenomeno noto come “*boiling for depth*”), producendo una miscela di acqua e vapore. Per la produzione di energia elettrica viene utilizzato solamente il vapore, mentre l’acqua viene allontanata con appositi separatori e reimpressa nel sottosuolo. Manifestazioni superficiali caratteristiche di questo tipo di campi sono sorgenti bollenti e, talvolta, *geyser* o soffioni. Si ritiene che il 90% dei serbatoi idrotermali al mondo sia di questo tipo. (Bertani, 2005).

- *Serbatoi “a vapore dominante”* In alcuni serbatoi geotermici, geologicamente simili ai precedenti, la temperatura è così elevata che il fluido geotermico è presente sotto forma di vapore secco, ad alto valore energetico: questo può essere inviato direttamente alla turbina dell’impianto. Il più grande serbatoio di questo tipo, sfruttato fin dagli anni '60, è “*The Geysers*”, situato in California (USA). Il primo campo utilizzato al mondo è stato invece quello di Larderello in Toscana, dove nel 1904 l'imprenditore fiorentino Pietro Ginori Conti per primo produsse energia elettrica mediante una dinamo trascinata da un motore azionato dal vapore endogeno; con il calore geotermico negli anni '40, in Italia, venivano già prodotti 132 MWe. Altri campi di questo tipo si trovano in Giappone ed in Indonesia. (Bertani, 2005).

I sistemi geotermici possono, inoltre, essere classificati in base alla temperatura. Avremo quindi:

- *Sistemi “ad alta temperatura”* I sistemi ad alta temperatura possono essere sistemi "a vapore dominante", se il fluido geotermico si trova sotto forma di vapore. In questo

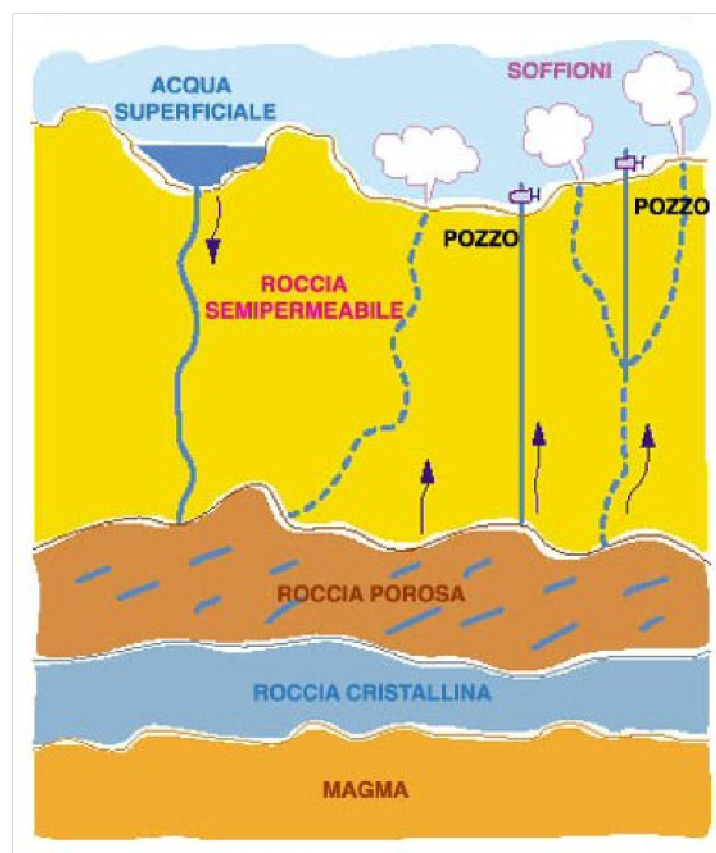
caso, l'energia geotermica viene utilizzata principalmente per produrre energia elettrica. Nei sistemi cosiddetti "ad acqua dominante" il fluido geotermico si trova nel sottosuolo in forma liquida ad alta temperatura e sotto pressione. Quando un pozzo geotermico viene perforato, la pressione diminuisce bruscamente e l'acqua vaporizza, risalendo in superficie come miscela di acqua e vapore. In questi casi, l'energia geotermica può essere utilizzata sia per produrre energia elettrica, che usata direttamente.

- *Sistemi "a medio-bassa temperatura"* I sistemi a medio-bassa temperatura contengono fluidi a temperature comprese tra i 160 e i 90 gradi centigradi che vengono impiegati solo per usi diretti. Possibili usi diretti del calore contenuto nei fluidi geotermici sono il riscaldamento e il raffreddamento di edifici, in molti casi interi quartieri e città; usi agricoli come l'essiccamento di prodotti agricoli e il riscaldamento di serre e aree per l'allevamento di animali. Ultimamente si sta diffondendo l'acquacoltura geotermica, cioè l'allevamento di specie acquatiche in vasche a temperatura controllata. Il teleriscaldamento è uno dei modi più interessanti per usare direttamente i fluidi geotermici a bassa temperatura (80-100 gradi centigradi). Consiste nell'usare il fluido geotermico per scaldare direttamente, tramite degli scambiatori di calore, l'acqua circolante nei corpi scaldanti (radiatori, termoconvettori o pannelli radianti) dell'impianto di riscaldamento delle abitazioni. Altri usi diretti fanno parte dei processi industriali (ad esempio, quello dell'industria della cellulosa e della carta) e di qualsiasi attività che richieda calore. Alcune forme di utilizzo rientrano nei cosiddetti usi "multipli" o "a cascata". Esse si basano sul fatto che un fluido geotermico, dopo essere stato impiegato una prima volta, ha ancora del calore residuo da utilizzare in un altro impianto che necessiti di minore calore.

1.2.2 UTILIZZO DEL CALORE GEOTERMICO PER PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA

Sebbene gli usi diretti del calore geotermico (riscaldamento di edifici, serre o in processi industriali) abbiano rilevante significato economico, l'utilizzo più importante e probabilmente più conosciuto è quello dedicato alla generazione di energia elettrica.

Nelle centrali il vapore fornisce la forza necessaria a muovere le turbine che producono elettricità. Tale vapore viene direttamente dal pozzo (campi a vapore dominante), o da un separatore in pressione (campi ad acqua dominante). Il vapore, dopo l'espansione in turbina, viene generalmente condensato, ed il liquido così ottenuto, insieme all'eventuale acqua proveniente dal separatore, viene poi reimpresso in profondità nel serbatoio, attraverso appositi pozzi, mantenendo così la pressione del serbatoio ed evitando l'inquinamento di falde o corsi d'acqua in superficie. L'acqua reiniettata sarà di nuovo scaldata nel sottosuolo, contribuendo così al rinnovamento della risorsa energetica. (Bertani, 2005). (Vedi Figura 3).



*Figura 3: Schema di un sistema geotermico
(Kyoto Club ONG, 2009)*

Per serbatoi che producono acqua a temperature moderate (tra i 120 e i 180°C), la tecnologia del ciclo binario è la più redditizia. In questi sistemi il fluido geotermico viene utilizzato per vaporizzare, attraverso uno scambiatore di calore, un secondo liquido (ad esempio isopentano), con temperatura di ebollizione più bassa rispetto all'acqua. Il fluido secondario si espande in turbina e viene quindi condensato e riavviato allo scambiatore in un circuito

chiuso, senza scambi con l'esterno. Il fluido geotermico, dopo aver attraversato lo scambiatore, torna al pozzo di reiniezione per essere reimpresso nel serbatoio. Questo schema operativo, completamente chiuso, ha impatti ambientali estremamente limitati, ma è adatto per impianti di piccola taglia. (Bertani, 2005).

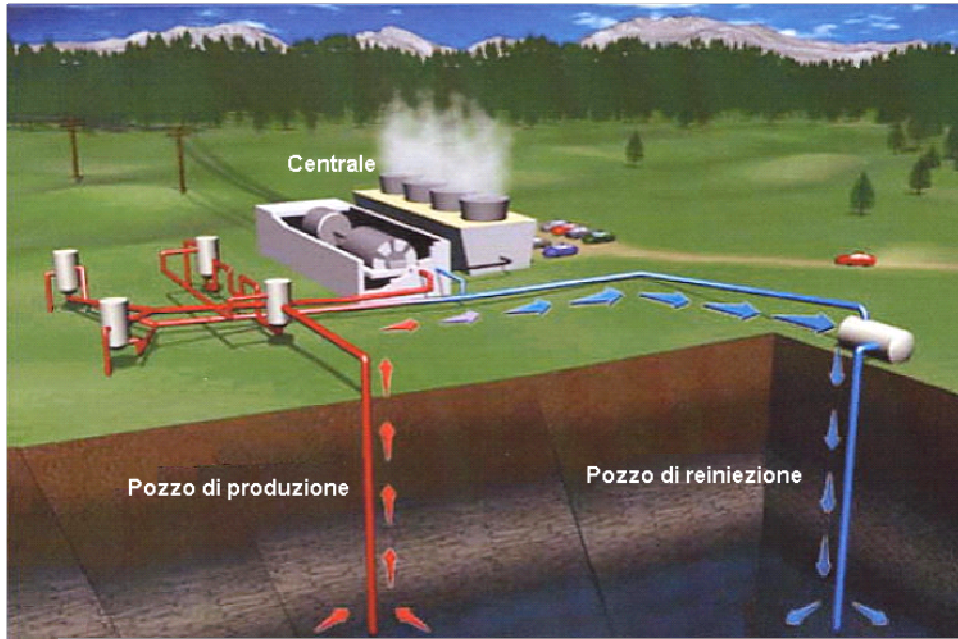


Figura 4: Schema di un funzionamento di una centrale geotermica (Bertani, 2005)

1.2.3 GLI IMPIANTI GEOTERMoeLETTRICI

La tipologia degli impianti geotermoelettrici varia in funzione del sistema geotermico disponibile: a vapore dominante, ad acqua dominante ad alta temperatura, ad acqua dominante a bassa temperatura. (Kyoto Club ONG, 2009).

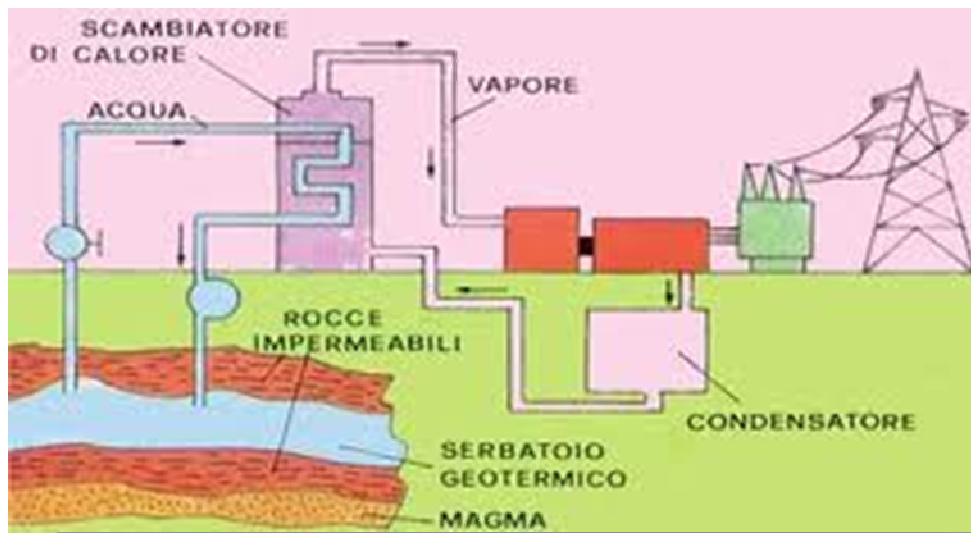
Le tipologie di impianti sono sostanzialmente quattro:

- 1) a vapore secco
- 2) a singolo o doppio flash
- 3) a ciclo binario
- 4) a ciclo combinato

1) Gli *impianti a vapore secco* sono utilizzati se l'acquifero è "a vapore dominante" ed è quindi possibile estrarre vapore secco o surriscaldato.

Il vapore proveniente dai serbatoi geotermici è inviato direttamente, tramite vapordotti, all'unità turbinageneratore per la produzione di energia elettrica.

Si possono avere centrali a condensazione o a scarico libero. Nelle centrali a condensazione il vapore proveniente dalla turbina viene fatto condensare e reiniettato nel serbatoio geotermico. La portata di condensa costituisce il 20-30% di quella del fluido geotermico utilizzato. Esempi di questa tipologia di impianto sono le centrali di Larderello in Toscana e gli impianti del campo geotermico "The Geysers" a circa 140 km a Nord di San Francisco in California (Usa), quest'ultimo ha una potenza totale di 750 MW. Risorse geotermiche di questo tipo sono piuttosto rare. (Kyoto Club ONG, 2009).



*Figura 5: Schema di impianto a vapore secco
(Google immagini)*

2) Gli impianti a singolo o doppio "flash" sono impiegati se il serbatoio o acquifero è "ad acqua dominante", con acqua calda a temperatura superiore a 150-170°C.

L'acqua, tramite pozzi, è pompata ad alta pressione verso gli organi di generazione elettrica situati in superficie. L'acqua, salendo in superficie, passa rapidamente dalla pressione di serbatoio a quella dell'atmosfera. La repentina riduzione di pressione permette la separazione o "conversione flash" di una parte di acqua in vapore.

Il vapore ottenuto è fatto espandere nelle turbine per la produzione di energia elettrica. L'acqua calda rimasta allo stato liquido durante la separazione e l'acqua condensata proveniente dalle turbine sono generalmente reiniettate nel serbatoio geotermico.

È possibile sottoporre il fluido geotermico, se arriva in superficie con temperature particolarmente elevate, per due volte ad un processo di "flash": impianti a doppio flash. (Kyoto Club ONG, 2009).

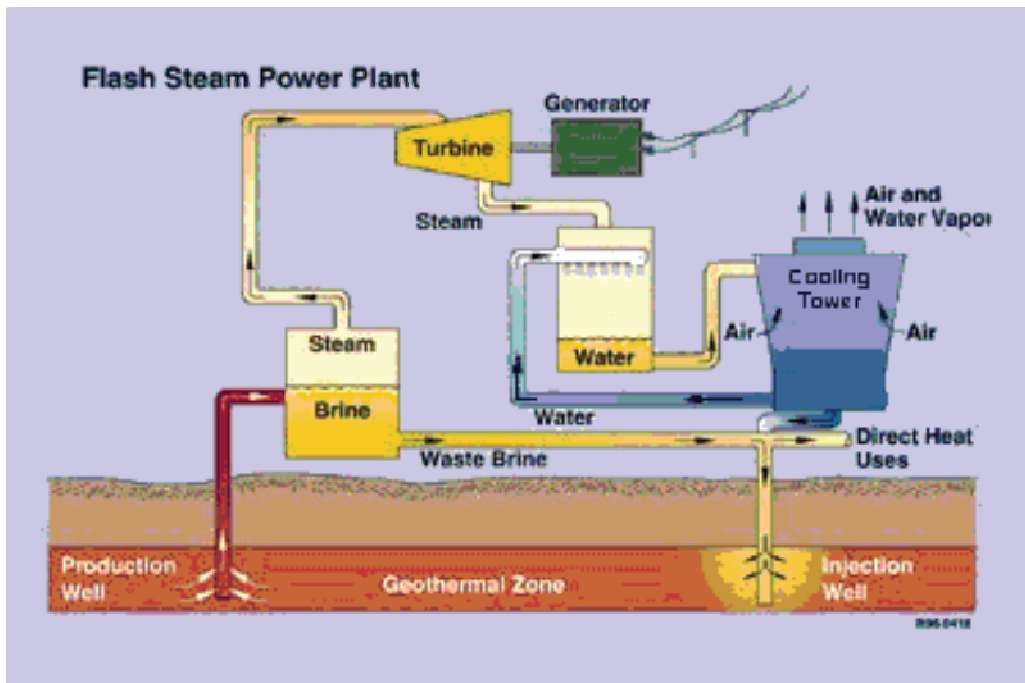


Figura 6: Schema di impianto a vapore "flash" (ENEA)

3) Gli impianti a ciclo binario sono usati se il serbatoio o acquifero di alimentazione è "ad acqua dominante" con acqua calda a temperatura moderata, tra i 120 e i 170°C.

In tali impianti l'acqua o il vapore proveniente dai serbatoi geotermici non è inviato direttamente in turbina. Il fluido geotermico riscalda tramite uno scambiatore un altro fluido secondario di lavoro.

Il fluido secondario vaporizza ed è fatto espandere in una turbina collegata ad un generatore per la produzione di energia elettrica. I due fluidi non entrano mai a contatto tra loro, perché confinati in sistemi di circolazione distinti, circuiti chiusi. Il fluido geotermico, dopo aver attraversato lo scambiatore, è pompato nel serbatoio geotermico. Tali impianti non hanno emissioni di gas inquinanti. (Kyoto Club ONG, 2009).

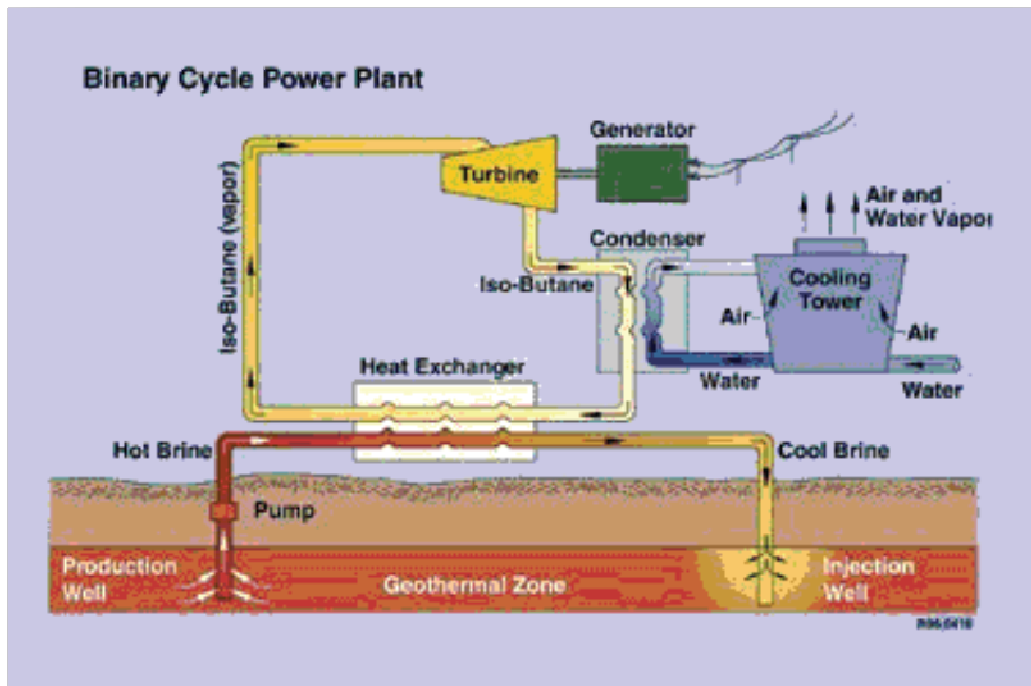


Figura 7: Schema di impianto a ciclo binario (ENEA)

Oltre agli impianti appena descritti si possono utilizzare quelli a ciclo combinato.

4) Gli impianti a "ciclo combinato" abbinano la tecnologia a singolo flash ed a ciclo binario. Dal processo flash si ottiene una parte di vapore, che è inviato in turbina per la produzione di energia elettrica, ed una parte liquida. Quest'ultima, invece, di essere reiniettata nel serbatoio geotermico è utilizzata per far vaporizzare un fluido secondario (es. isopentano) del ciclo binario, utilizzato poi nella turbina. Si cerca, così, di massimizzare il rendimento del sistema. (Kyoto Club ONG, 2009).

Di più recente utilizzo sono gli sfruttamenti geotermici delle cosiddette Rocce Secche (Hard Dry Rock). Si tratta di serbatoi geotermici profondi, utilizzati iniettando, tramite pozzi, acqua nelle rocce calde e secche, in precedenza fratturate con particolari sistemi. L'acqua, immessa a contatto con le rocce, è riscaldata e risale in superficie dove, tramite uno scambiatore, permette la vaporizzazione di un fluido secondario che è inviato ad un turbo-generatore per la produzione di elettricità.

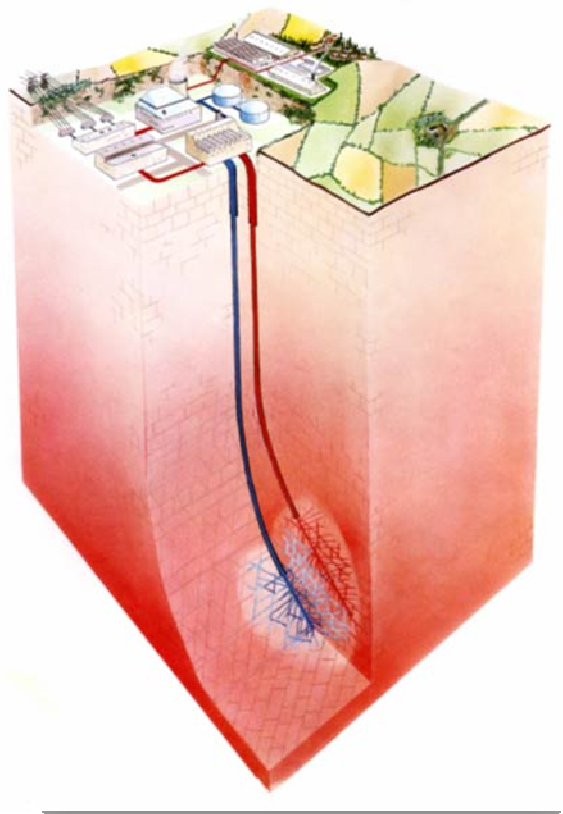


Figura 8: Rappresentazione schematica di un sistema geotermico artificiale (Rocce Calde Secche) (Dickinson, Fanelli, 2004)

1.3 L'ESPLORAZIONE GEOTERMICA

1.3.1 OBIETTIVI DELL'ESPLORAZIONE

Gli obiettivi dell'*esplorazione geotermica* sono (Lumb, 1981; Dickinson, Fanelli, 2004):

1. Identificare i fenomeni geotermici.
2. Accertare l'esistenza di aree con produzione geotermica sfruttabile.
3. Valutare la dimensione delle risorse.
4. Determinare il tipo dei campi geotermici.
5. Localizzare le zone produttive.
6. Determinare il contenuto termico dei fluidi.
7. Compilare una base di dati, che possa servire di riferimento per i futuri monitoraggi.
8. Determinare, prima di iniziare lo sfruttamento, i parametri sensibili per l'ambiente.
9. Individuare le caratteristiche che potrebbero creare problemi durante lo sfruttamento del campo. (Dickinson, Fanelli, 2004)

L'importanza relativa di ogni obiettivo dipende da numerosi fattori, la maggior parte dei quali è collegata alla risorsa. Questi fattori comprendono la forma di utilizzazione prevista, la tecnologia disponibile, gli aspetti economici, ed anche la situazione locale, il sito, ed il periodo, tutti elementi che influiscono sul programma di esplorazione. Per esempio, il riconoscimento preliminare delle manifestazioni geotermiche ha un'importanza molto maggiore in un'area remota e non esplorata di quanto abbia in un'area conosciuta; valutare le dimensioni di una risorsa può avere un'importanza minore, se questa sarà usata per un piccolo impianto richiedente molto meno energia termica di quanta ne viene fornita per vie naturali; se si prevede di utilizzare il calore per il riscaldamento di ambienti o per altre forme d'uso, che richiedono basse temperature, la ricerca di fluidi ad alta entalpia può essere esclusa dagli obiettivi (Lumb, 1981; Dickinson, Fanelli, 2004).

Per raggiungere questi obiettivi sono disponibili numerosi metodi e tecnologie, molti dei quali sono di uso comune e sono stati ampiamente sperimentati in altri settori della ricerca.

E' necessario tener presente, comunque, che le tecniche e le metodologie che si sono dimostrate utili nella ricerca mineraria o per idrocarburi non sono necessariamente la miglior soluzione per l'esplorazione geotermica. D'altra parte, tecniche di scarso impiego nella ricerca petrolifera, sono, in certi casi, strumenti ideali nell'esplorazione geotermica (Combs e Muffler, 1973; Dickinson, Fanelli, 2004).

1.3.2 METODI DI ESPLORAZIONE

Gli *studi geologici ed idrogeologici* sono il punto di partenza di ogni programma di esplorazione. Il loro scopo principale è quello di definire la posizione e l'estensione delle aree da investigare con maggiore dettaglio e di suggerire i metodi di esplorazione più adatti per queste aree. Gli studi geologici ed idrogeologici hanno una grande importanza per tutte le fasi successive della ricerca geotermica, sino alla localizzazione dei pozzi esplorativi e di produzione. Essi inoltre forniscono le informazioni di base per interpretare i dati forniti dagli altri metodi di esplorazione e, infine, per costruire un modello realistico del sistema geotermico e valutare il potenziale della risorsa. I dati ottenuti dagli studi geologici ed idrogeologici sono utili anche nella fase di sfruttamento perché forniscono informazioni utilizzabili dagli ingegneri del serbatoio e di produzione. La durata ed il costo di questa fase dell'esplorazione possono essere sensibilmente ridotti da un programma ben organizzato e da un efficiente coordinamento della ricerca. (Dickinson, Fanelli, 2004)

La *prospezione geochemica* (comprendente la geochemica isotopica) rappresenta un ottimo mezzo per stabilire se un sistema geotermico è ad acqua o a vapore dominante, per prevedere la temperatura minima del serbatoio, per stimare l'omogeneità dell'apporto di acqua, per determinare le caratteristiche chimiche del fluido profondo e per individuare l'origine dell'acqua di ricarica. Possono anche ricavarsi utili informazioni sui problemi che possono verificarsi nella fase di reiniezione e durante l'utilizzazione (per esempio, variazioni nella composizione del fluido, fenomeni di corrosione ed incrostazione nei tubi e negli impianti, impatto sull'ambiente) e sul modo di evitare o ridurre questi problemi. La prospezione geochemica comporta il campionamento e l'analisi chimica e/o isotopica delle acque e dei gas prodotti dalle manifestazioni geotermiche (sorgenti termali, fumarole, ecc.) o dai pozzi che si trovano nell'area in studio. La prospezione geochemica fornisce anche dati utili per programmare le successive fasi dell'esplorazione ed ha un costo relativamente basso in confronto ad altri metodi più sofisticati, come quelli geofisici; per questa ragione, essa dovrebbe essere impiegata, per quanto possibile, prima di altri metodi più costosi. (Dickinson, Fanelli, 2004)

La *prospezione geofisica* ha lo scopo di ottenere indirettamente, dalla superficie o da intervalli di profondità vicini alla superficie, i parametri fisici delle formazioni geologiche profonde. Questi parametri fisici comprendono la temperatura (prospezione termica), la conducibilità elettrica (metodi elettrici ed elettromagnetici), la velocità di propagazione delle onde elastiche (prospezione sismica), la densità (prospezione gravimetrica) e la suscettibilità magnetica (prospezione magnetica). Alcuni di questi metodi, come quelli sismici, gravimetrici e magnetici, che sono di uso normale nella ricerca petrolifera, possono dare molte informazioni sulla forma, dimensioni, profondità e altre importanti caratteristiche delle strutture geologiche profonde, che potrebbero costituire un serbatoio geotermico, ma danno poche, o nessuna, indicazioni sulla presenza all'interno di queste strutture dei fluidi, che costituiscono l'obiettivo della ricerca geotermica. Essi sono pertanto i più utili per definire i dettagli nelle fasi finali dell'esplorazione, prima che siano posizionati i pozzi esplorativi. (Dickinson, Fanelli, 2004)

Informazioni sull'esistenza di fluidi geotermici nelle strutture geologiche si possono ottenere dalle prospezioni elettriche ed elettromagnetiche, che sono più sensibili di altri metodi alla presenza di questi fluidi ed alle variazioni di temperatura; queste tecniche sono state ampiamente applicate con soddisfacenti risultati. In particolare, il metodo magnetotellurico (MT), che sfrutta le onde elettromagnetiche generate dalle tempeste solari, è stato notevolmente perfezionato negli ultimi anni e attualmente offre una vasta gamma di

applicazioni, anche se richiede una strumentazione sofisticata ed è sensibile al rumore di fondo nelle aree abitate. Il principale vantaggio del metodo magnetotellurico sta nella sua capacità di definire strutture più profonde di quelle raggiungibili con i metodi elettrici e gli altri elettromagnetici. Più recentemente è stato messo a punto il metodo audiomagnetotellurico a sorgente controllata (CSAMT), che utilizza onde elettromagnetiche prodotte artificialmente anziché quelle naturali. Con questo metodo si raggiungono profondità inferiori a quelle raggiungibili con il classico metodo MT, ma esso è più veloce, meno costoso e fornisce maggiori dettagli. I metodi termici (misure di temperatura, determinazione del gradiente geotermico e del flusso di calore terrestre) spesso possono dare con buona approssimazione la temperatura della parte superiore del serbatoio geotermico. (Dickinson, Fanelli, 2004)

La perforazione dei *pozzi esplorativi* è la fase finale di ogni programma di esplorazione ed è il solo metodo che permette di definire con certezza le caratteristiche di un serbatoio geotermico e di valutarne il potenziale (Combs e Muffler, 1973). I dati forniti dai sondaggi esplorativi hanno lo scopo di verificare le ipotesi ed i modelli elaborati con i risultati dell'esplorazione di superficie. Essi inoltre devono confermare che il serbatoio è produttivo e contiene fluidi in quantità adeguata e con caratteristiche adatte all'utilizzazione prevista. Posizionare i pozzi esplorativi è pertanto un'operazione molto delicata. (Dickinson, Fanelli, 2004)

1.3.3 PROGRAMMA DI ESPLORAZIONE

Prima di definire un programma di esplorazione geotermica è necessario raccogliere tutti i dati geologici, geofisici e geochimica già esistenti. I dati geotermici devono essere integrati con quelli derivanti dalle ricerche idriche, minerarie e petrolifere effettuate nell'area in studio ed in quelle vicine. Le informazioni raccolte in questa fase preliminare sono importanti per ben individuare gli obiettivi del programma d'esplorazione geotermica e talvolta consentono una significativa riduzione dei costi. (Dickinson, Fanelli, 2004)

Un programma d'esplorazione si sviluppa normalmente in fasi successive: *riconoscimento*, *prefattibilità* e *fattibilità*. Durante ciascuna di queste fasi, sono gradualmente eliminate le aree meno interessanti, mentre la ricerca si concentra in quelle più promettenti. I metodi di investigazione applicati, inoltre, diventano progressivamente più sofisticati e forniscono maggiori dettagli man mano che il programma procede. La dimensione e l'impegno finanziario dell'intero programma devono essere proporzionati ai suoi obiettivi,

all'importanza delle risorse ipotizzabili ed alla forma di utilizzazione prevista. (Dickinson, Fanelli, 2004)

Il programma d'esplorazione deve essere flessibile e essere ridefinito man mano che si rendono disponibili i risultati delle ricerche svolte nelle varie fasi; nello stesso modo, i modelli geologici e geotermici devono essere progressivamente aggiornati e ottimizzati. Questi riesami periodici del programma dovrebbero eliminare tutte le azioni non più necessarie ed eventualmente avviarne altre, suggerite dai risultati ottenuti nelle varie fasi.

Naturalmente, ogni riduzione del numero e delle dimensioni delle operazioni di prospezione ha per effetto una diminuzione dei costi, ma anche un aumento del rischio di errori o di fallire l'obiettivo. D'altra parte la diminuzione del rischio minerario comporta un aumento generalizzato dei costi. Il successo economico di un programma d'esplorazione sta appunto nel trovare un buon equilibrio tra le due opposte esigenze di ridurre i costi e di diminuire i rischi. (Dickinson, Fanelli, 2004)

1.4 LO SCAMBIO TERMICO CON IL SOTTOSUOLO: GEOSCAMBIO

Non tutti i sottosuoli presentano caratteristiche tali da poter essere sfruttati per mezzo delle tecnologie precedentemente menzionate. Nella maggioranza dei casi il sottosuolo ha una temperatura pressochè costante che in Italia oscilla fra i 12 ed 14°C. In generale, questa temperatura si mantiene costante a partire da 10 metri fino a 100 metri di profondità. Il primo strato risente delle escursioni termiche giorno/notte – estate/inverno.

Al di sotto di 100 metri, la temperatura inizia a salire in ragione di 3 gradi per ogni 100 metri di profondità. Il gradiente termico, cioè la velocità con cui sale la temperatura del sottosuolo, avvicinandosi al centro della Terra, non è costante ovunque e a qualunque profondità.

Anche per i sottosuoli “normali” esiste la possibilità di uno sfruttamento per fini energetici ovvero per riscaldare e raffrescare edifici e produrre acqua calda per scopi sanitari o industriali. La porzione del sottosuolo generalmente interessata da questo tipo di tecnologia è quella che va da qualche metro fino ad non oltre 200 metri di profondità.

Generalmente ci si riferisce a questo tipo di tecnologia con la locuzione “*geotermia a bassa entalpia*” proprio per differenziarla da quella classica in cui l'applicazione tecnologica implica temperature del sottosuolo superiori ai 40°C.

→ Con il termine “geotermia” da questo momento si indicherà solo la “geotermia a bassa entalpia”, mentre per “impianto geotermico” si intenderà quella tipologia

impiantistica che sfrutta la bassa entalpia del sottosuolo a fini di riscaldamento, raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria.

Dal 1950, nel Nord-America, in Svezia e in Svizzera, si è sviluppata la tecnologia della “geotermia a bassa entalpia” per il riscaldamento di edifici. In Italia si sta diffondendo l’applicazione della geotermia per la Climatizzazione Caldo e Freddo e per la produzione di Acqua Calda Sanitaria in edifici, dal residenziale all’industriale. (RCT S.r.l., 2009).

In questo senso, tale tecnologia è definita *Geoscambio* in quanto l’impianto geotermico scambia calore col sottosuolo in modo da produrre freddo d’estate e caldo d’inverno. Il principio del geoscambio si basa sullo sfruttamento della temperatura del sottosuolo che oltre i 10 metri di profondità ha un valore costante di 10°-15°, tale temperatura aumenta di 1° ogni 33 metri di profondità. (RCT S.r.l., 2009).

Grazie all’invariabilità della temperatura e all’inerzia termica del sottosuolo, un impianto geotermico riesce a scambiare profittevolmente calore col terreno assorbendolo in inverno e cedendolo d’estate, diminuendo considerevolmente i consumi di energia per la climatizzazione e per la produzione di acqua calda sanitaria. (RCT S.r.l., 2009).

L’impianto geotermico è in grado di climatizzare edifici di ogni dimensione, dalla villetta monofamiliare al centro commerciale, alimentando anche impianti di processo industriale. Lo scambio col sottosuolo può avvenire tramite pozzi o tramite sonde verticali. Se nel primo caso è l’acqua di falda ad essere estratta e portata direttamente alla pompa di calore, nel secondo caso l’acqua circola all’interno di tubi di polietilene e scambia calore col terreno, con impianto a circuito chiuso non si ha nessuna interazione diretta con l’ambiente ad esclusione di uno scambio termico. (RCT S.r.l., 2009).

Nella pompa di calore, con un minimo dispendio di energia elettrica, l’acqua verrà riscaldata (inverno) o raffreddata (estate) per poi essere mandata nell’impianto di distribuzione interno agli edifici (pannelli radianti, ventil-convettori, travi fredde). Inoltre la pompa di calore può anche riscaldare, sia in inverno sia in estate, un apposito accumulatore per acqua calda sanitaria. (RCT S.r.l., 2009).

L’utilizzo di un impianto geotermico permette di climatizzare un edificio di qualsiasi dimensione con forti risparmi rispetto ai tradizionali metodi di riscaldamento e raffrescamento. Infatti, non solo il sistema geotermico è reversibile, cioè permette di produrre sia Caldo che Freddo con un solo impianto, consente di essere completamente indipendente dalla fornitura di metano, gas ed altri idrocarburi. Materie prime queste i cui prezzi, essendo dipendenti da quello del petrolio, sono in continuo aumento. (RCT S.r.l., 2009).

Perché un impianto geotermico garantisca elevate rese è auspicabile che gli impianti interni siano a superficie radiante (a pavimento, parete o soffitto) o a ventil-convettori. In questi casi, la pompa di calore lavora in regime ottimale e permette di produrre con 1 kWh elettrico circa 4 kWh termici, permettendo di risparmiare circa il 50% rispetto ad un impianto a metano, circa il 70% rispetto ad un impianto a gasolio e circa l'80% rispetto ad un impianto a GPL. (RCT S.r.l., 2009).

Nelle mezze stagioni, tramite il Free o Natural Cooling, i consumi elettrici sono bassissimi perché la pompa di calore rimane spenta ed è attiva solo una pompa di circolazione. Il calore in eccesso presente negli ambienti interni viene assorbito dalle superfici radianti e tramite l'acqua di circolazione viene dissipato nel sottosuolo. (RCT S.r.l., 2009).

1.4.1 GLI SCAMBIATORI TERMICI

Per beneficiare della naturale energia contenuta nel sottosuolo è necessario avvalersi di pompe di calore, accoppiate a scambiatori termici; si potrà estrarre calore dal terreno mediante:

- *sonde geotermiche verticali*, installate nel terreno a una profondità normalmente compresa tra 70 e 150 m. Possono essere scambiatori ad U (singolo o doppio U) oppure tubi coassiali (semplici o complessi), solitamente realizzati in polietilene o polibutilene;

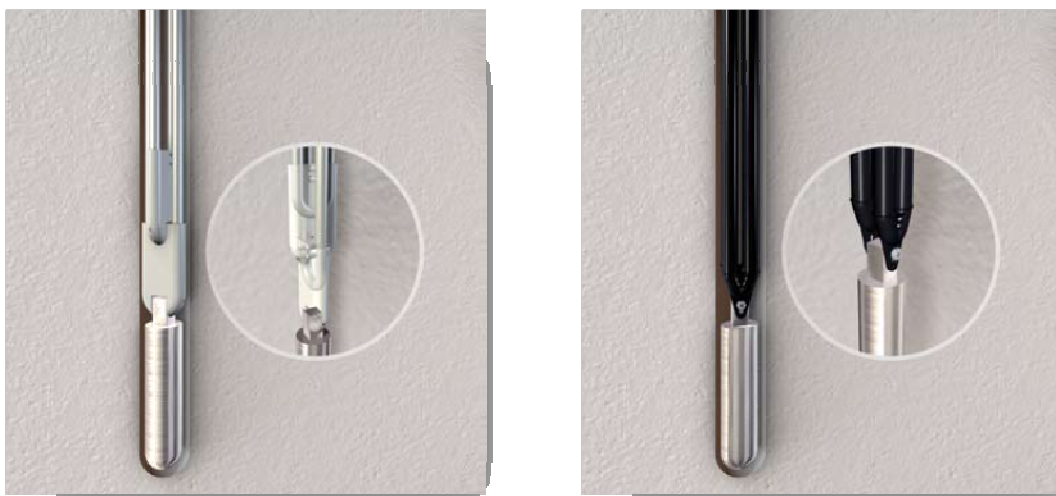


Figura 9: sonde geotermiche verticali (Rehau S.p.a, 2007)

- *collettori geotermici* posati in *orizzontale* a una profondità di circa 1,5 m. Sono tipicamente realizzati in polietilene, polibutilene o rame. Questo tipo di sistema utilizza il flusso termico proveniente dalla superficie, determinato in modo diretto o indiretto dall'energia solare;



Figura 10: collettori geotermici orizzontali (Rehau S.p.a., 2007)

- collettori geotermici incorporati in pali di fondazione (i cosiddetti “*pilastrini energetici*”).

Sono delle geostrutture (principalmente pali) in calcestruzzo o calcestruzzo armato dalla duplice funzione: fungere da fondamenta ed, equipaggiate con scambiatori di calore, fornire calore all'edificio che sostengono. All'interno dei pali sono installati dei tubi in polietilene ad U (due o più a seconda del diametro del palo da 0.4 a 1.5 m);



Figura 11: pilastrini energetici (Rehau S.p.a., 2007)

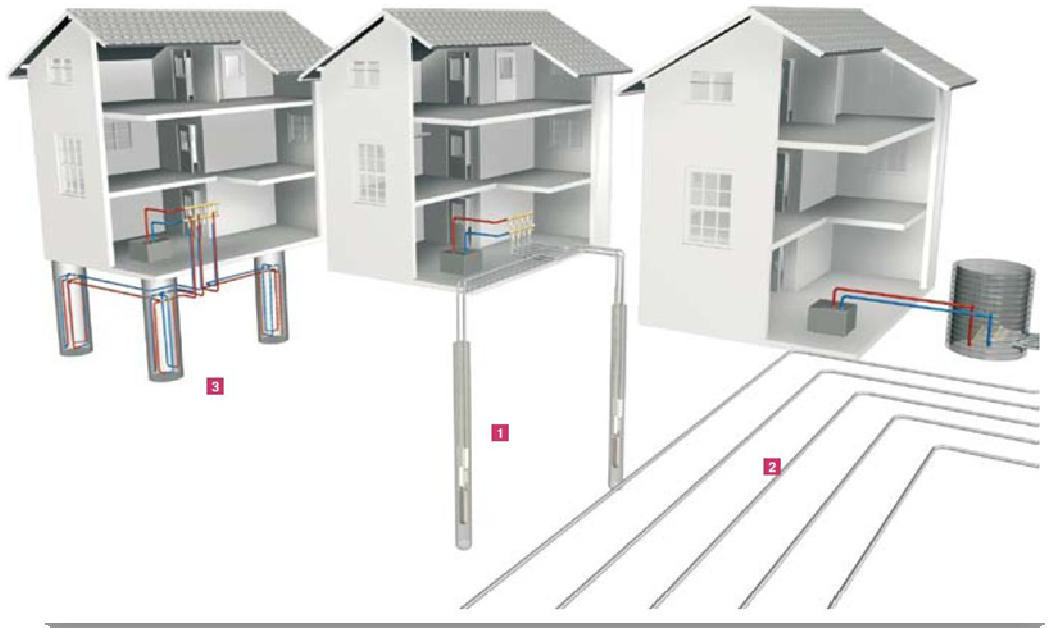
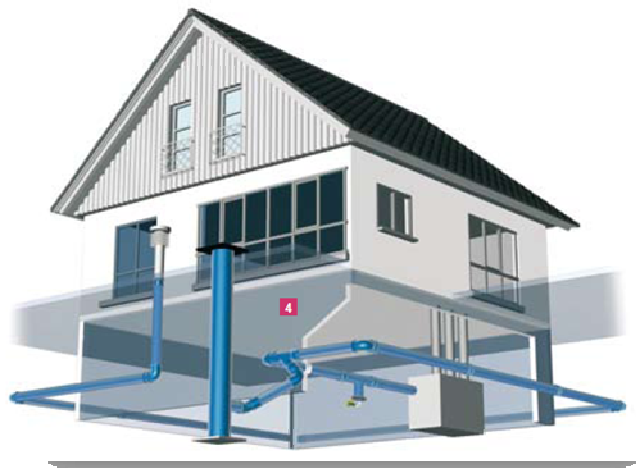


Figura 12: Tipologie di scambiatori termici: 1) sonde geotermiche verticali; 2) collettori geotermici orizzontali; 3) pilastri energetici (Rehau S.p.a., 2007)



*Figura 13: Scambiatore termico aria-terra (4)
(Rehau S.p.a., 2007)*

- *scambiatore termico aria-terra*: viene collegato a monte di un apparato di ventilazione controllata con recupero di calore. Il principio si basa sul fatto che la temperatura pressochè costante di circa 10°C del terreno viene utilizzata rispettivamente in inverno

per preriscaldare e in estate per raffreddare l'aria attraverso un sistema di tubazioni posato nel terreno.

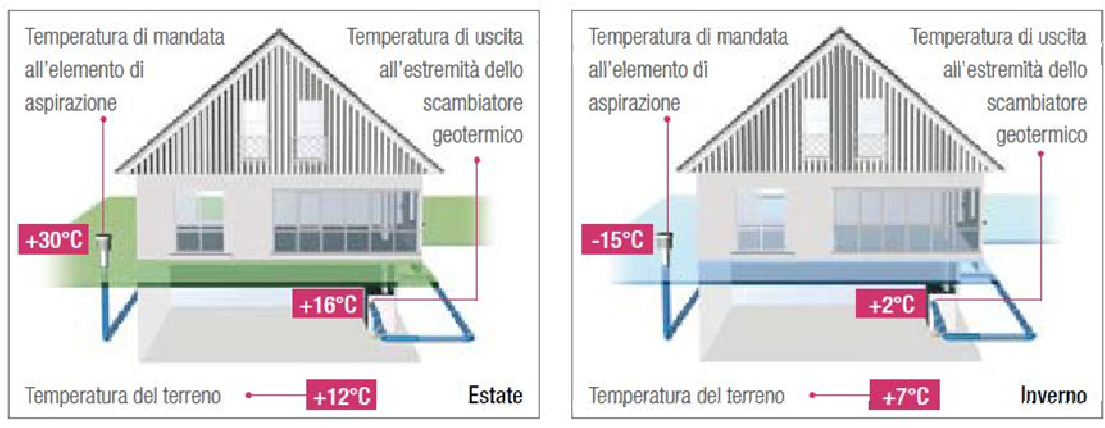


Figura 14: Funzionamento di uno scambiatore termico aria-terra (Rehau S.p.a., 2007)

Prima di essere collegate alla pompa di calore, le sonde (tubi) vanno riempite di una soluzione di acqua e altro composto chimico in bassa percentuale (per assicurare un punto di congelamento a -10°C), che fungerà da termovettore, ovvero consentirà alle sonde di scambiare energia con il sottosuolo. Chiaramente il composto scelto dovrebbe essere: non tossico, non infiammabile, stabile, compatibile con i materiali degli altri componenti del sistema, a basso impatto ambientale, non corrosivo, economico, con ottime caratteristiche di scambio termico, con bassa viscosità. (Rehau S.p.a., 2007)

Fra i fluidi che soddisfano più di qualcuna delle precedenti caratteristiche, quelli di uso più comune sono soluzioni con: glicole etilenico, glicole propilenico (attualmente l'anticongelante più utilizzato), metanolo, etanolo, cloruro di sodio, cloruro di calcio, acetato di potassio. (Rehau S.p.a., 2007)

Per la scelta del sistema occorre partire sempre dalla potenza dell'evaporatore, ovvero il calore da sottrarre oppure, nel caso del raffreddamento, da apportare al terreno. In sede di progettazione occorre scegliere la fonte di calore maggiormente idonea per il luogo di installazione, adattandovi quindi il sistema di riscaldamento e gli altri componenti dell'impianto. (Rehau S.p.a., 2007)

La decisione se optare per un trasmettitore di calore orizzontale o verticale verrà “pilotata” dalle condizioni geologiche presenti in sito e dallo spazio necessario e disponibile, ovvero dalle condizioni di carattere edile. (Rehau S.p.a., 2007)

1) I dati da contemplare ai fini della progettazione di un impianto dotato di *collettori geotermici* combinato con una pompa di calore sono:

- Fabbisogno di calore per riscaldamento e C.O.P. della pompa di calore, da cui risulta la potenza dell’evaporatore
- Portata volumica della pompa di calore
- Capacità di sottrazione specifica del terreno. (Rehau S.p.a., 2007).

La pompa di calore deve essere definita in modo estremamente preciso, per cui per il dimensionamento va interpellato un produttore, in modo da assegnare il coefficiente di prestazione alla potenza termica, in base al modo di funzionamento definito. (Rehau S.p.a., 2007).

In questo modo la potenza dell’evaporatore risulta nel seguente modo:

Potenza evaporatore = Potere calorifico x (C.O.P.-1) / C.O.P.

Esempio:

Potere calorifico: 12 kW

C.O.P.: 4

$[12 \text{ kW} \times (4-1)] / 4 = 9 \text{ kW}$

Secondo la Tabella 1 la capacità di sottrazione specifica dipende dalla durata del funzionamento annuo:

Tabella 1 (Rehau S.p.a., 2007)

Suolo	Capacità di sottrazione	
	a 1800 h	a 2400 h
Terreno non compatto	10 W/m ²	8 W/m ²
Terreno compatto, umido	20-30 W/m ²	16-24 W/m ²
Terreno saturo d'acqua	40 W/m ²	32 W/m ²

Esempio:

Potenza evaporatore: 9 kW

Ore di funzionamento: 1800 h/a

Terreno: compatto, umido

Ne consegue:

Capacità di sottrazione: 25 W/m²

Superficie collettore per terreno = Superficie collettore per terreno (W) / Capacità di sottrazione (W/m²) = 360 m²

Le dimensioni dei tubi vanno scelte in funzione della capacità di sottrazione potenzialmente ottenibile dal terreno, ed in particolare tanto maggiore sarà quest'ultima, tanto maggiore sarà il flusso volumetrico necessario alla fascia di temperature data, e tanto più grande dovrà essere la dimensione dei tubi. (Rehau S.p.a., 2007). Un orientamento al riguardo è fornito dalla Tabella 2.

Tabella 2 (Rehau S.p.a., 2007)

Tipo di terreno	AD x s (mm)
Terreno non compatto	20 x 1,9
Terreno compatto, umido	25 x 2,3
Terreno saturo d'acqua	32 x 2,9

La direttiva VDI 4640 consiglia una distanza di posa di 50-80 cm. (Verein Deutscher Ingenieure, 2001).

Scegliendo una distanza di posa di 75 cm (0,75 m) e in base alla relazione:

Quantità di tubo = Superficie collettore per terreno (m²) / Distanza di posa (m) risulta una lunghezza tubi di 480 m. (Rehau S.p.a., 2007).

Bisogna fare attenzione che i valori relativi alla capacità e al lavoro di sottrazione non devono essere superati, in quanto in questo caso il tratto in cui è posata la tubazione gela eccessivamente – oltre alle proporzioni desiderate – e i raggi di estensione della gelata vengono a convergere, raggiungendo proporzioni notevoli. (Rehau S.p.a., 2007).

Durante il disgelo in primavera viene ostacolato notevolmente il drenaggio delle acque delle precipitazioni piovose e derivanti dal disgelo, che contribuisce in misura fondamentale a riscaldare il terreno. (Rehau S.p.a., 2007).

Dato che il collettore geotermico provoca inevitabili alterazioni del livello delle temperature all'interno del terreno, i tubi vanno assolutamente posati a distanza sufficiente da alberi, arbusti e piante sensibili. E' richiesta una distanza di posa da altre tubazioni di alimentazione ed edifici di 70 cm. Nei casi in cui non fosse possibile rispettarla, le tubazioni devono essere assolutamente protette attraverso un isolamento sufficiente. (Rehau S.p.a., 2007).

I collettori per terreno risultano idonei per il raffreddamento diretto degli edifici soltanto a determinate condizioni:

- Acqua sotterranea < 0,5 m con terreno conduttore 2,5 - 3 W/mK
- Temperatura acqua sotterranea durante l'estate < 12 °C

I carichi di raffreddamento di punta possono essere captati anche attraverso una macchina frigorifera accoppiata nel terreno.

Per evitare il pericolo di una perdita di pressione e/o carico troppo elevata, la lunghezza dei tratti di tubi non deve superare i 100 m. (Rehau S.p.a., 2007).

Per gli impianti con collettori geotermici la direttiva VDI 4640 prescrive un montaggio dei tubi a una profondità di 1,2 – 1,5 m e a una distanza di 50-80 cm. (Verein Deutscher Ingenieure, 2001). I collettori geotermici vengono rigenerati principalmente dall'alto attraverso l'irradiazione solare e le precipitazioni. In relazione a ciò il flusso di calore geotermico è ridotto. (Rehau S.p.a., 2007).

Alla luce di quanto appena detto, in linea di principio si deve pertanto evitare di costruire nei punti in cui passano i collettori ovvero di posare questi ultimi al di sotto di superfici sigillate

in qualsiasi modo. Per eventuali eccezioni alla suddetta regola è necessaria una conferma a livello di progettazione, possibile in determinate circostanze, quando cioè un collettore geotermico viene utilizzato sia per riscaldare che per raffreddare, per cui contribuisce alla rigenerazione del terreno con qualsiasi modalità di funzionamento. In particolare in caso di posa al di sotto di edifici occorre tenere conto del fatto che la temperatura di funzionamento non deve assolutamente raggiungere il limite di gelata, in quanto in questo caso le opere murarie potrebbero riportare danni per effetto del sollevamento del terreno o altri fenomeni analoghi. (Rehau S.p.a., 2007).

2) Anche per la progettazione delle sonde geotermiche destinate al funzionamento delle pompe di calore è determinante la capacità di sottrazione ovvero la potenza dell'evaporatore. La Tabella 3 contiene i valori da adottare per gli impianti di piccolo formato < 30 kW per il riscaldamento mediante pompa di calore e per lunghezze max. della sonda di 100 m. (Rehau S.p.a., 2007).

Tabella 3: Capacità di sottrazione specifica delle sonde geotermiche
(Verein Deutscher Ingenieure, 2001)

Ore di funzionamento Suolo	1800 h	2400 h
Capacità di sottrazione specificata in W/m di sonda		
Valori di riferimento generali:		
Fondo cattivo (sedimenti asciutti) ($\lambda < 1,5$ W/mK)	25	20
Fondo normale con roccia solida e sedimenti saturi d'acqua ($\lambda < 3,0$ W/mK)	60	50
Roccia solida ad alta conduttività termica ($\lambda < 3,0$ W/mK)	84	70
Singole rocce:		
Roccia solida ad alta conduttività termica	< 25	< 20
Ghiaia, pietrisco conduttori d'acqua	65 - 80	55 - 85
In caso di fiume sotterraneo piuttosto in ghiaia e sabbia, per impianti singoli	80 - 100	80 - 100
Argilla di vario tipo, umido	35 - 50	30 - 40
Pietra calcarea (massiccia)	55 - 70	45 - 60
Argilla umida	65 - 80	55 - 65
Magmatite acida (p. es. granito)	65 - 85	55 - 70
Magmatite basica (p. es. basalto)	40 - 65	35 - 55
Gneis	70 - 85	60 - 70

I tipi di terreno che influenzano la capacità di sottrazione della sonda possono essere individuati dalla prova geologica o alla prima perforazione da parte della ditta di trivellazione. (Rehau S.p.a., 2007).

Potenza evaporatore:	6,8 kW (6800 W)
Ore di funzionamento:	2400 h/a
Terreno umido	
Ne consegue che:	Capacità di sottrazione: 50 W/m
Ne consegue che	
Lunghezza sonda =	$\frac{\text{Potenza evaporatore (W)}}{\text{Capacità di sottrazione (W/m)}}$
in questo caso 136 m.	

Figura 15: Esempio di progettazione
(Rehau S.p.a., 2007)

Nel caso di impianti di grandi dimensioni con pompa di calore dal potere calorifico > 30 kW o sfruttamento di una fonte di calore supplementare (p. es. raffreddamento) deve essere eseguito un calcolo più preciso. A questo scopo va rilevato come base il fabbisogno di freddo o calore dell'edificio. (Rehau S.p.a., 2007).

La Figura 15 mostra un esempio di fabbisogno di freddo e calore dell'edificio distribuito nel corso dell'anno, calcolato mediante un programma di simulazione. (Rehau S.p.a., 2007).

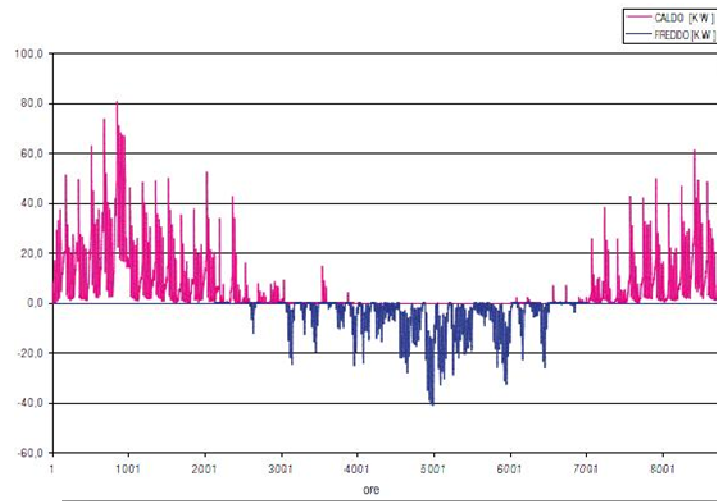


Figura 16: Esempio di curva caratteristica caldo – freddo (edificio)
(Rehau S.p.a., 2007)

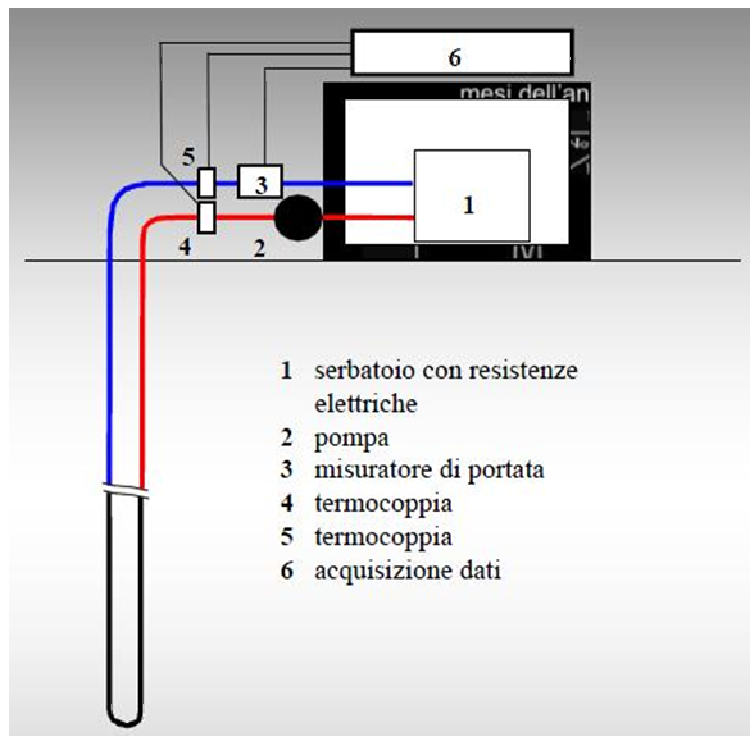
Per il dimensionamento dell'impianto con sonda nei casi in cui non si conosce con assoluta certezza la situazione geologica e idro-geologica occorre effettuare una perforazione pilota che permetta di rilevare le caratteristiche geofisiche del sottosuolo, e mediante un *test di risposta termica* si possa misurare la potenza che è possibile sottrarre dal sottosuolo. (Rehau S.p.a., 2007).

In particolare, il *Ground Response Test* [GRT] o *Thermal Response Test* (test di resa termica) è una prova che ha lo scopo di misurare le proprietà termiche dello scambiatore geotermico installato in un determinato sottosuolo, e la resistenza termica dello scambiatore. (Basta, 2007).

La misura di questo parametro fornisce informazioni di tipo termico relativamente sia al sottosuolo in esame, che alla sonda geotermica installata. (Basta, 2007).

Il GRT viene effettuato su una sonda pilota, che entrerà a far parte successivamente del campo sonde. (Basta, 2007).

Durante il GRT una quantità definita di flusso termico viene immessa nella sonda. Si provvede quindi alla misura delle variazioni del fluido termovettore che ritornano dal sottosuolo, determinando di conseguenza lo scambio termico in quelle condizioni. (Basta, 2007).



*Figura 17: Scambio termico sonda – sottosuolo
(Galgaro, 2010)*

Dalla elaborazione delle temperature di ingresso e uscita del fluido geotermico dalla sonda si possono ricavare, utilizzando modelli diversi, sia le caratteristiche del terreno, che una serie utile di dati sperimentali sul comportamento degli scambiatori, necessarie per il dimensionamento e per la verifica della corretta installazione della sonda geotermica. (Basta, 2007).

Come si è detto, il GRT si basa sull'immissione (oppure estrazione) di una quantità di calore nota e costante all'interno del loop geotermico, e sulla misura delle temperature di mandata e ritorno. Sono stati condotti test geotermici, sia immettendo calore nella sonda che estraendone. Si è osservato che le proprietà termiche del sottosuolo in generale non variano.

(Basta, 2007). Eccezioni sono state osservate solo nei casi in cui l'immissione di calore induce fenomeni di migrazione di acqua in strati di sottosuolo non completamente saturi. (Basta, 2007).

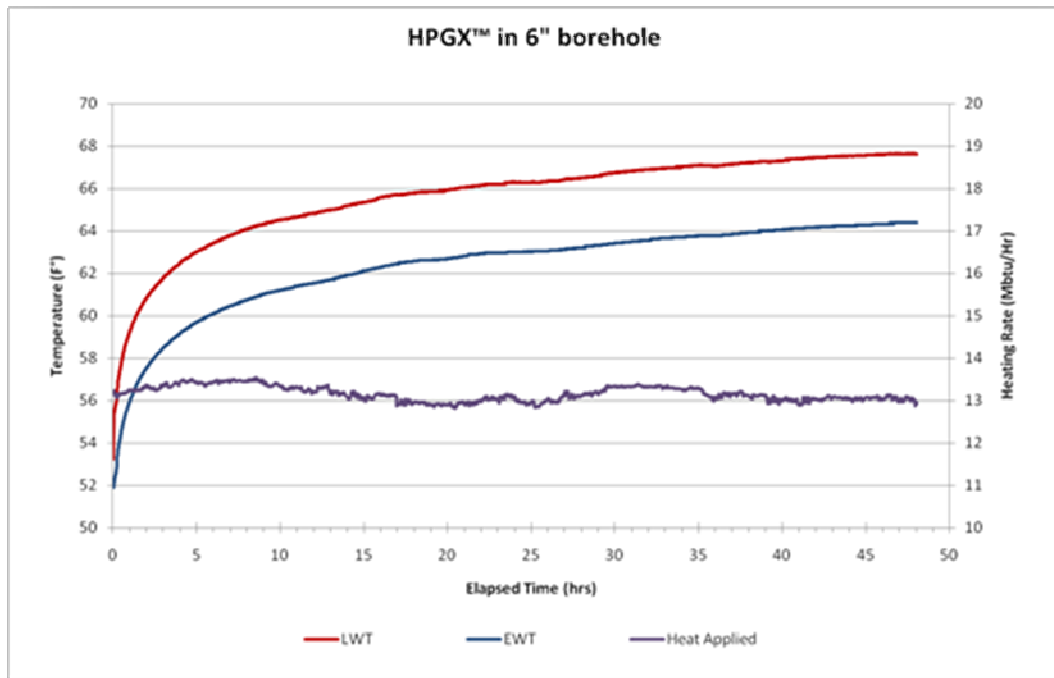


Figura 18: Esempio di andamento delle temperature in un Ground Response Test (Google immagini)

Sulla scorta dei risultati è inoltre possibile ricavare, sempre attraverso un programma di simulazione, la capacità di sottrazione possibile nel corso di un anno per una durata impianto da definire. (Basta, 2007).

1.4.2 LA POMPA DI CALORE

La pompa di calore è una macchina in grado di trasferire calore da un corpo a temperatura più bassa ad un corpo a temperatura più alta. Tale processo è inverso rispetto a quello che avviene naturalmente in natura ed è dovuto al fatto che viene fornita energia elettrica alla macchina che "pompa calore". Il principio di funzionamento che sta alla base della pompa di calore è un ciclo termodinamico inverso, analogo a quello che sta alla base di un comune frigorifero. Nel caso in cui l'unico interesse sia quello di riscaldare un dato ambiente, la pompa si dice

"irreversibile"; nel caso in cui si abbia sia l'interesse a riscaldare (ad esempio durante l'inverno) che a raffrescare (ad esempio, durante l'estate), la pompa si dice "reversibile". (Romer, 2002).

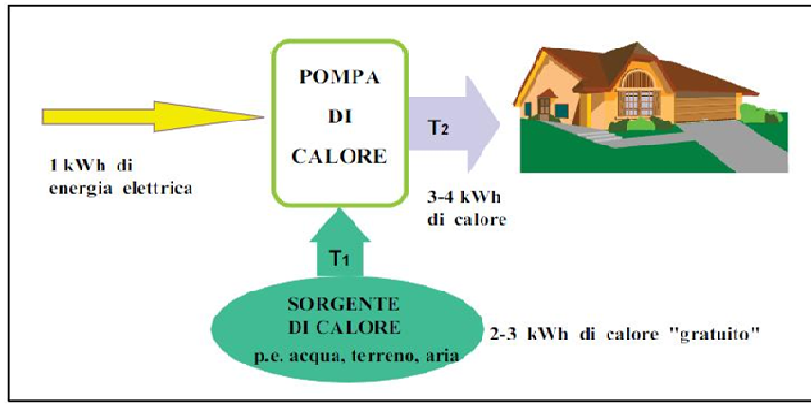


Figura 19: La pompa di calore (Romer, 2002)

L'efficienza di una pompa di calore è rappresentata dal coefficiente di prestazione COP, inteso come rapporto tra l'energia termica resa al corpo da riscaldare e l'energia elettrica consumata perché possa avvenire il trasporto di calore medesimo. Un valore di COP tipico di un sistema piuttosto efficiente, può essere considerato pari a 3 (valori normali sono compresi tra 2,5 e 3,5): ciò significa che per ogni kWh di energia elettrica consumato, la pompa di calore renderà 3 kWh d'energia termica all'ambiente da riscaldare. Ovviamente, in una corretta valutazione, andrà tenuta presente la tipologia di fonte energetica impiegata per la generazione elettrica e l'intera catena di produzione, trasporto e distribuzione dell'energia elettrica medesima. (Romer, 2002).

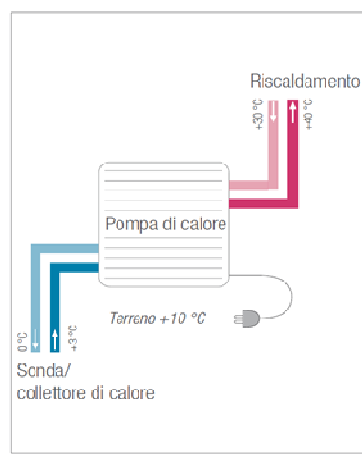
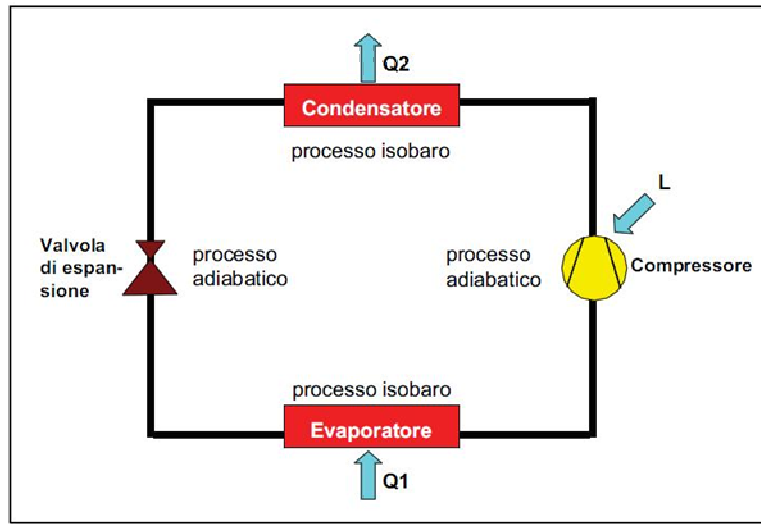


Figura 20: Funzionamento di una pompa di calore (Romer, 2002)

1.4.2.1 IL CICLO TERMODINAMICO

La pompa di calore è costituita da un circuito chiuso (costituito da un compressore, un condensatore, una valvola di espansione ed un evaporatore) percorso dal fluido frigorifero (come R-134a, R-32, R-125, R-507, NH₃, CO₂, ecc...). (Romer, 2002).

Se la pompa di calore è a ciclo invertibile, è ulteriormente equipaggiata con una valvola di inversione del ciclo. (Romer, 2002).



*Figura 21: Il ciclo termodinamico della pompa di calore
(Romer, 2002)*

Il ciclo termodinamico che il fluido frigorifero subisce consiste in una compressione adiabatica, una fase di condensazione, una fase di espansione e una di evaporazione. Durante la compressione il fluido frigorifero aumenta di pressione e di temperatura; nella seconda fase attraversa uno scambiatore (condensatore) nel quale viene a contatto con acqua o aria cedendo, in tal modo, calore. L'acqua o l'aria sono utilizzate come fluido vettore per il riscaldamento di locali o acqua sanitaria. Nella terza fase il fluido frigorifero attraversa una valvola di espansione (processo di laminazione) con conseguente riduzione di pressione e di temperatura. Nella fase 4, detta di evaporazione, viene utilizzato il passaggio di stato da liquido a vapore: il fluido frigorifero si trova a temperature molto basse, tali da permettergli di assorbire calore dal fluido vettore esterno che asporta energia. (Romer, 2002).

La Tabella 4 riassume quanto accennato; la Figura 21 riporta lo schema di funzionamento della pompa di calore.

*Tabella 4: Le quattro fasi del ciclo termodinamico di una pompa di calore
Prestazioni e applicazioni (Romer, 2002)*

Fase	Nome fase	Processo
1	Compressione	Il fluido di lavoro viene portato ad alta pressione e si riscalda, assorbendo calore (mediante passaggio da energia meccanica a energia termica)
2	Condensazione	Il fluido di lavoro passando dallo stato di vapore a quello di liquido cede il calore assorbito al fluido vettore
3	Espansione	Il fluido di lavoro abbassa la propria pressione e temperatura
4	Evaporazione	Il fluido di lavoro assorbe calore dall'esterno ed evapora

Durante il funzionamento della pompa di calore si hanno: un consumo di energia elettrica nel compressore, un assorbimento di calore dall'ambiente circostante nell'evaporatore ed una cessione di calore all'ambiente da riscaldare nel condensatore. Il vantaggio dell'impiego della pompa di calore sta nel fatto che tale sistema consente di fornire più energia (sotto forma di calore, forma di energia poco pregiata) di quella elettrica (forma di energia pregiata) necessaria al funzionamento. (Romer, 2002).

L'ambiente da cui si estrae calore è la sorgente fredda. Le principali sorgenti fredde sono aria, acqua e terreno. Il fluido vettore da scaldare è detto pozzo caldo; generalmente si tratta di acqua o aria. Nel condensatore il fluido frigorigeno cede al pozzo caldo sia il calore prelevato dalla sorgente che l'energia fornita dal compressore. Il calore può poi essere ceduto all'ambiente mediante ventilatori convettori, serpentine inserite nel pavimento, canalizzazioni per il trasferimento del calore ai diversi locali. (Romer, 2002).

In base alla sorgente fredda e al pozzo caldo utilizzato le pompe di calore possono essere: aria – acqua, aria – aria, acqua – acqua, acqua – aria e terra – acqua.. (Romer, 2002).

L'aria, come sorgente fredda, ha il vantaggio di essere disponibile ovunque, tuttavia la potenza resa dalla pompa di calore diminuisce con la temperatura della sorgente. Più vantaggioso è l'impiego dell'aria "viziata" come sorgente fredda (l'aria viene estratta e ne viene sfruttato il contenuto di calore, invece di essere semplicemente "cambiata" e dispersa nell'ambiente). (Romer, 2002).

L'acqua (di falda, di fiume o di lago; oppure accumulata in serbatoi e riscaldata da collettori solari) svincola maggiormente il sistema dalle condizioni climatiche esterne. (Romer, 2002).

Il terreno può essere considerato quasi una sorgente a temperatura costante (in profondità), ma richiede soluzioni impiantistiche più complesse e costose. (Romer, 2002).

Le applicazioni della pompa di calore maggiormente note sono il riscaldamento di ambienti e di acqua sanitaria e climatizzazione degli ambienti (in alternativa ai sistemi convenzionali caldaia + refrigeratore). L'applicazione della pompa di calore alla climatizzazione (riscaldamento + raffrescamento) è quella più conveniente, in quanto comporta un minor tempo di ammortamento del costo dell'impianto. (Romer, 2002).

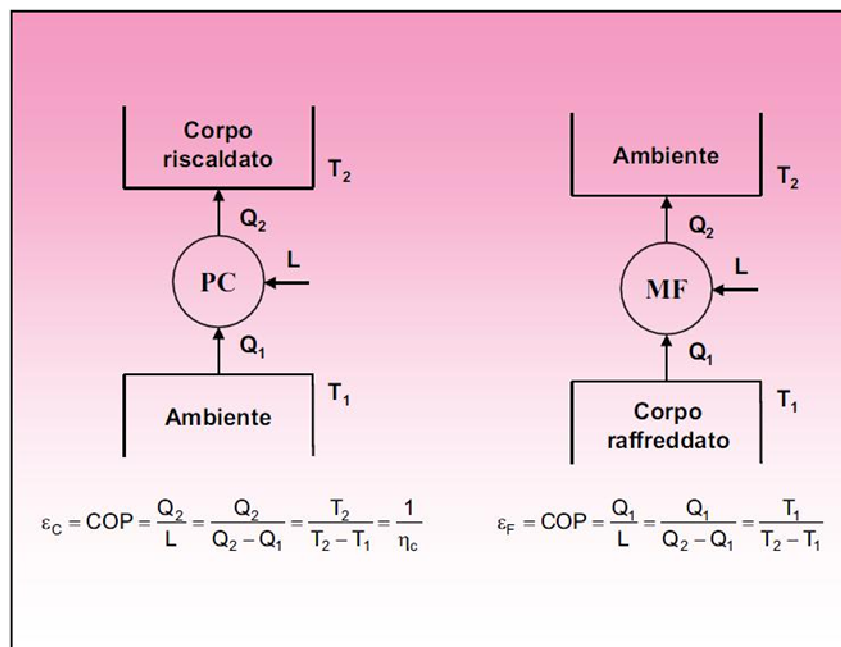


Figura 22: La produzione di caldo e di freddo mediante la pompa di calore

(Romer, 2002)

1.4.2.2 VANTAGGI E SVANTAGGI

Vantaggi

Il vantaggio più evidente è che si tratta di un sistema intrinsecamente efficiente. (Romer, 2002).

Ciò ha dirette ripercussioni anche sull'ammortamento del costo di installazione e sulla bolletta del consumatore; alcuni dati di letteratura mostrano infatti un costo specifico medio per unità

di calore prodotto pari alla metà di quello di un impianto tradizionale con caldaia a gasolio e 2/3 di quello di un impianto tradizionale con caldaia a metano. (Romer, 2002).

Inoltre, l'impiego della pompa di calore può consentire lo sfruttamento di quote di energia altrimenti perse, come nel caso del recupero di calore di scarto da processi produttivi industriali. (Romer, 2002).

Infine, tale sistema consente anche una facile e vantaggiosa integrazione con altre fonti rinnovabili. (Romer, 2002).

Svantaggi

Gli svantaggi sono per la maggior parte dipendenti dalle scelte; un'analisi completa delle potenzialità applicative dovrebbe bastare ad evitare scelte poco efficienti. (Romer, 2002).

Ad esempio, se come sorgente viene usata l'aria esterna, vanno esclusi i luoghi dove la temperatura scende al di sotto degli 0°C, a meno di usare un sistema di tipo bivalente con caldaia ausiliaria in grado di coprire in fabbisogno di energia quando la temperatura scende al di sotto degli 0°C. (Romer, 2002).

Nel caso l'energia elettrica impiegata sia prodotta a partire da fonti fossili, dal punto di vista ambientale il sistema risulta meno efficace. (Romer, 2002).

Nel caso dell' impiego per solo riscaldamento di acqua sanitaria o ambienti, vanno attentamente valutati gli aspetti economici rispetto ai sistemi tradizionali quali caldaie e scaldabagni elettrici o a gas, anche alla luce degli incentivi variabili da Paese a Paese. (Romer, 2002).

1.4.3 SISTEMI DI GEOSCAMBIO A CIRCUITO CHIUSO

Nei sistemi a circuito chiuso, detti anche GCHP (Ground Coupled Heat Pumps), un fluido termovettore viene fatto circolare attraverso una o più sonde per far sì che questo venga riscaldato (o raffreddato) dal terreno per poter essere poi utilizzato dalla pompa di calore. Una volta che il fluido è stato utilizzato dalla pompa viene re-immesso nel circuito. (Panazzolo, 2009).

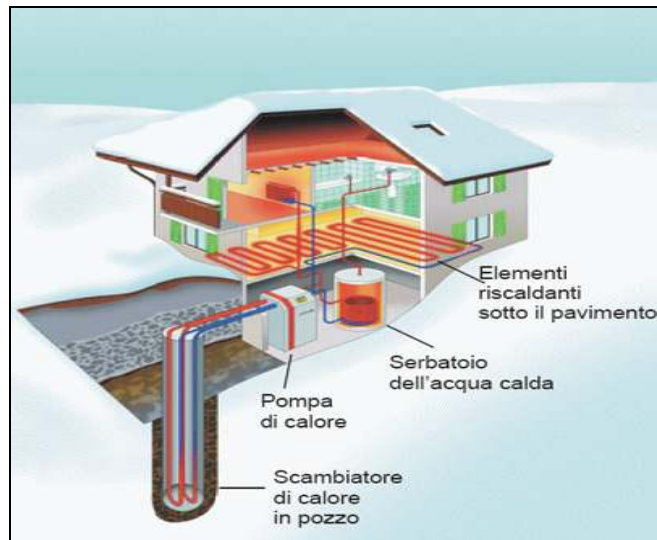


Figura 23: Esempio di sistema di riscaldamento domestico con pompa di calore geotermica. La pompa è collegata ad uno scambiatore di calore in pozzo ed è del tipo acqua / acqua. Oltre al riscaldamento degli ambienti, il sistema comprende anche la fornitura di acqua sanitaria. (<http://geothermal-house.com>, modificato)

Le sonde geotermiche possono essere poste: in orizzontale o in verticale. Nel primo caso le sonde sono generalmente posizionate ad una profondità di 1,5 m o comunque sotto il limite di congelamento del terreno, impegnando un'area proporzionale alla potenza richiesta, da maggiorarsi nel caso di utilizzo estivo del sistema come raffrescamento e nel caso di isolamento medio o scarso dell'abitazione. A titolo di esempio per una costruzione con una superficie di circa 100 mq. sono necessari circa 120 – 150 m² di superficie di captazione. La posa delle sonde geotermiche non altera in alcun modo la natura del terreno, dopo l'interramento delle tubazioni è possibile sfruttare la superficie sovrastante senza creare problemi al buon funzionamento dell'impianto. La posa in opera può avvenire o tramite sbancamento di una parte del terreno o scavando trincee strette e profonde. Solitamente il dimensionamento del sistema è influenzato da: temperatura media esterna del sito, proprietà del suolo, esposizione dell'area alla radiazione solare ed alla pioggia, volume e livello di isolamento dell'edificio e temperatura richiesta dal sistema di riscaldamento. A seconda del tipo di suolo e di esposizione dello stesso, le prestazioni del sistema sono comprese tra i 10 e i 40 W/m². Se si dispone di una sufficiente area di prato, questa soluzione è generalmente più conveniente in termini di rapporto costi-benefici rispetto a quella a sonda verticale. Risulta però peggiore per quanto riguarda la capacità di scambio termico col terreno. Infatti le sonde essendo poste a bassa profondità risultano maggiormente influenzate dalle variazioni stagionali e giornaliere della temperatura. Questo accade soprattutto per il raffrescamento

estivo, in quanto nei mesi caldi il terreno raggiunge ben presto alte temperature che non agevolano lo scambio in raffreddamento. Nell'altro caso invece nel suolo, utilizzato come serbatoio di calore, vengono praticate una o più perforazioni del diametro di circa 10-15 cm, fino a una profondità generalmente variabile tra 50 e 150 metri e le sonde geotermiche vengono installate verticalmente. Le variabili che influenzano il dimensionamento sono grosso modo le stesse del caso orizzontale. Ogni sonda è costituita da due moduli doppi generalmente in polietilene uniti ad "U" in modo da formare un circuito chiuso (andata-ritorno) all'interno dei quali circola il fluido. Le sonde vengono collegate in superficie ad un collettore a sua volta collegato ad una pompa di calore. Il fluido può essere semplicemente acqua oppure la stessa con l'aggiunta di antigelo. Sapendo che nei primi 100-150 m, la temperatura del sottosuolo è con buona approssimazione costante, per estrarre calore mediante una sonda geotermica verticale è sufficiente immettere acqua nella sonda ad una temperatura che sia 4-6°C inferiore a quella del sottosuolo. Trovando un terreno con temperatura media di circa 13°C dopo aver percorso 200 m, 100 a scendere e 100 a salire, l'acqua tornerà su ad una temperatura superiore rispetto a quella a cui è stata immessa. In questo caso, ancor più che nel primo descritto, è fondamentale che alla base della realizzazione dell'impianto siano previste analisi e studi per accertare i requisiti che il sottosuolo deve possedere. (Panazzolo, 2009)

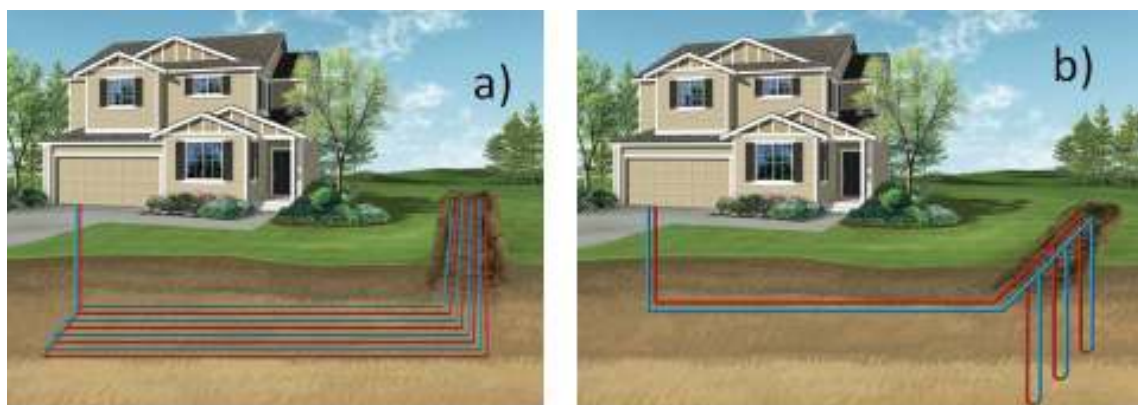


Figura 24: Esempi di sistemi di geoscambio a circuito chiuso con sonde geotermiche orizzontali(a) e sonde geotermiche verticali(b). (<http://geothermal-house.com>, modificato)

Con i sistemi a circuito chiuso quindi è possibile avere scambio di calore acqua-solido, ma anche solido-aria(vuoti), acqua-aria e acqua-acqua. Di questi il caso più efficiente è sicuramente l'ultimo, infatti l'acqua, oltre ad essere un ottimo conduttore, riempie anche tutti i vuoti presenti nel terreno rendendo continuo il mezzo solido di propagazione che altrimenti sarebbe in contatto solo attraverso superfici limitate. Un caso particolare si ha poi quando l'edificio da servire si trova in prossimità di uno lago o comunque di uno specchio d'acqua di

sufficienti dimensioni, in questa circostanza infatti è possibile utilizzare queste acque superficiali come fonti di scambio termico, sia con sistemi a circuito chiuso sia aperto. Solitamente si usa il circuito chiuso installando delle spire in polietilene collocate, completamente immerse e ancorate, sul fondo del bacino. (Panazzolo, 2009).



*Figura 25: Sistema di geoscambio con circuito chiuso in uno specchio d'acqua
(<http://geothermal-house.com>, modificato)*

In questo caso in particolare le sonde sono collocate appunto con la caratteristica forma a spirale che, nonostante sia più difficile da installare, permette di ridurre notevolmente l'ingombro degli scambiatori. Sebbene in questi casi non ci sia necessità di realizzare perforazioni o scavi, le acque superficiali però risentono di una instabilità termica più elevata. (Panazzolo, 2009).

1.4.4 SISTEMI DI GEOSCAMBIO A CIRCUITO APERTO

Lo scambio termico si realizza anche con i sistemi a circuito aperto (GWHP – Ground Water Heat Pumps) in cui sono le acque sotterranee a essere utilizzate come fluido termovettore per consentire uno scambio di calore diretto con la pompa di calore. Infatti, mentre le acque superficiali presentano temperature medie di 10-15°, ma con rilevanti oscillazioni, quelle sotterranee offrono temperature di 10-12° che risultano essere molto stabili durante l'anno. La maggior parte degli impianti “open-loop” (circuito aperto) utilizzano uno o più pozzi. L'acqua viene estratta da un pozzo (detto di produzione) e poi re-immessa in natura o con un altro pozzo (detto di iniezione) o attraverso uno scarico superficiale. (Panazzolo, 2009).

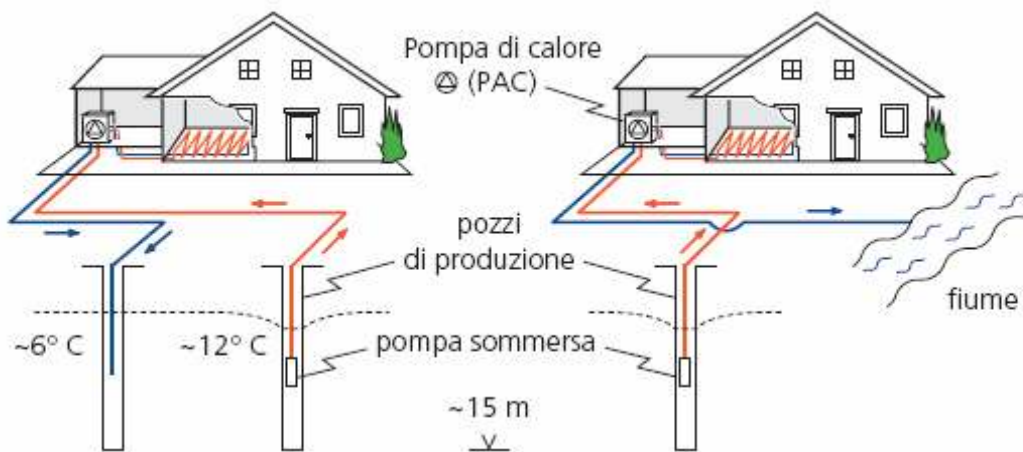


Figura 26: Esempi di sistemi di geoscambio con impianti a circuito aperto
(<http://geothermal-house.com>, modificato)

Il pozzo di estrazione deve garantire una portata minima in arrivo alla pompa di calore, che risulta essere intorno a $0.25\text{m}^3/\text{h}$ per ogni kW di capacità dell'evaporatore. I pozzi di iniezione devono scaricare una portata uguale a quella di estrazione per evitare squilibri nella falda, inoltre, per evitare problemi di influenza termica del sistema, è consigliabile realizzare la restituzione in falda a valle rispetto in senso idrogeologico. Il sistema acqua-acqua a circuito aperto richiede una distanza minima tra il pozzo di prelievo in falda e quello di versamento dipendente dalle condizioni idrogeologiche del contesto locale, oppure bisogna prevedere che il prelievo e la restituzione avvengano a livelli di falda diversi. È importante in questo caso conoscere le caratteristiche chimiche dell'acqua di falda, almeno dei parametri principali come ad esempio contenuto in ferro, manganese, ossigeno, gradi di pH, etc. al fine di evitare il più possibile incrostazione, corrosione e occlusione. Il sistema a circuito aperto risulta essere più efficiente rispetto ad uno chiuso. Ciò è dovuto al fatto che il circuito aperto, portando tramite il pompaggio l'acqua direttamente nella pompa di calore, riduce il numero degli scambi di calore che hanno luogo in un impianto. Infatti non avviene, come nel circuito chiuso, lo scambio di calore nel terreno, poiché la fonte è trasportata e costretta a scambiare all'interno della pompa di calore. Si elimina in questa maniera il meno efficiente dei tre scambi previsti per il funzionamento dell'impianto. Inoltre in un sistema a circuito aperto la situazione di partenza corrisponde a quella di regime, cosa che non accade nel circuito chiuso in cui la presenza del periodo di transitorio comporta una riduzione dell'efficienza. Purtroppo, poiché utilizza direttamente la risorsa presente nel sottosuolo, esistono alcune problematiche correlate all'uso di sistemi open loop. Una di queste è relativa alla possibile instabilità del livello di falda, tale cioè da non garantire l'inesauribilità della sorgente energetica. Oppure

sono possibili contaminazioni chimiche delle acque reimmesse in falda che possono essere dovute a eventuali perdite di fluido refrigerante del circuito idraulico. Inoltre le variazioni termiche indotte possono comportare un cambiamento del chimismo delle acque sotterranee poiché, con il variare della temperatura, varia la capacità di dissoluzione dell'acqua dei minerali che attraversa. Infatti i più sensibili sono anche i più solubili (ferro, calcio, idrogenocarbonati, etc.) e potrebbero modificare la composizione chimica delle acque sotterranee. Oltre a ciò bisogna considerare anche le influenze che una variazione termica può causare sui microorganismi presenti nel sottosuolo, che possono essere molto sensibili a questo tipo di alterazioni. Va però detto che questi problemi possono essere evitati, o quanto meno minimizzati, se è previsto un accurato studio preliminare delle caratteristiche sia geologico - idrogeologiche sia termo - idrauliche. (Panazzolo, 2009).

1.4.5 SISTEMI DI GEOSCAMBIO A CONFRONTO

Circuito Chiuso:

- interessa il sottosuolo fino a profondità più elevate, dell'ordine dei 100-150 m da p.c.;
- le perforazioni sono da realizzarsi in grande numero (ad es. 100-120 fori da 150-200 mm cadauno) e determinano una concreta interferenza geostrutturale;
- sussiste concretamente il rischio di interconnettere acquiferi sovrapposti del sistema artesiano locale (leaching), con conseguenze potenzialmente attese sia per gli aspetti piezometrici (perdita di pressioni) che per quelli idrochimici (miscelazione verticale di falde superficiali e profonde);
- gli standard medi di progettazione e di realizzazione attuali, costituiscono un effettivo pericolo per le risorse acquifere sotterranee, poiché mancano sistemi e procedure standardizzate di realizzazione e collaudo;
- non è possibile controllare, attraverso monitoraggi, analisi chimiche e misure etc. il reale decorso dell'esercizio, poiché il campo geotermico finale è molto vasto sia realmente che verticalmente; non causa alcuna compromissione quantitativa della risorsa (non c'è prelievo); può teoricamente generare peggioramento della qualità delle acque (perdite dal circuito del liquido refrigerante);
- sotto il profilo tecnologico il sistema sonda-geotermica non presenta una adeguata esperienza alla scala locale (e.g.: adozione della migliore tecnica di perforazione, scelta del prodotto cementante, definizione delle procedure e dei materiali...) (Cavallini, 2009).

Circuito Aperto:

- interessa il sottosuolo fino a profondità modeste, dell'ordine dei 30-40 m da p.c.;
- le perforazioni sono in numero modesto (3-4 fori) e determinano una bassa interferenza geostrutturale;
- non sussiste rischio di interconnettere acquiferi sovrapposti del sistema artesiano locale (pregiato);
- consente di controllare, attraverso monitoraggi, analisi chimiche e misure etc. il reale decorso dell'esercizio;
- in aggiunta, essendo soggetto ad autorizzazione, l'impianto può essere bloccato dalla P.A. nell'eventualità in cui non sussistessero i necessari presupposti per il suo ottimale funzionamento;
- non causa alcuna compromissione quantitativa ovvero consumo della risorsa (non c'è prelievo);
- non genera alcun peggioramento della qualità delle acque (non sussiste contatto con sostanze chimiche);
- sotto il profilo tecnologico il sistema pozzo può contare su una adeguata esperienza anche alla scala locale;
- è caratterizzato da costi di realizzazione maggiormente sostenibili;
- determina costi di gestione (energia elettrica per il sollevamento);
- il sistema è contraddistinto da una buona efficienza termica;
- l'impianto e le matrici ambientali possono essere facilmente controllate e monitorate dall'ente preposto (ARPAV);
- consente l'acquisizione di dati ambientali, che proiettati sul lungo periodo e su un certo numero di impianti autorizzati, permette di strutturare banche dati di rilevanza ambientale. (Cavallini, 2009).

1.5 RIFERIMENTI NORMATIVI

Il tema del risparmio energetico e della riduzione delle emissioni di CO₂ è di grande attualità negli ultimi anni. Il protocollo di Kyoto prevede una riduzione delle emissioni del 6,5% rispetto al 1990 entro il 2020 (il mancato rispetto del protocollo di Kyoto comporterà per l'Italia penali di 9,3 miliardi di euro).

La comunità scientifica internazionale è concorde sugli effetti negativi derivanti dall'emissione di gas serra e polveri sottili derivanti dalla combustione di combustibili. Pertanto l'Unione Europea promuove la diffusione di tecnologie che non prevedano l'utilizzo di fonti di energia fossile con particolare riferimento al settore dell'edilizia.

- Fuori dai confini europei, gli Stati Uniti d'America, pur non essendo fra i firmatari del protocollo di Kyoto, sono la nazione che fa il più largo uso di impianti di climatizzazione geotermica (primi impianti installati alla fine degli anni '40). Su territorio nazionale si contano oltre 500.000 installazioni per un totale di circa 7.000 MWt. E' ipotizzabile un fortissimo incremento nei prossimi anni.

- In Svizzera l'energia geotermica è stata classificata come rinnovabile e pertanto beneficia del programma nazionale per l'energia "Energie 2000" e del successivo "Energie Suisse" (obiettivo di 100.000 pompe di calore installate entro il 2010, già superato). Nel 2007 il 70% degli edifici è stato costruito con pompa di calore.

- La Svezia ha abbattuto del 50% i consumi di combustibili fossili per il riscaldamento degli edifici negli ultimi 15 anni. Il 95% delle nuove abitazioni singole è climatizzata con metodi geotermici.

1.5.1 QUADRO NORMATIVO UNIONE EUROPEA E ALTRE NAZIONI EUROPEE

Tra i principali riferimenti normativi o di indirizzo dell'UE vanno evidenziati:

- la direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico dell'edilizia
- il documento strategico del 10 gennaio 2007 "Una politica energetica per l'Europa" propone obiettivi specifici di aumento di utilizzo di fonti energetiche rinnovabili e crescita dell'efficienza energetica. Sottolinea, inoltre, la necessità di un nuovo quadro normativo per la promozione delle energie rinnovabili.

In Europa solamente alcuni stati sono dotati di una specifica normativa relativa agli impianti geotermici a bassa entalpia:

- la Svizzera: ha definito a scala di programmazione territoriale gli areali nei quali è possibile realizzare impianti geotermici e le limitazioni o i vincoli;
- la Germania: le norme tedesche VDI 4640 costituiscono di fatto uno dei riferimenti standard europei per la progettazione degli impianti.

1.5.2 QUADRO NORMATIVO ITALIANO: RENDICONTO ENERGETICO IN EDILIZIA

Nel 2005 è stata recepita la direttiva 2002/91/CE.

Il D. Lgs 19 agosto 2005, n. 192 corretto ed integrato dal successivo D.Lgs 29 dicembre 2006, n. 311:

- codifica della qualità energetica degli edifici mediante il parametro kWh/m²*anno;
- dal 1 luglio 2007 obbligo del Certificato Energetico per tutti gli edifici di nuova costruzione superiori a 1000 m²; dal 1 luglio 2008 esteso a tutti i casi di compravendita; dal 1 luglio 2009 esteso a tutti i casi.

1.5.3 QUADRO NORMATIVO ITALIANO INERENTE ALLA GEOTERMIA

- R.D. 14 agosto 1920 n. 1285 «Regolamento per le derivazioni e utilizzazioni di acque pubbliche».
- R.D. 27 luglio 1927 n. 1443 – Art. 1: *La ricerca e la coltivazione di sostanze minerali e delle energie del sottosuolo, industrialmente utilizzabili, sotto qualsiasi forma fisica, sono regolate dalla presente legge.*
- D.M. 16 dicembre 1923 «Norme per la compilazione dei progetti di derivazione d’acqua».
- R.D. 11 dicembre 1933 n. 1775 «Testo unico delle disposizioni di legge sulle acque e sugli impianti elettrici» - Art. 95: *“Salva la facoltà attribuita al proprietario nell’art. 93, chi, nei comprensori soggetti a tutela, voglia provvedere a ricerche di acque sotterranee o a scavo di pozzi nei fondi propri o altrui, deve chiederne l’autorizzazione all’ufficio del Genio Civile, corredando la domanda del piano di massima dell’estrazione e dell’utilizzazione che si propone di eseguire”. [...]*
- Legge 4 agosto 1984 n. 464 «Obblighi di informazione al Servizio Geologico». – Art 1: *“Chiunque intenda eseguire nel territorio della Repubblica studi ed indagini, a mezzo di scavi, pozzi, perforazioni ed indagini, a mezzo di scavi, pozzi, perforazioni e rilievi geofisici, per ricerche idriche o per opere di ingegneria civile, al di sotto di trenta metri dal piano di campagna ovvero a mezzo di gallerie suborizzontali o inclinate di lunghezza superiore di*

duecento metri, deve darne comunicazione al Servizio geologico della Direzione generale delle miniere de Ministero dell'industria, del commercio e dell'artigianato entro trenta giorni dall'inizio degli studi e delle indagini, indicando su apposite mappe la localizzazione degli studi e delle indagini programmati e deve fare prevenire al Servizio geologico, entro trenta giorni dall'ultimazione degli studi e delle indagini, una dettagliata relazione, corredata dalla relativa documentazione, sui risultati geologici e geofisici acquisiti.

Per perforazioni di profondità superiore a 30 m occorre dunque comunicare all'ISPRA (ex APAT) – Dipartimento Difesa del Suolo Servizio Geologico, Scienze della Terra e Carte Tematiche Settore Idrogeologia e Geologia Applicata – Via Vitaliano Brancati, n. 48 – 00144 Roma:

- denuncia di inizio indagine (Mod.1). Al modulo deve essere allegato uno stralcio di cartografia (base I.G.M scala 1:25.000) con indicata l'area di intervento;*
- denuncia dell'eventuale sospensione (Mod.2) e successiva eventuale ripresa (Mod.3);*
- denuncia di fine indagine con dati tecnici (Mod.4). A tale modulo deve essere allegata l'ubicazione della perforazione su carta di dettaglio e la descrizione litostratigrafica del sottosuolo utilizzando, se necessario, lo schema tipo (Mod.4 bis)”.
- Codice Civile: Art. 840: “Sottosuolo e spazio sovrastante al suolo. La proprietà del suolo si estende al sottosuolo, con tutto ciò che vi si contiene, e il proprietario può fare qualsiasi escavazione od opera che non rechi danno al vicino. Questa disposizione non si applica a quanto forma oggetto delle leggi sulle miniere, cave e torbiere. Sono del pari salve limitazioni derivanti dalle leggi sulle antichità e belle arti, sulle acque, sulle opere idrauliche e da altre leggi speciali. Il proprietario del suolo non può opporsi ad attività di terzi che si svolgano a tale profondità nel sottosuolo o a tale altezza nello spazio sovrastante, che egli non abbia interesse ad escluderle. Art. 889: Distanze per pozzi, cisterne, fosse e tubi. Chi vuole aprire pozzi, cisterne, fosse di latrina o di concime presso il confine, anche se su questo si trova un muro divisorio, deve osservare la distanza di almeno due metri tra il confine e il punto più vicino del perimetro interno delle opere predette. per tubi d'acqua pura o lurida, per quelli di gas e simili e loro diramazioni deve osservarsi la distanza di almeno un metro dal confine. Sono salve in ogni caso le disposizioni dei regolamenti locali”.*
- D. Lgs. 27 gennaio 1992 n. 132 «Attuazione della direttiva 80/68/CEE concernente la protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento provocato da certe sostanze pericolose».*
- D. Lgs. 12 luglio 1993 n. 275 «Riordino in materia di concessione di acque pubbliche».*
- Legge 5 gennaio 1994 n. 36 «Disposizioni in materia di risorse idriche».*

- D. Lgs. 11 maggio 1999 n. 152 «Disposizioni sulla tutela delle acque dall'inquinamento e recepimento della direttiva 91/271/CEE concernente il trattamento delle acque reflue urbane e della direttiva 91/676/CEE relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole».
- D. Lgs. 18 agosto 2000 n. 258 «Disposizioni correttive e integrative del DL 11/5/89 n. 152 in materia di tutela delle acque dall'inquinamento a norma dell'art. 1, comma 4, della L. 24/4/98 n. 128».
- L.R. 13 aprile 2001 n.11
- L.R. 30 gennaio 2004 n.1 «Legge finanziaria regionale per l'esercizio 2004».
- DGRV 17 settembre 2004 n. 2928 «Autorizzazione alla ricerca di acque sotterranee mediante la terebrazione di un pozzo e richiesta di concessione di derivazione d'acqua».
- DGRV 29 dicembre 2004 n. 4453 «Piano di tutela delle acque (D.Lgs. 152/1999). Misure per il raggiungimento degli obiettivi di qualità dei corpi idrici significativi (pubblicata sul BURV 1 marzo 2005, n°23)».
- D. Lgs. 3 aprile 2006 n.152 «Norme in materia ambientale».
- DGRV 24 luglio 2007 n. 2267 «Norme da porre in regime di salvaguardia: disposizioni di cui agli art.12,13,25,31,40,41,42,43,44 e 45 delle norme tecniche di attuazione del Piano di Tutela delle Acque».
- La legge 23 luglio 2009 n. 99, Art. 27 comma 28 ha previsto l'emanazione di un regolamento finalizzato al riassetto della normativa in materia di ricerca e coltivazione delle risorse geotermiche.

Art. 27 comma 28: *“Il Governo è delegato ad adottare, entro centottanta giorni dalla data di entrata in vigore della presente legge, [...], uno o più decreti legislativi al fine di determinare un nuovo assetto della normativa in materia di ricerca e coltivazione delle risorse geotermiche che garantisca, in un contesto di sviluppo sostenibile del settore e assicurando la protezione ambientale, un regime concorrenziale per l'utilizzo delle risorse geotermiche ad alta temperatura e che semplifichi i procedimenti amministrativi per l'utilizzo delle risorse geotermiche a bassa e media temperatura”*. [...] Art. 27 comma 39: *“Entro sei mesi dalla data di entrata in vigore della presente legge, il Ministro dello sviluppo economico, di concerto con il Ministro dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare e con il Ministro delle infrastrutture e dei trasporti, di intesa con la Conferenza unificata di cui all'articolo 8 del decreto legislativo 28 agosto 1997, n. 281, emana un decreto volto a definire prescrizioni relative alla posa in opera di impianti di produzione di calore da risorsa geotermica, ovvero*

sonde geotermiche, destinati al riscaldamento e alla climatizzazione di edifici, per cui è necessaria la sola dichiarazione di inizio attività”.

Il D. Lgs. 11 febbraio 2010 n. 22 costituisce tale regolamento ed il riferimento normativo nazionale di riferimento per lo sfruttamento geotermico del sottosuolo. E' abrogata la precedente normativa costituita dalla legge 9 dicembre 1986 n. 896.

- D. Lgs. 11 febbraio 2010 n. 22 – Art. 1: *“Sono piccole utilizzazioni locali le risorse geotermiche come definite e disciplinate dall’articolo 10. Le stesse non sono soggette alla disciplina mineraria di cui al regio decreto 29 luglio 1927, n. 1443, e all’articolo 826 del codice civile. Le risorse geotermiche ai sensi e per gli effetti di quanto previsto e disciplinato dal regio decreto 29 luglio 1927 n. 1443, e dall’articolo 826 del codice civile sono risorse minerarie, dove le risorse geotermiche di interesse nazionale sono patrimonio indisponibile dello Stato mentre quelle di interesse locale sono patrimonio indisponibile regionale. Le autorità competenti per le funzioni amministrative, ai fini del rilascio del permesso di ricerca e delle concessioni di coltivazione, comprese le funzioni di vigilanza sull’applicazione delle norme di polizia mineraria, riguardanti le risorse geotermiche d’interesse nazionale e locale sono le Regioni o enti da esse delegati, nel cui territorio sono rinvenute”* [...] *“L’iniezione di acque e la reiniezione di fluidi geotermici nelle stesse formazioni di provenienza, o comunque al di sotto di falde utilizzabili a scopo civile o industriale, anche in area marina, sono autorizzate dall’autorità competente”.* Art. 10: *Piccole utilizzazioni locali: “Sono piccole utilizzazioni locali di calore geotermico quelle per le quali sono soddisfatte congiuntamente le seguenti condizioni: - consentono la realizzazione di impianti di potenza inferiore a 2 MW termici, ottenibili dal fluido geotermico alla temperatura convenzionale dei reflui di 15 gradi centigradi; - ottenute mediante l’esecuzione di pozzi di profondità fino a 400 metri per ricerca, estrazione e utilizzazione di fluidi geotermici o acque calde, comprese quelle sgorganti da sorgenti per potenza termica complessiva non superiore a 2.000 KW termici, anche per eventuale produzione di energia elettrica con impianti a ciclo binario ad emissione nulla. Sono altresì piccole utilizzazioni locali di calore geotermico quelle effettuate tramite l’installazione di sonde geotermiche che scambiano calore con il sottosuolo senza effettuare il prelievo e la reimmissione nel sottosuolo di acque calde o fluidi geotermici. Le autorità competenti per le funzioni amministrative, comprese le funzioni di vigilanza, riguardanti le piccole utilizzazioni locali di calore geotermico sono le Regioni o enti da esse delegati. Le piccole utilizzazioni locali di cui al comma 1, sono concesse dalla Regione territorialmente competente con le modalità previste dal testo unico delle disposizioni di legge sulle acque e*

impianti elettrici, di cui al regio decreto 11 dicembre 1933, n. 1775. Le piccole utilizzazioni locali di cui al comma 2 sono sottoposte al rispetto della specifica disciplina emanata dalla regione competente, con previsione di adozione di procedure semplificate. Le operazioni per lo sfruttamento delle piccole utilizzazioni locali possono essere vietate o limitate, dall'autorità competente, su aree già oggetto di concessione di coltivazione di risorse geotermiche di interesse nazionale o locale, previa valutazione delle possibili interferenze”.

5) Alcune Regioni e Province italiane hanno definito in passato normative, regolamenti o linee guida finalizzate alla regolamentazione della geotermia a bassa entalpia; fra queste:

- Regione Lombardia e Province di: Milano, Bergamo, Como, Lecco, Brescia, Pavia, Mantova, Sondrio, Varese;
- Regione Piemonte e Province di: VCO, Biella;
- Regione Toscana;
- Regione Trentino Alto Adige;
- Regione Veneto e Province di Vicenza e Treviso

6) Per quanto concerne i vincoli normativi sulle possibilità di emungimento dell'acqua di falda, il documento recente più rilevante è costituito dal DGRV del 24 luglio 2007 n° 2267 (Norme di Salvaguardia).

L'articolo 31, comma 2 di tale documento stabilisce che: *“in deroga al divieto (di scarico diretto nelle acque sotterranee) la Provincia, dopo indagine preventiva, può autorizzare gli scarichi nella stessa falda delle acque utilizzate per scopi...(omissis)...comprese quelle degli impianti di scambio termico, purché siano restituite in condizioni di qualità non peggiori rispetto al prelievo”.*

Il successivo art. 40, comma 1, inoltre, specifica quanto segue: *“Nei territori dei Comuni ricadenti nelle aree di primaria tutela quantitativa degli acquiferi,... possono essere assentite esclusivamente le istanze di:....(omissis) f) derivazione di acque sotterranee per usi...(omissis)...di scambio termico, compreso il raffreddamento impianti, con scarico nella medesima falda di prelievo, a condizione che la situazione idrogeologica locale e la tipologia dell'impianto siano tali da escludere qualunque pericolo di contaminazione chimica e/o microbiologica delle acque sotterranee”*

L'art. 104 del D.Lgs 152/2006 al comma 1 recita quanto segue: *“E' vietato lo scarico diretto nelle acque sotterranee e nel sottosuolo”.* Al successivo comma 2 si legge: *“In deroga a quanto previsto al comma 1, l'autorità competente, dopo indagine preventiva, può autorizzare*

gli scarichi nella stessa falda delle acque utilizzate per scopi ...(omissis)... ivi comprese quelle degli impianti di scambio termico”.

In buona sostanza quindi vi è possibilità di derivazione dal sottosuolo delle portate d'acqua necessarie all'impianto, purché si provveda alla sua reimmissione in falda dopo l'utilizzo per solo scambio termico.

Si fa anche presente che la Regione Veneto ha inoltre precisato che: *“l'autorizzazione allo scarico in falda delle acque utilizzate per scambio termico può essere concessa dalla Provincia solo a seguito di valutazione puntuale basata sui dati di progetto. A tal fine all'istanza di autorizzazione è necessario sia allegata una valutazione dell'impatto sulla falda, dalla quale risulti la compatibilità ambientale della reimmissione nel corpo recipiente, e che l'autorizzazione alla reimmissione in falda preveda la prescrizione dei controlli qualitativi sull'acqua prelevata e su quella restituita”.*

➔ Essendo oggetto del caso di studio, bisogna soffermare l'attenzione alla delibera del quadro per la pianificazione risorse idriche nel territorio vicentino.

Pertanto sono stati riportati i contenuti di interesse per le tematiche del geoscambio, tratti dalla recente delibera del Consiglio Provinciale di Vicenza del 11.07.2008

2) acque di falda

La Provincia di Vicenza nell'ambito delle proprie competenze di tutela e valorizzazione della risorsa idrica (come indicate nell'art. 19 D. Lgs. 267/00), da alcuni anni ha avviato programmi di attività concordati con le Autorità d'Ambito Territoriali, al fine di cogliere l'opportunità delle possibili sinergie e ad ottimizzare le risorse finanziarie disponibili verso le finalità comuni di tutela e corretta gestione delle acque.

In particolare si intende proseguire con le AATO sul programma di lavoro, già avviato dal 2002, di studio e analisi dei sistemi acquiferi sotterranei (come flussi e come soluti) della pianura vicentina.

Gli studi realizzati e quelli futuri sono indispensabili per la conoscenza del sistema idrografico del territorio e dei suoi comportamenti, ma è altrettanto importante che tali approfondimenti abbiano una fase applicativa: l'Amministrazione Provinciale intende assumere un ruolo attivo nella valorizzazione delle acque di falda, accompagnando la mera fase di studio ad un ruolo attivo, che la veda impegnata in specifici interventi ... Tali azioni sono soprattutto finalizzate alla salvaguardia della falda acquifera in senso quantitativo e

sono tutte ispirate al principio di restituzione, per cui ogni prelievo da falda deve essere condizionato ad un obbligo di reimmettere in falda una quantità pari a quella prelevata.

...omissis...

9) impianti geotermici

Nella Provincia di Vicenza, come già avvenuto in altre zone dell'Italia, sta crescendo l'interesse all'installazione – in edifici pubblici e privati - di impianti di climatizzazione invernale ed estiva, che impiegano come fonte di calore la geotermia. Tale scambio di calore viene realizzato con pompe di calore abbinate a sonde geotermiche, che sfruttando questo principio, consentono di riscaldare e raffrescare gli edifici con un unico impianto, assicurando un alto grado di rendimento ed un fabbisogno di energia contenuto rispetto alle prestazioni.

Gli impianti di scambio termico che interessano il territorio della Provincia di Vicenza appartengono a due categorie in funzione della modalità con cui avviene lo scambio termico con il sottosuolo:

- 1. impianti a circuito, che utilizzano l'acqua di falda come fluido termovettore (per riscaldare/raffreddare il fluido di esercizio), con reimmissione nella falda stessa dopo l'uso;*
- 2. impianti a circuito chiuso, al cui interno scorre un fluido termovettore ;*

Pur presentando indubbi vantaggi dal punto di vista energetico, entrambe le soluzioni possono però rappresentare un rischio potenziale per le falde idriche sotterranee, sia nella fase realizzativa che in quella gestionale.

Per entrambi i sistemi si evidenzia che il rischio in corso di terebrazione dei pozzi è quello di compromettere le barriere idrauliche naturali portando in contatto tra loro acqua di falde profonde ed acqua di falde superficiali, di minore qualità, e provocando la contaminazione delle prime.

Uno dei maggiori deterrenti all'utilizzo di impianti geotermici è dovuto alle possibili implicazioni ambientali dell'utilizzo dell'acqua di falda per scopi geotermici: il Piano di Tutela delle Acque Regionale, per evitare il peggioramento delle condizioni delle falde, consente, in via eccezionale e previa autorizzazione provinciale, lo scarico nella stessa falda delle acque utilizzate per scopi geotermici, purché siano restituite in condizioni di qualità non peggiori rispetto al prelievo.

Poiché la reimmissione in falda viene attuata in deroga al divieto generale di scarico diretto nelle acque sotterranee e nel sottosuolo è da sottoporre ad una valutazione particolarmente

severa e restrittiva per evitare il rischio di contaminazione delle falde, con particolare riguardo a quelle ad uso potabile.

Con il PTCP, adottato a dicembre 2006, la Provincia ha ritenuto di subordinare il rilascio di autorizzazioni alla reimmissione in falda all'approvazione di un apposito regolamento, predisposto dagli uffici provinciali nel corso dell'anno 2007, tenendo conto del Piano di zonizzazione del territorio per individuare le aree con maggiori necessità di tutela e delle osservazioni degli uffici regionali dei Servizi Ambiente e Geologia della Regione, nonché da parte del Dipartimento provinciale e dell'Osservatorio Acque di Arpav. Il documento è stato anche inviato ai diversi Ordini professionali e alle Associazioni di categoria per un confronto.

L'esigenza di considerare la vulnerabilità della falda come prioritaria per la fruizione futura della risorsa stessa, fa sì che pur riconoscendo la sua indubbia importanza energetica come fonte rinnovabile della terra, il delicato equilibrio tra le esigenze energetiche e la tutela delle risorse idriche sotterranee deve comunque volgere prioritariamente a favore della risorsa sotterranea". (Sinergeo S.r.l, 2008).

CAPITOLO 2 : LO SCAMBIO TERMICO

2.1 MECCANISMI DI TRASMISSIONE DEL CALORE

La trasmissione del calore è quella branca della fisica tecnica il cui studio consente di calcolare le quantità di calore scambiato tra corpi a diversa temperatura, la rapidità con cui avviene tale scambio e la distribuzione di temperatura all'interno di un sistema, corpo, materiale. Sulla base del Secondo Principio della Termodinamica, è noto che, in assenza di altri fenomeni, tra due corpi a diversa temperatura, il calore si trasmette da quello a temperatura maggiore a quello a temperatura minore, sino a raggiungere la condizione di equilibrio termico. (Caputo et al.).

La trasmissione del calore può avvenire secondo tre diverse modalità: per conduzione, per convezione e per irraggiamento. Come già detto, tutte e tre le modalità richiedono l'esistenza di una differenza di temperatura e hanno una direzione «naturalmente preferenziale» (flusso di calore da regioni a temperatura più alta a regioni a temperatura più bassa). (Caputo et al.).

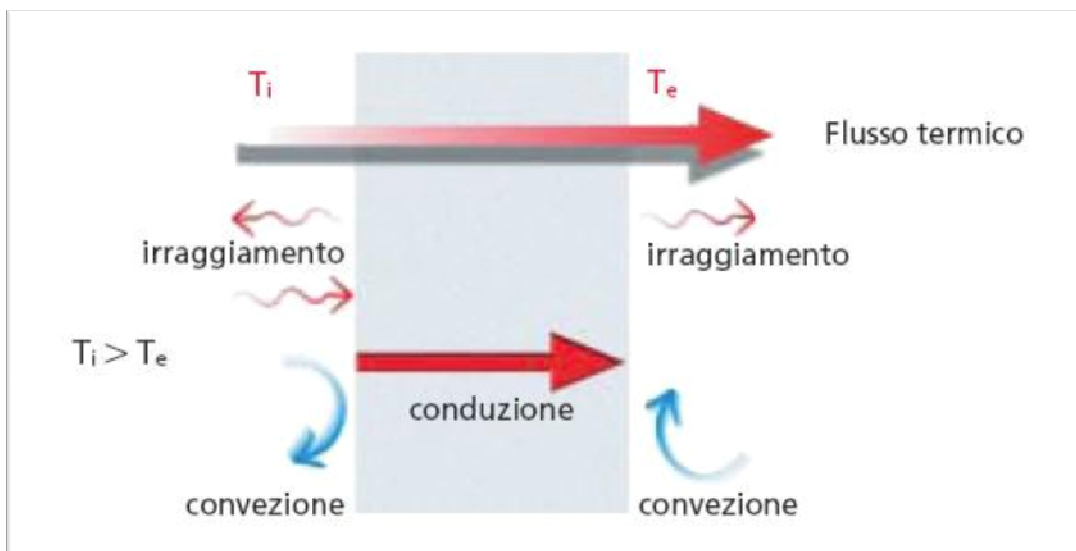


Figura 27: Trasmissione del calore attraverso una parete tramite conduzione, convezione e irraggiamento (Google immagini)

2.1.1 LA CONDUZIONE DEL CALORE

Nella *conduzione* la trasmissione del calore è riconducibile alle interazioni tra molecole adiacenti, (scambi tra molecole a diversi livelli di energia); si potrebbe definire la conduzione come il verificarsi di microvibrazioni che si ripercuotono da una molecola all'altra. La conduzione può avvenire sia nei solidi che nei fluidi in perfetto stato di quiete. (Caputo et al.). In base all'equazione di Fourier, autore del postulato per la conduzione del calore (1822), possiamo scrivere:

$$Q = (\lambda/s) * A * (T_1 - T_2), \text{ dove:}$$

Q è la potenza termica [W]

λ è il coefficiente di trasmissione del calore per conduzione [W/m*K]

A è la superficie di scambio di calore [m²]

T₁ è la temperatura interna della parete [K, oppure °C]

T₂ è la temperatura esterna della parete [K, oppure °C]

s è lo spessore della parete [m]

2.1.2 CONDUCIBILITA' TERMICA

Per la valutazione delle caratteristiche termiche di un materiale, in relazione al meccanismo di conduzione del calore, si fa riferimento alla conducibilità termica, indicata con la lettera greca λ (lambda). (Caputo et al.).

I «materiali isolanti» sono caratterizzati da bassi valori di conducibilità; al contrario, i «materiali conduttori» sono caratterizzati da alti valori di conducibilità. (Caputo et al.).

Se si considera una parete omogenea, a facce piane e parallele, di spessore s che separa due ambienti a differente temperatura, il flusso di calore che attraversa nell'unità di tempo un metro quadrato della parete è direttamente proporzionale alla differenza ΔT di temperatura tra le superfici del divisorio, alla conducibilità termica del materiale costituente la parete stessa e inversamente proporzionale al suo spessore s , ovvero:

$$\Phi = \Delta T * (\lambda/s)$$

Ponendo nella formula $\Delta T = l [K]$, $s = l [m]$, si può ricavare la definizione di λ : flusso di calore, nell'unità di tempo e per metro quadrato, che si determina quando esiste una differenza di temperatura di un K tra una faccia e l'altra e per lo spessore di un metro del materiale stesso. Il coefficiente λ si esprime dunque in $[W/mK]$. La definizione di conducibilità fornita è valida per materiali omogenei. (Caputo et al.).

Per migliorare la resistenza termica alla conduzione di uno strato di materiale omogeneo (s/λ , in $[m^2K/W]$) si può aumentare lo spessore e/o scegliere un materiale con un minore valore di conducibilità termica. (Caputo et al.).

2.1.3 LA CONVEZIONE

Nella convezione, caratteristica dei fluidi, la trasmissione del calore avviene attraverso un movimento macroscopico di alcune parti della massa del fluido rispetto ad altre; si ha quindi trasporto di materia. La convezione può essere naturale o forzata: quest'ultima si ha quando il moto dei fluidi viene «forzato» mediante dispositivi meccanici come ventilatori o pompe. In edilizia si può parlare di convezione nel descrivere il fenomeno di trasmissione del calore che si ha tra la superficie di un corpo solido (di un muro) e l'aria dell'ambiente verso cui il corpo si affaccia (l'ambiente esterno dell'involucro edilizio o quello interno «abitato»). (Caputo et al.).

La potenza termica scambiata per convezione si esprime mediante la legge di Newton per la convezione:

$$Q = h_c * A * (T_s - T_f), \text{ dove:}$$

h_c è il coefficiente di scambio convettivo in $[W/m^2 * K]$

A è la superficie di scambio di calore $[m^2]$

T_s è la temperatura superficiale del corpo $[K \text{ oppure } ^\circ C]$

T_f è la temperatura del fluido in cui il corpo si trova e con cui scambia calore, a distanza sufficientemente grande dalla superficie medesima $[K \text{ oppure } ^\circ C]$

2.1.4 IL COEFFICIENTE CONDUTTIVO

Il coefficiente h dipende da fattori di carattere fluidodinamico come:

- differenza di temperatura fra la superficie e l'aria (oltre lo strato limite);
- velocità e direzione della massa d'aria che lambisce la superficie;
- forma e rugosità della superficie.

Nel calcolo dell'influenza di tali fattori, si fa riferimento a numeri, come quello di Nusselt (Nu), Reynolds (Re), Prandtl (Pr) e Grashof (Gr). In generale, è possibile impiegare espressioni di calcolo semplificate. (Caputo et al.).

2.1.5 L'IRRAGGIAMENTO

Nell'irraggiamento, infine, la trasmissione del calore avviene indipendentemente dalla presenza di molecole. Si tratta cioè di una trasmissione di energia elettromagnetica, che può propagarsi anche nel vuoto. Tutti i corpi a temperatura superiore allo 0 [K] (il *Kelvin* è l'unità di misura della scala assoluta delle temperature dove 0 [K] = -273.15°C e ogni unità [K] equivale ad una unità [°C], dunque 0[°C] = 273.15 [K]) emettono energia per irraggiamento, prevalentemente nella banda del lontano infrarosso; la potenza termica emessa per irraggiamento si esprime mediante la legge di Stefan Boltzmann:

$$Q = \sigma A T_s^4$$

dove:

σ è la costante di Stefan – Boltzmann ($5.7 \cdot 10^{-8}$ [W/m²*K⁴])

A è la superficie del corpo nero [m²]

T_s è la temperatura superficiale del corpo [K]

Nel caso dei corpi reali, non neri, ma «grigi», la formula diventa:

$$Q = \epsilon \sigma A T_s^4$$

dove:

ϵ è il coefficiente di emissione (emissività) caratteristico della superficie esterna del corpo grigio considerato.

Se è vero che ogni corpo emette energia sotto forma di onde elettromagnetiche, è altrettanto vero che ogni corpo riceve (ed assorbe) l'energia elettromagnetica emessa dai corpi che lo circondano. (Caputo et al.).

Infatti nel considerare le quantità di calore trasmesse per irraggiamento da un corpo ad un altro si deve necessariamente fare riferimento alle quantità di calore «scambiate» tra i corpi in entrambe le direzioni. Per la maggior parte dei materiali di uso comune in edilizia è lecito affermare, con errore trascurabile, che il coefficiente di emissione caratteristico di un corpo corrisponde anche al suo coefficiente di assorbimento delle radiazioni, emesse da altri corpi, che raggiungono la superficie del corpo in esame. Per fare un bilancio dello scambio energetico sarebbe necessario mettere in relazione l'energia emessa da ciascun corpo del sistema esaminato con i «fattori di vista» che legano un corpo all'altro. I fattori di vista danno misura percentuale di quanta della superficie di un corpo viene «vista», in una sorta di proiezione prospettica, da un altro corpo e viceversa: preso un corpo immerso in un ambiente, la sommatoria dei fattori di vista che esso ha rispetto a tutti i corpi che delimitano detto ambiente è pari a 1 (100%). (Caputo et al.).

Rispetto ad un corpo contenuto in un ambiente delimitato da altri corpi, l'energia scambiata dipende dalle temperature superficiali, del corpo in esame e dei corpi che delineano l'ambiente in cui questo è contenuto, poste in relazione ai diversi fattori di vista che legano il corpo con gli altri. È così definibile la temperatura media radiante di un ambiente rispetto ad un punto P:

$$t_{mr} = \sum_i F_{i,p} * t_i, \text{ dove:}$$

$F_{i,p}$ è il fattore di vista tra il punto P e la i superfici che delimitano l'ambiente e t_i sono le rispettive temperature superficiali. (Caputo et al.).

Sulla base di una teoria la cui trattazione risulterebbe piuttosto complicata e comunque esuberante rispetto agli obiettivi del presente articolo, si ricava che la potenza termica netta di calore scambiata per irraggiamento

$$Q = h_r * A * (T_s - T_{mr}), \text{ dove:}$$

h_r è il coefficiente di scambio radiativo in $[W/m^2 \cdot K]$

A è la superficie di scambio di calore $[m^2]$

T_s è la temperatura della superficie considerata $[K$ oppure $^{\circ}C]$

T_{mr} è la temperatura media radiante dell'ambiente visto dalla superficie in esame $[K$ oppure $^{\circ}C]$

2.1.6 L'ADDUZIONE

Abbiamo visto che la trasmissione del calore tra due ambienti avviene oltre che per conduzione all'interno della parete considerata, anche per convezione e irraggiamento dall'aria dell'ambiente a temperatura maggiore verso la superficie adiacente della parete e dall'altra superficie della stessa verso l'ambiente a temperatura minore. (Caputo et al.).

Si supponga che l'aria interna si trovi a temperatura superiore rispetto all'aria esterna. Per l'insieme degli effetti della convezione e dell'irraggiamento, si può affermare che la quantità di calore Q che passa dall'ambiente interno alla superficie interna della parete è direttamente proporzionale alla superficie stessa $[m^2]$, al salto di temperatura tra aria e superficie $[^{\circ}C]$ e ad un coefficiente di scambio termico di adduzione interno « α_i » $[W/m^2 \cdot K]$, che esprime la quantità di calore ceduta nell'unità di tempo ad ogni unità di area, per ogni grado di differenza di temperatura. Analogamente, per quanto riguarda il calore ceduto dalla parete all'ambiente esterno, si avrà il coefficiente di scambio termico di adduzione esterno « α_e ». (Caputo et al.).

Il calore scambiato per convezione ed irraggiamento può essere espresso, in forma semplificata, come:

$$Q = (h_c + h_r) \cdot A \cdot (T_s - T_a)$$

dove:

T_a è la temperatura ambiente $[K$ oppure $^{\circ}C]$

$(h_c + h_r) = \alpha$ è il coefficiente di adduzione $[W/(m^2 \cdot K)]$

Abituali valori di α_i e α_e per materiali opachi, sono:

$$\alpha_i = 7.7 [W/m^2 \cdot K]$$

$$\alpha_e = 25 [W/m^2 \cdot K]$$

2.1.7 CALCOLO DELLA TRASMITTANZA U

Se la parete, come abitualmente accade, è costituita da più strati in serie, ognuno caratterizzato da un proprio spessore s e da una propria conducibilità termica λ , la resistenza termica complessiva del divisorio è data dalla somma dei contributi dovuti ai coefficienti di adduzione interno ed esterno e dei rapporti s/λ di ogni singolo strato. (Caputo et al.).

In formule:

$$R = 1/\alpha_i + \sum_i (s_i/\lambda_i) + 1/\alpha_e \quad [\text{m}^2\text{K}/\text{W}]$$

A questo punto, è possibile definire la trasmittanza termica U , ovvero l'inverso della resistenza termica globale R , ossia:

$$U = 1/R = 1 / [1/\alpha_i + \sum_i (s_i/\lambda_i) + 1/\alpha_e] \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$$

Tale parametro è strettamente legato allo stato dei due fluidi e delle pareti circostanti, così come alla natura e dagli spessori costituenti la parete. (Caputo et al.).

La trasmittanza termica U del muro deve essere più bassa possibile per limitare i consumi energetici nelle abitazioni (per far funzionare a minore potenza e per minor tempo gli impianti di riscaldamento) e, conseguentemente, l'inquinamento ambientale dei centri abitati. Inoltre, la trasmittanza termica influenza anche i fenomeni di condensa. (Caputo et al.).

È allora importante conoscere, in funzione della temperatura invernale esterna della zona in cui si realizza l'abitazione, la trasmittanza termica massima di sotto alla quale si evita l'insorgere sul muro dei pregiudizievoli fenomeni di condensa. (Caputo et al.).

Esempio: il vetro è un materiale dotato di un alto valore di conducibilità termica ed è dotato di piccoli spessori; pertanto, i valori di trasmittanza del vetro sono molto alti. Così è stato per molto tempo, quando venivano impiegati i vetri singoli. Proprio a causa delle alte dispersioni connesse con le superficie trasparenti, attualmente, si adottano vetri doppi o tripli, con intercapedini di aria (di diverso spessore) o gas inerti più isolanti. (Caputo et al.).

Per valutare la performance energetica degli edifici si adoperano indicatori come la trasmittanza media dell'intero edificio e il consumo di energia per un particolare scopo (ad esempio, per il riscaldamento) per m^2 di superficie e per anno $[\text{MJ}/(\text{m}^2 \text{ anno})]$. (Caputo et al.).

A livello qualitativo, si può definire l'U medio di un edificio come quel valore di U che avrebbe un edificio dotato della medesima superficie e caratterizzato da pareti omogenee tutte identiche tra loro. (Caputo et al.).

In termini quantitativi, si tratta di fare una media ponderata dei vari U relativi alle diverse superficie che compongono l'edificio. (Caputo et al.).

Attualmente, tutti i dibattiti ed i provvedimenti in campo energetico-ambientale vanno nella direzione dell'aumento dell'efficienza energetica e nella riduzione dei consumi energetici. Da un lato, la progettazione di edifici nuovi ritrova ed aggiorna alla luce dei nuovi progressi tecnologici i principi dell'architettura bioclimatica e sostenibile, tende alla concezione di edifici a basso consumo energetico, «passivi» o addirittura a zero consumo energetico; dall'altro, l'ambiente costruito viene parzialmente recuperato e riqualificato a livello energetico. A tali tendenze corrisponde la proposta di nuovi strumenti normativi e standard e marchi di certificazione (come, ad esempio il *Minergie* svizzero) in cui l'involucro dell'edificio assume fondamentale importanza. (Caputo et al.).

Tra gli strumenti normativi più recenti si ricorda la Direttiva CE 98/2001 sulla performance energetica degli edifici, che invita tutti gli stati membri a ridefinire i propri standard anche nel tentativo di uniformare la metodologia di progettazione e valutazione degli edifici (concetto di *integrated minimum energy performance standard*). (Caputo et al.).

Per quanto riguarda gli indici di riferimento, il valore di trasmittanza di un edificio nel suo complesso dovrebbe essere sempre molto minore di 1 [W/(m² K)]; in particolare, i valori suggeriti per edifici «passivi», sono pari a:

$U < 0,15$ [W/(m² K)] per pareti opache e $U < 0,8$ [W/(m² K)] per pareti trasparenti

2.2 FLUIDODINAMICA

La fluidodinamica è quella parte della Fisica che studia il comportamento dei fluidi (ovvero liquidi e gas) in movimento. La risoluzione di un problema fluidodinamico comporta generalmente la risoluzione di equazioni per il calcolo di diverse proprietà del fluido, come ad esempio velocità, pressione, densità, e temperatura, in funzione dello spazio e del tempo. (Wikipedia, 2011).

La fluidodinamica e le sue discipline derivate (come ad esempio, aerodinamica, idrostatica, idrodinamica, idraulica) hanno una grande varietà di campi di applicazione. Può ad esempio essere usata per il calcolo di forze e momenti di superfici esposte all'azione dei fluidi (ad esempio riguardo allo studio di profili alari in campo aeronautico o automobilistico), oppure per studi di comfort ambientale, diffusione di sostanze inquinanti o meteorologia (geofluidodinamica). (Wikipedia, 2011).

Lo studio della fluidodinamica interna può essere applicata a tutte le problematiche di moti in condotti, di notevole interesse nel campo dell'ingegneria petrolchimica, nello studio dei motori o del condizionamento. (Wikipedia, 2011).

Esistono anche applicazioni in campi apparentemente distanti come, ad esempio, lo studio delle correnti di traffico o delle vie di fuga. (Wikipedia, 2011).

2.2.1 FLUIDI COMPRIMIBILI E INCOMPRIMIBILI

In un problema di fluidodinamica, il fluido in esame viene detto comprimibile se le variazioni di densità hanno effetti apprezzabili sulla soluzione. Se le variazioni di densità hanno effetti trascurabili nel campo fluidodinamico, il fluido viene detto incomprimibile e quindi le variazioni di densità vengono ignorate. A rigore, sarebbe necessario e opportuno attribuire la qualifica di comprimibile o incomprimibile al moto: difatti, i gas, pur comprimibili, possono fluire senza variazioni di volume (in condizioni isocore). (Wikipedia, 2011).

Al fine di definire il campo di validità dell'ipotesi di incomprimibilità, viene analizzato il valore del numero di Mach. (Wikipedia, 2011).

In particolare, il *numero di Mach* (Ma) è un gruppo adimensionale definito come il rapporto tra una velocità e la velocità del suono nel fluido considerato:

$$Ma = \frac{v_o}{v_s}$$

in cui

v_o è la velocità dell'oggetto considerato

u è la velocità del suono nel fluido (o mezzo) considerato

Ma permette di stabilire quanto siano importanti gli effetti di comprimibilità del fluido in esame. Generalmente, gli effetti della comprimibilità possono essere trascurati per numeri di Mach di valore inferiore a 0.3. (Wikipedia, 2011).

2.2.2 MOTO LAMINARE E MOTO TURBOLENTO

Si parla di *flusso stazionario* in fluidodinamica quando tutte le grandezze risultano essere indipendenti dal tempo. (Wikipedia, 2011).

Flussi di questo tipo permettono una forte semplificazione delle equazioni di Navier-Stokes ed hanno applicazione in una grande varietà di problemi. Il problema di un flusso incomprimibile, non viscoso e stazionario, può essere risolto con le leggi del flusso potenziale, governato dall'equazione di Laplace. Le soluzioni di tipo analitico ammesse sono ottenute come combinazione lineare di più soluzioni elementari. (Wikipedia, 2011).

L'*equazione di Laplace* è un'equazione differenziale alle derivate parziali studiata da Pierre Simon Laplace. Soluzioni dell'equazione di Laplace hanno importanti ricadute in molti campi della scienza. Questa equazione riveste particolare importanza nei settori dell'elettromagnetismo, astronomia, fluidodinamica dato che descrive i campi gravitazionali, elettrici e il potenziale nei fluidi. (Wikipedia, 2011).

Il problema è trovare la funzione φ a valori reali di classe C^2 , cioè derivabile due volte con continuità nelle sue variabili x_1, \dots, x_n tale che:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_2^2} + \dots + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_n^2} = 0.$$

In forma compatta essa può essere scritta anche come:

$$\Delta \varphi = 0,$$

o

$$\nabla^2 \varphi = 0$$

o

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi = 0$$

dove div è l'operatore divergenza e grad è l'operatore gradiente.

Se l'equazione non è omogenea, cioè se il secondo membro dell'equazione è costituito da una funzione non identicamente nulla f

$$\Delta \varphi = f,$$

allora l'equazione viene chiamata equazione di Poisson. Questa equazione è un semplice esempio di equazione ellittica. L'operatore differenziale ∇^2 o Δ (definito su tutte le dimensioni dello spazio) viene chiamato *Operatore di Laplace o Laplaciano*. (Wikipedia, 2011).

I *flussi turbolenti* sono dominati da ricircolazioni, vortici e apparente casualità. Si può dire che i flussi turbolenti sono un'evoluzione caotica di strutture coerenti. I flussi in cui non appare alcun fenomeno turbolento vengono detti *flussi laminari*. (Wikipedia, 2011).

È universalmente accettato che i flussi turbolenti obbediscano comunque alle leggi di Navier-Stokes; nonostante ciò, le equazioni nel caso turbolento risultano essere troppo complesse per trovare una soluzione analitica e troppo "pesanti" per essere risolte con gli usuali strumenti computazionali ad eccezione di casi con condizioni ideali e particolari. I flussi turbolenti vengono simulati mediante l'ausilio di diversi modelli di turbolenza, con l'assunzione che il flusso sia laminare al di fuori delle regioni turbolente. (Wikipedia, 2011).

Per spiegare il concetto di *regime laminare* in maniera semplice ed intuitiva, si supponga di iniettare, mediante una siringa, un fluido colorato (inseminante), chiamiamolo fluido B, all'interno di un flusso di un altro fluido trasparente, chiamiamolo fluido A (si noti che *fluido* è un termine usato generalmente e quotidianamente per indicare un liquido, ma in termodinamica ed in fisica per fluido si indica un mezzo continuo non avente forma propria, caratterizzato da proprietà fisiche che ne identificano lo stato termodinamico, quali temperatura, pressione, densità; un fluido può pertanto essere anche un gas oppure un vapore. Se la velocità dei fluidi è sufficientemente bassa (rispetto alla loro viscosità) si noterà che questo *filetto fluido* colorato, fluido B, non si mescola col fluido A, e rimarrà per così dire confinato in un "cilindro virtuale" che lo mantiene separato da A. (Wikipedia, 2011).

All'aumentare della velocità del fluido A si vedrà come il fluido B rimarrà confinato nel suo cilindro virtuale solo per un breve tratto, dopodiché si evidenzierà un progressivo sfaldamento di questo cilindro virtuale, e si noterà come B inizi a mescolarsi con A che gli scorre attorno. Questo mescolamento ha inizialmente l'aspetto di piccole ondulazioni delle pareti del filetto di B, che procedendo diventeranno vortici, prima piccoli e poi di maggiori dimensioni. Se si dà al fenomeno un tempo sufficiente, si vedrà come a valle ci ritroveremo nelle condizioni di non poter più distinguere il fluido B (inseminante) da A (trasparente), vedremo un unico fluido indistinto, magari di colore non più trasparente. (Wikipedia, 2011).

Possiamo dire che nel primo caso (velocità basse), si è in presenza di un flusso in *regime laminare*, cioè un flusso in cui tutti i *filetti fluidi* che costituiscono il campo di moto, rimangono sempre paralleli a sé stessi, senza mai mescolarsi, come tante piccole "lamelle" o "lamine" tutte parallele, da cui la definizione di laminare. Osservando un moto laminare è persino difficile captare la sensazione di movimento perché tutto è sempre uguale a sé stesso e non ci sono fenomeni transitori e instazionari come vibrazioni o vortici che comunemente danno alla nostra percezione la consapevolezza che un fluido si sta muovendo. (Wikipedia, 2011).

Nel secondo caso (velocità più alte), possiamo dire di essere in un *regime turbolento*, in cui fenomeni inerziali (dovuti alla velocità) come i vortici, vincono sui fenomeni viscosi (che tendono a mantenere tutto parallelo), e svolgono un'azione di mescolamento dei *filetti fluidi* tra loro, rompendone l'originario parallelismo (mantenuto invece in un flusso a regime laminare). (Wikipedia, 2011).

Nell'esperienza quotidiana si può osservare tutto questo (anche se non è certo un esperimento rigoroso) semplicemente guardando il fumo che sale da una sigaretta poggiata su un portacenere. Il fumo è in questo caso il fluido B (inseminante), mentre l'aria della stanza è il fluido A. Il calore della sigaretta scalda l'aria e crea un moto convettivo ascensionale (tutti sanno che l'aria calda è più leggera e tende a salire, mentre l'aria fredda, più pesante, tende a scendere). Si nota facilmente come all'inizio, il fumo è molto concentrato e non si mescola con l'aria (*regime laminare*), poi si notano le prime instabilità (*regime di transizione*) ed infine il fumo si mescola rapidamente con l'aria disperdendosi in essa (*regime turbolento*). (Wikipedia, 2011).

Si contrappone ai flussi turbolenti, dominati da ricircolazioni, vortici e apparente casualità. La transizione da flusso laminare a turbolento dipende dal valore del *numero di Reynolds*:

esiste un valore critico per cui al di sotto di questo il moto è laminare, al di sopra evolve gradualmente in turbolento. In linea generale si considera indicativamente il fluido in regime laminare se $Re < 2000$; turbolento se $Re > 4000$, *di transizione* se cade tra questi valori. (Wikipedia, 2011).

Il *numero di Reynolds (Re)* è un gruppo adimensionale usato in fluidodinamica, proporzionale al rapporto tra le forze d'inerzia e le forze viscosse. Esso permette di valutare se il flusso di scorrimento di un fluido è in regime laminare (in corrispondenza del quale si hanno valori più bassi del numero di Reynolds) o turbolento (in corrispondenza del quale si hanno valori più elevati del numero di Reynolds). Tale passaggio tra regime laminare e regime turbolento può essere previsto sfruttando il diagramma di Moody, con il quale può essere calcolato il coefficiente di attrito viscoso a partire dai valori del numero di Reynolds e della scabrezza relativa. (Wikipedia, 2011).

I valori del numero di Reynolds sono da considerarsi "bassi" o "elevati" relativamente ad uno specifico sistema, in cui siano fissate:

- *la geometria del corpo investito dal flusso;*
- *la natura del fluido;*
- *le condizioni operative (temperatura e pressione) alle quali avviene l'esperienza.*

Viene definito *numero di Reynolds critico* il valore del numero di Reynolds in corrispondenza del quale si ha il passaggio da regime laminare a regime turbolento.

Nel caso più generale il numero di Reynolds è scritto come:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu}$$

oppure:

$$Re = \frac{UL}{\nu}$$

dove:

- *U è la velocità media del fluido,*
- *μ è la viscosità dinamica,*

- ν è la viscosità cinematica: $\nu = \mu / \rho$,
- ρ è la densità del fluido,
- L è il diametro del tubo se la sezione del condotto è circolare, altrimenti è pari al cosiddetto diametro equivalente o diametro idraulico:

$$D_e = \frac{4S}{P}$$

dove:

- S è l'area della sezione
- P è il perimetro bagnato.

2.2.3 LE EQUAZIONI DI NAVIER-STOKES

Le leggi fondamentali della fluidodinamica sono le equazioni del bilancio (anche dette leggi di conservazione) e, in particolare, l'equazione di continuità (o conservazione della massa), la legge di conservazione della quantità di moto (anche nota come seconda legge di Newton) e la legge di conservazione dell'energia. Queste leggi sono basate sulla meccanica classica e vengono modificate nella meccanica relativistica. (Wikipedia, 2011).

Le equazioni del bilancio per la fluidodinamica vengono dette *equazioni di Navier-Stokes*. Si tratta di un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali che descrive il comportamento di un fluido dal punto di vista macroscopico. L'ipotesi di base è che il fluido possa essere modellato come un continuo deformabile. Esse presuppongono perciò la continuità del fluido in esame, ovvero il sistema perde di validità nello studio di un gas rarefatto. (Wikipedia, 2011).

Le *equazioni di Navier-Stokes* nella loro forma non semplificata non hanno una soluzione generale in forma chiusa, e vengono risolte in tal modo solo con la metodologia della fluidodinamica computazionale (detta, brevemente, CFD) ovvero tramite metodi numerici al calcolatore. A seconda del problema fisico possono essere semplificate in diversi modi. In alcuni casi ciò permette di ottenere una soluzione analitica in forma chiusa. (Wikipedia, 2011).

L'efficienza predittiva di tali equazioni viene pagata in termini di difficoltà di calcolo. Nel caso generale coinvolgono infatti cinque equazioni scalari differenziali alle derivate parziali e

20 variabili. Il bilancio tra equazioni e incognite avviene con la definizione delle proprietà del fluido considerato, delle eventuali forze di campo in gioco e con considerazioni matematiche. Inoltre, a causa della loro non linearità, le equazioni di Navier-Stokes non ammettono quasi mai una soluzione analitica (ovvero una soluzione esatta), ma esclusivamente numerica (una soluzione approssimata con un metodo numerico). (Wikipedia, 2011).

Le *equazioni di Navier-Stokes* sono in grado di descrivere completamente qualsiasi flusso fluido, anche turbolento. In particolare per un flusso turbolento, dove cioè le traiettorie delle particelle di flusso non sono più costanti nel tempo, un approccio numerico di calcolo è chiamato generalmente *simulazione numerica diretta*. A causa del fatto che le risorse di calcolo necessarie alla loro risoluzione cresce con il numero di Reynolds (quasi con Re^3) e che tale numero può avere valori dell'ordine di 10^6 - 10^9 , tale approccio resta tecnicamente impossibile. Alternativa alla simulazione numerica è possibile adottare sistemi meno onerosi quali la formulazione LES o le equazioni mediate. (Wikipedia, 2011).

Le equazioni vengono completate dalle condizioni al contorno e dalle condizioni iniziali (condizioni imposte all'inizio temporale del fenomeno da studiare). Possono inoltre essere integrate dall'equazione di stato dei gas perfetti e dalle equazioni di conservazione delle singole specie gassose nel caso di una miscela di gas. La soluzione delle equazioni fornisce il campo delle velocità del fluido. Da questo sarà poi possibile risalire a tutte le altre grandezze che caratterizzano il flusso. (Wikipedia, 2011).

Ipotesi del modello matematico

Il modello matematico che permette l'analisi della dinamica dei continui deformabili si basa sulle seguenti caratteristiche:

- 1) *fluido continuo*;
- 2) *fluido chimicamente omogeneo e non reagente*;
- 3) *fluido privo di cariche elettriche*.

1) Ipotesi di fluido continuo

Viene trascurata la natura discontinua della materia, in questo modo sarà possibile far tendere a zero un volume di fluido, senza che questo possa restare privo di materia. (Wikipedia, 2011).

Un parametro fondamentale che caratterizza il mezzo dal punto di vista della continuità è il *numero di Knudsen*, definito come il rapporto tra il cammino libero medio di una particella costituente il fluido e una lunghezza caratteristica del flusso:

$$\text{Kn} = \frac{l}{L}$$

Se il numero di Knudsen è molto minore di uno, allora è possibile considerare il fluido continuo. Altrimenti sarà necessario studiare il comportamento del gas unicamente su base statistica, mediante la teoria cinetica dei gas, la quale analizza statisticamente la *distribuzione delle velocità molecolari* e da questa ricava tutte le proprietà del gas. (Wikipedia, 2011).

2) Ipotesi di fluido chimicamente omogeneo e non reagente

Verranno trascurate le perturbazioni dovute alla non omogeneità del flusso ed alle reazioni chimiche. Ciò non sarà del tutto possibile per flussi reagenti quali quelli all'interno di una camera di combustione ad esempio. (Wikipedia, 2011).

3) Ipotesi di fluido privo di cariche elettriche

Verranno trascurate le perturbazioni dovute al campo elettromagnetico. L'interazione di flussi con campi elettromagnetici è studiata dalla magnetofluidodinamica. (Wikipedia, 2011).

Derivazione delle equazioni di Navier-Stokes

Le equazioni di Navier-Stokes sono la formalizzazione matematica di tre principi fisici ai quali i fluidi rispondono, imposta la condizione di continuo deformabile:

- *principio di conservazione della massa (equazione di continuità);*
- *secondo principio della dinamica (bilancio della quantità di moto);*
- *primo principio della termodinamica (conservazione dell'energia).*

Per questo motivo sono spesso nominate anche *equazioni di bilancio*.

Nei successivi paragrafi indicheremo sempre il vettore *velocità del fluido* con la notazione \vec{u} , mentre p e ρ indicheranno rispettivamente la pressione statica e la densità del fluido stesso. Il simbolo \vec{a} rappresenterà il vettore delle accelerazioni di campo. (Wikipedia, 2011).

Descrizione del moto lagrangiana ed euleriana

È possibile descrivere temporalmente il moto di un fluido attraverso due punti di vista.

Il primo, detto *lagrangiano* o *materiale*, segue la traiettoria di ogni particella di fluido, identificata solitamente dalle sue coordinate iniziali, analizzando le variazioni delle sue proprietà fisiche (come ad esempio la densità o la temperatura). Indicando le coordinate iniziali come $(a; b; c; 0)$, le coordinate della particella saranno variabili dipendenti:

$$\begin{cases} x = x(a; b; c; t) \\ y = y(a; b; c; t) \\ z = z(a; b; c; t) \end{cases}$$

così come le altre proprietà specifiche.

Il punto di vista *euleriano*, viceversa, osserva le variazioni delle proprietà fisiche per ogni data posizione spaziale $(x; y; z)$. Le coordinate spaziali (assieme alla variabile temporale) saranno perciò variabili indipendenti. Le variabili dipendenti sono perciò funzione di quelle spaziali e temporali. Ad esempio, per la velocità:

$$\vec{u} = \vec{u}(x; y; z; t).$$

Teorema del trasporto di Reynolds

Per comodità di trattazione riportiamo il *teorema del trasporto di Reynolds*, che, per una proprietà:

$$A = A(x; y; z; t)$$

contenuta in un volume arbitrario V , che si muova con il fluido, ed abbia superficie S , è indicato come:

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} A dV - \int_{V(t)} \frac{\partial A}{\partial t} dV + \int_{S(t)} A \vec{u} \cdot \hat{n} dS.$$

Ricordando il *teorema della divergenza* è possibile esprimere la precedente anche come:

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} A dV = \int_{V(t)} \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \cdot (A\vec{u}) \right) dV$$

e ricordando che:

$$\nabla \cdot (A\vec{u}) = (\vec{u} \cdot \nabla) A + A \nabla \cdot \vec{u}$$

nonché la definizione di *derivata sostanziale*, è possibile esprimere il teorema in una forma molto utile:

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} A dV = \int_{V(t)} \left(\frac{DA}{Dt} + A \nabla \cdot \vec{u} \right) dV.$$

(Wikipedia, 2011)

Punto di vista lagrangiano

Il principio di conservazione della massa, nel caso di moto di un fluido, può essere espresso dal punto di vista lagrangiano affermando che:

« resta invariata nel tempo la massa contenuta in un volume (deformabile) che si muove con il fluido. »

In questo caso dunque, in termini matematici:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho dV = 0.$$

Applicando il teorema del trasporto di Reynolds alla densità ρ (massa per unità di volume), otteniamo l'equazione di continuità in *forma di divergenza*:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{u}) = 0$$

che può essere riportata anche in *forma indiciale*:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

che può essere riportata anche in *forma estesa*:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0$$

o in termini della *derivata materiale*:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{u} = 0.$$

(Wikipedia, 2011)

Punto di vista euleriano

Lo stesso principio di conservazione, dal punto di vista euleriano, può essere così espresso:

« la variazione di massa contenuta in un volume fisso eguaglia la differenza tra i flussi di massa entranti ed i flussi di massa uscenti (opposto del flusso netto). »

Un generico flusso di massa per unità di superficie, che passi attraverso una coppia di facce P e Q di un volume, è considerato come il prodotto tra la densità ρ del fluido, la componente della velocità in direzione perpendicolare alla faccia considerata e l'area della faccia medesima. (Wikipedia, 2011).

Considerando l'ipotesi di elemento infinitesimo possiamo approssimare il valore del flusso nel punto centrale di ogni faccia con il suo valore medio e calcolare il valore del flusso su una

faccia a partire dal valore assunto sulla faccia precedente tramite una serie di Taylor troncata al primo ordine:

$$\Phi_{P_x} = \rho u \, dydz \quad \Phi_{Q_x} = \rho u \, dydz + \frac{\partial \rho u}{\partial x} \, dx \, dydz$$

dove con P_x e Q_x si sono indicate le facce normali (cioè perpendicolari) alla direzione x . Seguendo l'enunciato del principio, ovvero sia calcolando la differenza dei flussi, otteniamo:

$$\Phi_x = \Phi_{Q_x} - \Phi_{P_x} = \rho u \, dydz + \frac{\partial \rho u}{\partial x} \, dx \, dydz - \rho u \, dydz = \frac{\partial \rho u}{\partial x} \, dx \, dydz$$

Estendendo il ragionamento alle altre direzioni spaziali otteniamo che il flusso netto sarà uguale a:

$$\Phi = \left(\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} \right) \, dx \, dy \, dz = [\nabla \cdot (\rho \vec{u})] \, dx \, dy \, dz.$$

Ponendo ora la variazione di massa nel tempo uguale all'opposto del flusso netto:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \, dx \, dy \, dz - [\nabla \cdot (\rho \vec{u})] \, dx \, dy \, dz$$

ed infine, per unità di volume:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

riottenendo l'espressione precedentemente mostrata. (Wikipedia, 2011).

Punto di vista lagrangiano nella conservazione della quantità di moto

La *conservazione della quantità di moto* (definita come prodotto della massa per la velocità o, per unità di volume, della densità per la velocità) si esprime affermando che:

« *la variazione temporale della quantità di moto di un sistema coincide con la risultante delle forze esterne al sistema* »

e matematicamente:

$$\frac{d\vec{Q}}{dt} = \vec{F}_e$$

dove, appunto, con F_e si è indicata la somma delle forze esterne, *di massa* (come ad esempio la forza di gravità) e *di superficie* (quali ad esempio le forze viscosi). (Wikipedia, 2011).

Introducendo questa differenziazione nelle forze ed una formulazione integrale:

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho \vec{u} dV = \int_{V(t)} \rho \vec{F}_V dV + \int_{S(t)} \vec{F}_S dS$$

Il primo membro può essere trasformato in forma più conveniente mediante il teorema del trasporto di Reynolds:

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho \vec{u} dV = \int_{V(t)} \left(\frac{D\rho \vec{u}}{Dt} + \rho \vec{u} (\nabla \cdot \vec{u}) \right) dV$$

che può essere ridotta nella forma:

$$\frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho \vec{u} dV = \int_{V(t)} \rho \frac{D\vec{u}}{Dt} dV + \int_{V(t)} \vec{u} \left(\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{u} \right) dV$$

dove l'ultimo integrale coincide con l'equazione di continuità ed è perciò nullo. (Wikipedia, 2011).

Se si applica il teorema della divergenza all'ultimo integrale dell'equazione della quantità di moto, sarà possibile scriverlo come integrale di volume. L'equazione si trasforma quindi come segue:

$$\int_{V(t)} \left(\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} - \rho \vec{F}_V - \nabla \cdot \underline{\underline{T}} \right) dV = 0$$

dove con T con doppia sottolineatura si è indicato il tensore delle tensioni. Dato che l'uguaglianza precedente deve valere per qualsiasi arbitrario volume di integrazione, dovrà essere nullo l'integrando:

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = \rho \vec{F}_V + \nabla \cdot \underline{\underline{T}} = 0$$

che esprime l'equazione della quantità di moto (per unità di volume). (Wikipedia, 2011).

Punto di vista euleriano nella conservazione della quantità di moto

Il secondo principio della dinamica esprime la conservazione della quantità di moto e, per un elemento del fluido può essere enunciato come segue:

« la variazione, nel tempo, della quantità di moto del fluido contenuto nel volume di controllo τ , sommata al flusso netto di quantità di moto attraverso la superficie σ , uguaglia la risultante delle forze esterne agenti sul fluido contenuto nel volume stesso. »

Quindi, con formulazione integrale:

$$\rho \frac{d}{dt} \int_V \rho \vec{u} dV + \oint_S (\rho \vec{u}) \vec{u} \cdot \hat{n} dS = \int_V \vec{F}_V dV + \oint_S \underline{\underline{T}} dS$$

dove il volume (come la superficie S che lo racchiude) non è funzione del tempo. (Wikipedia, 2011).

Il tensore delle tensioni per un fluido

Il *tensore delle tensioni* o *tensore degli sforzi* è un tensore bidimensionale, caratterizzato da nove componenti T_{ik} che rappresentano le tre componenti degli sforzi nelle tre direzioni spaziali di un certo sistema di riferimento cartesiano. In forma matematica:

$$\underline{\underline{T}} = \begin{Bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{Bmatrix}.$$

Se si considera una generica superficie, orientata secondo il versore n come nella figura, e la risultante delle forze elementari che le molecole di fluido in prossimità della faccia positiva

esercitano su quelle in prossimità della faccia negativa si ha che lo sforzo relativo alla superficie S ed al versore n è:

$$\vec{T}_n = \frac{\vec{F}_n}{S}$$

Il pedice n indica che la forza dipende dalle dimensioni e dall'orientamento della superficie, mentre lo sforzo dal solo orientamento. (Wikipedia, 2011).

Nel caso *statico*, cioè di un fluido in quiete, a differenza della meccanica dei solidi, l'unica forza sarà puramente normale e lo sforzo risultante sarà chiamato pressione. In un fluido in moto invece, l'attrito tra strati adiacenti e che si muovano a diverse velocità darà luogo a forze risultanti oblique. (Wikipedia, 2011).

Al contrario dei solidi elastici, per i quali gli sforzi dipendono essenzialmente dalla *deformazione* attuale delle particelle, per i fluidi gli sforzi dipendono dalla *velocità di deformazione*. (Wikipedia, 2011).

Relazioni tra sforzi e velocità di deformazione: fluidi newtoniani isotropi

Un fluido si definisce *newtoniano* quando la sua viscosità non varia con la velocità e, per questo motivo, la relazione matematica che lega il tensore degli sforzi alle componenti del tensore della velocità di deformazione è lineare. (Wikipedia, 2011).

Desiderando trovare le relazioni che legano sforzi e velocità di deformazione, analizziamo i casi più semplici per poi sommarne gli effetti (grazie alla linearità del problema), ricavando il caso generale. (Wikipedia, 2011).

Il caso più semplice in assoluto sarà il caso statico: come già osservato gli sforzi saranno puramente normali, mentre il tensore delle velocità di deformazione (che indicheremo con $\underline{\underline{\xi}}$) è nullo per ipotesi. In termini matematici:

$$\begin{cases} T_{ik} = -p & \text{per } i = k \\ T_{ik} = 0 & \text{per } i \neq k. \end{cases}$$

Consideriamo adesso un flusso in moto, dove però, per un particolare sistema di riferimento cartesiano, gli sforzi siano puramente normali alle superfici di un elemento di forma parallelepipedica (sistema di riferimento degli assi principali di deformazione). Per esempio supponiamo che sia:

$$\begin{cases} T_{ik} = 0 & \text{per } i \neq k \\ T_{11} > T_{22} = T_{33} . \end{cases}$$

Gli effetti del sistema di sforzi precedente su di un fluido, sono differenti nel caso di fluido isotropo (come ad esempio acqua ed aria) oppure anisotropo (come ad esempio il sangue, le cui molecole conferiscono al fluido proprietà diverse nelle differenti direzioni). L'esperienza fisica dimostra che i fluidi che interessano l'aerodinamica e l'idrodinamica sono fluidi newtoniani ed isotropi, altrimenti detti *fluidi stokesiani*. (Wikipedia, 2011). Analizzeremo perciò un fluido isotropo, dove cioè dovrà essere $\varepsilon_{12} = 0$:

$$\begin{cases} \varepsilon_{ik} = 0 & \text{per } i \neq k \\ \varepsilon_{11} > 0 \\ \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} < \varepsilon_{11} . \end{cases}$$

Resta infine da considerare il caso più generale, dove cioè tutte le componenti degli sforzi saranno diversi da zero:

$$T_{ik} \neq 0 \quad \forall i; k \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_{ik} \neq 0 \quad \forall i; k .$$

Ogni componente del tensore degli sforzi sarà una certa funzione, lineare per fluidi newtoniani, delle componenti del tensore delle velocità di deformazione. Sviluppando tale funzione in *serie di Taylor* (arrestata al primo ordine per la sua proprietà di linearità), si ottiene:

$$T_{ik} = f_0 + f_1(\varepsilon_{mn}) .$$

Resta ora da ricavare tali funzioni lineari: trattando il problema in un sistema di riferimento particolare quale quello degli assi principali di deformazione, si ha:

$$\begin{cases} T_{11} = f_0 + a_1 \varepsilon_{11} + b_1 \varepsilon_{22} + b_1 \varepsilon_{33} \\ T_{22} = f_0 + a_2 \varepsilon_{22} + b_2 \varepsilon_{11} + b_2 \varepsilon_{33} \\ T_{33} = f_0 + a_3 \varepsilon_{33} + b_3 \varepsilon_{11} + b_3 \varepsilon_{22}. \end{cases}$$

Nel primo caso analizzato sarà quindi:

$$f_0 = -p.$$

A causa del fatto che studiamo un fluido stokesiano, vi è inoltre completa equivalenza di comportamento tra le tre direzioni principali di deformazione x_1, x_2, x_3 e quindi:

$$\begin{cases} a_1 = a_2 = a_3 = a \\ b_1 = b_2 = b_3 = b \end{cases}$$

e dunque il sistema iniziale si potrà scrivere come:

$$\begin{cases} T_{11} = f_0 + (a - b) \varepsilon_{11} + b \sum_{i=1}^3 \varepsilon_{ii} \\ T_{22} = f_0 + (a - b) \varepsilon_{22} + b \sum_{i=1}^3 \varepsilon_{ii} \\ T_{33} = f_0 + (a - b) \varepsilon_{33} + b \sum_{i=1}^3 \varepsilon_{ii}. \end{cases}$$

Infine, tenendo conto che

$$\sum_{i=1}^3 \varepsilon_{ii} = \nabla \cdot \vec{u}$$

e ponendo per comodità

$$\begin{cases} a - b = 2\mu \\ b = \lambda \end{cases}$$

si ottiene:

$$\begin{cases} T_{11} = -p + \lambda \nabla \cdot \vec{u} + 2\mu \varepsilon_{11} \\ T_{22} = -p + \lambda \nabla \cdot \vec{u} + 2\mu \varepsilon_{22} \\ T_{33} = -p + \lambda \nabla \cdot \vec{u} + 2\mu \varepsilon_{33} \end{cases}$$

dove il secondo termine a secondo membro descrive l'effetto della viscosità dovuto alla variazione di volume di una particella di fluido. (Wikipedia, 2011).

Non resta ora che generalizzare il sistema di equazioni precedente al caso di una terna di riferimento qualsiasi:

$$\begin{cases} T_{kk} = -p + \lambda \nabla \cdot \vec{u} + 2\mu \varepsilon_{kk} \\ T_{ik} = 2\mu \varepsilon_{ik} \quad i \neq k. \end{cases}$$

La prima equazione del sistema precedente evidenzia il fatto che, nel caso generale, i tre sforzi normali sono differenti tra loro. La loro media è:

$$\begin{aligned} \frac{T_{11} + T_{22} + T_{33}}{3} &= -p + \lambda \nabla \cdot \vec{u} + \frac{2}{3} \mu (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) = \\ &= -p + \lambda \nabla \cdot \vec{u} + \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{u} \\ &= -p + \mu' \nabla \cdot \vec{u} \end{aligned}$$

dove con μ' si è indicata la *viscosità di volume* (o in terminologia anglosassone *bulk viscosity*), la quale descrive la differenza tra lo sforzo normale medio e la pressione di un fluido, dovuta alla viscosità. Il valore della viscosità di volume in genere è trascurabile per i gas, in particolare per quelli monoatomici. (Wikipedia, 2011).

Conservazione dell'energia

Il primo principio della termodinamica, ovvero il principio di conservazione dell'energia può essere espresso dicendo che:

La variazione nell'unità di tempo dell'energia totale del fluido contenuto nel volume di controllo sommata al flusso netto di energia totale attraverso le facce del volume di controllo uguaglia la somma della potenza delle forze agenti sull'elemento di fluido e del flusso netto di energia termica trasmessa all'elemento di fluido per conduzione. (Wikipedia, 2011).

Come si nota in questa formulazione viene trascurata l'energia trasmessa all'elemento per irraggiamento. Formalizzando matematicamente questo principio si sfrutterà il concetto di *energia totale per unità di massa E* che è uno scalare definito come:

$$E = e + \frac{1}{2}V^2$$

cioè la somma tra l'energia interna delle molecole e l'energia meccanica degli elementini di fluido.

Nell'enunciato si parla di flusso netto di energia totale: come per la quantità di moto si indicherà questo flusso come il prodotto tra il flusso di massa e l'energia totale per unità di massa trasportata in ogni direzione:

$$\Phi_E = \frac{\partial E \rho u}{\partial x} + \frac{\partial E \rho v}{\partial y} + \frac{\partial E \rho w}{\partial z}$$

La potenza degli sforzi agenti sull'elementino di fluido considerato comprende sia la potenza sviluppata dagli sforzi viscosi del tensore S sia gli sforzi associati alla pressione. (Wikipedia, 2011).

Ricorrendo alla definizione di potenza come prodotto di una forza per una velocità, si potrà scrivere:

$$P_S = \frac{\partial(S_{xx}u + S_{yx}v + S_{zx}w)}{\partial x} + \frac{\partial(S_{xy}u + S_{yy}v + S_{zy}w)}{\partial y} + \frac{\partial(S_{xz}u + S_{yz}v + S_{zz}w)}{\partial z}$$

per quanto riguarda gli sforzi viscosi, mentre per la pressione sarà:

$$P_P = - \left(\frac{\partial p u}{\partial x} + \frac{\partial p v}{\partial y} + \frac{\partial p w}{\partial z} \right)$$

La potenza delle forze di campo si definisce come:

$$P_c = \rho a_x u + \rho a_y v + \rho a_z w$$

Per quanto riguarda la potenza termica trasmessa per conduzione attraverso le facce dell'elementino è necessaria la definizione di un vettore $\vec{q} = [q_x, q_y, q_z]^T$ *flusso termico*. Sarà possibile scrivere:

$$- \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right)$$

L'equazione completa che formalizza il primo principio della termodinamica per i fluidi in movimento sarà quindi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial E \rho u}{\partial x} + \frac{\partial E \rho v}{\partial y} + \frac{\partial E \rho w}{\partial z} = & - \left(\frac{\partial p u}{\partial x} + \frac{\partial p v}{\partial y} + \frac{\partial p w}{\partial z} \right) + \\ & + \frac{\partial (S_{xx} u + S_{yx} v + S_{zx} w)}{\partial x} + \frac{\partial (S_{xy} u + S_{yy} v + S_{zy} w)}{\partial y} + \frac{\partial (S_{xz} u + S_{yz} v + S_{zz} w)}{\partial z} + \\ & + \rho a_x u + \rho a_y v + \rho a_z w - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

Osservazioni e chiusura del problema

Le 3 equazioni (due equazioni scalari ed una equazione vettoriale) appena derivate sono insufficienti, da sole, alla chiusura del problema della determinazione del campo di moto del fluido. Infatti le equazioni contengono 20 incognite:

- densità
- vettore velocità (3 incognite)
- pressione
- tensore degli sforzi viscosi S (9 incognite)
- vettore accelerazione di campo (3 incognite)
- energia interna e
- vettore flusso termico \vec{q} , sempre riconducibile a una funzione di un coefficiente di conducibilità termica e della temperatura (2 incognite).

Queste equazioni sono del tutto generali e per la loro applicazione è necessaria una sorta di specializzazione delle stesse alla situazione di lavoro. (Wikipedia, 2011).

Per la chiusura del problema è quindi necessario definire le *proprietà termofisiche* del fluido in esame (che permettono di definire la conducibilità termica, la densità, l'energia interna e

una o più equazioni di stato in grado di determinare anche temperatura e pressione) e il campo di forze in cui si muove (determinando il vettore di *accelerazioni di campo*). Inoltre si osserva che il *tensore degli sforzi viscosi* S è simmetrico, con la conseguenza che le incognite effettivamente contenute sono 6 e non 9 e sono determinabili sperimentalmente o teoricamente specificando il tipo di fluido. Saranno successivamente necessarie le condizioni iniziali e le condizioni al contorno, trattandosi di equazioni differenziali (*problema di Cauchy o problema di von Neumann*). (Wikipedia, 2011).

Le equazioni in forma adimensionale

Le equazioni scritte nei paragrafi precedenti sono in forma dimensionale, nel senso che ogni termine possiede dimensioni fisiche della grandezza considerata:

- $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \text{ s}} \right]$ nella prima equazione;
- $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{ s}^2} \right]$ nelle tre equazioni della quantità di moto;
- $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m s}^3} \right]$ nell'ultima equazione.

Di conseguenza, volendo confrontare tra loro i numerosi coefficienti per sapere quali di essi sia il più preponderante nei vari casi in esame, bisognerebbe calcolare il valore di ogni singolo termine. Un metodo pratico per ovviare a questa necessità è quello di dividere ogni coefficiente per una certa grandezza omogenea di riferimento, in tal modo i coefficienti risulteranno *adimensionali*. Queste grandezze di riferimento saranno scelte in base alle *condizioni al contorno* ed alle *condizioni iniziali* del particolare problema fluidodinamico che si vuole esaminare. (Wikipedia, 2011). Qui sono indicate con il pedice 0 (zero):

$$\rho^* = \frac{\rho}{\rho_0} \quad u_i^* = \frac{u_i}{U_0} \quad p^* = \frac{p}{p_0} \quad t^* = \frac{t}{t_0} \quad x^* = \frac{x_i}{L_0} \quad T^* = \frac{T}{T_0}$$

L'equazione di conservazione della massa

L'equazione di conservazione della massa scritta nella forma:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{u} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla})\rho + \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0$$

può essere resa adimensionale esprimendola nella forma:

$$St \frac{\partial \rho^*}{\partial t^*} + (\vec{u}^* \cdot \vec{\nabla}^*)\rho^* + \rho^* \vec{\nabla}^* \cdot \vec{u}^* = 0$$

dove con il simbolo St si è indicato il gruppo adimensionale, detto numero di Strouhal:

$$\bullet \quad St = \frac{L_0}{U_0 t_0}$$

Le equazioni di conservazione della quantità di moto

Le equazioni di conservazione della quantità di moto possono essere adimensionalizzate nella forma:

$$St \left(\rho^* \frac{\partial \vec{u}^*}{\partial t^*} \right) + \rho^* (\vec{u}^* \cdot \vec{\nabla}^*) \vec{u}^* = -\frac{1}{Ru} \vec{\nabla}^* p^* - \frac{1}{Fr^2} \rho^* \vec{k} + \frac{1}{Re} \nabla^{*2} \vec{u}^* + \frac{1}{3Re} \vec{\nabla}^* (\vec{\nabla}^* \cdot \vec{u}^*)$$

dove i simboli indicano i seguenti gruppi adimensionali:

$$\bullet \quad Re = \frac{U_0 L_0}{\nu} = \frac{\rho_0 U_0 L_0}{\mu} \quad \text{numero di Reynolds;}$$
$$\bullet \quad Fr = \sqrt{\frac{U_0^2}{g L_0}} \quad \text{numero di Froude;}$$
$$\bullet \quad Ru = \frac{\rho_0 U_0^2}{p_0} \quad \text{numero di Ruark, inverso del numero di Eulero.}$$

Nel caso in cui la viscosità dinamica μ non sia costante, si troverà un valore di riferimento μ_0 e si utilizzerà all'interno dell'equazione il valore adimensionale μ^* .

L'equazione di conservazione dell'energia termica

L'equazione di conservazione dell'energia termica, dato che quella dell'energia meccanica condurrebbe a gruppi adimensionali già visti per le equazioni della quantità di moto, viene espressa in funzione di termini adimensionali:

$$\text{St} \left(\rho^* \frac{\partial T^*}{\partial t^*} \right) + \rho^* (\vec{u}^* \cdot \vec{\nabla}^*) T^* = \text{St} \frac{\text{Ec}}{\text{Ru}} \frac{\partial p^*}{\partial t^*} + \frac{\text{Ec}}{\text{Ru}} (\vec{u}^* \cdot \vec{\nabla}^*) p^* + \frac{\text{Ec}}{\text{Re}} \Phi^* + \frac{1}{\text{Pr Re}} \nabla^{*2} T^* + \frac{\text{Nu}}{\text{Pr Re}} \rho^* \dot{q}^*$$

- $\text{Ec} = \frac{U_0^2}{C_p T_0}$ *numero di Eckert;*
- $\text{Pr} = \frac{\mu C_p}{K} = \frac{\nu}{\alpha}$ *numero di Prandtl, dove con $\alpha = \frac{K}{\rho C_p}$ si è indicato il coefficiente di diffusività termica;*
- $\text{Nu} = -\frac{\lambda L_0}{K}$ *numero di Nusselt, dove con λ si è indicato il coefficiente di scambio termico.*

CAPITOLO 3 : METODI ANALITICI: CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI

3.1 CODICE DI ANALISI TERMICA ED IDRODINAMICA: FEFLOW 6

FeFlow (Finite Element subsurface FLOW system) è uno dei più qualificati codici di calcolo scientifico dedicato alla modellazione dei processi di flusso e trasporto in un mezzo poroso in condizioni sature o insature. Tale programma si basa su algoritmi agli elementi finiti ed è in grado di simulare flussi bi e tri-dimensionali in mezzi porosi confinati e non confinati, soggetti a prescritte condizioni al contorno. Il problema di flusso viene risolto generando sul dominio di interesse una mesh costituita da elementi finiti di forma semplice (triangoli e quadrilateri per domini 2D, esaedri e tetraedri per domini 3D) e applicando le equazioni di flusso tridimensionale (Panazzolo, 2009)

Feflow può essere utilizzato per descrivere la distribuzione spaziale e temporale dei contaminanti nelle acque sotterranee, per modellare i processi geotermici, per stimare la durata e i tempi di viaggio degli inquinanti negli acquiferi, per pianificare e progettare strategie di rimedio e tecniche di intercettazione e per assistere nell'ideazione di soluzioni ed efficaci schemi di monitoraggio. (DHI Wasy, 2010)

3.2 COSTRUZIONE DEL MODELLO IDROGEOLOGICO

3.2.1 COSTRUZIONE MESH

La funzione “mesh editor“ è uno strumento che permette di inserire i dati riguardanti la geometria del problema che si vuole andare ad analizzare. In questa sezione vanno disegnate le cosiddette “superelement mesh” che rappresentano la geometria base dell'area di studio, individuandone i limiti interni e esterni. I superelement, che devono essere costruiti manualmente, costituiscono la base su cui poi verrà costruito la mesh agli elementi finiti. Per rendere più facile il disegno di una particolare area, il software permette di importare file da Autocad o Arcgis mediante la funzione “snap to” e di utilizzarli per ricalcare le forme dell'area da studiare, in modo che i superelement la delimitino esattamente. Una volta disegnati i superelement si passa alla generazione delle mesh nella sezione “mesh generator”. Durante la simulazione i risultati sono elaborati per ogni nodo della mesh agli elementi finiti e

successivamente interpolati. Tanto più dense saranno le mesh e tanto maggiore sarà la precisione numerica ed il tempo di calcolo. Difficoltà di calcolo possono insorgere durante i processi di analisi numerica se le mesh contengono troppi elementi molto distorti, in questi casi è necessario verificare la corretta generazione della mesh. Il modo più semplice per creare il reticolo è quello di utilizzare la funzione “generate automatically”, in cui è richiesto solamente di inserire il numero totale di mesh che devono essere disegnate. Altrimenti è possibile inserire il numero di elementi che si vuole considerare per ogni superelement con la funzione “generate areally”. La triangolazione può occasionalmente fallire per un’errata suddivisione dei bordi dei superelement. A volte quando è richiesta la ripetizione della generazione delle mesh il generatore aumenta dinamicamente il numero di iterazioni consentendo di terminare l’operazione con successo. Nella sezione “generator options” è possibile cambiare, prima di generare le mesh, il tipo di generatore di mesh e decidere se e quanto il programma debba rifinire la creazione di mesh in prossimità dei bordi o in punti di particolare interesse. Infine con la funzione “mesh geometry” sono possibili diverse modifiche del reticolo già realizzato. Si può ad esempio rinfittire una determinata zona dell’area di interesse o cancellare le mesh inutili. Inoltre la funzione “transform mesh” consente di ruotare un elemento finito in diversi modi, mentre con altre è possibile spostare un singolo nodo e modificare la suddivisione di due triangoli adiacenti. La comodità del mesh geometry sta nel fatto che esso è presente anche nella sezione dove devono essere inseriti i dati di input, in questo modo è ancora possibile modificare il reticolo di mesh a seconda di dove e come si vogliono impostare i parametri. (Panazzolo, 2009).

3.2.2 DATI DI INPUT

Mentre la funzione “mesh editor” definisce la geometria dei dati, la funzione “problem editor” serve ad inserire tutte le rimanenti caratteristiche del modello, come ad esempio le proprietà dei materiali e le condizioni iniziali e di contorno. Il problem editor inoltre permette la definizione del tipo e della durata della simulazione. I menù in cui inserire queste caratteristiche sono:

- **PROBLEM CLASS:** tale funzione serve a definire il tipo e la classe del problema che si vuole affrontare. È necessario dapprima scegliere se il problema interessa un mezzo completamente saturo oppure solo parzialmente. Bisogna quindi scegliere la classe del problema: se si tratta di solo flusso oppure se di flusso e trasporto di massa o di calore o entrambi. All’interno di queste distinzioni poi si sceglie se la simulazione è in

regime stazionario oppure transitorio. La soluzione nel primo caso è estremamente veloce, ma l'applicabilità è ristretta a determinate condizioni. Nel caso di flusso e trasporto sono possibili tre scelte: flusso e trasporto stazionario, flusso stazionario e trasporto transitorio e flusso e trasporto transitorio. In questa sezione inoltre si sceglie se l'acquifero in esame è confinato o non confinato e, in questo secondo caso, si possono definire superfici libere multiple oppure acquiferi confinati al di sotto di quelli liberi. (Panazzolo, 2009).

- **TEMPORAL E CONTROL DATA MENU:** qui si fissano i parametri che controllano la stabilità e la precisione della simulazione. Questi includono il numero di intervalli (steps), il tipo di variazioni degli intervalli, il tempo finale, la tolleranza dell'errore e il criterio di convergenza. La simulazione transitoria ovviamente necessita di informazioni dal punto di vista temporale, è possibile scegliere tra variazioni costanti degli step temporali, che normalmente riduce lo sforzo numerico durante la simulazione, step temporali variabili, che si possono importare anche da un database, e step temporali controllati automaticamente dal programma. Quest'ultima scelta permette inoltre di selezionare uno tra differenti schemi. Ad esempio il "Forward Eulero/backward Eulero" è un metodo del primo ordine nel tempo. Un altro metodo utilizzabile è il "forward Adams-Bashforth/backward trapezoid" che invece è del secondo ordine nel tempo. La sezione "error tolerance" controlla la terminazione della procedura iterativa sia per il flusso sia per il trasporto non-lineare sia per i processi non-lineari in acquiferi non confinati e anche per il flusso non lineare nell'insaturo. L'errore ha un valore di default di 0.001. Sceglierne uno più piccolo rinforza maggiormente la precisione e talvolta aumenta i tempi di elaborazione. (Panazzolo, 2009).
- **3D SLICE ELEVATION:** questo sotto menu permette di definire, controllare e plottare le quote dei singoli piani in un problema 3D. È possibile dare un valore globale a tutto il piano oppure assegnare dei punti quotati e poi effettuare una interpolazione lineare. Molto utile è la funzione "database" che consente di importare punti quotati da diversi tipi di file di dati e di assegnarli al piano. Solitamente prima di impostare le quote dei singoli piani è opportuno selezionare in "3D options" il numero di piani e la quota grossolana di ognuno. (Panazzolo, 2009).
- **FLOW DATA:** questa parte consente di immettere i valori delle condizioni iniziali e a contorno per il flusso e le proprietà dei materiali. In "flow initials" si assegna il valore iniziale della piezometria, come per le quote, si possono assegnare valori globali,

puntuali o caricare i punti da un database. Quest'ultimo può essere uno shape file ESRI oppure un database ASCII. È necessario selezionare quali siano le coordinate (x,y) e quali i valori piezometrici. In “flow boundaries” le varie opzioni permettono di inserire condizioni al contorno di primo, secondo, terzo e quarto tipo e i relativi vincoli. Le condizioni possono essere considerate puntuali, come bordi oppure recuperate da database. Queste inoltre possono essere stazionarie oppure transitorie, è infatti possibile creare o importare funzioni che mostrino la variazione di un determinato parametro nel tempo. Condizioni al contorno di primo ordine consistono in valori fissi di piezometria che vengono assegnati a particolari punti in cui questi valori sono noti. Il secondo ordine rappresenta invece un flusso (m^2/d), mentre il terzo un trasporto, cioè definisce un riferimento di piezometria o un limite esterno noto, come può essere un fiume o un lago. Infine il quarto tipo descrive il comportamento di un pozzo, sia di emungimento che di reiniezione. L'ultima parte, “flow materials”, serve per inserire tutti i parametri, locali o globali, relativi ai materiali che sono necessari per descrivere il problema. Le proprietà dei materiali richieste dipendono dal tipo di simulazione, se in 2D o in 3D, se acquifero libero o confinato, ecc e sono ad esempio conducibilità idraulica o trasmissività e immagazzinamento. (Panazzolo, 2009).

- **TRANSPORT DATA:** in questa sezione l'impostazione è simile a quella precedente, si divide infatti in “transport initials”, “transport boundaries” e “transport materials”. Come per il flusso le condizioni iniziali sono essenziali nel caso transitorio per indicare le informazioni di partenza sul modello. La modalità di inserimento delle temperature sono peraltro del tutto simili. Anche le condizioni di contorno rispecchiano quelle per il flusso se non che al posto del livello piezometrico al primo ordine, si trova invece il valore della massa o della temperatura rispettivamente nel caso di trasporto di massa o di calore. In “transport materials”, infine, vengono assegnati i seguenti parametri: spessore dell'acquifero (solo in 2D), porosità, diffusione molecolare, dispersività longitudinale e trasversale, tipo di dispersione, tipo di decadimento e sorgente. (Panazzolo, 2009)..
- **REFERENCE DATA:** in questa parte è possibile inserire i dati di riferimento, vale a dire punti di osservazione singoli o a gruppi, sezioni o segmenti e distribuzioni nodali. Questi elementi risultano essere particolarmente utili per la valutazione dei risultati delle simulazioni. I punti di osservazione ad esempio possono essere posizionati in numero illimitato e dove si voglia oppure importati da shape file. Esistono poi

particolari tipi di punti, i “grouped balance points”, per cui il programma, durante la simulazione, calcola anche il bilancio di flusso, ciò risulta utile soprattutto nel caso si voglia fare un resoconto del bilancio di flusso. (Panazzolo, 2009).

3.2.3 SIMULAZIONE

Una volta che sono state create le mesh agli elementi finite e sono stati inseriti i parametri, è possibile effettuare la simulazione vera e propria. Una volta ultimato il processo di elaborazione è possibile seguire in tempo reale tramite le attività che il software sta compiendo controllandone il corretto avanzamento. Il simulatore grafico aggiorna le velocità e le frange di colore sul modello ogni qual volta sono disponibili nuovi risultati. A seconda del tipo di problema e degli intervalli temporali scelti, il software può attivare o meno l'assemblaggio delle equazioni o la fattorizzazione. Per processi di trasporto lineare con step temporali costanti, l'assemblaggio e la fattorizzazione della matrice dell'equazione del sistema è fatta solo per il primo step, mentre i successivi possono essere risolti più velocemente. È possibile inoltre interrompere in qualsiasi momento la simulazione per apportare modifiche oppure per salvare il progetto e continuarlo in un secondo momento, in quanto il file di output viene continuamente aggiornato e tenuto aperto in modalità “append”. Come detto, durante la simulazione sono presenti, nella schermata, vari diagrammi che descrivono il procedere della simulazione. Il tipo di grafici mostrati dipende ovviamente dal tipo di problema che si sta studiando. Per un semplice problema di flusso le finestre standard sono la legenda, la variazione nel tempo dei livelli piezometrici e una finestra che riassume le mesh agli elementi finiti. Nel caso ci sia anche trasporto possono essere visualizzati anche il diagramma delle variazioni di concentrazione o temperatura nel tempo in corrispondenza ai punti di osservazione e quello dei valori medi in pozzi o punti particolari. (Panazzolo, 2009).

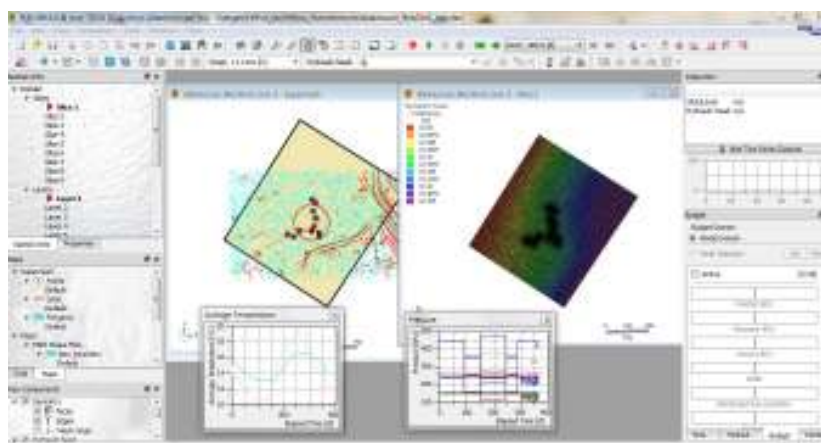


Figura 28: Esempio di schermata di simulazione con Feflow

3.2.4 VISUALIZZAZIONE ED ANALISI DEI RISULTATI

I risultati della simulazione possono essere visualizzati o direttamente dal menu “simulator” o salvando, sempre in questa sezione, il progetto per poi aprirlo in un secondo momento dal menu “Postprocessor”. Questo contiene numerose opzioni per uno studio e una stima dei risultati dell’elaborazione. È possibile selezionare, dal menu “browse file”, qualsiasi istante della simulazione per osservare i risultati in quel momento. La sezione “View results” consente di osservare ed esportare tutti i parametri risultanti dalla simulazione all’istante selezionato. (Panazzolo, 2009). Feflow dà la possibilità di visualizzare i risultati in diversi modi:

- con isolinee o frange di colori
- con campi vettoriali di velocità
- con tracciamenti di particolari scie
- con sezioni lungo linee e segmenti
- con proiezione 3D.

Una funzione molto utile del postprocessor è il “budget analyzer”. Questo strumento calcola la quantità di flusso di massa, contaminante e calore che entra o esce dall’area simulata o da parti di essa, inoltre calcola il bilancio per una quantità che entra o lascia il dominio del modello. Il bilancio viene fatto sommando tutti gli apporti (positivi o negativi) che il modello riceve, quindi i flussi attraverso i bordi di ingresso e uscita, le portate emunte o re iniettate dai pozzi e altri flussi dovuti a fenomeni di infiltrazione, ricarica o altro. Un’altra funzione analitica disponibile è il “fluid flux analyzer”, che è in grado di calcolare, orizzontalmente o verticalmente, la quantità di flusso che entra o esce dalla regione di simulazione, da parti di essa, da punti o da sezioni. Non è però, come per il caso descritto prima, un semplice calcolo numerico, ma uno strumento per la stima della distribuzione della velocità darcyniana. Il flusso attraverso un’area viene calcolato suddividendo la sezione in numerosi piccoli segmenti lineari, poi integrato, rappresenta il flusso normale, in volume per tempo, attraverso il segmento. Risulta quindi un utile strumento per la stima dei flussi tra parti del modello oppure per conoscere, all’interno di un pozzo, l’esatto contributo di ogni piano sulla portata totale estratta. Infine può risultare utile la funzione “special operations” che consente differenti operazioni sui dati ottenuti dalla simulazione o tra i risultati e i dati di riferimento per la creazione poi di diversi tipi di mappe. (Panazzolo, 2009).

CAPITOLO 4 : ANALISI DI SISTEMA DI GEOSCAMBIO CON USO DIRETTO DI ACQUA DI FALDA

4.1 OBIETTIVO DELLO STUDIO

Questa seconda parte del lavoro nasce dalla collaborazione fra il dipartimento di Geoscienze dell'Università degli Studi di Padova e la società Sinergo S.r.l. - Sinergie Geologiche per l'Ambiente con sede a Vicenza, che ha messo a disposizione le competenze professionali ed i mezzi necessari allo svolgimento delle indagini effettuate. Viene quindi presentato lo studio idrogeologico condotto nei pressi della Basilica Palladiana di Vicenza, atto alla caratterizzazione geologica, idrogeologica e geotermica dell'area su cui sorge il complesso, al fine della realizzazione di un impianto geotermico a circuito aperto con uso diretto di acqua di falda a scopo di climatizzazione degli spazi interni dell'edificio storico e locali annessi.

Scopo del lavoro è stato quello di verificare gli effetti di utilizzo simulato dell'impianto sulle caratteristiche idrodinamiche e termiche della falda e dei terreni interessati. Risulta, infatti, di grande interesse conoscere dimensioni e caratteristiche evolutive del plume termico generato dal funzionamento dell'impianto. Mediante l'utilizzo di un codice calcolo agli elementi finiti è stata realizzata una simulazione dinamica degli effetti termici ed idrodinamici connessi al prelievo ed alla restituzione dall'acquifero utilizzato a scopo geotermico nella falda acquifera. Tale analisi è stata effettuata in modalità tridimensionale con lo scopo di individuare le caratteristiche evolutive dei processi di trasporto termico connessi all'assetto idrodinamico instaurato nel sistema acquifero utilizzato.

4.2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO, GEOLOGICO ED IDROGEOLOGICO

La Basilica Palladiana è un edificio pubblico che si affaccia su Piazza dei Signori a Vicenza. Il suo nome è indissolubilmente legato all'architetto rinascimentale Andrea Palladio, che riprogettò il Palazzo della Ragione, aggiungendo alla preesistente costruzione gotica quattrocentesca le celebri logge in marmo bianco a serliane.

Un tempo sede delle magistrature pubbliche di Vicenza, oggi la Basilica Palladiana, dotata di tre spazi espositivi indipendenti, è teatro di mostre d'architettura e d'arte. Dal 1994 è, con le altre architetture di Palladio a Vicenza, nella lista dei patrimoni dell'umanità dell'UNESCO.



Figura 29: Ubicazione della Basilica Palladiana (Google maps)



Figura 30: inquadratura geografica della città di Vicenza (Google maps)

La città di Vicenza sorge su depositi fluviali della pianura alluvionale recente, alla confluenza del fiume Bacchiglione con il suo affluente Retrone.

I principali elementi morfologici presenti nella provincia di Vicenza, considerati rispetto alla posizione geografica della città, sono: a nord l'Altopiano dei Sette Comuni (o Altopiano di Asiago), a ovest i Monti Lessini Orientali, a sud i Monti Berici.

Grazie a diverse indagini geofisiche e idrogeologiche profonde, effettuate nel corso degli anni nelle valli del torrente Chiampo e del fiume Agno situate a nord-ovest rispetto a Vicenza, sono state raccolte numerose stratigrafie di pozzi perforati, grazie alle quali è stato possibile ricostruire la successione stratigrafica profonda presente al di sotto del materasso alluvionale recente.

In particolare, nell'area dei Monti Lessini Orientali, la serie litologica può essere così sintetizzata, partendo dai terreni più antichi affioranti:

- calcareniti e calcari in grosse bancate dell'Eocene medio;

- marne fogliettate a stratificazione spesso indistinta, intercalate a calcareniti e calcari marnosi nettamente stratificati (*Marne di Priabona* – Eocene superiore), con spessore di circa 100 m;
- calcareniti e calcari nulliporici potenti complessivamente 180 m (*Calcareniti di Castelgomberto* – Oligocene inferiore). Per l'intensa fratturazione e la presenza di un diffuso sistema carsico questo ammasso costituisce un importante serbatoio idrico che alimenta numerose sorgenti, spesso con regime carsico, poste alla base dei rilievi collinari;
- rocce vulcaniche dell'Oligocene medio-superiore, rappresentate da basalti di colata, filoni basici, tufi e tufiti rimaneggiate, spesso molto alterate e stratificate. Abbondanti sono anche le breccie basaltiche di esplosione e le argille bentonitiche, prodotti di alterazione delle accennate rocce vulcanoclastiche. Lo spessore di tale complesso è, per la sua stessa origine, molto variabile da punto a punto;
- *Arenarie di S. Urbano* e sabbie quarzose, calcari nulliporici e calcareniti arenacee del Miocene inferiore, potenti complessivamente 20 m;
- *Formazione del Monte Costi*, rappresentata dalle marne e dai calcari marnosi del Miocene medio, potenti circa 40 m;
- alluvioni terrazzate grossolane e minute dell'antica conoide dell'Adige, prevalentemente cementate, del Pleistocene;
- alluvioni fluvioglaciali e fluviali prevalentemente sabbiose, con strato di alterazione brunastro, del Pleistocene;
- alluvioni terrazzate grossolane e minute dell'Adige e alluvioni dei corsi d'acqua e delle valli lessinee, ascrivibili all'Olocene.

Elemento morfologico di primaria importanza è costituito dalle alluvioni dell'antica conoide dell'Adige: questa, oltre ad operare uno sbarramento allo sbocco delle valli lessinee, con molta probabilità le ha risalite per tratti di ampiezza variabile, determinando la formazione di bacini lacustri, successivamente colmati da depositi argilloso-torbosi. (Antonelli et al., 1990).

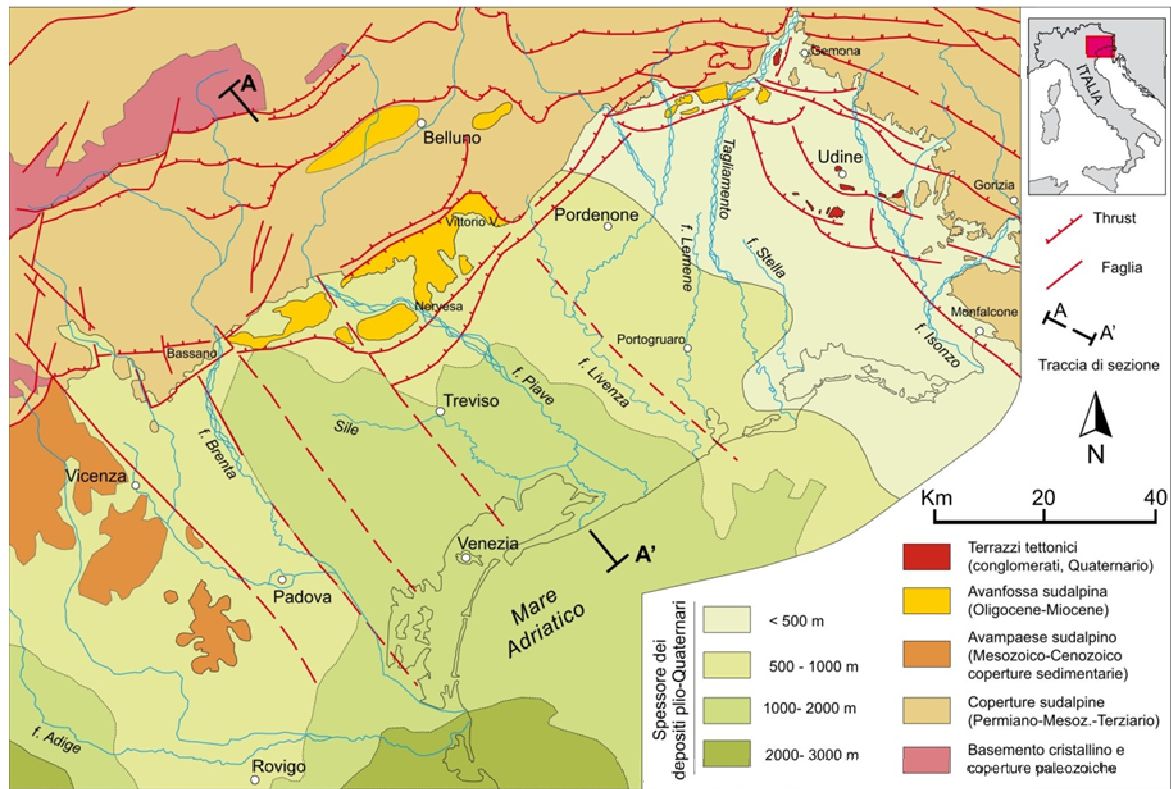


Figura 31: Schizzo geologico strutturale della pianura veneto-friulana (Bondesan et al., 2008)

Il principale elemento tettonico della regione è costituito dalla “linea Schio-Vicenza”. In questo settore le dislocazioni maggiori, con orientamento NNO-SSE, sono spesso interessate da complicazioni tettoniche secondarie, sub-parallele o anche trasversali rispetto alle principali.

I lineamenti strutturali condizionano in modo determinante anche l’assetto morfologico della regione; le valli più importanti tendono a ripetere, nell’area geografica nord-occidentale rispetto a Vicenza, l’orientamento delle principali direttrici tettoniche, con dorsali collinari leggermente divergenti e molto allungate. Anche la valle dell’Agno-Aguà segue l’andamento della Schio-Vicenza; più a meridione, però, prosegue verso la pianura con direzione N-S, mentre il torrente Chiampo mantiene uno sviluppo NO-SE fino alla confluenza con la più ampia vallata dell’Agno. (Antonelli et al., 1990).

L’aspetto della pianura veneto-friulana è fortemente legato all’evoluzione tardo pleistocenica e olocenica dei fiumi alpini Isonzo, Tagliamento, Piave, Brenta e Adige. Essi

hanno infatti ripetutamente cambiato percorso a valle del loro sbocco montano, interessando aree molto ampie, fino a coprire migliaia di km². (Bondesan et al., 2008).

Si sono così formati sistemi sedimentari, allungati fino al mare, che in pianta presentano morfologia a ventaglio, mentre nelle tre dimensioni possiedono una forma simile ad un cono appiattito; tali sistemi sono stati in passato descritti dagli autori come conoidi, ma ora vengono definiti megafan (o megaconoidi) alluvionali. (Bondesan et al., 2008).

Nell'insieme questi corpi sedimentari presentano, quindi, una evidente continuità spaziale dallo sbocco vallivo fino alle zone costiere e mostrano forme complessivamente "a ventaglio". Tuttavia, la loro notevole estensione areale, i limitati gradienti topografici presenti nella bassa pianura, la caratteristica selezione granulometrica dei sedimenti che da monte a valle passano da ghiaie a sabbie, limi e argille, li rendono piuttosto diversi dai classici conoidi alluvionali descritti in letteratura, caratterizzati invece solo da sedimenti grossolani. Quindi il termine "conoide", in senso stretto, descrive bene le porzioni prossimali di questi sistemi alluvionali, cioè l'alta pianura, ma è ambiguo nel definire l'intera struttura deposizionale.

Rispetto agli altri megafan descritti in letteratura, quelli della pianura veneto-friulana si distinguono per avere dimensioni relativamente piccole, essendo compresi fra 1000 e 2500 km². (Bondesan et al., 2008).

Nel sottosuolo sono probabilmente presenti in successione verticale diverse generazioni di megafan e fan-delta che potrebbero presentare forma, estensione, direzione media e valori di inclinazione anche molto differenti rispetto a quelli attualmente visibili in superficie. (Bondesan et al., 2008).

Da notare, inoltre, che nella zona di interdigitazione tra i maggiori megafan esistono i più importanti corsi di risorgiva o di risorgenza carsica che con i loro sistemi hanno occupato quindi le aree depresse dell'interfluvio. E' questo il caso dei fiumi Stella (tra megafan di Cormor e Tagliamento), Livenza (tra megafan di Tagliamento e Piave), Sile (tra megafan di Piave e Brenta) e Bacchiglione (tra megafan del Brenta e piana dell'Adige). (Bondesan et al., 2008).

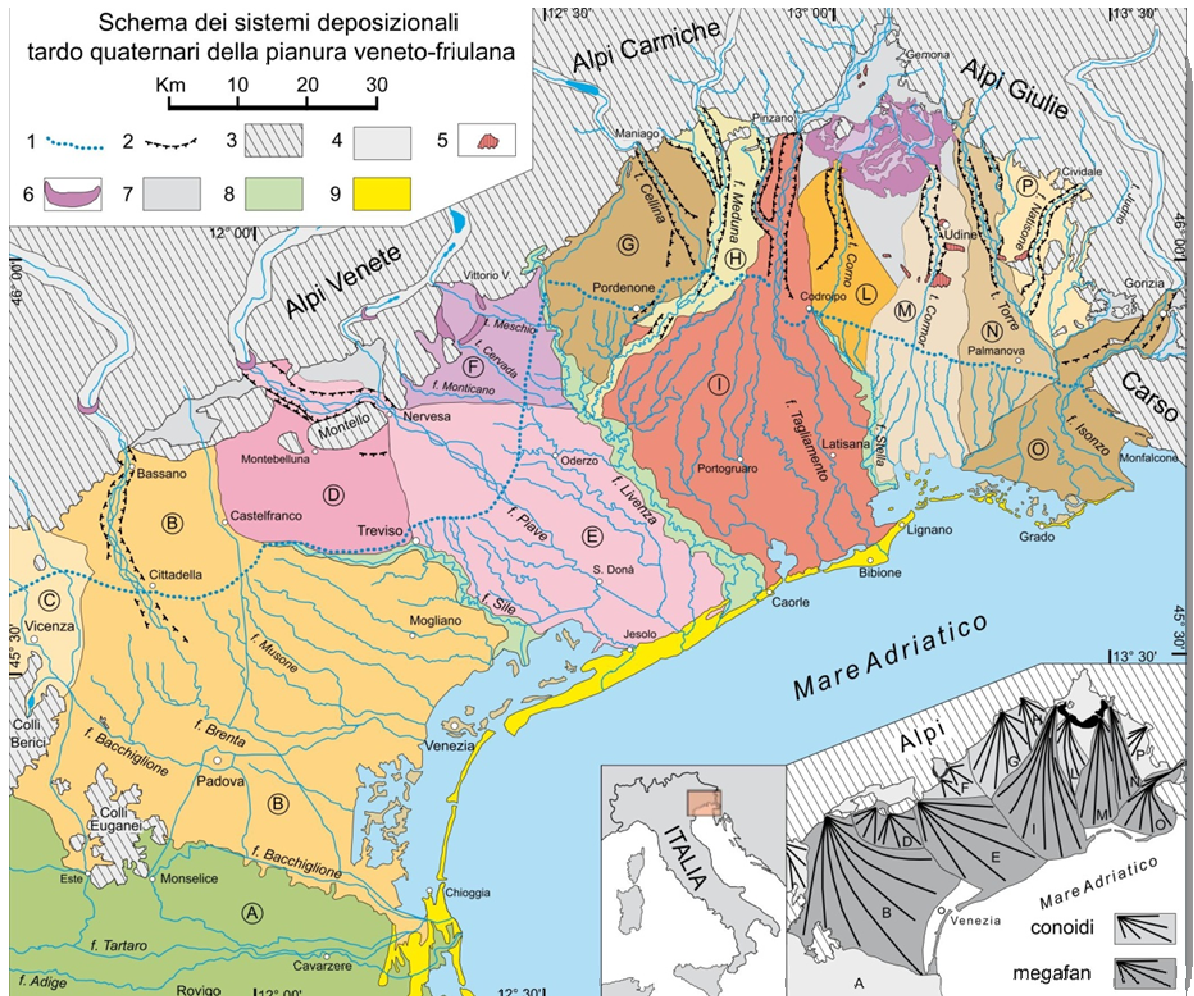


Figura 32: Schema dei sistemi deposizionali tardo quaternari della pianura veneto-friulana. Nel riquadro in basso a destra uno schizzo semplificato dei conoidi e megafan. Simboli: 1) limite superiore delle risorgive; 2) orlo di terrazzo fluviale; 3) aree montuose e collinari; 4) principali valli alpine; 5) terrazzi tettonici; 6) cordoni morenici; 7) depositi di interconoide e delle zone intermontane; 8) depositi dei principali fiumi di risorgiva; 9) sistemi costieri e deltizi. Lettere: (A) pianura dell'Adige. (B) megafan del Brenta, (C) conoide dell'Astico, (D) megafan di Montebelluna, (E) megafan di Nervesa, (F) conoide del Monticano-Cervada-Meschio, (G) conoide del Cellina, (H) conoide del Meduna, (I) megafan del Tagliamento, (L) conoide del Corno, (M) megafan del Cormor, (N) megafan del Torre, (O) megafan dell'Isonzo, (P) conoide del Natisone. (Bondesan et al., 2008)

La struttura litostratigrafica della Pianura Veneta è così schematizzabile:

Alta pianura

L'alta pianura è formata da una serie di conoidi alluvionali ghiaiose sovrapposte ed intersecate fra loro, depositatesi in corrispondenza dello sbocco in valle dei grossi corsi d'acqua. Tale grande serbatoio dotato di elevata permeabilità, costituisce l'acquifero freatico dell'alta pianura detto anche Acquifero Indifferenziato, in cui circola una falda di tipo freatico (detta libera in quanto la superficie del pelo d'acqua non è confinata, ma libera di muoversi) che inizia a monte, a ridosso dei rilievi. (Mion, 2002).

Questa porzione di territorio, detta anche *fascia delle ghiaie*, rappresenta l'area di ricarica dell'intero sistema idrogeologico; qui la falda freatica è facilmente in comunicazione (e per questo anche molto vulnerabile) con la superficie del suolo. È un'area di grandissima importanza, in quanto è sede di una serie di fenomeni naturali (afflussi meteorici, dispersione dei corsi d'acqua ed infiltrazione delle acque irrigue) che consentono la conservazione ed il rinnovamento della risorsa idrica sotterranea. (Mion, 2002).

Media pianura

Nella media pianura, in cui rientra l'area su cui sorge la città di Vicenza, i depositi sono rappresentati da materiali progressivamente più fini, costituiti da ghiaie e sabbie con digitazioni limose ed argillose le quali diventano sempre più frequenti da monte a valle; in questi depositi esiste una serie di falde sovrapposte, di cui la prima è generalmente libera e quelle sottostanti in pressione, localizzate negli strati permeabili ghiaiosi e/o sabbiosi intercalati alle lenti argillose dotate invece di bassissima permeabilità. Il sistema delle falde in pressione è strettamente collegato, verso monte, all'unica grande falda freatica, dalla quale trae alimentazione e che ne condiziona la qualità di base. (Mion, 2002).

La zona di passaggio dal sistema indifferenziato a quello multifalde, è rappresentata da una porzione di territorio a sviluppo est-ovest, larga anche qualche chilometro e variabile nel tempo, denominata "*fascia delle risorgive*". La falda si avvicina progressivamente alla superficie del suolo fino ad emergere, anche a causa della presenza delle sottostanti lenti argillose, formando le tipiche sorgenti di pianura, dette appunto risorgive (o fontanili). Esse costituiscono il "*tropo pieno*" della falda freatica dell'alta Pianura Veneta, e finché resteranno attive assicureranno la disponibilità idrica al sistema differenziato posto a valle. (Mion, 2002).

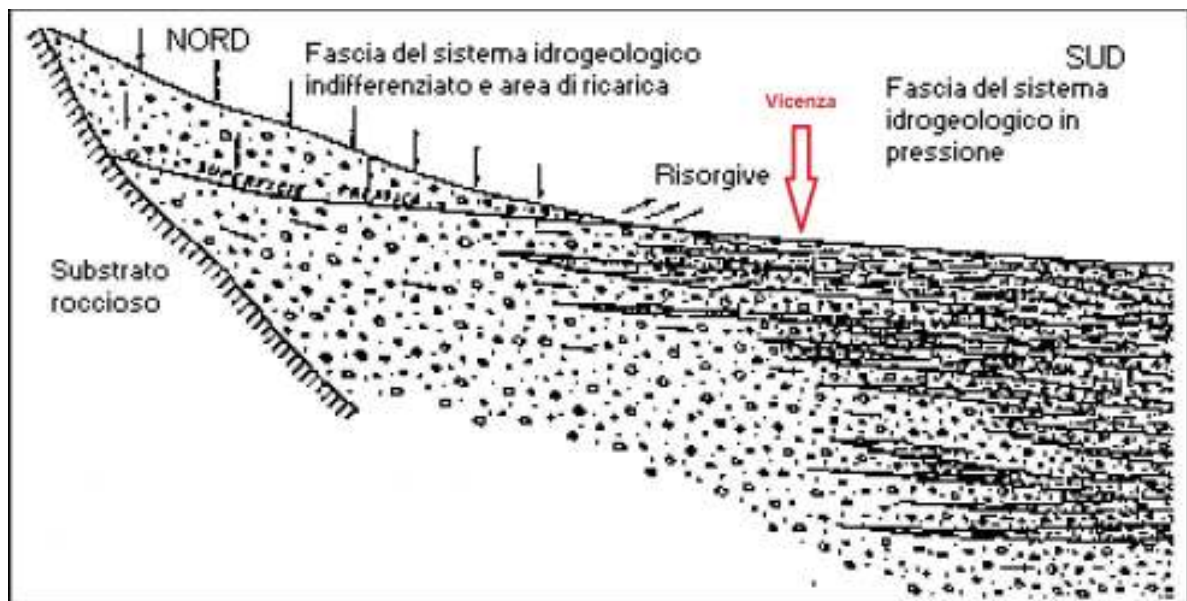


Figura 33: Schema idrogeologico dell'alta e media pianura veneta (Mion, 2002, modificato)

Bassa pianura

I depositi alluvionali ghiaiosi profondi si assottigliano sempre più, fino ad esaurirsi nella bassa pianura. Qui il sottosuolo è costituito da un'alternanza di materiali a granulometria fine (limi, argille e frazioni intermedie) con sabbie a variabile percentuale di materiali più fini (sabbie limose, sabbie debolmente limose, limi sabbiosi, ecc.). (Mion, 2002).

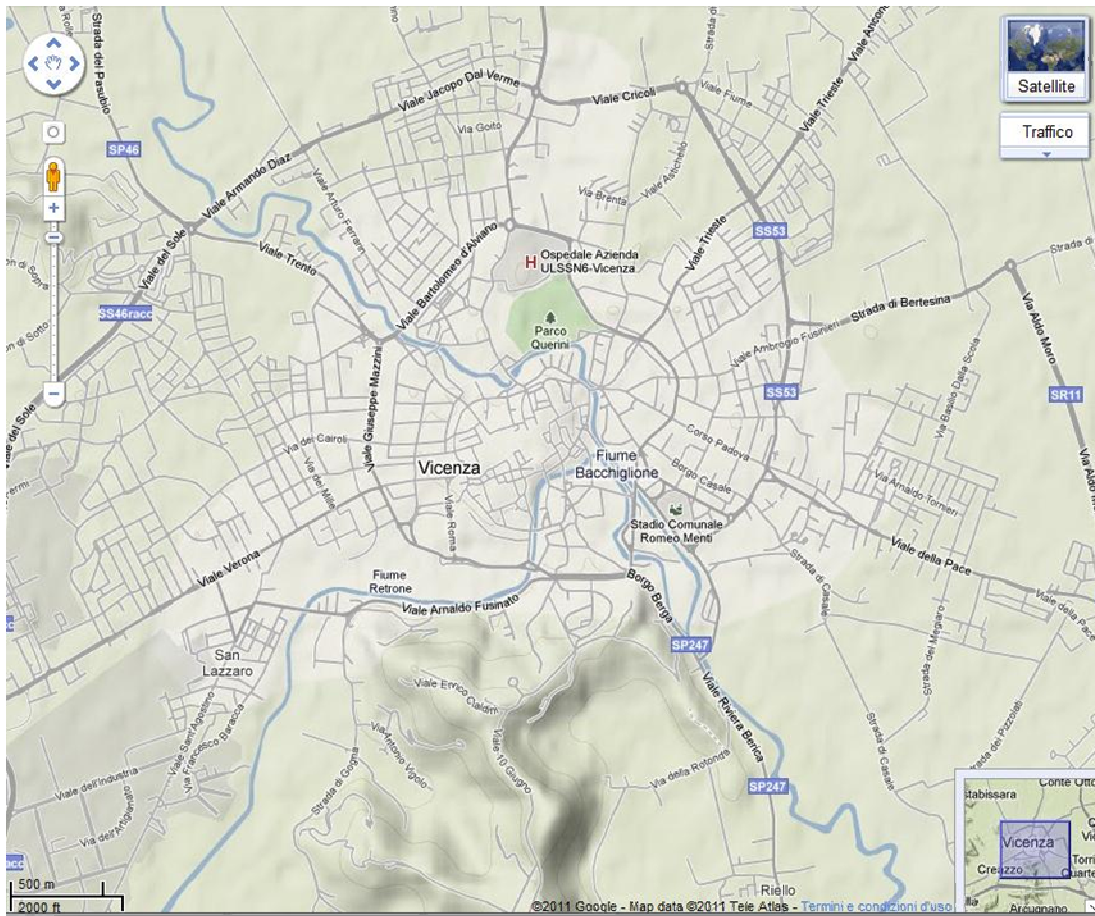


Figura 34: Idrografia superficiale nell'area in cui sorge Vicenza (Google maps)

L'esistenza del sistema idrogeologico veneto è da ricondursi alla struttura geologica del sottosuolo, alle proprietà idrauliche degli acquiferi e quindi alla circolazione sotterranea associata. La presenza di una struttura idrogeologica è una condizione necessaria, ma non sufficiente, all'esistenza di una circolazione idrica sotterranea. Occorre infatti che la struttura possa essere efficacemente alimentata dalla superficie: l'acquifero deve poter ricevere direttamente e/o indirettamente la ricarica da parte delle acque superficiali. (Monopoli, 2010).

La grande consistenza di questa risorsa deriva principalmente dalla coincidenza di due fattori (Monopoli, 2010):

- L'assetto geologico-strutturale particolarmente favorevole che determina l'esistenza di estesi e potenti acquiferi, i più importanti dei quali sono rappresentati dai materassi

alluvionali dell'alta pianura, area di ricarica degli acquiferi e dell'acquifero indifferenziato, che alimentano poi le falde artesiane profonde della Media Pianura e Bassa Pianura Veneta;

- Gli strettissimi rapporti di interdipendenza tra acque superficiali e sotterranee, che consentono efficaci azioni di alimentazione e ricarica.

I processi che regolano l'equilibrio del sistema idrogeologico possono essere così schematizzati (Monopoli, 2010):

- Gli afflussi determinati dal concorso della dispersione in alveo dei corsi d'acqua costituenti la rete idrografica principale, delle infiltrazioni dirette delle precipitazioni (precipitazioni efficaci), della dispersione capillare operata dalla rete di canali d'irrigazione non rivestiti assieme alle portate infiltrate nelle pratiche irrigue a scorrimento, dagli apporti indiretti del ruscellamento superficiale dai rilievi e infine degli apporti profondi di tipo carsico dei rilievi pedemontani;
- Una circolazione sotterranea a varia profondità e complessità;
- I deflussi, rappresentati sia dallo scorrimento superficiale della rete idrografica, sia dall'affioramento delle falde freatiche che dà luogo alle risorgive e sia, più in profondità, dalla circolazione che determina il deflusso sotterraneo. Quest'ultima voce comprende la circolazione sotterranea a maggior profondità che garantisce l'alimentazione al ricchissimo sistema multi-falde in pressione (artesiane) che caratterizza la Media e Bassa Pianura Veneta. Completa la voce dei deflussi un termine artificiale assai rilevante dato dalla derivazione di enormi volumi di acqua da falde a varia profondità ad opera dei numerosissimi pozzi ad uso industriale e civile.

La pianura pedemontana è caratterizzata da un potente acquifero freatico indifferenziato costituito da ghiaie di origine essenzialmente fluviale e fluvioglaciale e contraddistinto da una notevole, continuità laterale. È questa la parte di territorio di pianura più vulnerabile dove avviene la massima infiltrazione dalla superficie e per questo definita "area di ricarica degli acquiferi". (Monopoli, 2010).

L'acquifero indifferenziato, più a sud, evolve in un sistema multistrato costituito da una serie di falde a diversa profondità alle quali si sovrappone una falda freatica di modesto spessore e potenzialità. (Monopoli, 2010).

La separazione tra i due elementi sopra descritti coincide con la media pianura dove si verifica, lungo una fascia di larghezza variabile tra i 2 e i 10 km, la venuta a giorno della falda freatica. (Monopoli, 2010).

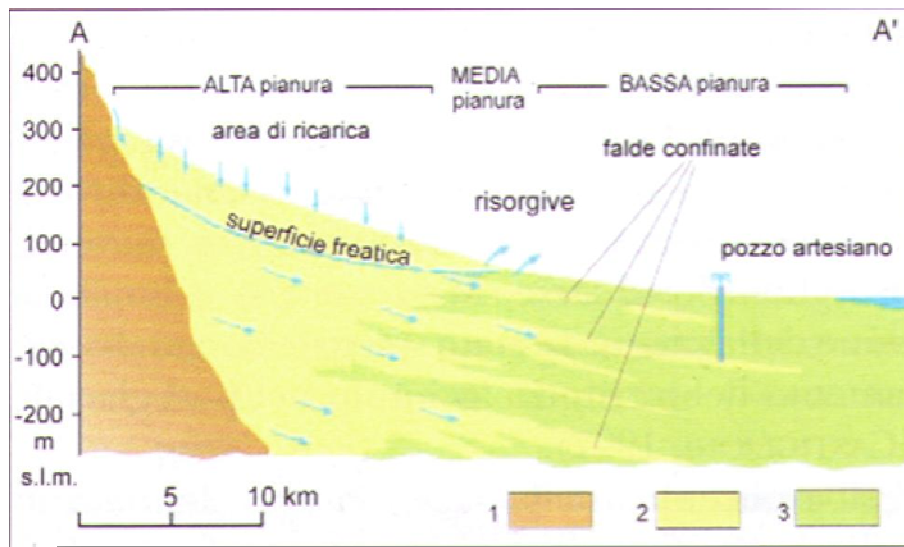


Figura 35: Sezione geologica e idrogeologica schematica della pianura veneta; 1) prealpi e substrato roccioso profondo; 2) ghiaia dell'alta pianura passanti a sabbie e sabbie ghiaiose nel sottosuolo della bassa pianura; 3) limi e argille impermeabili della bassa pianura (Fontana et al., 2004)

Questa fascia, nota come fascia delle risorgive, è individuata da un limite superiore e uno inferiore e separa l'alta pianura ghiaiosa, quasi priva di drenaggio superficiale, da quella bassa limoso-argillosa, ricca di acque superficiali. (Monopoli, 2010).

Gli orizzonti argillosi impermeabili costringono parte della falda freatica a emergere in superficie, mentre la porzione rimanente continua il suo moto verso valle nel sottosuolo creando un sistema di falde confinate sovrapposte. (Monopoli, 2010).

In generale il regime freatico nell'estesa fascia pedemontana, in un anno idrogeologico medio, è caratterizzato da una fase di piena tardo estiva (agosto-settembre) e una fase di magra invernale (febbraio-marzo). Il regime della bassa pianura è invece caratterizzato da

escursioni assai meno marcate in cui è preponderante l'azione di alimentazione operata dalle precipitazioni e dall'irrigazione. (Monopoli, 2010).

Per concludere l'inquadramento idrogeologico generale, si ricorda che da anni è in corso un lento ma progressivo abbassamento piezometrico dell' acquifero indifferenziato, indotto da un generale depauperamento delle riserve idriche. (Monopoli, 2010).

4.3 INDAGINI DI CAMPAGNA

4.3.1 PREMESSE

Prima di illustrare le indagini di campagna effettuate in collaborazione con la ditta Sinergeo s.r.l., è doveroso soffermare l'attenzione sul contesto in cui sono state eseguite, ovvero un ambiente urbano.

Generalmente un'azione invasiva su suolo urbano, come può essere un'indagine geologica, intesa in senso lato del termine, o la realizzazione di un'opera, è soggetta doverosamente a molti più vincoli e limitazioni rispetto a quelli imposti per un ambiente meno antropizzato, poiché un centro ad elevata densità abitativa risulta molto vulnerabile, essendo elevato il rischio tra edificato e sottosuolo già raggiunto. Di conseguenza, l'iter necessario per ottenere le autorizzazioni ad "agire" sul territorio è molto lungo e spesso travagliato, poiché è necessario rapportarsi con numerosi Enti ed organi amministrativi preposti alla salvaguardia del territorio cittadino e, nondimeno, alla tutela ambientale. Inoltre, proprio in corso d'opera, è possibile che sopraggiungano altri tipi di problematiche, non necessariamente legate all'apparato amministrativo-burocratico, ma di tipo tecnico-logistico, connesse alla presenza simultanea di più realtà lavorative che operano nello stesso contesto e/o sullo stesso progetto, o di tipo economico, poiché capita che vi siano in gioco interessi, nonché grosse speculazioni anche su progetti che dovrebbero portare benefici e vantaggi al soggetto committente e, nel caso di opere pubbliche, all'intera società civile. Tutto ciò solitamente provoca ritardi nell'esecuzione di un progetto o di un'opera, oppure, in casi limite, ne comporta il "congelamento" o la cancellazione.

In generale, molto stringatamente, un geologo che si trovi ad operare in ambiente urbano dovrebbe sempre tenere conto: delle caratteristiche geologiche e idrogeologiche del territorio oggetto di indagine, ricavabili anche da archivio se esistenti, delle sue caratteristiche geotecniche e geomeccaniche, dell'impatto che può avere l'esecuzione di ogni tipologia di

indagine sull'area considerata, da un semplice slug test alla realizzazione di una grande opera sotterranea, delle difficoltà di esecuzione e delle limitazioni derivanti dall'essere in un ambiente troppo antropizzato nel caso di indagini geofisiche, come l'elevato rumore di fondo e l'obbligo di effettuare indagini non distruttive, della possibile presenza nel sottosuolo di resti archeologici da preservare e tutelare, ecc..

A capo di tutto questo, in ogni caso, dovrebbero sempre esserci, da parte del geologo, la presa di coscienza ed il senso di responsabilità per ciò che si andrà a fare o che si è compiuto, la serietà professionale e la trasparenza nei confronti del committente.

4.3.2 SONDAGGI

Tramite studi preliminari precedentemente effettuati, è stata riscontrata la presenza di più acquiferi sotterranei posti a diverse profondità al di sotto dell'area occupata superficialmente dal complesso della Basilica Palladiana.

Per poter individuare quello più adatto al fine dello sfruttamento geotermico sono stati realizzati tre sondaggi: Pz1, Pz2, Pz3. Il primo si trova in Piazza dei Signori, in prossimità della Torre di Piazza, il secondo in Piazza delle Erbe e il terzo in Piazzetta Palladio, a fianco alla statua dedicata all'omonimo architetto padovano.

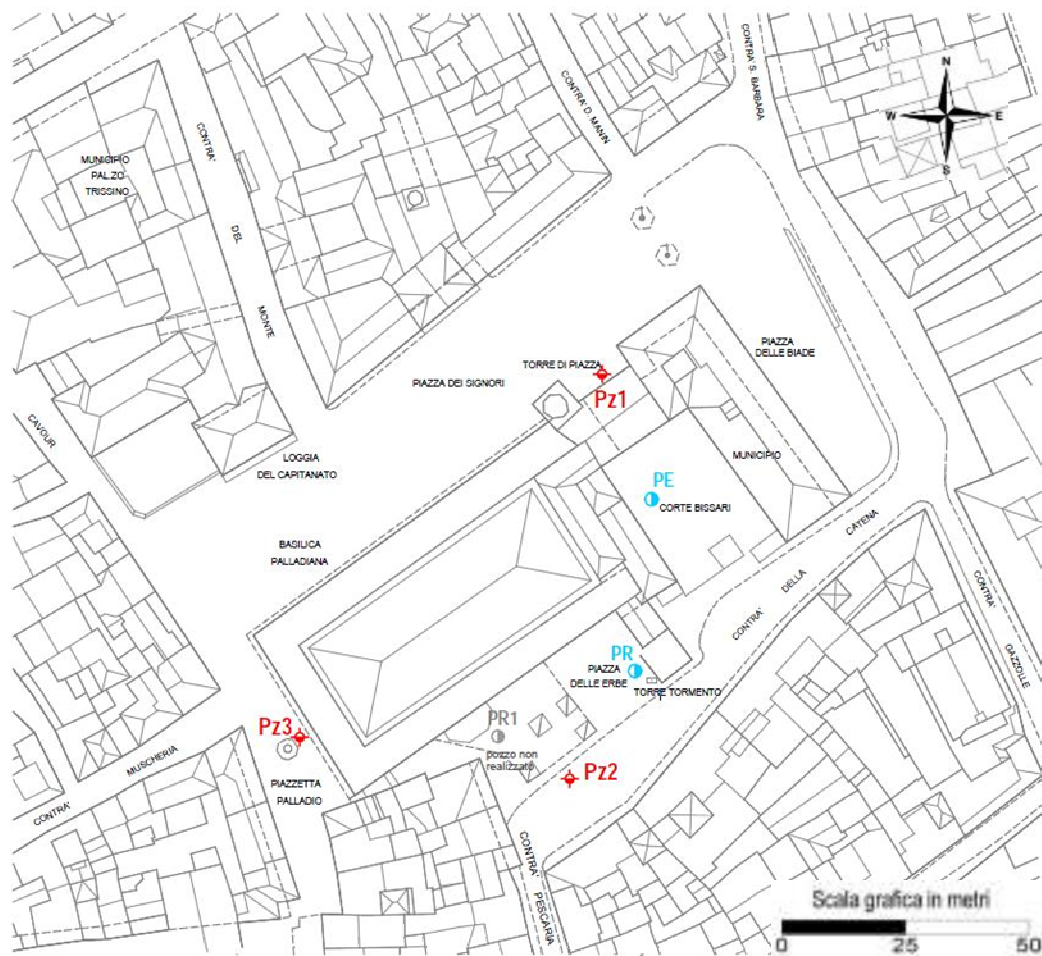


Figura 36: Collocazione dei sondaggi Pz1, Pz2, Pz3 e dei pozzi PE e PR (Sinergo)

I lavori di trivellazione sono stati realizzati dalla ditta Geotecnica Veneta S.r.l. durante i mesi di Novembre - Dicembre 2010.

In particolare sono stati effettuati sondaggi con un diametro di perforazione pari a 127 mm fino ad una profondità di 50 m (Pz1 e Pz3) e di 52 m (Pz2), utilizzando la tecnica a distruzione di nucleo fino a 20 m di profondità da piano campagna (Pz1) e fino a 30 m di profondità da piano campagna (Pz3); l'avanzamento, poi, è proseguito fino a fondo foro con il metodo del carotaggio continuo. Il sondaggio Pz2 è stato realizzato per primo interamente con la tecnica del carotaggio continuo, per completare il database dei dati stratigrafici già in nostro possesso.



Figura 37: Esecuzione dei sondaggi in Piazza dei Signori

Al fine di caratterizzare la stratigrafia dell'acquifero è stata raccolta l'intera sequenza di carote in apposite cassette di materiale plastico e si è proceduto a descrivere brevemente sul campo ciascun livello stratigrafico rinvenuto.

Per completezza è stata riportata la documentazione fotografica della carota estratta in Pz2, essendo in quanto l'unica ad essere stata estratta interamente da piano campagna fino a 50 metri di profondità.

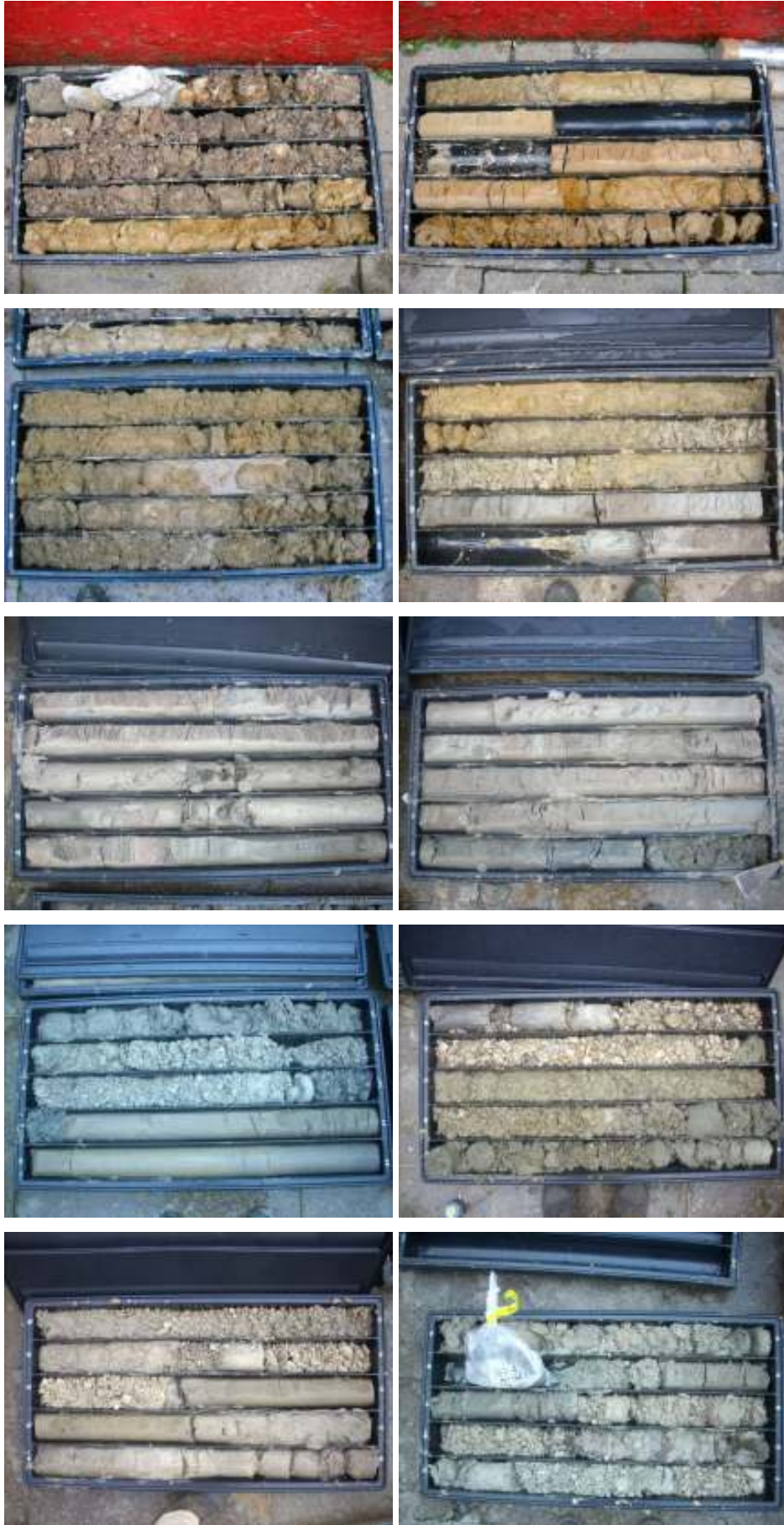


Figura 38: Carote estratte in Pz2

In ciascun foro è stato inserito un tratto di tubo filtrante con dreno in ghiaietto in corrispondenza della profondità dell'acquifero da indagare; in particolare: da 33 a 48 m di profondità per Pz1, da 29 a 50 m per Pz2 e da 30 a 48 m per Pz3. Negli ultimi due metri finali di ogni foro e nella porzione sovrastante il filtro di ogni foro sono stati inseriti tubi ciechi, cementati esternamente con miscela bentonitica.



Figura 39: Preparazione della miscela bentonitica



Figura 40: Aggiunta della miscela bentonitica

I sondaggi sono stati infine completati con l'inserimento di piezometri in PVC da 2".



Figura 41 e 42: Inserimento dei tubi in PVC

4.3.3 RILIEVO TOPOGRAFICO E POSIZIONAMENTO DEI DIVERS

Una volta ultimati i sondaggi si è reso necessario effettuare un rilievo topografico dell'area in esame, al fine di determinare le coordinate spaziali assolute x , y , z dei piani campagna (PC) dei tre piezometri installati e la quota pozzo (QP) propria di ciascuno di essi.

Per fare questo si è utilizzato un teodolite posizionato in tre differenti stazioni base.

Per la nostra indagine è stato utilizzato un teodolite di nuova generazione di tipo "Total Station", o stazione totale, che in pratica è un teodolite con accoppiato coassialmente (cioè il punto in cui viene effettuata la misura angolare è anche il punto in cui viene rilevata la distanza) un distanziometro; quest'ultimo utilizza il prisma riflettente, montato su asta, per effettuare la misura distanziometrica.

La stazione totale è dotata di un piccolo computer in grado di memorizzare automaticamente la lettura degli angoli orizzontale e zenitale, oltre che la distanza, di ciascun punto; al termine delle misure è stato quindi possibile riversare i dati raccolti in forma di codice direttamente in un computer fisso attraverso un semplice programma di database.



Figura 43: Rilievo topografico



Figura 44: Prisma montato su asta



Figura 45: Particolare su Pz1

Si è provveduto, poi, a collocare un diver all'interno di ciascuno dei tre piezometri al fine di raccogliere dati relativi a temperatura, conducibilità elettrica e pressione in termini di battente (peso della colonna d'acqua sovrastante), e monitorare, quindi, l'andamento della temperatura dell'acqua di falda nonché le oscillazioni giornaliere del livello statico dell'acquifero. Per fare questo i tre divers sono stati preventivamente settati con un intervallo orario di acquisizione dati.

I divers sono stati posizionati a fine del mese di Dicembre 2010 e sono stati lasciati acquisire dati durante le tre settimane successive.

4.3.4 MONITORAGGIO DEI LIVELLI DI FALDA

Di rilevanza fondamentale in questo tipo di studio è la misura della soggiacenza, ovvero la posizione in profondità della falda rispetto al piano campagna. Per la misura del livello statico si è utilizzato il freatimetro, costituito di:

- Cavo tondo quadripolare 4,7 mm con anima in Kevlar.
- Graduato ogni centimetro con stampigliatura a caldo (non con adesivi).
- Protezione con guaina antigraffio in poliuretano trasparente.
- Segnalatore acustico e visivo di raggiungimento livello.
- Diametro sonda 10 mm.
- Tasto prova.
- Avvolgicavo in materiale plastico.
- Alimentazione con batteria da 9 V



Figura 46: Misura della soggiacenza con il freatimetro



Figura 47: Strumentazione per l'acquisizione dei dati

Contestualmente alla misura dei livelli nei tre piezometri si è provveduto a rimuovere ciascun diver e a scaricare i dati di pressione e temperatura sul pc portatile tramite collegamento usb, utilizzando un software dedicato della Van Essen Instruments; ad operazione ultimata, le sonde sono state riposizionate per ulteriori acquisizioni.

4.3.5 SLUG TEST E CAMPIONAMENTO ACQUE

Per poter stimare l'ordine di grandezza della conducibilità idraulica (K) dell'acquifero preso in considerazione sono stati effettuati un paio di slug test per ciascuno dei tre piezometri.

Inizialmente si è misurato il livello statico della falda con il freatimetro ed ogni sensore è stato rimosso, scaricato su pc e reimpostato per acquisire ogni secondo con un intervallo di 10 secondi fra ogni acquisizione. A questo punto si è proceduto gettando una secchiata d'acqua all'interno del foro con l'ausilio di un imbuto e si è aspettato che il livello tornasse alla stessa quota pre-test; per verificare tale riassetto è stato misurato più volte il livello statico.



Figura 48: Esecuzione dello slug test

Al momento della rimozione del diver è stato misurato il livello statico con il freatimetro e il valore della pressione atmosferica utilizzando un barometro; in questo modo, dopo aver scaricato i dati della sonda sul pc, è stato possibile epurare i dati di pressione registrati dalla sonda come somma di pressione atmosferica e peso della colonna d'acqua sovrastante il sensore, dal valore della pressione atmosferica.

Dopo aver effettuato gli slug test si è proceduto al prelievo di campioni d'acqua da Pz1, che intercetta la falda più a monte, e da Pz3, posto più a valle.

Prima di prelevare i campioni è stato necessario spurgare entrambi i tubi per eliminare l'acqua al loro interno e si è avuta l'accortezza di rimuovere un volume d'acqua triplo rispetto a quello contenuto nel tubo; ciascuno spurgo è durato circa mezz'ora.



Figura 49: Strumentazione utilizzata per gli slug test



Figura 50: Campionamento dell'acqua di falda

In particolare sono stati prelevati da ciascun piezometro: 2 vial per l'analisi dei composti organo-alogenati (solventi), 1 litro d'acqua contenuto in un flacone in polietilene per l'analisi dei composti organici (idrocarburi) e 2 contenitori in polietilene da 250 ml l'uno per l'analisi dei metalli pesanti. I campioni sono poi stati consegnati al laboratorio di analisi di Cin-Novaledo.

4.3.6 POZZI

A cavallo fra Dicembre 2010 e Gennaio 2011 sono stati realizzati due pozzi ad opera di Botti Elio – Impresa di Perforazioni e CO.ME.TRI.A (Costruzioni Meccaniche per Trivellazioni e Affini) S.r.l., utilizzando il metodo del carotaggio a distruzione di nucleo.

*Tabella 5: Caratteristiche PE ed acquifero
(Sinergico, modificato)*

diametro tubaz. (mm)	457
profondità tot. (m)	47
acquifero	confinato da 23 a 43 m
spessore (m)	20
litologia	ghiaia sabbiosa
filtri	da -27 a -43
lunghezza tot. (m)	16
tipo filtri	n.d.
quota p.c. (m s.l.m.)	33

*Tabella 6: Caratteristiche PR ed acquifero
(Sinergico, modificato)*

diametro tubaz. (mm)	457
profondità tot. (m)	50
acquifero	confinato da 30 a 50 m
spessore (m)	20
litologia	ghiaia sabbiosa
filtri	da -30,5 a -42,5
lunghezza tot. (m)	12
tipo filtri	n.d.
quota p.c. (m s.l.m.)	35,5

I pozzi presentano una distanza reciproca in pianta, misurata sulla CTR, pari a 33.8 metri (vedi Figura 36)



Figura 51: Realizzazione del pozzo PE in Corte dei Bissari

Elementi caratteristici del sistema di geoscambio a circuito aperto in fase di realizzazione sono: il prelievo dell'acqua di falda da una certa profondità tramite un pozzo (PE, pozzo di emungimento o prelievo), l'utilizzo della risorsa ai fini di climatizzazione degli ambienti della Basilica Palladiana ed, infine, la reimmissione di tale acqua nella falda di provenienza per mezzo di un altro pozzo (PR, pozzo di re immissione o restituzione).



Figura 52: Collocazione della pompa in PR



Figura 53: Inserimento del diver in PE

E' stato, inoltre, installato un tubo piezometrico in PE, chiamato PEpiez, per poter raccogliere dati e monitorare il pozzo di emungimento.

4.3.7 PROVE IN POZZO

Al fine di determinare i parametri idrogeologici dell'acquifero studiato e valutare l'efficienza dei pozzi realizzati, sono state effettuate alcune prove di pompaggio durante il mese di Febbraio 2011, sia sul pozzo di emungimento PE, sia su quello di restituzione PR.

Tali prove consistono nel sottoporre un pozzo ad emungimento, tramite una pompa sommersa od aspirante, e nel misurare gli abbassamenti di falda provocati nello stesso pozzo e/o in piezometri vicini. Rispetto a quelle in pozzetto superficiale (tipo slug test), le prove di pompaggio forniscono informazioni su aree molto più estese di acquifero.

Dapprima, quindi, è stato realizzato un test a portata costante (CRT, Constant Rate Test), al fine di determinare i parametri dell'acquifero. In pratica, è stata pompata acqua da PE ad una portata costante di circa 15,3 l/s per un periodo di 5h, durante il quale i sensori (divers) posti all'interno dei pozzi e dei piezometri hanno registrato in continuo le variazioni dei livelli dinamici della falda; si è provveduto, per sicurezza, a misurare manualmente i livelli dinamici prima, durante e dopo la prova, nei tre piezometri, in PEpiez e nei due pozzi PE e PR. Lo scarico è avvenuto superficialmente.



Figura 54: Scarico superficiale dell'acqua di falda

A prova ultimata è stata spenta la pompa aspirante, sono stati rimossi i divers, scaricati i dati registrati sul pc da campo e ricollocati i sensori per registrare in continuo. Infatti, immediatamente seguente alla prova CRT è stato il test REC (RECOvery), ovvero sono stati

misurati i livelli di recupero dell'acqua nel pozzo di pompaggio PE per un arco temporale di oltre 24 ore. La prova di recupero è stata molto utile per valutare qualitativamente l'effetto di pompaggio e possibile disidratazione della falda acquifera, che possono derivare a causa della portata limitata di un acquifero. Inoltre, la prova di recupero indica il livello a cui l'acquifero è in realtà disidratato misurando il prelievo residuo dopo che al pozzo è stato permesso di recuperare.

Dal pompaggio e dalla risalita è stato possibile determinare alcuni parametri dell'acquifero come la trasmissività (T) e la portata critica (Qc).



Figura 55: Misuratore di portata utilizzato

Il giorno successivo al recovery test è stata effettuata una prova SDT (Step Drawdown Test, test di abbassamento a gradini) nel pozzo di produzione PE ed è consistita nel pompare portate variabili e crescenti d'acqua in periodi costanti nel tempo; sono stati realizzati quattro gradini, da 1 ora ciascuno, con portate crescenti di 7, 14, 21, 28 l/s circa. Anche in questo caso si è avuta l'accortezza di misurare manualmente i livelli dinamici prima, durante e dopo il test, al fine di prevenire eventuali problemi derivabili da una non corretta acquisizione dei dati da parte dei sensori. La prova è stata eseguita principalmente per prevedere gli abbassamenti a

diverse portate (anche leggermente superiori a quelle di uso normale), per conoscere l'efficienza del pozzo e ricavare alcuni parametri dell'acquifero, come la trasmissività (T), la portata critica (Qc).

L'ultima prova è stata realizzata nel pozzo di reimmissione PR, per vedere la capacità di drenaggio del pozzo, utilizzando portate simili a quelle che verranno riversate in falda ad impianto ultimato ed in funzione. Anche in questo caso sono stati realizzati quattro gradini, da 1 ora ciascuno e portate crescenti di 7, 14, 21, 28 l/s circa. Come per i test precedentemente effettuati, anche questa volta si è avuta l'accortezza di misurare manualmente i livelli dinamici prima, durante e dopo il test, e a fine prova sono stati rimossi e scaricati i sensori.

4.4 RISULTATI DELLE INDAGINI

4.4.1 GEOLOGIA DI DETTAGLIO

Tramite i dati raccolti mediante i sondaggi si è proceduto a realizzare un log stratigrafico per ogni sondaggio effettuato; affianco ad ognuno è stata riportata una breve descrizione delle litologie, la profondità alla quale ciascuno strato è stato rinvenuto, la quota assoluta sul livello del mare. Inoltre una specifica colonnina è stata dedicata a mettere in evidenza (colore azzurro) i livelli stratigrafici granulari a comportamento permeabile prevalente, che costituiscono i corpi principali del sistema multifalda in cui trova spazio l'acquifero preso in considerazione. I gap stratigrafici sono stati colmati integrando i nuovi dati stratigrafici con quelli acquisiti da precedenti sondaggi (2004) effettuati dalla ditta Geotecnica Veneta S.r.l e commissionati dalla Favero & Milan Ingegneria S.r.l.

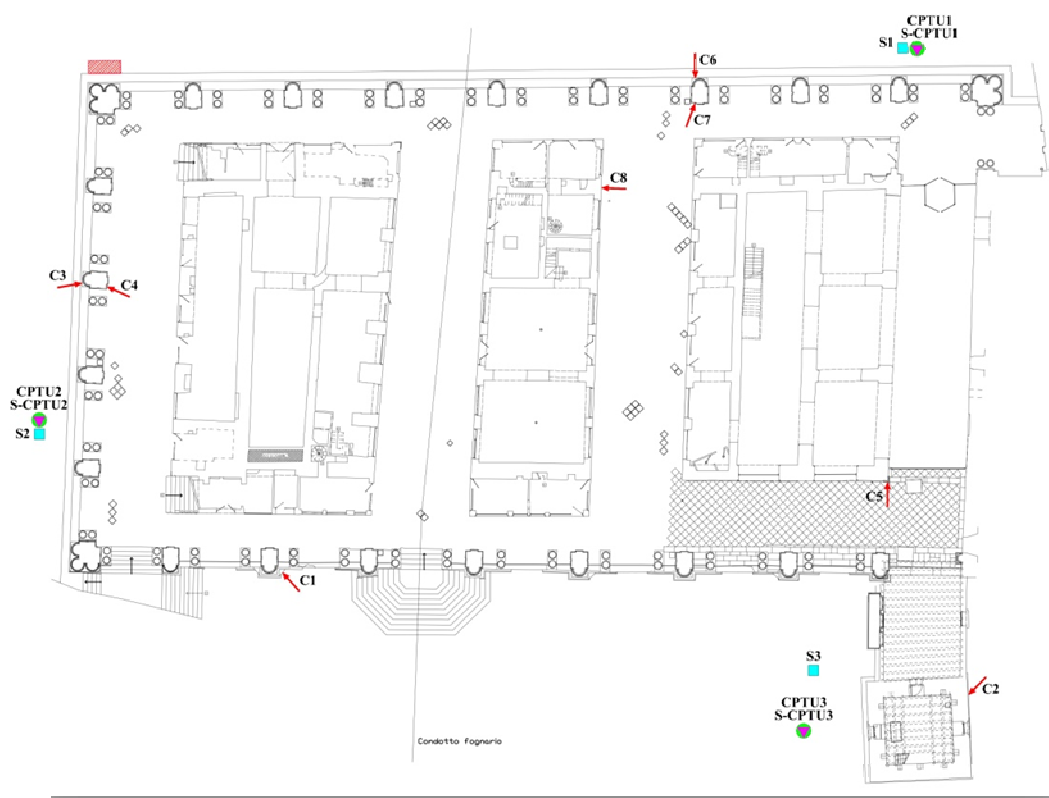


Figura 56: Ubicazione delle prove penetrometriche effettuate nel Dicembre 2004 (Sinergo).
Si può notare come Pz1 sia stato realizzato nelle vicinanze di S1 e Pz3 in prossimità di S2

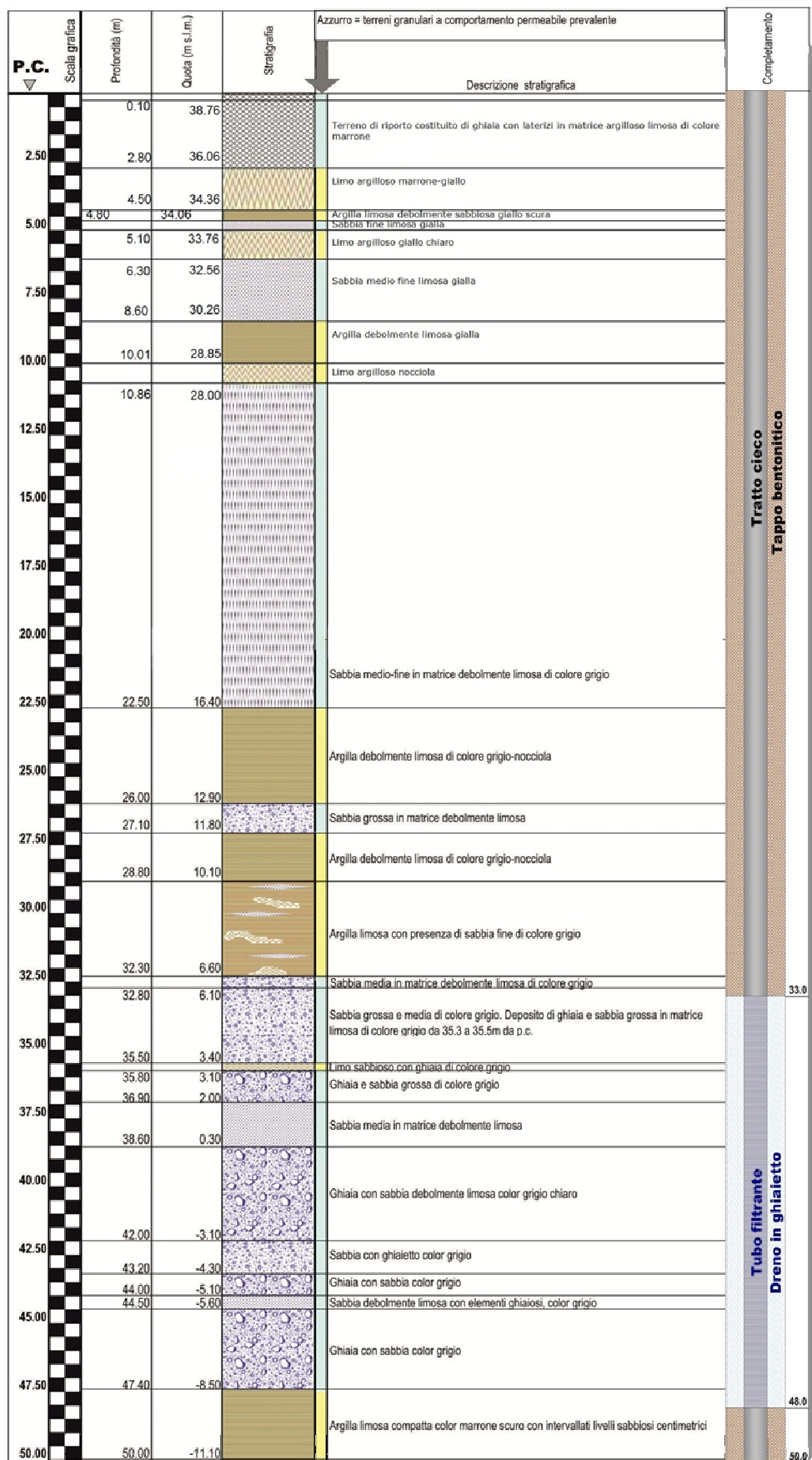


Figura 57: Sondaggio in Pz1 – Piazza dei Signori (Sinergeo, modificato)

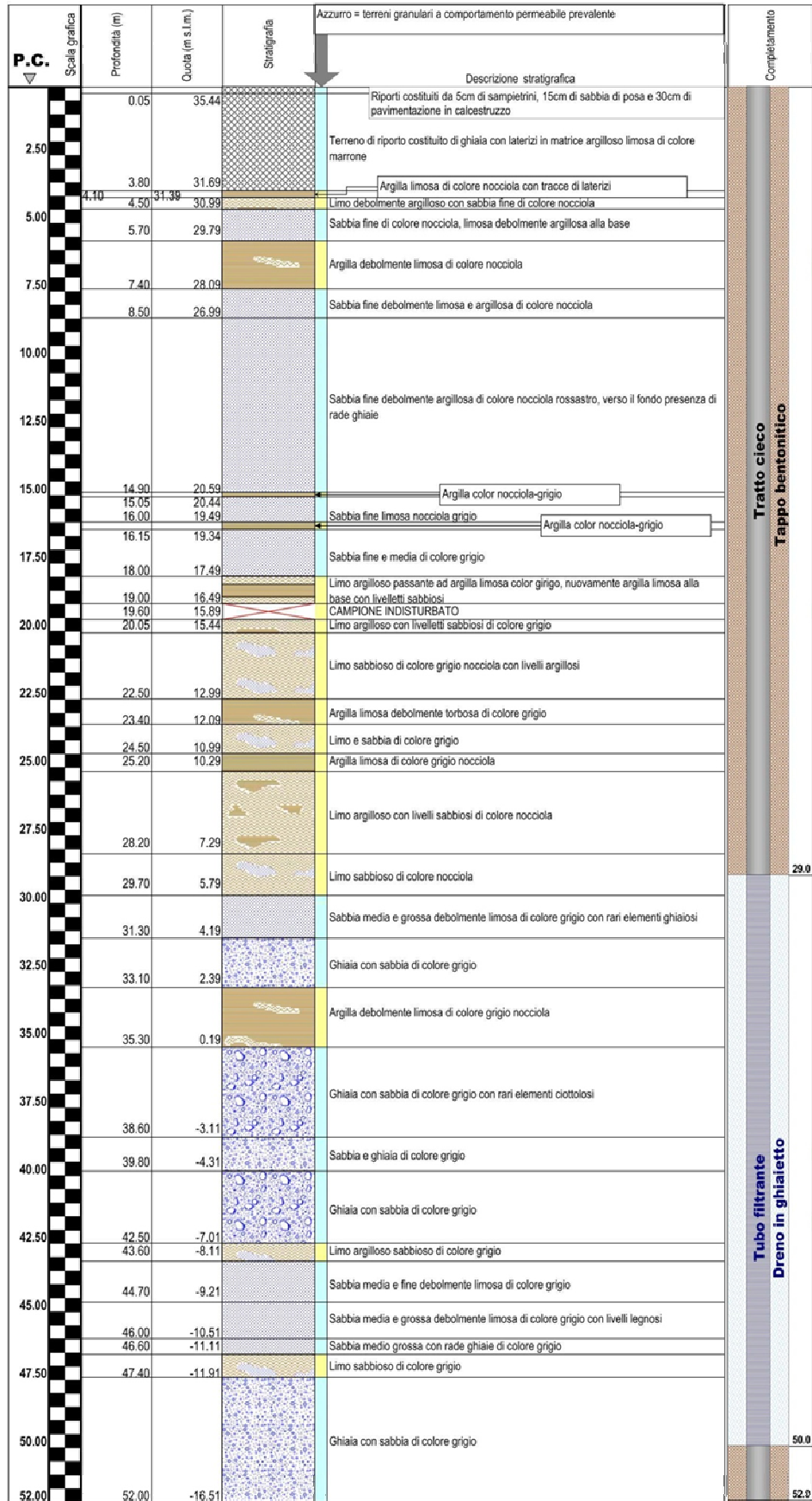


Figura 58: Sondaggio in Pz2 – Piazza delle Erbe (Sinergeo, modificato)

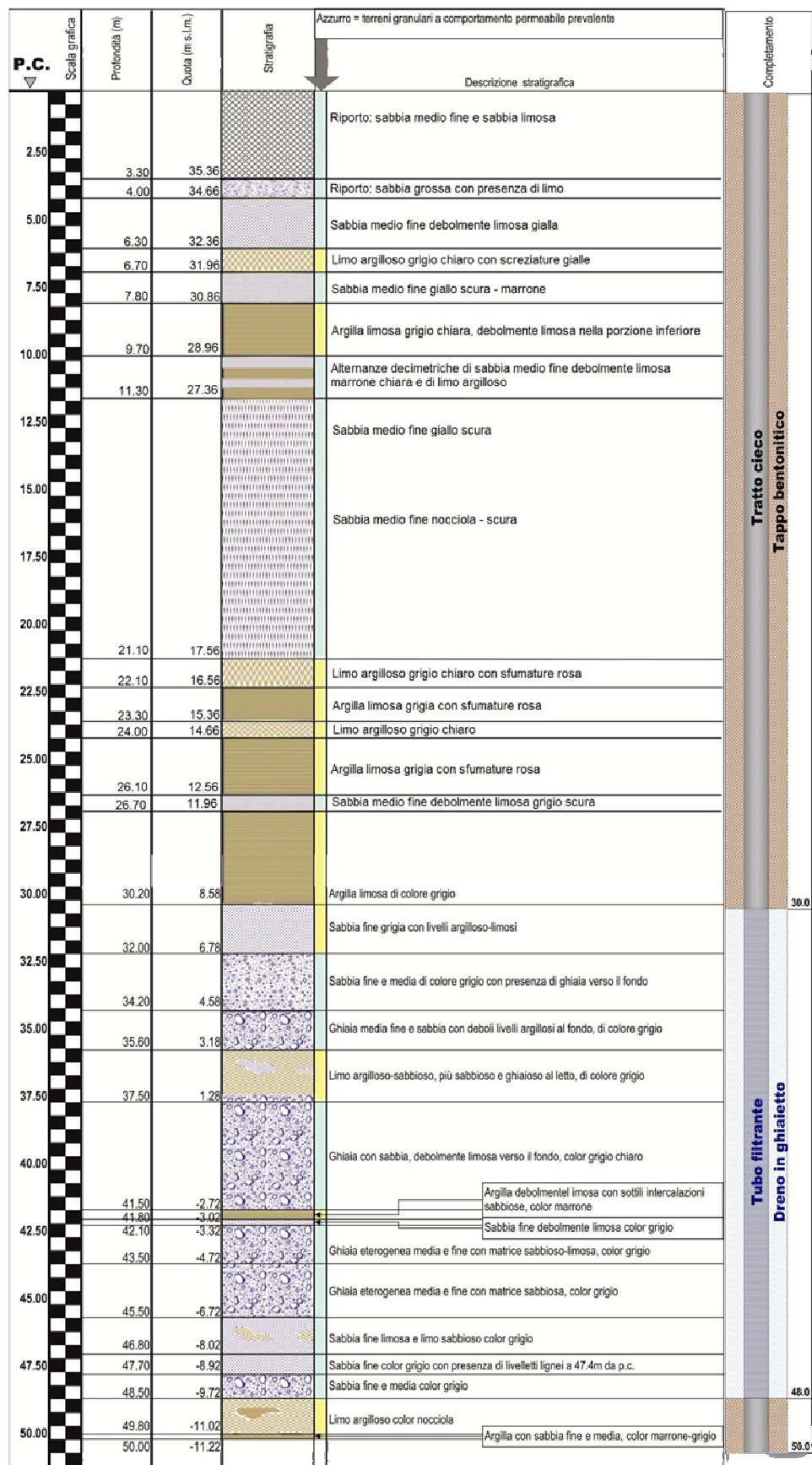


Figura 59: Sondaggio in Pz3 – Piazzetta Palladio (Sinergo, modificato)

Come è possibile osservare dai log stratigrafici costruiti a partire dai dati litologici raccolti mediante i sondaggi, si riscontra la presenza di diversi livelli a carattere più permeabile, costituiti da sabbie e ghiaie, ai quali sono intercalati strati sabbioso-limosi, limi argillosi e argille, a carattere più impermeabile. Si può notare che la granulometria dei livelli più permeabili aumenta progressivamente con la profondità, passando da sabbia fine e medio-fine a sabbia grossa e ghiaia, e che i vari orizzonti mostrano una buona continuità orizzontale.

Considerata la struttura litostratigrafica fornita dai dati raccolti nell'area di studio e da bibliografia, e tenendo conto della localizzazione geografica della zona, è indubbio che i livelli a carattere più permeabile rinvenuti costituiscano i corpi litologici di un sistema multi falda, tipico della fascia della media pianura.

In particolare, è importante evidenziare la presenza di un livello, potente all'incirca una ventina di metri, collocato fra i 30-32,5 m e i 47,5-48 m, che è caratterizzato da una matrice ghiaioso-sabbiosa ed è delimitato superiormente ed inferiormente da livelli di argille limose; si tratta di un acquifero confinato ed è stato oggetto delle varie tipologie di analisi condotte.

4.4.2 IDROGEOLOGIA DI DETTAGLIO

4.4.2.1 FREATIMETRIA

Tabella 7: Dati di campagna relativi alle coordinate dei sondaggi e ai livelli statici relativi ed assoluti misurati (Sinergeo, modificato)

Sondaggio	X_GB m	Y_GB m	Quota p.c. m s.l.m.
Pz1	1,698,850.72	5,046,938.12	38.86
Pz2	1,698,845.67	5,046,855.55	35.84
Pz3	1,698,794.23	5,046,856.13	38.66
	Hs del 29-12-2010 (m)	Quota m s.l.m. del 29-12-2010	
Pz1	6.38	32.48	
Pz2	3.38	32.46	
Pz3	6.195	32.47	
	Hs del 19-01-2011 (m)	Quota m s.l.m. del 19-01-2011	
Pz1	6.465	32.40	
Pz2	3.45	32.39	
Pz3	6.265	32.40	

Conoscendo le quote assolute di ciascuna bocca piezometro grazie al rilievo topografico effettuato, è stato possibile agganciare i dati acquisiti dai diversi e ottenere il valore effettivo del livello di falda rispetto al livello del mare (Hs assoluto).

Tramite il software Surfer v. 8.0 sono state, quindi, create le carte delle isofreatiche. Come è possibile notare, durante il periodo di acquisizione dati la direzione del flusso è variata da NNW-SSE a NW-SE nei mesi di Dicembre e Gennaio, per poi passare a WNW-ESE in Febbraio.

Il gradiente idraulico sperimentale si attesta su valori intorno al 0.02%.

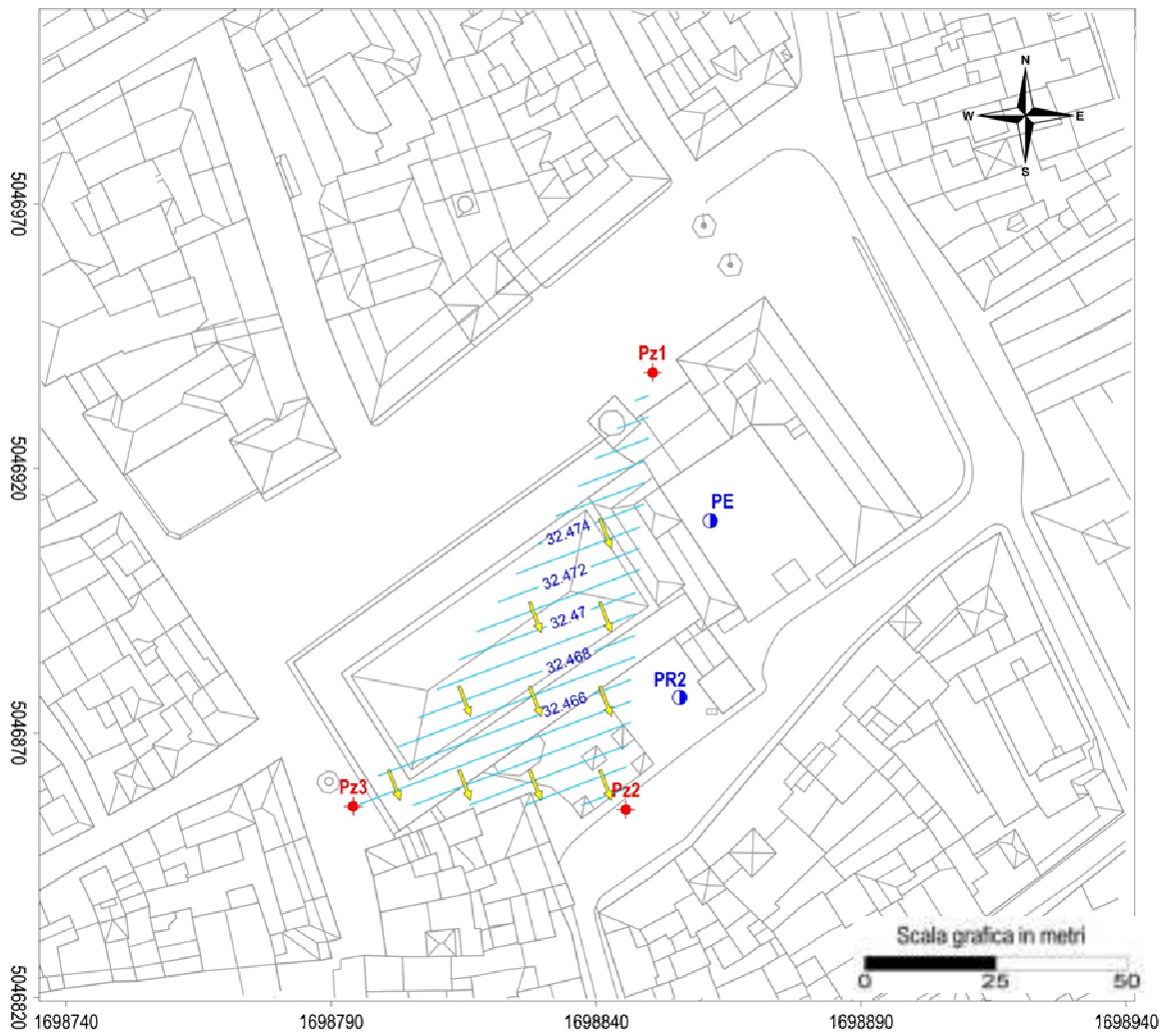


Figura 60: Andamento dei deflussi delle acque sotterranee relative al primo acquifero confinato - Campagna del 29 Dicembre 2010 (Sinergeo)

LEGENDA

-  Vettore direzione dei deflussi sotterranei
-  Linee isopiezometriche equidistanza 0.001 m (gradiente idraulico: 0.02%)
-  Rete piezometrica di monitoraggio
-  Pozzi a largo diametro

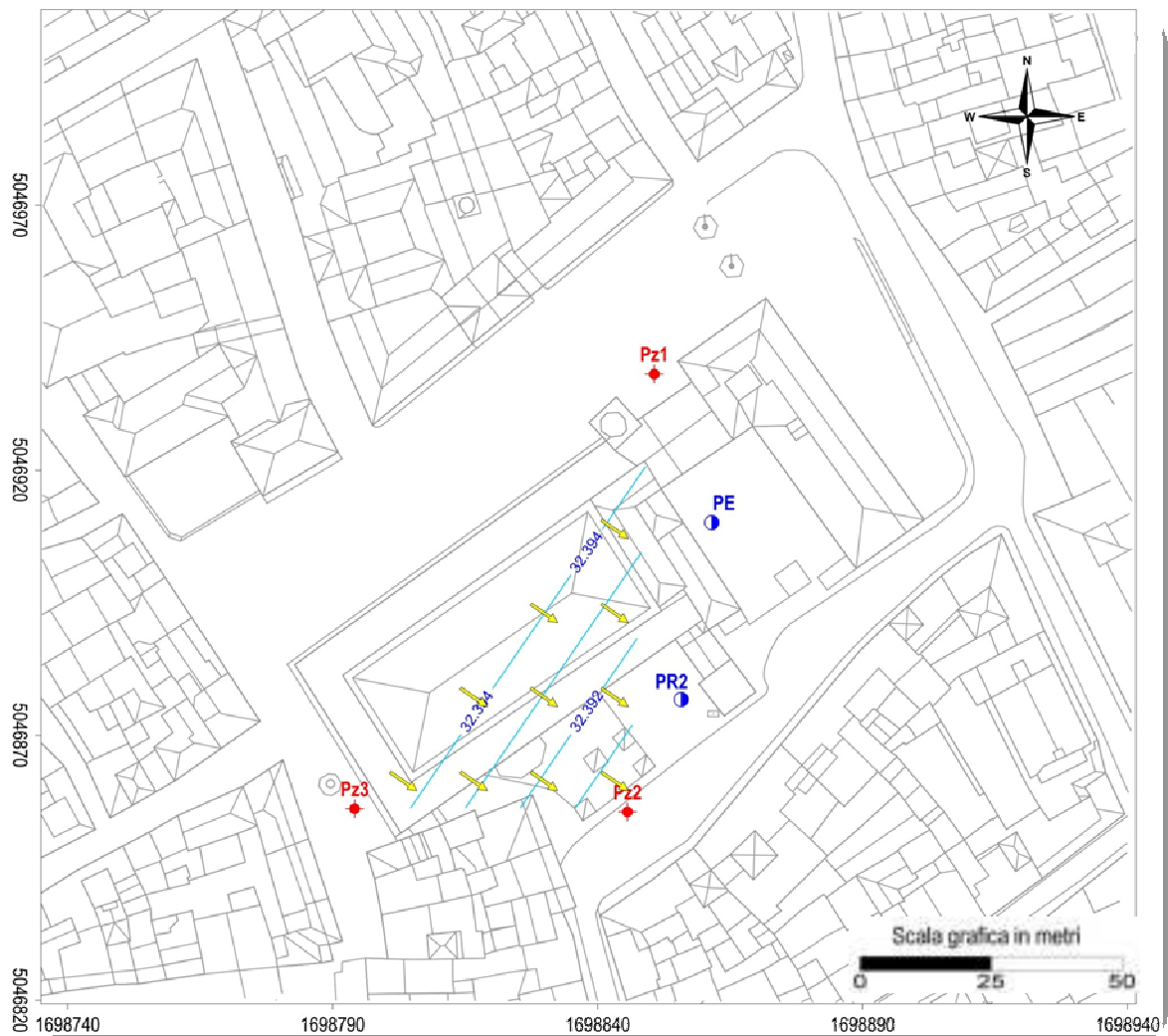


Figura 61: Andamento dei deflussi delle acque sotterranee relative al primo acquifero confinato - Campagna del 19 Gennaio 2011 (Sinergeo)

LEGENDA

-  Vettore direzione dei deflussi sotterranei
-  Linee isopiezometriche equidistanza 0.001 m (gradiente idraulico: 0.02%)
-  Pz1 Rete piezometrica di monitoraggio
-  PR2 Pozzi a largo diametro

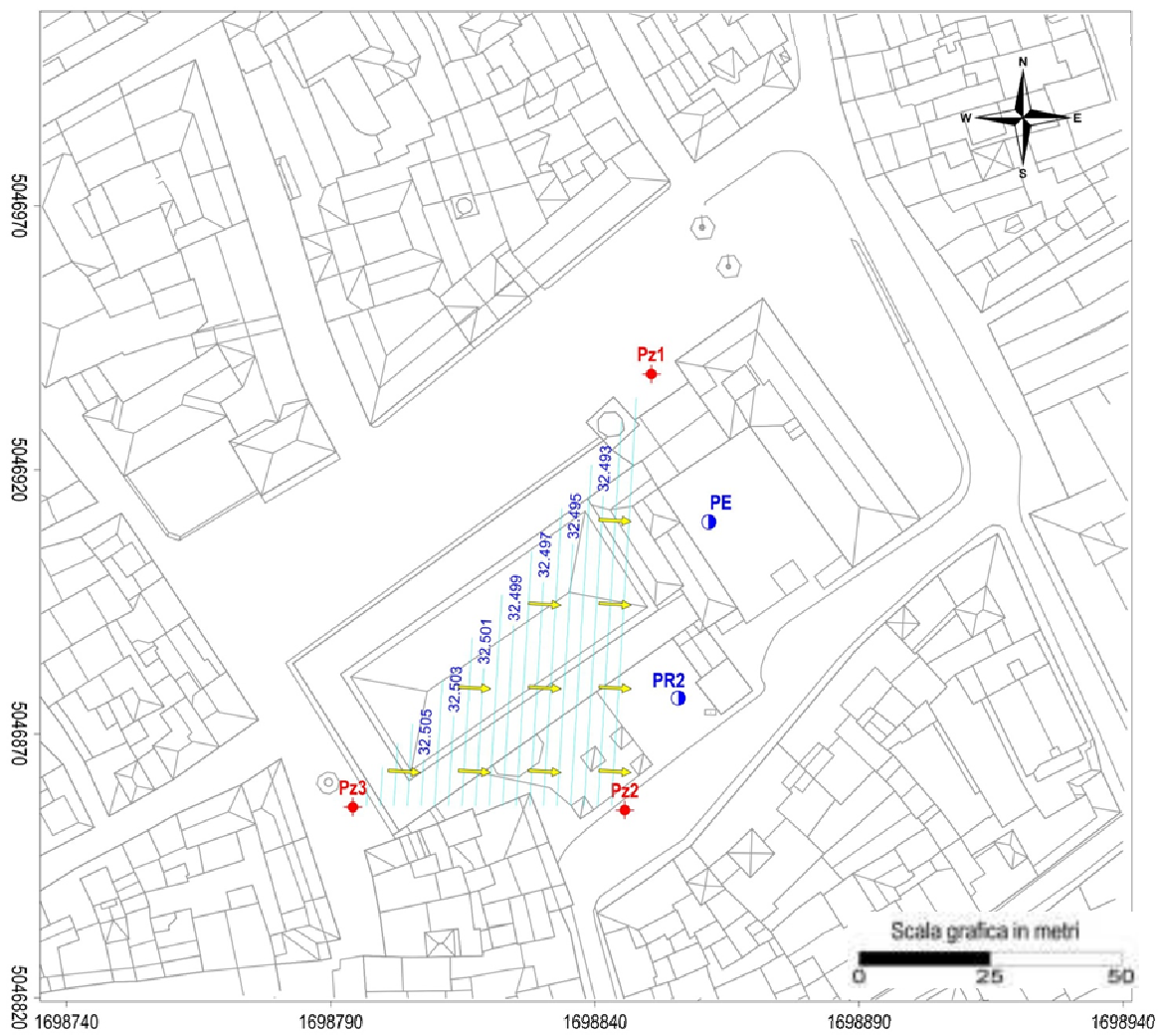


Figura 62: Andamento dei deflussi delle acque sotterranee relative al primo acquifero confinato - Campagna del 07 Febbraio 2011 (Sinergeo)

LEGENDA

-  Vettore direzione dei deflussi sotterranei
-  Linee isopiezometriche equidistanza 0.001 m (gradiente idraulico: 0.02%)
-  Pz1 Rete piezometrica di monitoraggio
-  PR2 Pozzi a largo diametro

Come si può notare dalle figure 60, 61, 62, l'andamento dei deflussi sembra subire una rotazione durante il tempo di monitoraggio. Ciò potrebbe essere dovuto all'arrivo tardato dei deflussi autunnali dalla zona sorgente posta nella fascia dell'alta pianura, che comporterebbero una variazione della direzione dei deflussi da NNW-SSE a WNW-ESE. Ad ogni modo, dalla somma vettoriale degli andamenti riportati nelle figure precedenti, risulterebbe un'andamento NW-SE, confermato anche da bibliografia (vedi Figura 63).



Figura 63: Carta dei deflussi (Dal Prà, 1993)

4.4.2.2 SLUG TEST ED ANALISI DELLE ACQUE

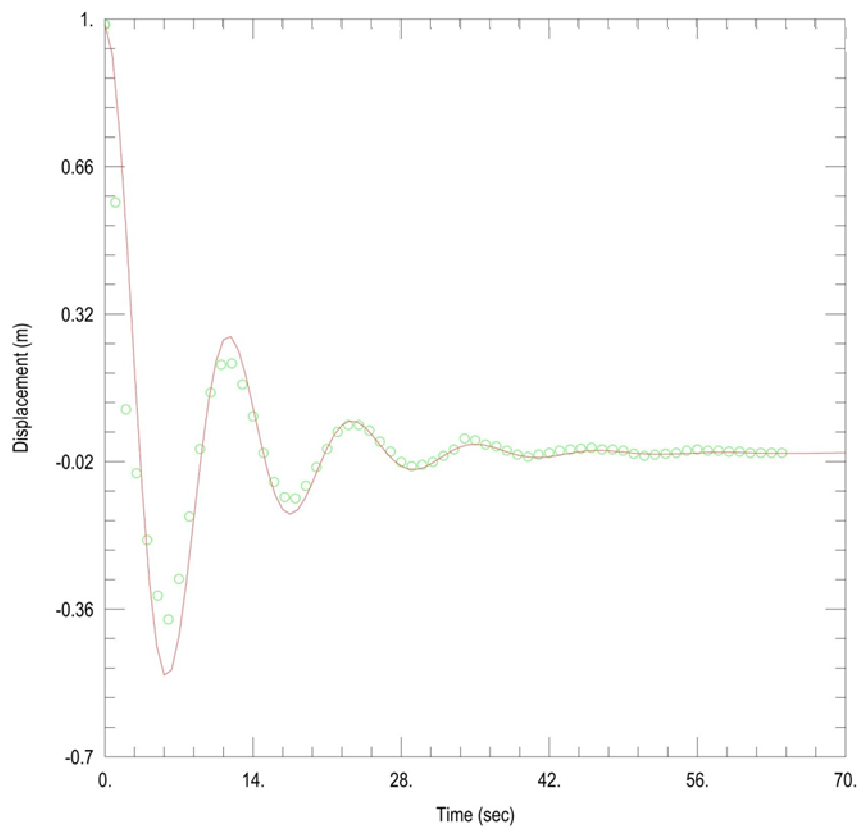
Il valore di conducibilità (K) desumibile dallo slug test risulta dalla migliore interpolazione della pendenza della curva di riassetamento.

Tramite software sono state, quindi, interpretate le curve di riassetamento del livello di falda.

In particolare per ottenere le curve di riassetamento di Pz1 e Pz2, Sinergeo ha utilizzato il metodo di Butler (1988). Si tratta di una soluzione matematica utile per determinare le proprietà idrauliche di acquiferi confinati con proprietà non uniformi. Tale soluzione assume che il pozzo di pompaggio sia collocato al centro di un disco inserito all'interno di una matrice infinita. Si assume che le proprietà idrauliche siano uniformi all'interno di ciascuna zona (disco e matrice), ma potrebbero variare fra le due zone. (<http://www.aqtesolv.com>).

I presupposti per l'applicazione del metodo di Butler sono i seguenti:

- l'acquifero ha estensione areale infinita
 - l'acquifero è eterogeneo con un disco inserito all'interno di una matrice
 - il pozzetto di controllo è interamente penetrante
 - il flusso del pozzetto di controllo è orizzontale
 - l'acquifero è confinato
 - il flusso è instabile
 - l'acqua è rilasciata istantaneamente dall'immagazzinamento con una diminuzione del carico idraulico
 - il diametro del pozzetto di controllo è molto piccolo cosicché l'immagazzinamento nel pozzo può essere trascurato.
- (<http://www.aqtesolv.com>).



SOLUTION

Aquifer Model: Confined
 Solution Method: Butler

K = 0.0001974 m/sec Le = 32.43 m

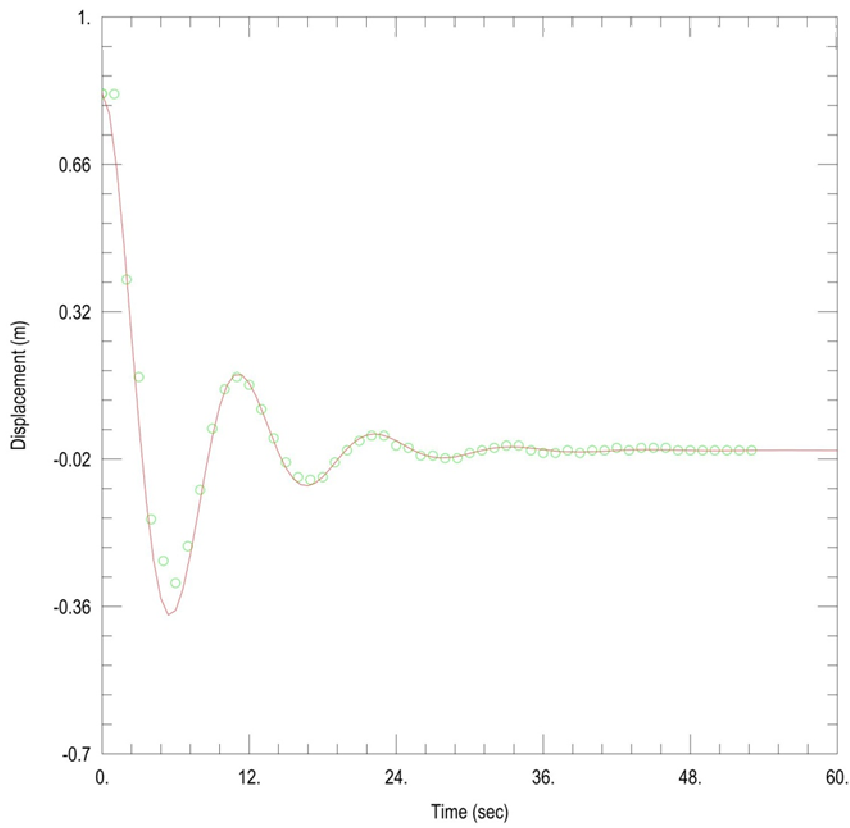
AQUIFER DATA

Saturated Thickness: 15.1 m Anisotropy Ratio (Kz/Kr): 1.

WELL DATA (Pz1)

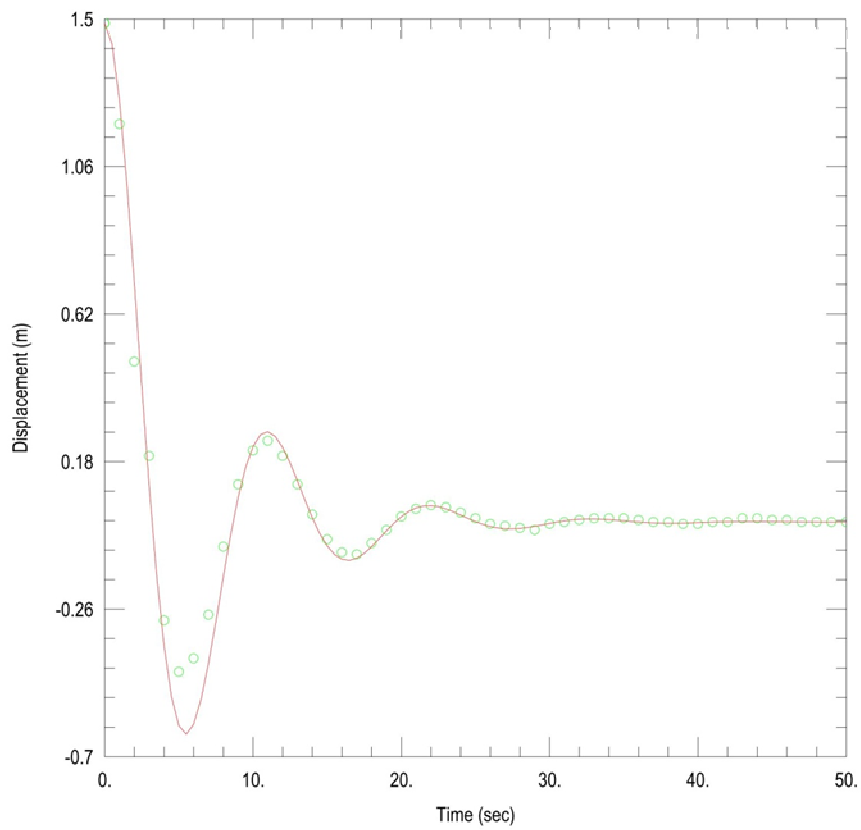
Initial Displacement: 0.987 m
 Static Water Column Height: 40.94 m
 Total Well Penetration Depth: 15.1 m
 Screen Length: 14.4 m
 Casing Radius: 0.0254 m
 Well Radius: 0.0635 m

Figura 64: Slug Test n°1 in Pz1 effettuato il 19 Gennaio 2011 (Sinergeo)



SOLUTION	AQUIFER DATA
Aquifer Model: Confined	Saturated Thickness: <u>22.3</u> m Anisotropy Ratio (Kz/Kr): <u>1</u> .
Solution Method: Butler	
K = <u>0.0001327</u> m/sec	<u>WELL DATA (Pz2)</u>
Le = <u>28.95</u> m	Initial Displacement: <u>0.823</u> m
	Static Water Column Height: <u>48.55</u> m
	Total Well Penetration Depth: <u>20.3</u> m
	Screen Length: <u>20.3</u> m
	Casing Radius: <u>0.0254</u> m
	Well Radius: <u>0.0635</u> m

Figura 65: Slug Test n°1 in Pz2 effettuato il 19 Gennaio 2011 (Sinergeo)



SOLUTION	AQUIFER DATA
Aquifer Model: <u>Confined</u> Solution Method: <u>Butler</u> K = <u>0.0001226</u> m/sec Le = <u>27.64</u> m	Saturated Thickness: <u>22.3</u> m Anisotropy Ratio (Kz/Kr): <u>1.</u> <b style="text-align: center;">WELL DATA (Pz2) Initial Displacement: <u>1.487</u> m Static Water Column Height: <u>48.55</u> m Total Well Penetration Depth: <u>20.3</u> m Screen Length: <u>20.3</u> m Casing Radius: <u>0.0254</u> m Well Radius: <u>0.0635</u> m

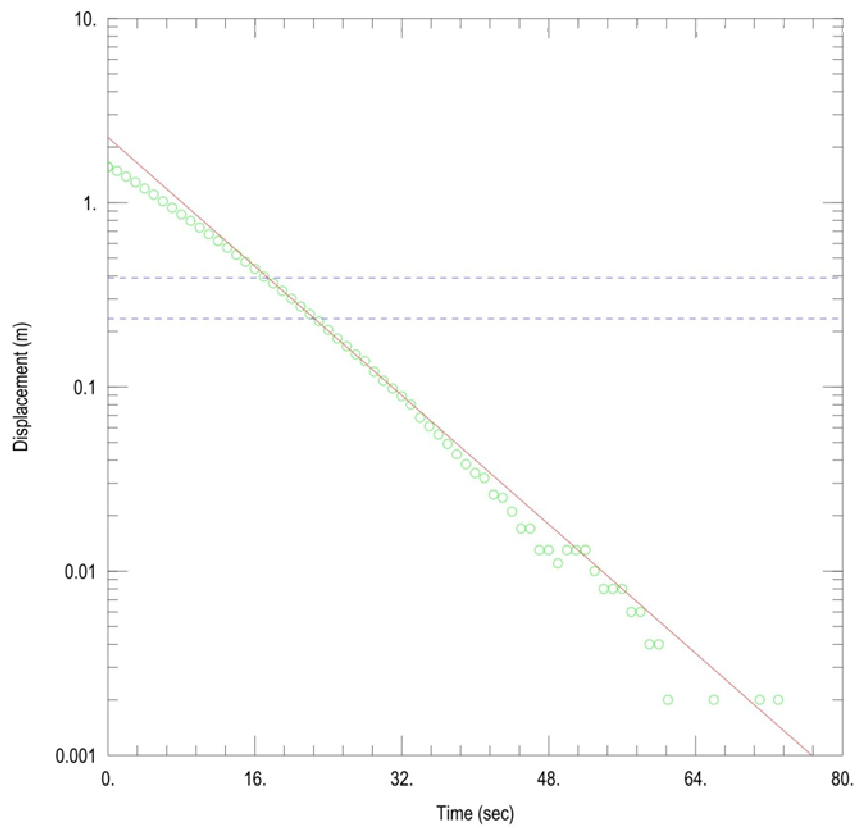
Figura 66: Slug Test n°2 in Pz2 effettuato il 19 Gennaio 2011 (Sinergeo)

Per ottenere invece le curve degli slug test effettuati in Pz3 Sinergeo ha preferito utilizzare il metodo di Hvorslev (1951). Anche in questo caso si tratta di una soluzione matematica utile per la determinazione della conducibilità idraulica di acquiferi confinati senza perdite. I dati di spostamento del livello dell'acqua raccolti durante lo slug test sono disposti lungo una linea retta. (<http://www.aqtesolv.com>).

All'utilizzo del metodo di soluzione Hvorslev si applicano le seguenti assunzioni:

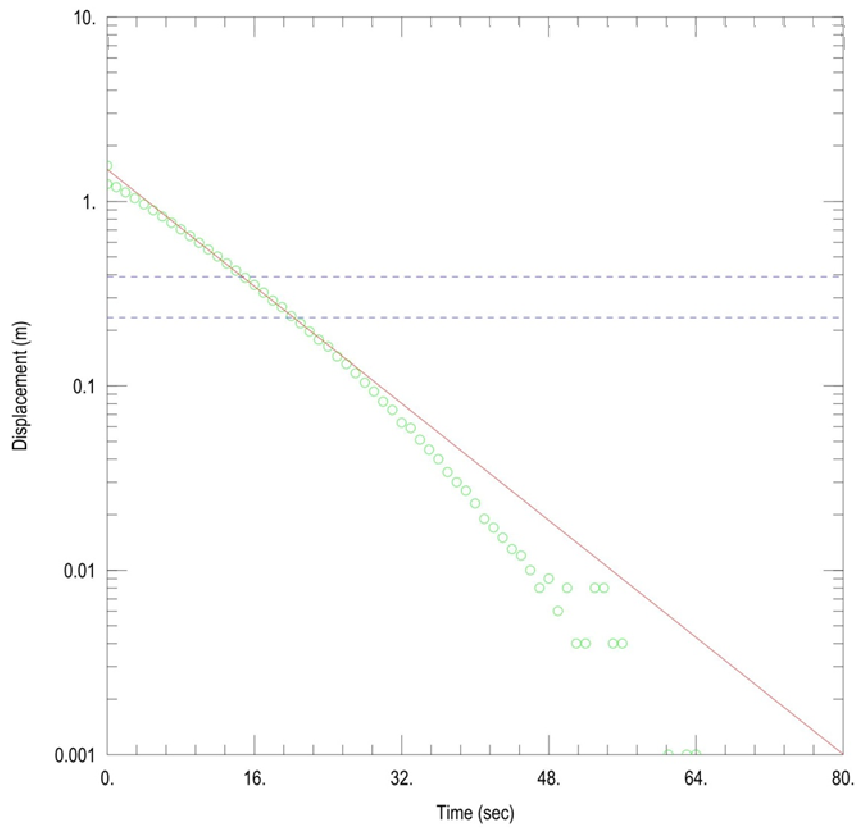
- l'acquifero ha estensione areale infinita
- l'acquifero è omogeneo e di spessore uniforme
- la superficie piezometrica dell'acquifero è inizialmente orizzontale
- il pozzetto di controllo è interamente o parzialmente penetrante
- un volume d'acqua viene iniettato o scaricato istantaneamente dal pozzetto di controllo
- l'acquifero è confinato e senza perdite
- il flusso è stabile.

(<http://www.aqtesolv.com>).



SOLUTION	AQUIFER DATA
Aquifer Model: <u>Confined</u> Solution Method: <u>Hvorslev</u> K = <u>1.156E-5</u> m/sec y0 = <u>2.261</u> m	Saturated Thickness: <u>18.3</u> m Anisotropy Ratio (Kz/Kr): <u>1</u> . <b style="text-align: center;">WELL DATA (Pz3) Initial Displacement: <u>1.562</u> m Static Water Column Height: <u>45.05</u> m Total Well Penetration Depth: <u>17.8</u> m Screen Length: <u>17.8</u> m Casing Radius: <u>0.0254</u> m Well Radius: <u>0.0635</u> m

Figura 67: Slug Test n°1 in Pz3 effettuato il 19 Gennaio 2011 (Sinergeo)



SOLUTION	AQUIFER DATA
Aquifer Model: Confined Solution Method: Hvorslev K = $1.047E-5$ m/sec $y_0 = 1.491$ m	Saturated Thickness: <u>18.3</u> m Anisotropy Ratio (Kz/Kr): <u>1</u> <u>WELL DATA (Pz3)</u> Initial Displacement: <u>1.562</u> m Static Water Column Height: <u>45.05</u> m Total Well Penetration Depth: <u>17.8</u> m Screen Length: <u>17.8</u> m Casing Radius: <u>0.0254</u> m Well Radius: <u>0.0635</u> m

Figura 68: Slug Test n°2 in Pz3 effettuato il 19 Gennaio 2011 (Sinergeo)

Si può notare come le curve degli slug test su Pz1 in Piazza dei Signori e Pz2 in Piazza delle Erbe mostrino un marcato “rimbalzo” del livello di falda che si riassetta, mentre nella curva di Pz3 in Piazzetta Palladio il rimbalzo è meno marcato e il riassetamento risulta essere più rapido. Tale diversità di comportamento può essere dovuta a diversi fattori, come ad esempio ad un “errore umano”, cioè ad un difetto di costruzione-realizzazione del foro-piezometro; in tal caso vi sarebbe la presenza di un’interfaccia libera fra piezometro e acquifero che non permetterebbe un perfetto drenaggio. Ma tale differenza può essere dipesa anche da una variazione di conducibilità idraulica; infatti, se Pz1 e Pz2 intercettassero una zona dell’acquifero a diversa conducibilità rispetto a Pz3, ne conseguirebbe che il rapido riassetamento della curva di Pz3 sarebbe imputabile ad una maggior conducibilità dell’acquifero nel punto intercettato da tale piezometro.

Proprio per questo è bene ricordare che lo slug test fornisce una misura di K di tipo puntuale, di contorno al piezometro; pertanto è stato preso come significativo la K risultante dalla media aritmetica dei tre valori di ottenuti mediante gli slug test.

Tabella 8: Sondaggi e corrispettivi K medi

Sondaggio	K medio (m/s)
Pz1	$1.974 \cdot 10^{-4}$
Pz2	$1.276 \cdot 10^{-4}$
Pz3	$1.101 \cdot 10^{-5}$

Ne risulta perciò un K medio per l’acquifero confinato di circa $1,12 \cdot 10^{-4}$ m/s.

4.4.2.3 MONITORAGGIO LIVELLO DI FALDA E TEMPERATURA

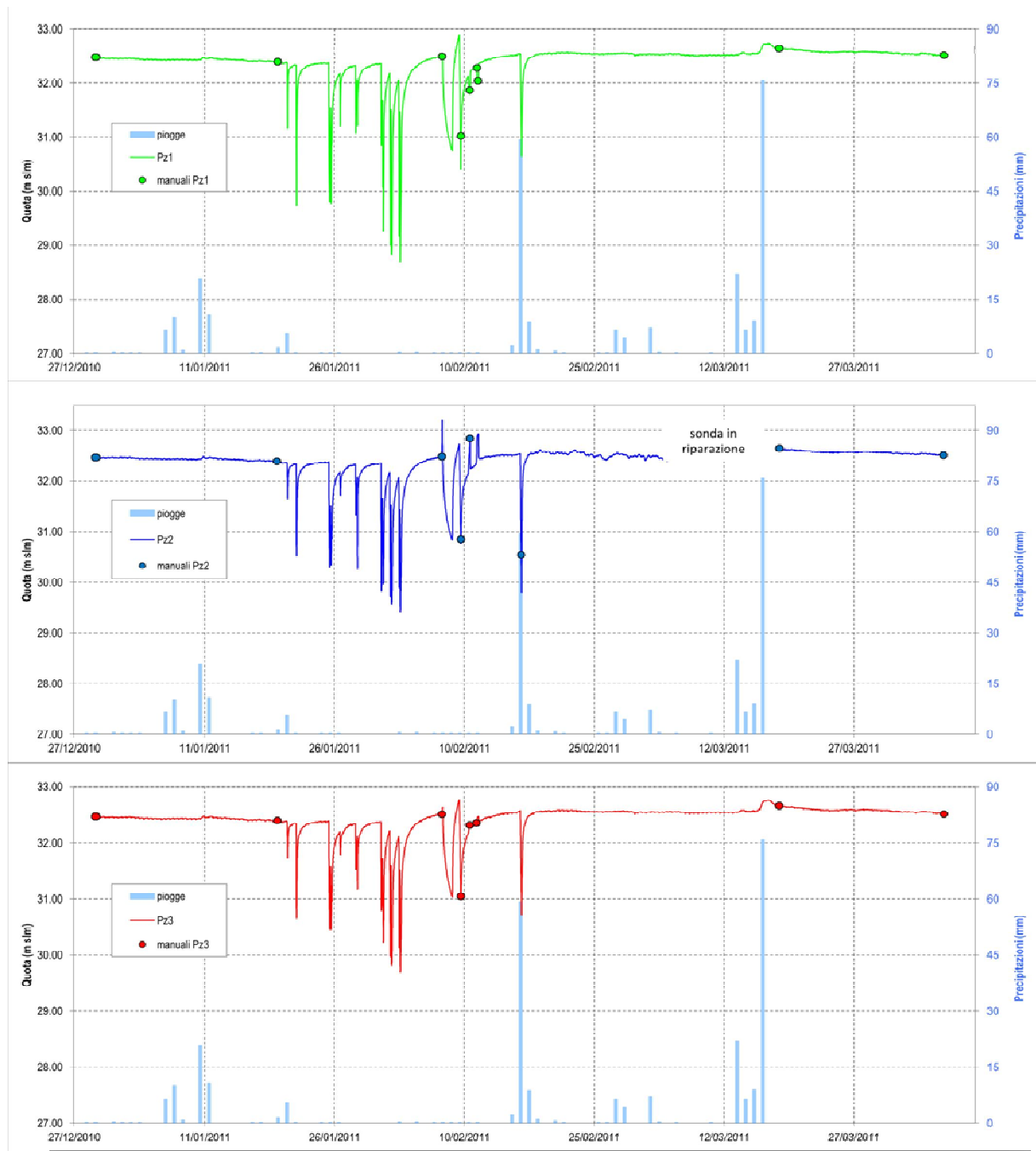


Figura 69: Monitoraggio del livello di falda del primo acquifero confinato presso i piezometri Pz1, Pz2, Pz3 nel periodo 29 Dicembre 2010 - 6 Aprile 2011 (Sinergeo). I dati pluviometrici inseriti provengono dalla stazione di misura dell'ARPAV di S. Agostino (Vicenza)

Dalla figura precedente si può notare l'andamento del livello di falda registrato in Pz1, Pz2 e Pz3. Tralasciando le considerevoli variazioni del livello, dovute al riassetto della falda,

durante il periodo in cui sono state effettuate le prove di pompaggio, si può notare come generalmente il livello di falda non sembra essere interessato dalle precipitazioni meteoriche stagionali. Questa può essere considerata una prova del fatto che l'acquifero si trova confinato, perlomeno a tetto, da un livello molto impermeabile, che pare non permettere l'infiltrazione delle acque provenienti dai settori più superficiali.

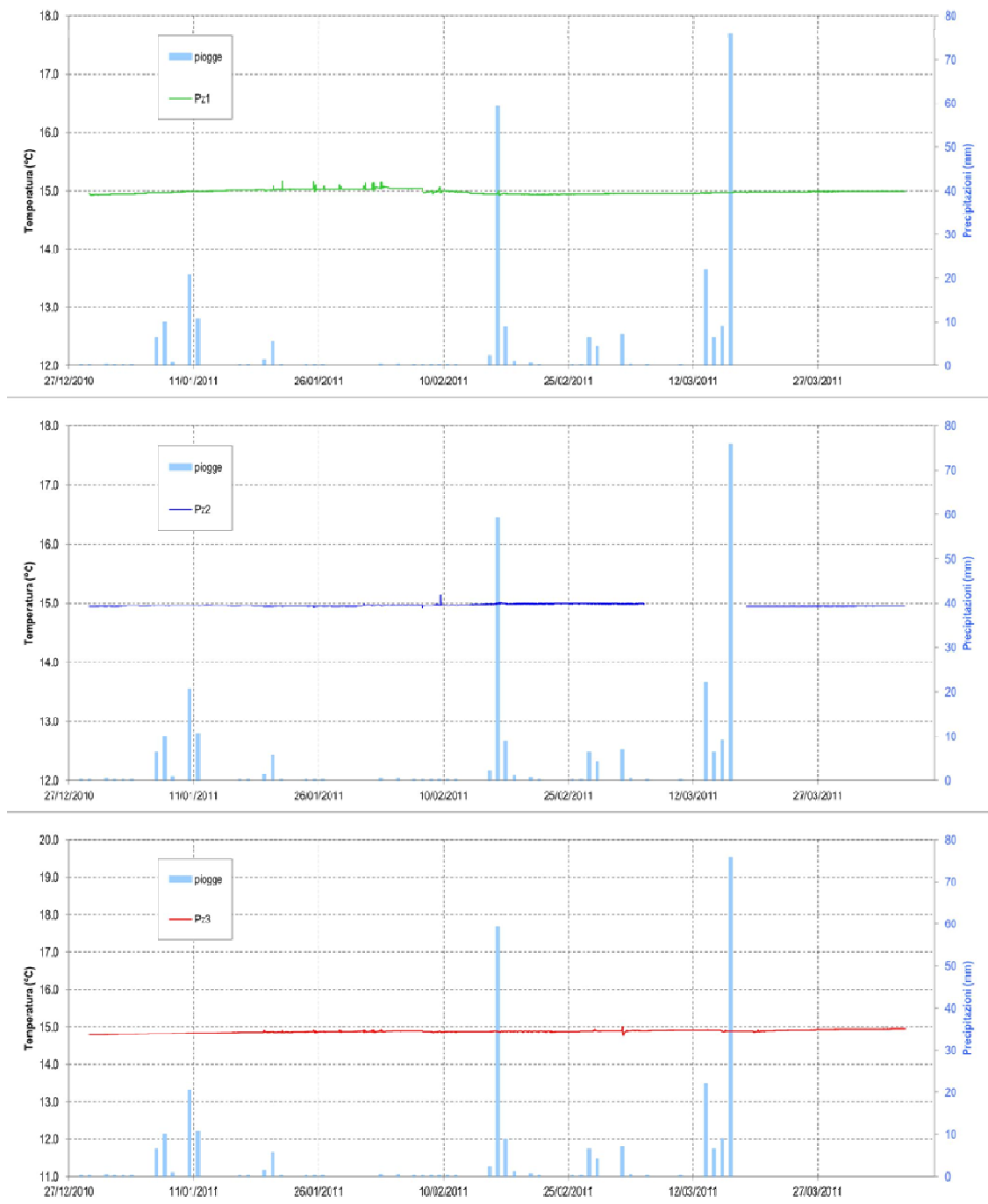


Figura 70: Monitoraggio della temperatura del primo acquifero confinato presso i piezometri Pz1, Pz2, Pz3 nel periodo 29 Dicembre 2010 - 6 Aprile 2011 (Sinergeo)

Dal monitoraggio sulla temperatura dell'acqua di falda, si può notare come la temperatura media dell'acqua si attesti su valori medi pari a 14.8 °C e sembra non risentire delle variazioni termiche indotte dalle precipitazioni meteoriche. Ciò è da imputarsi al fatto che l'acquifero è confinato e non si verificano apprezzabili fenomeni di infiltrazione di acqua proveniente da livelli più superficiali in grado di far variare la temperatura dell'acqua.

4.4.2.4 PUMP TEST

Grazie al Constant Rate Test (CRT) effettuato nel pozzo di produzione PE è stata possibile la determinazione della trasmissività idraulica (T) e del coefficiente di immagazzinamento (S) dell'acquifero confinato, che presenta uno spessore verticale medio di 20 metri.

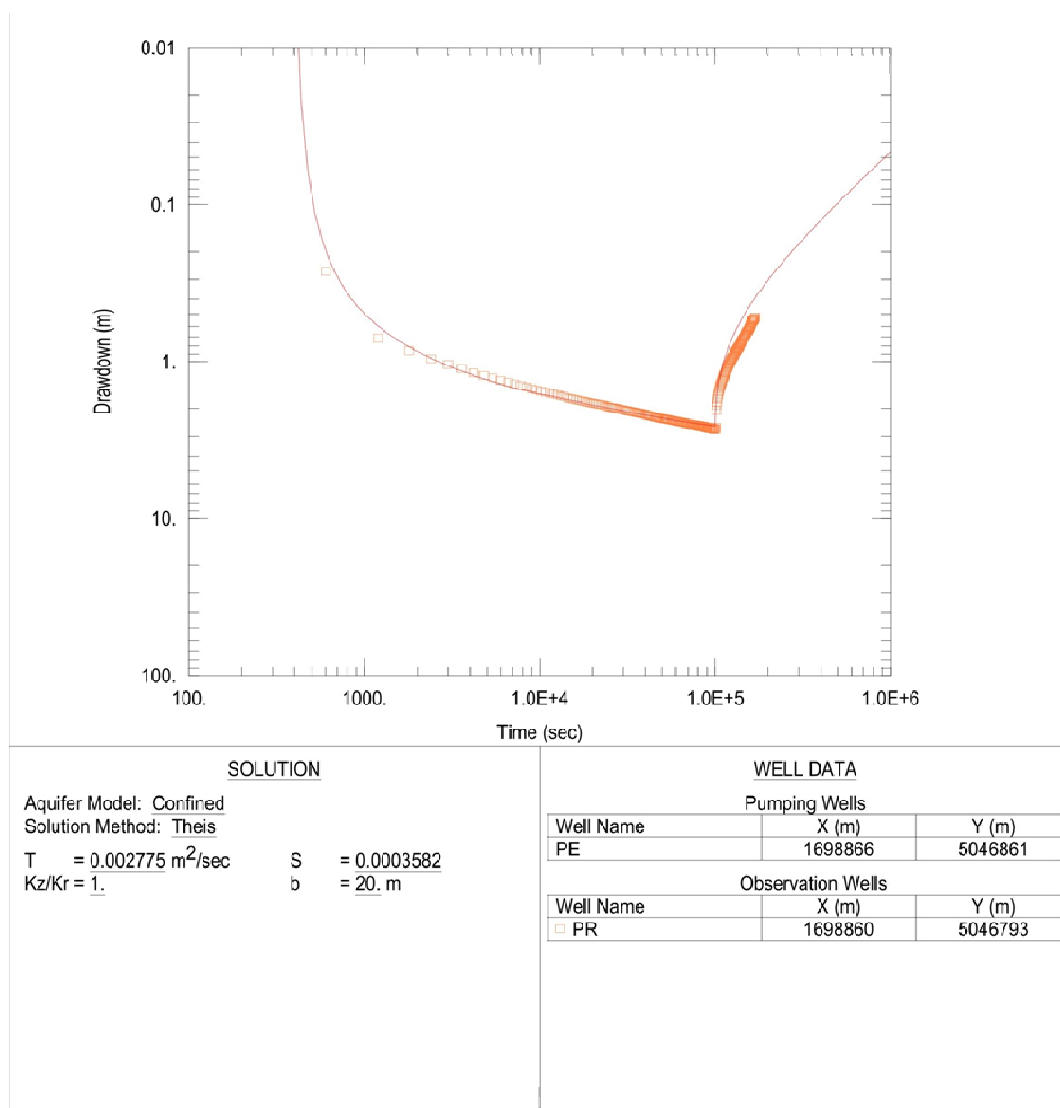


Figura 71: Pump Test nel periodo 07-11 Febbraio in PE visto da PR (Sinergo)

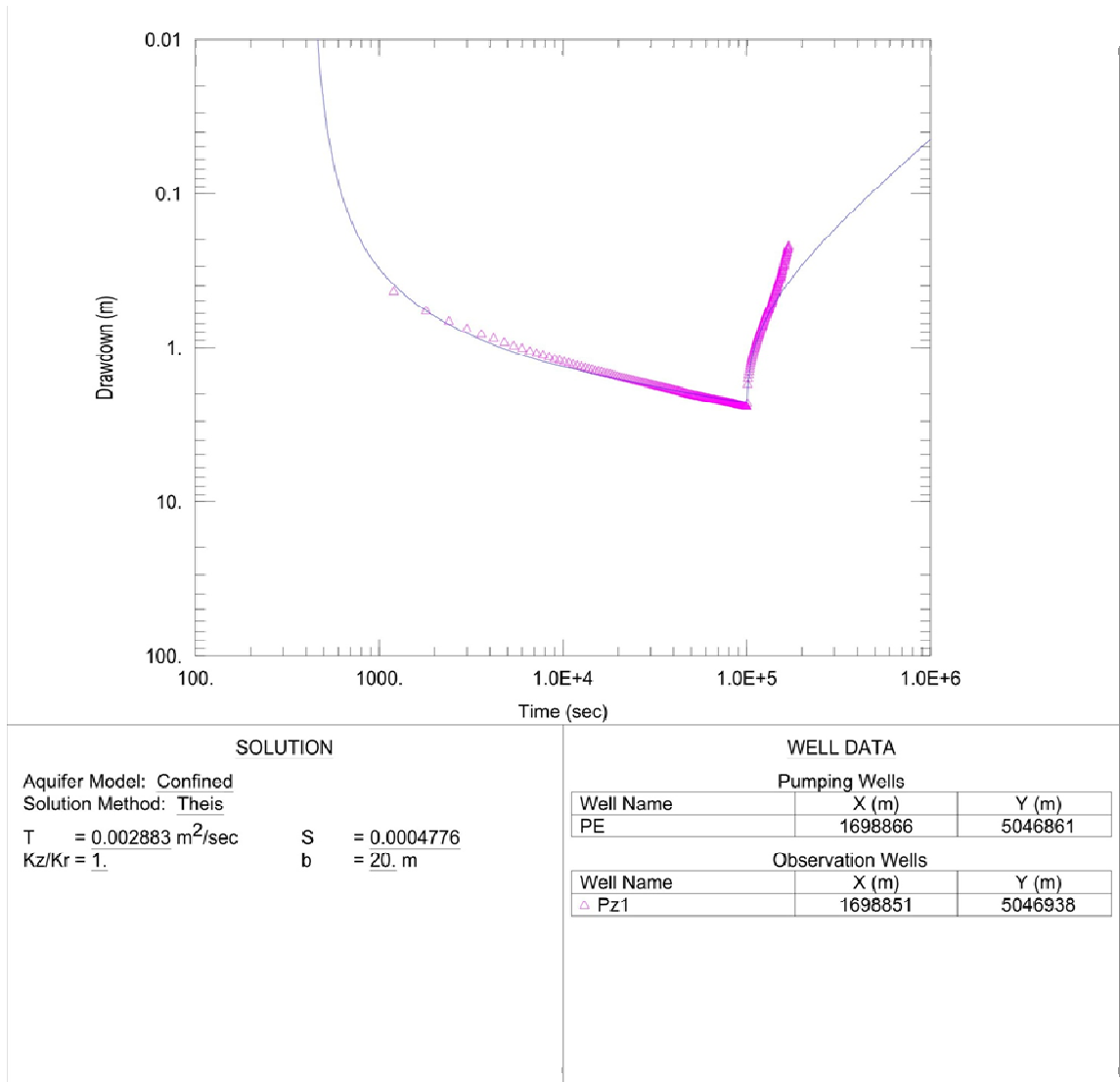
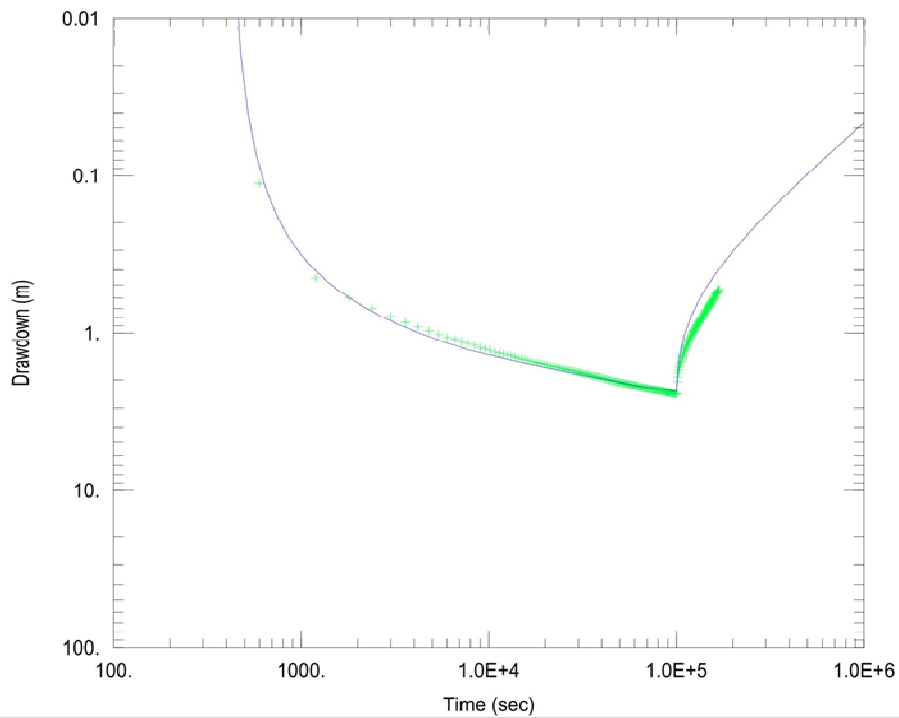
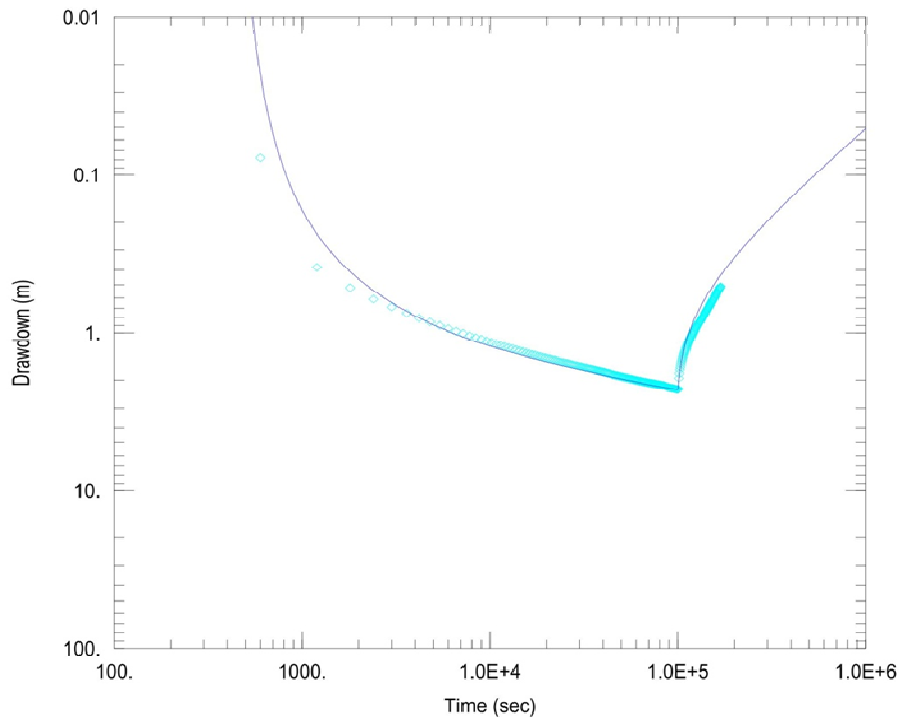


Figura 72: Pump Test nel periodo 07-11 Febbraio in PE visto da Pz1 (Sinergeo)



SOLUTION		WELL DATA		
Aquifer Model: Confined		Pumping Wells		
Solution Method: Theis		Well Name	X (m)	Y (m)
T = 0.002775 m ² /sec	S = 0.006699	PE	1698866	5046861
Kz/Kr = 1.	b = 20. m	Observation Wells		
		Well Name	X (m)	Y (m)
		+ Pz2	1698846	5046856

Figura 73: Pump Test nel periodo 07-11 Febbraio in PE visto da Pz2 (Sinergeo)



SOLUTION		WELL DATA		
Aquifer Model: Confined		Pumping Wells		
Solution Method: Theis		Well Name	X (m)	Y (m)
T = 0.002519 m ² /sec	S = 0.0009404	PE	1698866	5046861
Kz/Kr = 1.	b = 20. m	Observation Wells		
		Well Name	X (m)	Y (m)
		Pz3	1698794	5046856

Figura 74: Pump Test nel periodo 07-11 Febbraio in PE visto da Pz3 (Sinergeo)

Tabella 9: Parametri idraulici ricavati

Pozzo di pompaggio	Pozzo di osservazione	S	T [m ² /s]
PE	PR	3.582*10 ⁻⁴	2.775*10 ⁻³
PE	Pz1	4.776*10 ⁻⁴	2.883*10 ⁻³
PE	Pz2	6.699*10 ⁻³	2.775*10 ⁻³
PE	Pz3	9.404*10 ⁻⁴	2.519*10 ⁻³

Pertanto l'acquifero considerato è caratterizzato da valori medi di trasmissività idraulica e coefficiente di immagazzinamento pari a: $T = 2.738 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ e $S = 2.118 \cdot 10^{-3}$.

Vengono ora riportati i risultati dell'elaborazione realizzata da Sinergeo per quanto riguarda lo Step Drawdown Test effettuato sul pozzo di prelievo PE.

Pozzo: PE		Foglio N°: 1 / 1	
Data:	09-feb-11	Località:	Vicenza (VI)
Committente:	Comune di Vicenza		
Operatore:	L. Vettorello - S. Bertoldo	Acquisizione:	automatica e manuale
Diametro tubaz. (mm):	457	Profondità totale (m):	47.0
Acquifero:	confinato da 23 a 43 m	Spessore (m):	20
Litologia:	ghiaia sabbiosa		
Filtri:	da -27 a -43	Lunghezza totale (m):	16
Tipo filtri:	n.d.		
Anno di perforazione:	2010 Ditta Botti elio Sas (Adria - RO)		
Piano Riferimento:	(1) Bocca pozzo - (2) Trasduttore di pressione in pozzo		
Q.ta P.C. (m s.l.m.):	33	ΔH P.R. - P.C.:	0
		Q.ta P.R.:	33
		Det q.ta:	da CTR
T inizio:	9/2/11 10.38	T fine:	9/2/11 14.58
		Durata totale test:	4 h 30 m 00 s
ΔH P.R. 1/Hs (m):	2.130	Q.ta Hs:	30.87
		Campo del trasduttore di pressione (bar):	2.0
		Batente idraulico iniziale (ΔH Hs /P.R.2):	20.863

	T cumulato (sec)	Tempo cumulato			Q (l/s)	Note
		(ore)	(min)	(sec)		
Acquisizione automatica dei dati di livello di falda mediante:	169680	47	8	0	8.33	SDT 1° step
	173879	48	17	59	8.33	
1) Trasduttori di pressione f.s. 10-20-30 m, sensibilità 1-5 mm;	173980	48	18	0	17.16	SDT 2° step
2) Notebook Toughbook 18 per la registrazione/scarico dei dati;	177719	49	21	59	17.16	
3) Notebook Toughbook 18 per la registrazione/scarico dei dati;	177720	49	22	0	25.17	SDT 3° step
4) freatimetro centimetrato (50m);	181679	50	27	59	25.17	
STEP DI ACQUISIZIONE:	181680	50	28	0	3'.50	SDT 4° step
1 sec	185880	51	38	0	3'.50	fine prova
2 sec						
3 sec						
5 sec						
10 sec						
20 sec						
30 sec						
60 sec						
120 sec						
300 sec						
Portate di esercizio						
misure manuali dei volumi prelevati nell'unità di tempo, mediante cronometro digitale e contatore Woltmann						

Figura 75: Caratteristiche dello Step Drawdown Test effettuato nel pozzo PE il 9 Febbraio 2011 (Sinergeo)

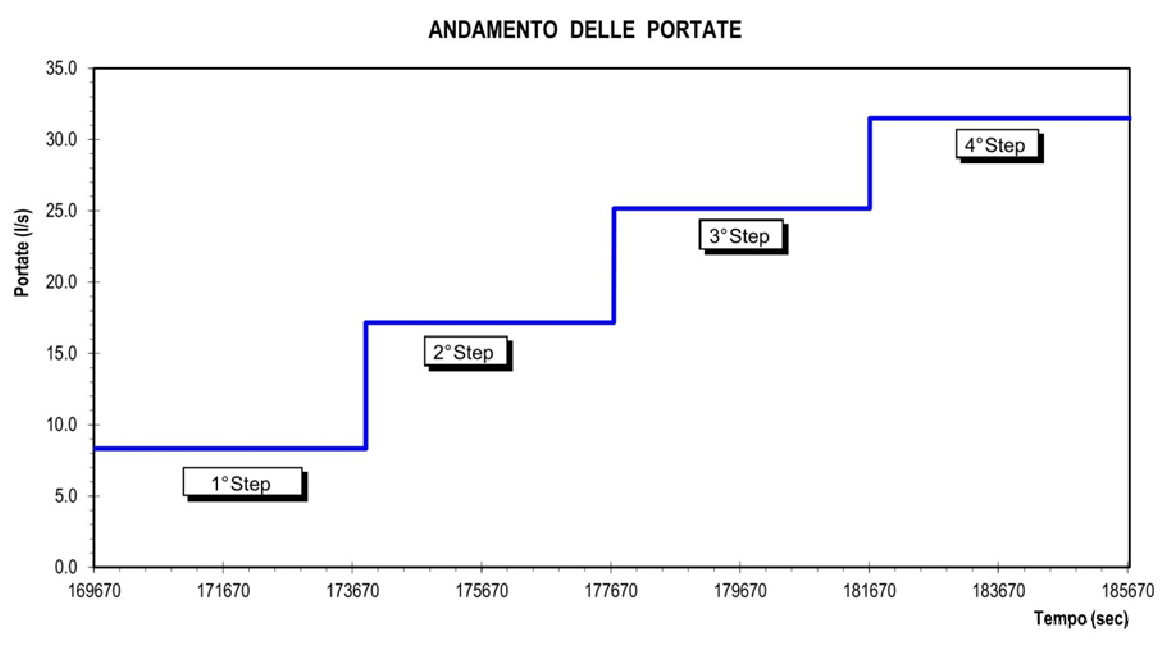
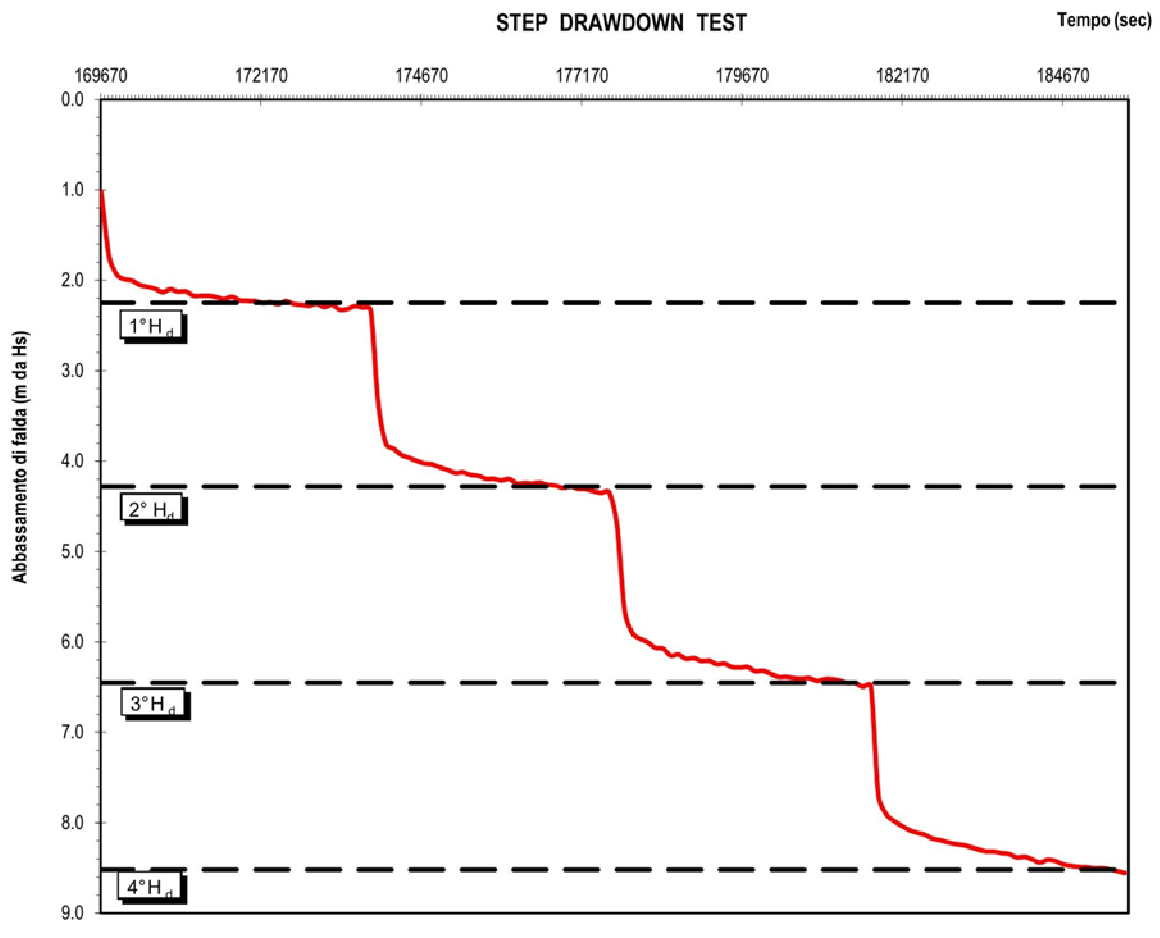


Figura 76: Visualizzazione grafica dello Step Drawdown Test effettuato nel pozzo PE il 9 Febbraio 2011 (Sinergeo)

Per poter calcolare la portata critica del pozzo PE, Sinergeo ha utilizzato il metodo di Jacob (1950).

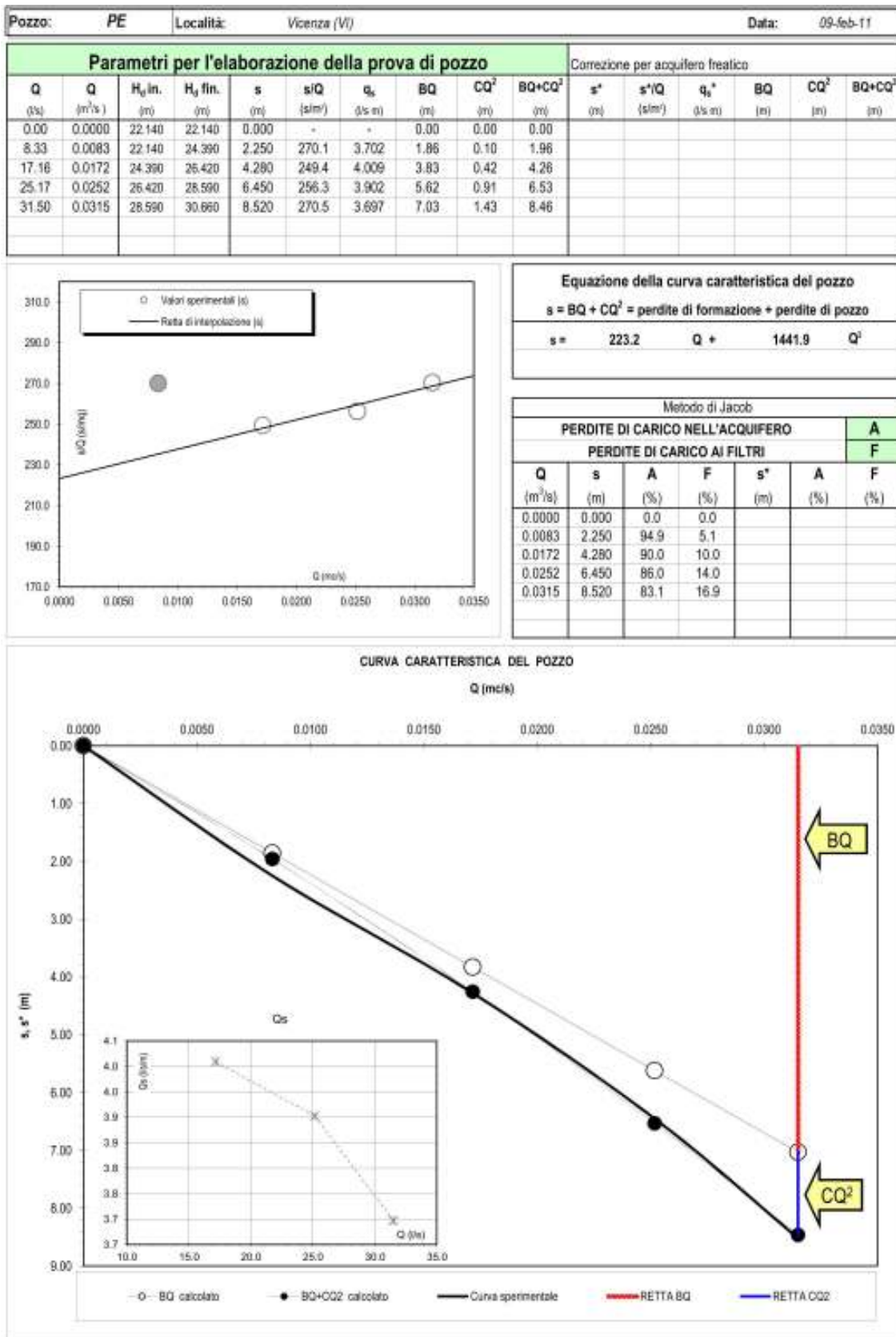


Figura 77: Applicazione del metodo di Jacob per l'interpretazione dello SDT effettuato nel pozzo di prelievo PE (Sinergeo)

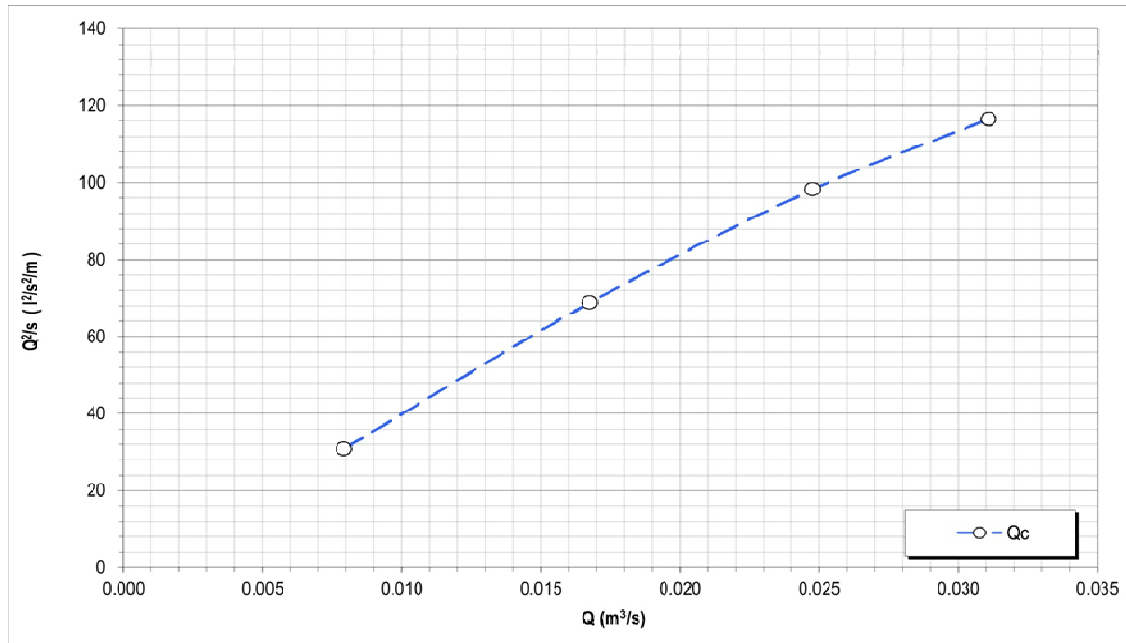


Figura 78: Determinazione grafica della portata critica del pozzo PE (Sinergo)

La portata critica (Q_c), raggiunta solo in fase di prova, serve ad indicare quale sarà la portata di utilizzo del pozzo, pari all'incirca a $2/3$ di Q_c . (Fileccia, 2009). Da determinazione grafica è possibile individuare un valore di portata critica di circa $0.031 \text{ m}^3/\text{s}$ (31 l/s), e pertanto la portata di esercizio sarà, in buona approssimazione, pari a $0.021 \text{ m}^3/\text{s}$ (21 l/s).

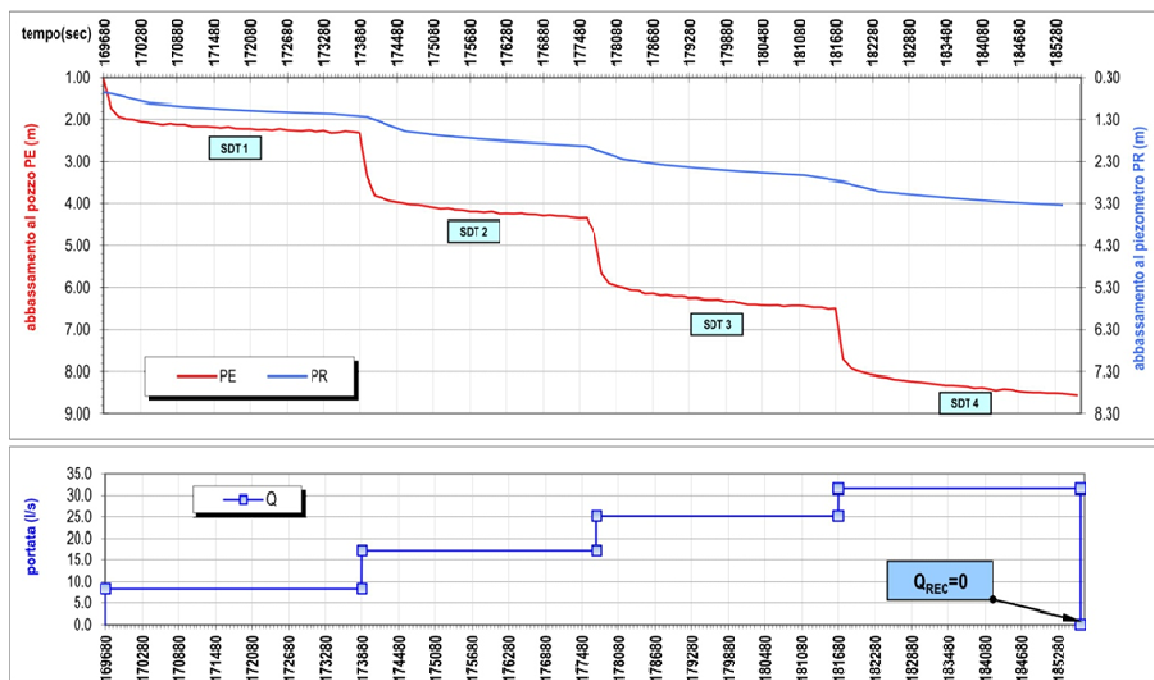


Figura 79: Correlazione tra portata di esercizio e livello di falda nel pozzo PE il 9 Febbraio 2011 (Sinergo)

Questi, invece, sono i dati dell'elaborazione effettuata da Sinergeo sul SDT realizzato nel pozzo PR.

Pozzo: PR		Foglio N°: 1 / 1	
Data: 16-feb-11	Località: Vicenza (VI)		
Committente: Comune di Vicenza			
Operatore: L. Vettorello	Acquisizione: automatica e manuale		
Diametro tubaz. (mm): 457	Profondità totale (m): 50,0		
Acquifero: confinato da 30 a 50 m	Spessore (m): 20		
Litologia: ghiaia sabbiosa			
Filtri: da -30.5 a -42.5	Lunghezza totale (m): 12		
Tipo filtri: n.d.			
Anno di perforazione: 2010 <i>Ditta Botti elio Sas (Adria - RO)</i>			
Piano Riferimento: (1) Bocca pozzo - (2) Trasduttore di pressione in pozzo			
Q.ta P.C. (m s.l.m.): 35,5	ΔH P.R. - P.C.: 0	Q.ta P.R.: 35,5	Det. q.ta: da CTR
T inizio: 16/2/11 11.25	T fine: 16/2/11 15.45	Durata totale test: 4 h 20 m 00 s	
ΔH P.R. 1/Hs (m): 5,410	Q.ta Hs: 30,09	Campo del trasduttore di pressione (bar): 2,0	
		Battente idraulico iniziale (ΔH Hs /P.R.2): 21,667	

	T cumulato (sec)	Tempo cumulato			Q (l/s)	Note
		(ore)	(min)	(sec)		
Acquisizione automatica dei dati di livello di falda mediante:	777600	216	0	0	6.83	SDT 1° step
	781200	217	0	0	6.83	
1) Trasduttori di pressione f.s. 10-20-30 m, sensibilità 1-5 mm;	781201	217	0	1	17.00	SDT 2° step
2) Notebook Toughbook 18 per la registrazione/scarico dei dati;	786000	218	20	0	17.00	
4) freatimetro centimetrato (50m);	786001	218	20	1	23.33	SDT 3° step
	789300	219	15	0	23.33	
STEP DI ACQUISIZIONE:	789301	219	15	1	30.66	SDT 4° step
1 sec	793466	220	24	26	30.66	fine prova
2 sec						
3 sec						
5 sec						
10 sec						
20 sec						
30 sec						
60 sec						
120 sec						
300 sec						
Portate di esercizio						
misure manuali dei volumi prelevati nell'unità di tempo, mediante cronometro digitale e contatore Woltmann						

Figura 80: Dati dello Step Drawdown Test effettuato nel pozzo PR il 16 Febbraio 2011 (Sinergeo)

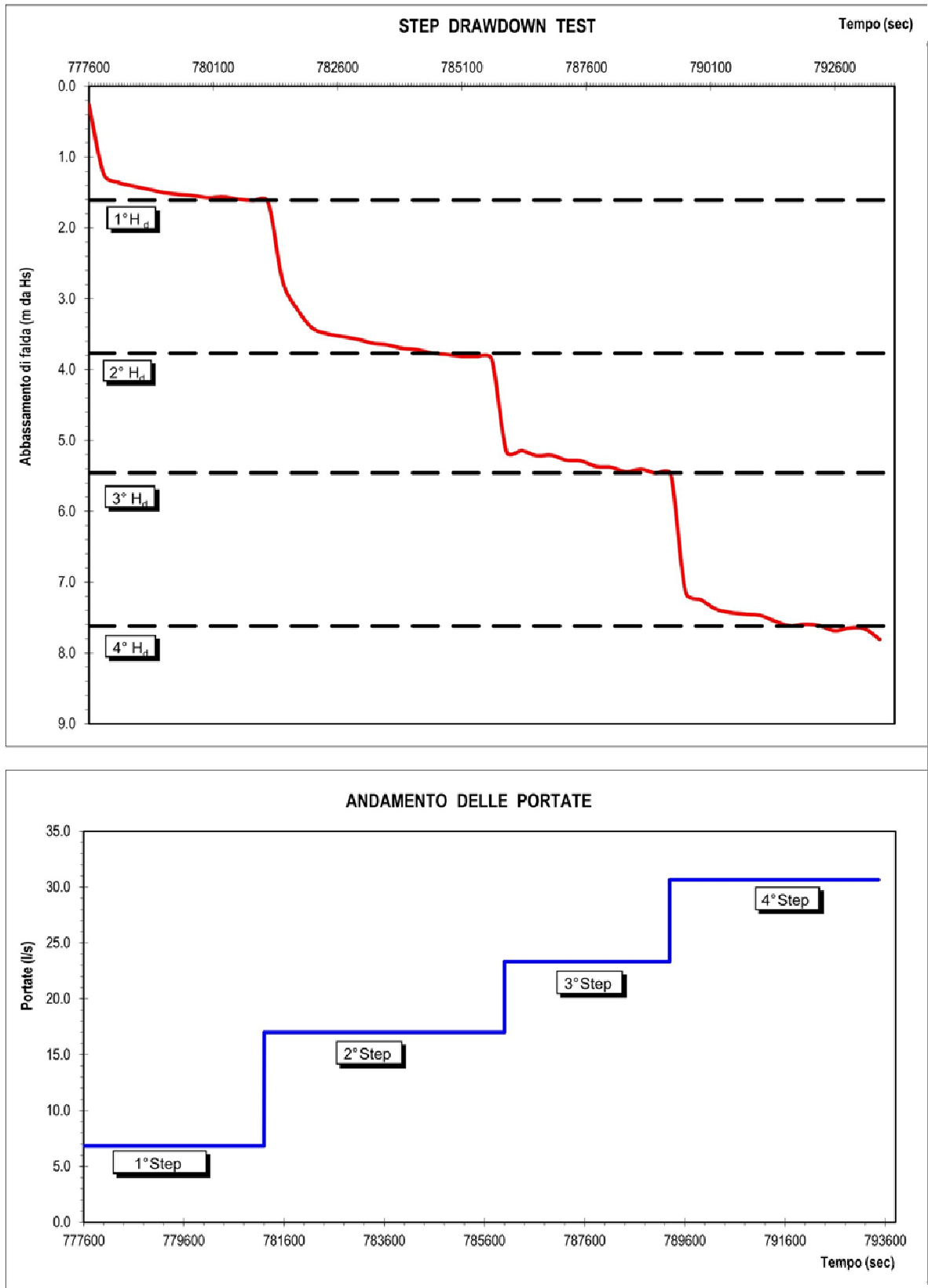


Figura 81: Visualizzazione grafica dello Step Drawdown Test effettuato nel pozzo PR il 16 Febbraio 2011 (Sinergeo)

Anche per l'interpretazione dello Step Drawdown Test effettuato in PR Sinergeo ha utilizzato il metodo di Jacob (1950).

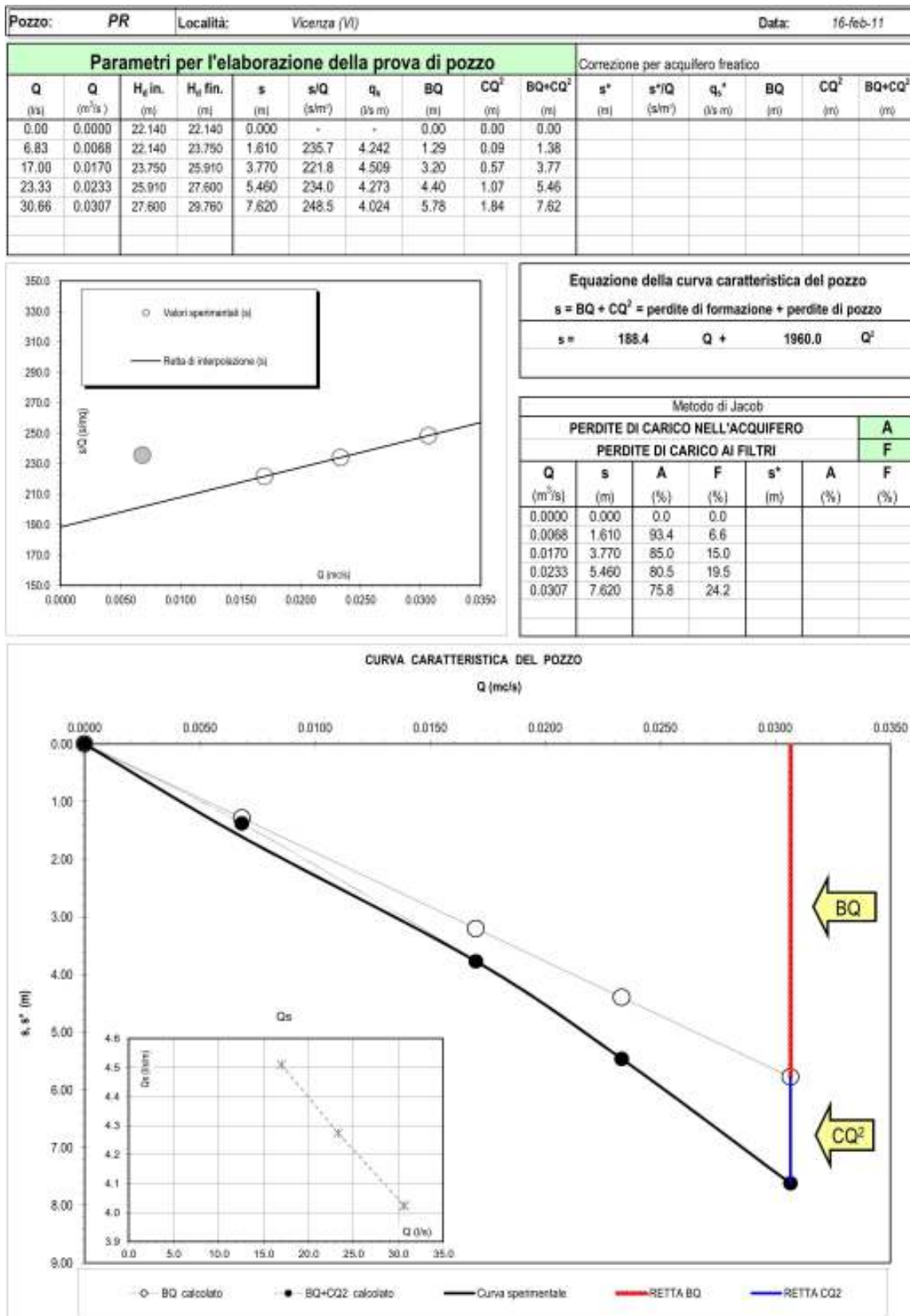


Figura 82: Applicazione del metodo di Jacob per l'interpretazione dello SDT effettuato nel pozzo PR (Sinergeo)

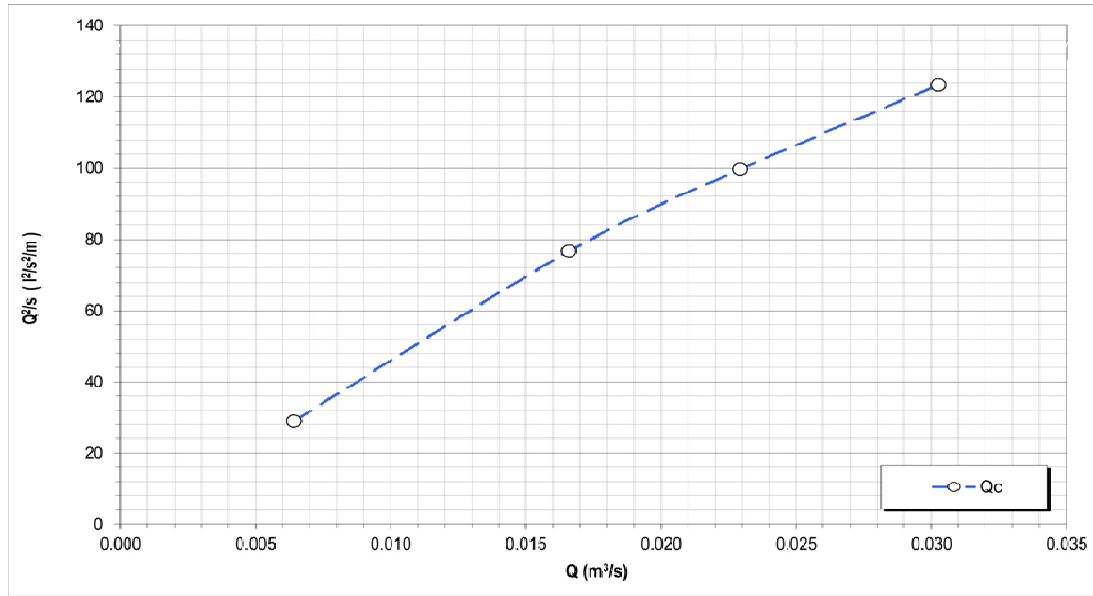


Figura 83: Determinazione grafica della portata critica del pozzo PR (Sinergeo)

Come si può notare dalla Figura 85 anche la portata critica del pozzo PR si attesta su valori di poco superiori a 0.031 m³/s (31 l/s), e pertanto la portata di esercizio sarà, in buona approssimazione, pari a 0.021 m³/s (21 l/s).

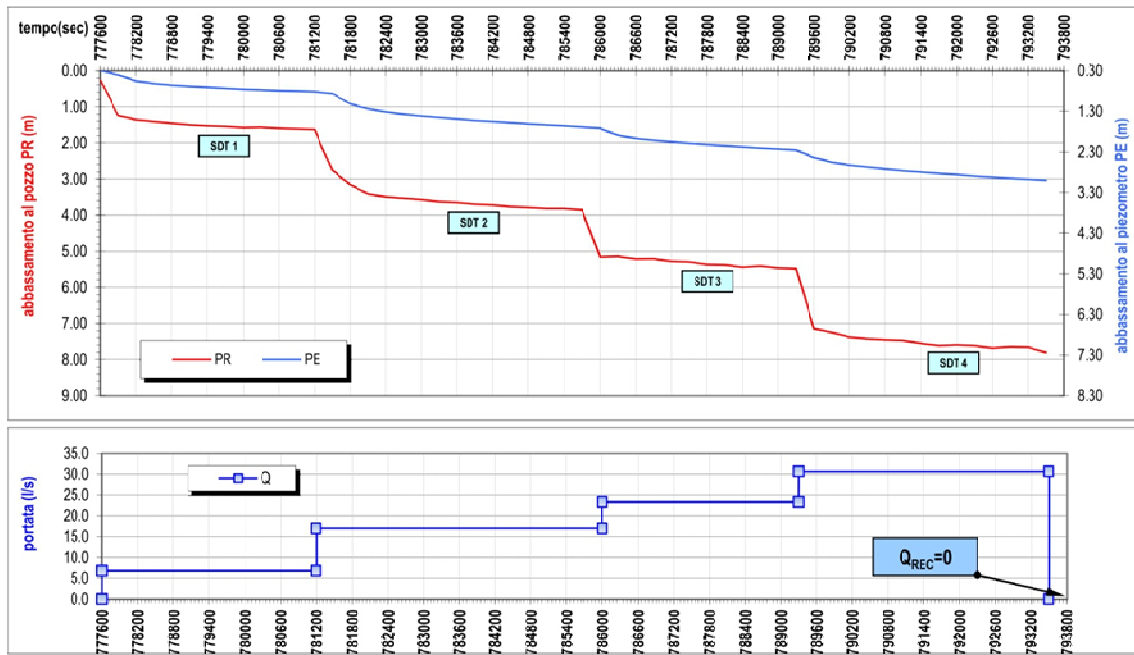


Figura 84: Correlazione tra portata di esercizio e livello di falda nei pozzi PE e PR il 16 Febbraio 2011 (Sinergeo)

Vengono, infine, presentati i grafici in cui si possono visualizzare gli abbassamenti in pozzo indotti dalla portata di esercizio utilizzata durante l'intero arco temporale in cui si sono svolte le prove di pompaggio e i relativi abbassamenti in pozzo indotti nei pozzi PE e PR e nei piezometri Pz1, Pz2 e Pz3 durante l'arco temporale in cui sono state effettuate le prove di pompaggio (Figura 85).

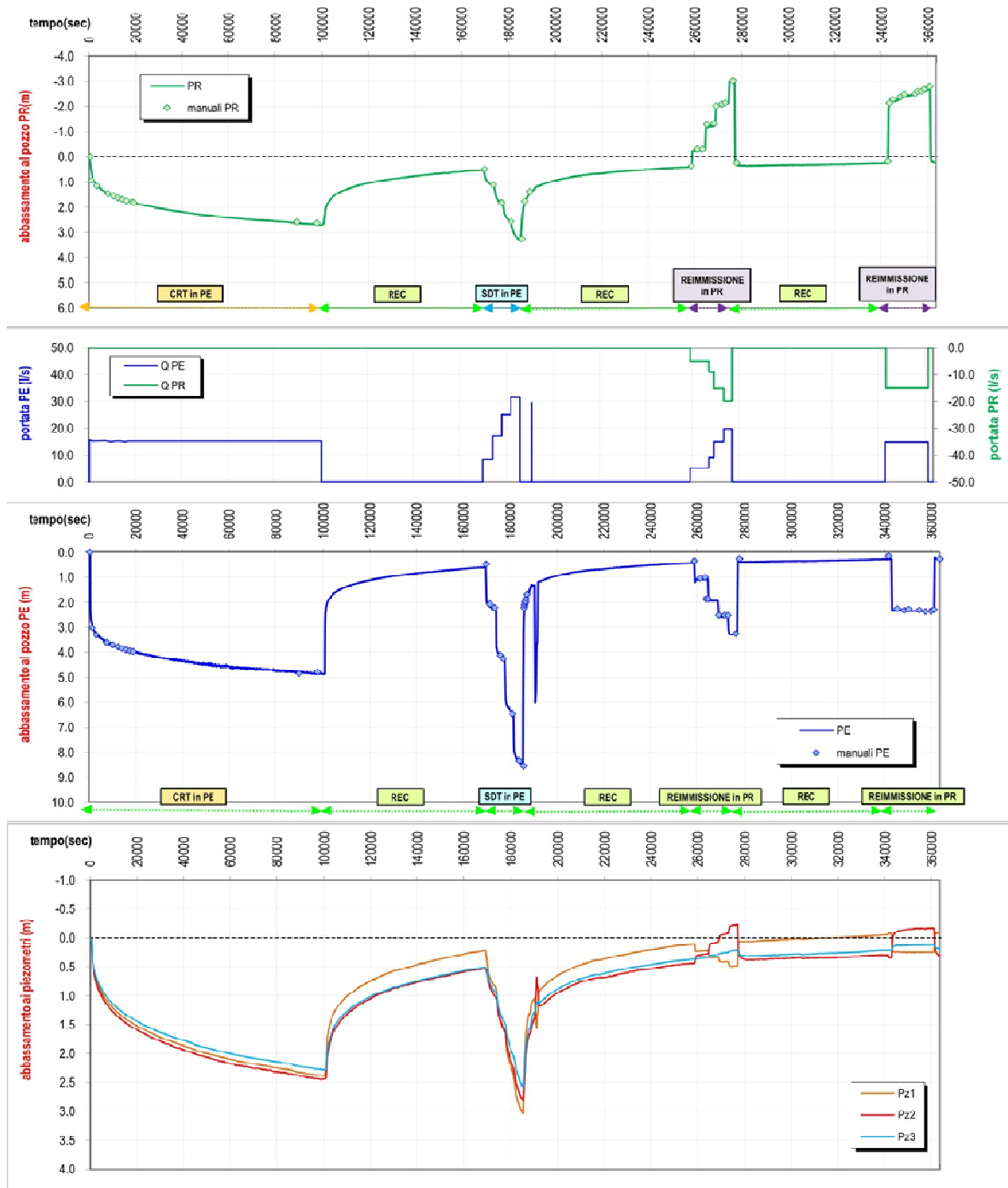


Figura 85: Correlazione tra portata di esercizio e livello di falda per il periodo 07-11 Febbraio 2011 (Sinergo)

CAPITOLO 5 : IL MODELLO NUMERICO

5.1 PREMESSE

Contestualmente alle prime fasi preparatorie all'implementazione del modello in Feflow, si è reso indispensabile ottenere informazioni riguardanti nello specifico l'impianto geotermico a servizio della Basilica Palladiana; è stata perciò contattata la società Tifs Manens s.p.a., progettista dell'impianto.

In pratica la soluzione tecnica prevede l'impiego di una pompa di calore reversibile ad acqua di falda per la generazione sia di acqua calda, per uso riscaldamento invernale, che di acqua refrigerata, per uso condizionamento estivo.

Tale soluzione prevede l'utilizzo di acqua di falda quale sorgente termica accoppiata ad un sistema pompa di calore. Tale sistema nella funzione invernale consente di estrarre calore dall'acqua emunta, restituendola più fredda, mentre nella stagione estiva l'acqua di falda agisce da dissipatore termico e subisce, quindi, un processo di riscaldamento per trasferimento termico nei condensatori delle pompe di calore funzionanti come refrigeratori e viene restituita ad una temperatura superiore, sempre nella medesima falda di prelievo.

La soluzione presenta anche il vantaggio di evitare la presenza locale di fonti di inquinamento da combustione di combustibile fossile, in quanto non necessita di caldaie per la generazione di acqua calda.

L'impianto geotermico ha previsto la realizzazione dei due pozzi: uno (PE) destinato al prelievo di acqua di falda, ubicato in corte dei Bissari (Figura 36), dove verranno alloggiati 2 pompe sommerse dotate di inverter (una di riserva al 100%) di portata massima pari a 88 m³/h (pari a 2112 m³ al giorno) a 5 bar (portata di picco estivo), e la seconda nel pozzo di restituzione (PR) destinato allo smaltimento (reimmissione).

Il prelievo di acqua di falda ed il conseguente consumo energetico risultano essere naturalmente proporzionali al fabbisogno energetico delle utenze ed al volume complessivo da climatizzare della Basilica, che si attesta intorno a 19.800 m³.

Tra i gruppi polivalenti ed il pozzo di emungimento è inserito un sistema di filtrazione generale dell'acqua di falda (sottocentrale di filtrazione), costituito da n° 4 filtri dissabbiatori a ciclone funzionanti in parallelo, di portata cadauno pari a circa 22 m³/h, per complessivi 88 m³/h e gestiti in cascata in funzione della quantità dell'acqua emunta, da un misuratore di portata elettronico che tramite l'impianto di supervisione ed elettrovalvole a due vie allo

scarico, potrà inserire in cascata e invertire l'inserimento ciclico dei filtri per consentirne un intasamento omogeneo.

A valle dei filtri saranno previsti n° 2 scambiatori di calore a piastre intermedi in acciaio inox AISI 304 della potenzialità cadauno di circa 700 kW (di cui uno di riserva totale), che consentono di evitare l'inquinamento della falda nell'eventualità seppur remota di rottura dei condensatori dei gruppi polivalenti.

La Tifs Manens s.p.a., inoltre, certifica che il gas frigorifero impiegato è un gas ecologico non tossico, compatibile ed in linea con quanto richiesto dai protocolli di salvaguardia dell'ambiente (R134a)

Una rete di tubazioni, in polietilene alta densità PN 16 per i tratti interrati e in AISI 304 per i tratti a vista nel piano interrato, collegherà i pozzi di emungimento e di reimmissione in falda, con le apparecchiature in sottocentrale (Tifs Manens s.p.a).

- ➔ Come già anticipato, il codice di calcolo utilizzato per la realizzazione del modello numerico è Feflow v. 6.0, le cui funzionalità sono state illustrate nel capitolo 3. Inoltre le operazioni di georeferenziazione e organizzazione dei dati sono state analizzate in ambiente Arcgis. Il problema affrontato riguarda un mezzo saturo in cui si ha flusso transitorio con trasporto di calore anch'esso in regime transitorio.

5.2 DOMINIO DI CALCOLO

Il dominio di calcolo è stato definito dapprima utilizzando ArcGis e successivamente è stato importato in Feflow. La prima operazione è stata recuperare la cartografia regionale in cui l'area di interesse è inserita. In particolare, la zona studiata cade al limite superiore della CTR 125071. Si è però scelto di ampliare l'area di indagine comprendendo anche la CTR 125032, al fine di individuare una superficie che fosse rappresentativa e sufficientemente estesa da contenere gli sviluppi della simulazione, e per delimitarla si è resa necessaria la definizione delle condizioni al contorno. A causa della mancanza di dati nell'intorno dell'area oggetto delle indagini di campagna, ci si è rivolti al Comune di Vicenza e all'Ufficio del Genio Civile della città per richiedere la carta delle isofreatiche del suolo cittadino, ma tale ricerca non è andata a buon fine. Per definire, quindi, i limiti dell'area si è eseguita un'interpolazione (polynomial regression) dei dati freaticometrici ottenuti dall'indagine di campagna effettuata in precedenza nei pressi della Basilica Palladiana utilizzando Surfer 8.0, in modo tale da poter assegnare i valori piezometrici ai limiti di potenziale imposto. Per questo le isofreatiche non possono essere considerate completamente affidabili e precise; infatti l'errore che apporterebbero ad uno studio di dettaglio, considerando le ridotte dimensioni, sarebbe significativo. Quindi si è deciso di impiegare lo stesso dominio utilizzato nello studio esistente dedicato all'analisi del sito di interesse. Sempre in ambiente gis sono stati poi creati alcuni shape files contenenti informazioni riguardanti: pozzi, piezometri, distribuzione delle isofreatiche.

Come si può vedere nella Figura 86, il dominio considerato è un rettangolo di lati 600x540 m, con un'area complessiva di 0,324 Km². La zona è delimitata dalle linee blu (a NW ed a SE) che definiscono i limiti di potenziale assegnato (Head in Feflow), e dalle linee rosse (a NE ed a SW) che corrispondono ai limiti di flusso (Flux in Feflow), cioè dove si assume che il flusso ad esse perpendicolare sia nullo. I limiti a potenziale imposto sono ricavati dalle linee equipotenziali sperimentali (isofreatiche) lungo i limiti evidenziati dalle linee blu.

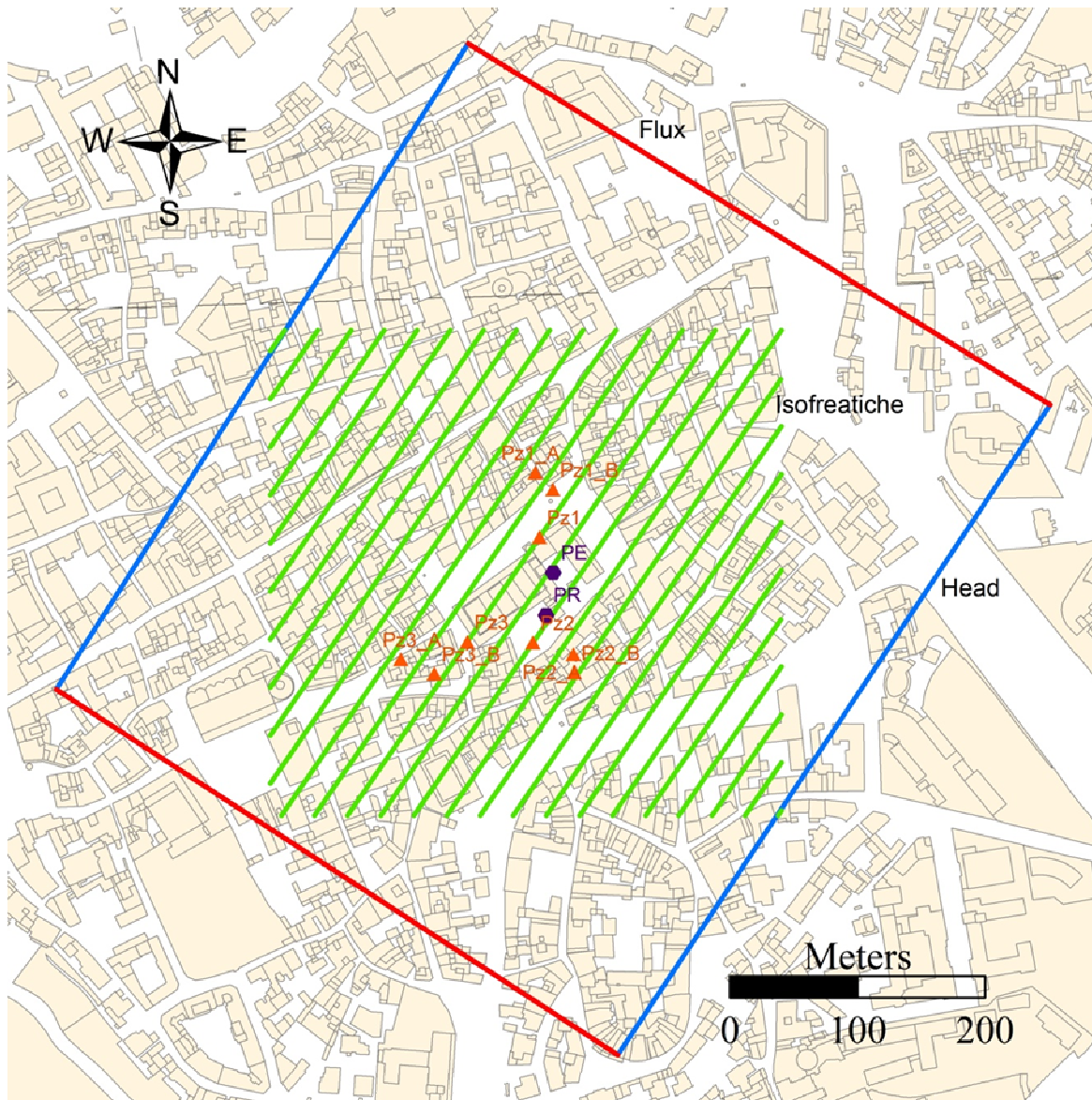


Figura 86: L'area oggetto della modellizzazione

L'area così definita è stata poi ampliata in tre dimensioni. A tal fine è stato creato un modello idrogeologico a partire dall'analisi delle stratigrafie desunte dai sondaggi effettuati nell'area di studio. Purtroppo, a causa della non disponibilità di informazioni stratigrafiche ed idrogeologiche riguardanti terebrazioni effettuate nelle zone prossime all'area di studio, non è stato possibile definire con maggior dettaglio le condizioni al contorno del modello. Al di là delle stratigrafie già citate, l'unica rinvenuta si colloca nel settore nord-occidentale dell'area individuata per la simulazione. Si è quindi considerata una continuità laterale delle condizioni rinvenute nei pozzi e nei piezometri eseguiti nell'ambito delle attività di realizzazione del sistema geotermico.

La stratigrafia riassuntiva realizzata e utilizzata nel modello è costituita dagli orizzonti che sono stati rinvenuti con maggiore frequenza nei diversi sondaggi e che ne definiscono le tipologie idrogeologiche.

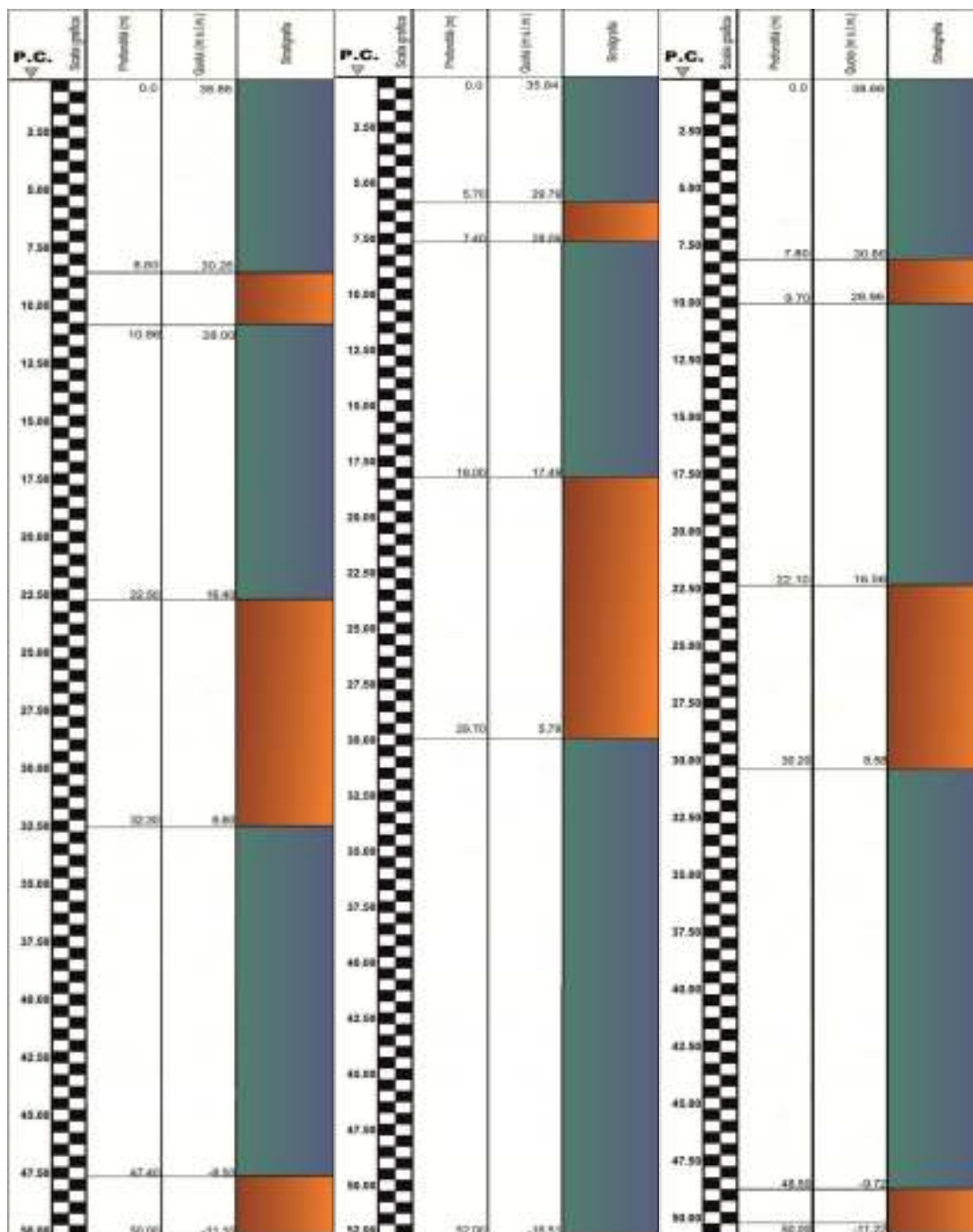


Figura 87: Stratigrafia desunta e usata nel modello

In particolare, come è riscontrabile nella Figura 87, i livelli di colore blu indicano strati formati prevalentemente di sabbia medio-grossa, a cui si aggiunge una componente ghiaiosa significativa man mano che la profondità aumenta; ad eccezione del primo livello più superficiale, tutti gli altri sono stati trattati come “acquiferi”. Invece gli strati di colore arancio sono formati dall’alternanza più o meno regolare di argilla e limo, che costituiscono gli intervalli impermeabili, “acquicludi”, che separano gli acquiferi suddetti. Si può notare che le due tipologie idrogeologiche presentano spessori diversi nei tre sondaggi, ma considerata la

loro composizione, la posizione stratigrafica che ciascun livello ricopre e la reciproca distanza in pianta, si può affermare con certezza che sono interconnessi.

Per riportare questa suddivisione del dominio nel modello di Feflow, è stato dapprima necessario selezionare il numero di piani (slice) che si desidera considerare e di conseguenza anche il numero di strati (layer). Si è scelto di considerare sette slice e sei layer. Ogni slice definisce la base (bottom) del layer sovrastante, ad eccezione della prima che corrisponde al piano campagna, mentre la settima definisce il limite inferiore dell'ultimo layer, a cui è stato assegnato un valore arbitrario, al fine di delimitare inferiormente il modello. Le slice 5 e 6 delimitano superiormente e inferiormente il V layer, che corrisponde all'acquifero confinato preso in esame.

Tabella 10: Due esempi di file .xls usati per definire il modello idrogeologico

Sondaggi	Slice	Descrizione	X	Y	quota p.c. m s.l.m.	profondità (m)
Pz1	1	top I° layer	1.698.850,72	5.046.938,12	38,86	0
Pz2	1	top I° layer	1.698.845,67	5.046.855,55	35,84	0
Pz3	1	top I° layer	1.698.794,23	5.046.856,13	38,66	0
Pz1_A	1	top I° layer	1.698.874,37	5.046.988,06	38,86	0
Pz1_B	1	top I° layer	1.698.861,23	5.046.975,43	38,86	0
Pz2_A	1	top I° layer	1.698.877,35	5.046.846,42	34,34	0
Pz2_B	1	top I° layer	1.698.877,89	5.046.832,03	34,34	0
Pz3_A	1	top I° layer	1.698.742,19	5.046.842,35	38,66	0
Pz3_B	1	top I° layer	1.698.768,49	5.046.831,13	38,66	0
Pozzi	Slice	Descrizione	X	Y	quota bottom m s.l.m.	profondità (m)
Pz1	2	bottom I° layer	1.698.850,72	5.046.938,12	30,26	8,6
Pz2	2	bottom I° layer	1.698.845,67	5.046.855,55	29,79	5,55
Pz3	2	bottom I° layer	1.698.794,23	5.046.856,13	30,86	7,8
Pz1_A	2	bottom I° layer	1.698.874,37	5.046.988,06	30,26	8,6
Pz1_B	2	bottom I° layer	1.698.861,23	5.046.975,43	30,26	8,6
Pz2_A	2	bottom I° layer	1.698.877,35	5.046.846,42	29,79	5,55
Pz2_B	2	bottom I° layer	1.698.877,89	5.046.832,03	29,79	5,55
Pz3_A	2	bottom I° layer	1.698.742,19	5.046.842,35	30,86	7,8
Pz3_B	2	bottom I° layer	1.698.768,49	5.046.831,13	30,86	7,8

Considerata la mancanza di dati stratigrafici e idrogeologici, ad eccezione dell'area circoscritta alla Basilica, è stato opportuno aggiungere delle informazioni stratigrafiche "fittizie" al contorno, in modo da estendere il dominio di indagine e permettere un più corretto funzionamento di Feflow in fase di modellazione. Infatti, come si può notare nella Tabella 10, è stata inserita una coppia di punti "fittizi" Pzn_A e Pzn_B per ogni sondaggio realmente effettuato (Pzn). Ciascun punto è caratterizzato da reali coordinate geografiche (X, Y), ma contiene l'informazione stratigrafica (quote, spessori, ecc.), e le relative proprietà idrogeologiche, propria del sondaggio a cui si riferisce.

È stato inoltre necessario specificare le caratteristiche idrogeologiche di ogni piano, considerando i primi due piani come freatici e l'ultimo come limite idrogeologico, mentre quelli intermedi sono lasciati indefiniti, funzione che permette un loro adattamento automatico durante la simulazione.

5.3 COSTRUZIONE DELLA MAGLIA DEL MODELLO

Allo scopo di creare una maglia adeguata è stato necessario delimitare l'area o le aree entro cui questa deve essere generata. Per fare ciò sono stati caricati gli elementi individuati e disegnati in Arcgis. In particolare è stato importato lo shape file che riproduce l'area della Basilica Palladiana, fornito da Sinergeo, i file .dat contenenti le informazioni relative al modello idrogeologico (slice e layer) e quelle relative ai due pozzi PE e PR. A questo punto è stata creata la griglia di calcolo utilizzando mesh triangolari "Triangle Delaunay", ciascuna caratterizzata da tre nodi ed un vincolo di 30° come minimo valore angolare. In questo modo si crea una maglia formata quasi interamente da triangoli equilateri, a parte in quelle zone in cui devono essere necessariamente deformati in modo da coprire tutta la superficie; inoltre si è scelta una opzione che impone al software di infittire automaticamente le mesh in vicinanza dei bordi.

5.4 CONDIZIONI AL CONTORNO

I dati relativi alle proprietà del sistema sono stati inseriti sia per il flusso sia per il trasporto di calore, indicando sia le condizioni iniziali (initials conditions) che le condizioni al contorno (boundary conditions). Le condizioni iniziali servono, come nel caso in esame, quando si procede a simulazioni che considerano un regime transitorio.

5.4.1 INPUT IDROGEOLOGICO

- CONDIZIONI INIZIALI: alla voce “Hydraulic Head” è stato impostato il valore di 32.457 m, ottenuto dalla media delle linee equipotenziali sperimentali precedentemente interpolate.
- CONDIZIONI AL CONTORNO: per prima cosa sono state inserite le quote piezometriche (condizioni del primo tipo “Head”) lungo le linee che delimitano la parte nord-ovest e sud-est del modello; a nord-ovest è impostato il valore di 32.52 m mentre per quello a sud-est 32.39 m. Questi valori sono stati copiati poi per tutte le 10 slice che compongono il dominio. Per rappresentare l’attività dei pozzi si è scelto di utilizzare la condizione al contorno del quarto tipo “Well”.

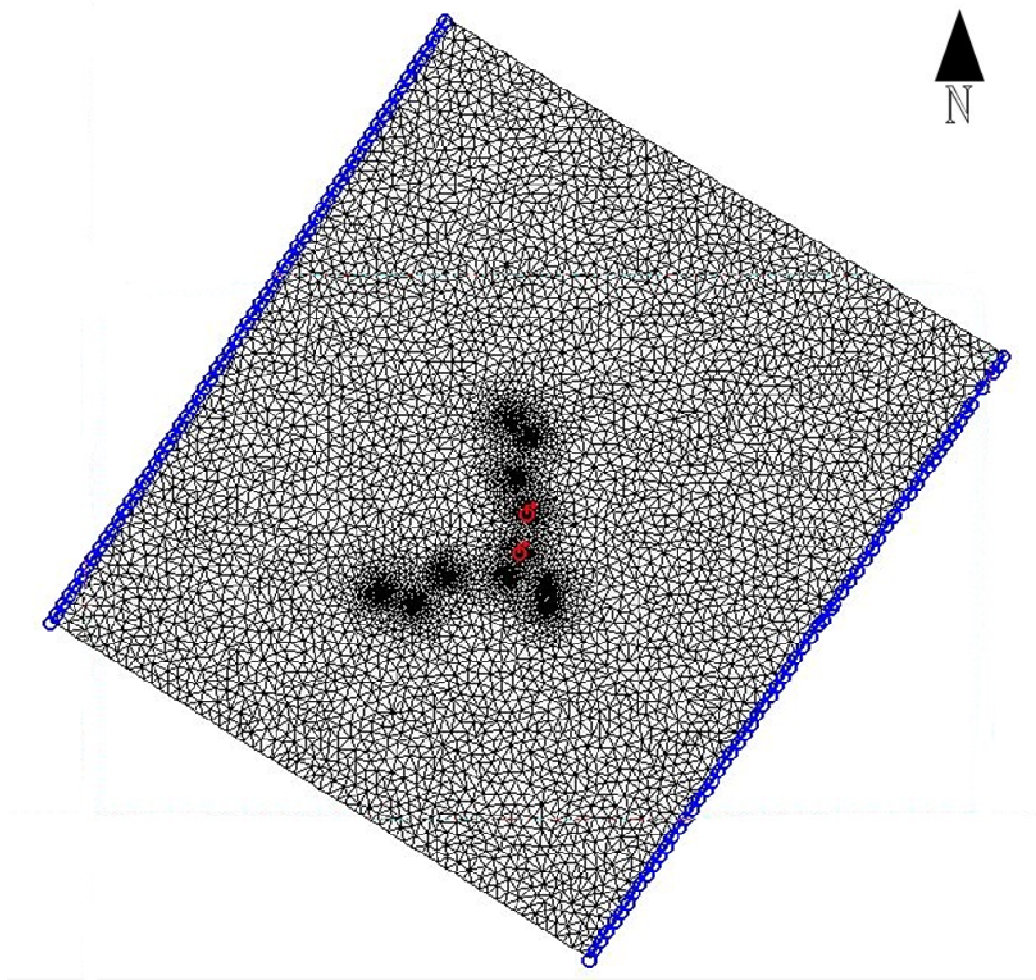
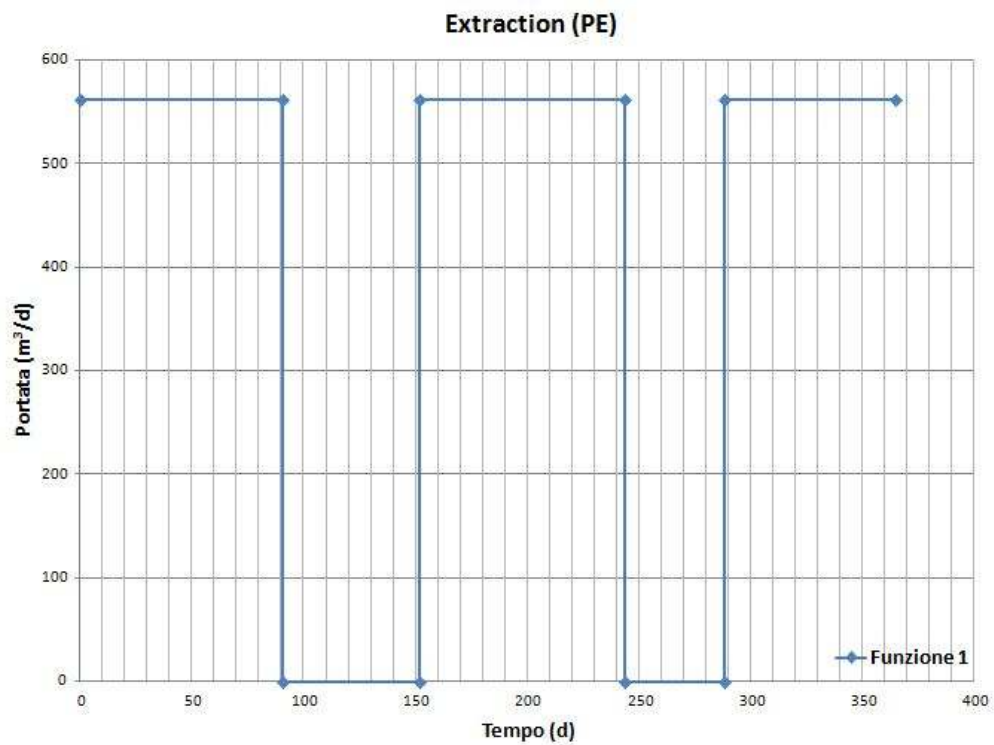


Figura 88: Condizioni al contorno del primo tipo (“Head”, in blu) e del quarto tipo (“Well”, in rosso) per il flusso

In particolare, dopo aver importato la supermesh contenente i dati relativi ai due pozzi, tramite il comando multi-well è stato possibile assegnare a ciascuno di essi i valori di portata, contraddistinte da valori positivi per PE (flusso in uscita dal sistema) e valori negativi per PR (flusso in entrata); sono stati quindi specificati il top e il bottom screen dei pozzi inserendo le quote delle slice 5 e 6, che delimitano l'acquifero preso in esame nel modello idrogeologico.

Si è scelto quindi di riprodurre il comportamento dei pozzi costruendo delle funzioni tempo – portata, espressi rispettivamente in giorni (days) e m^3 al giorno (m^3/d).



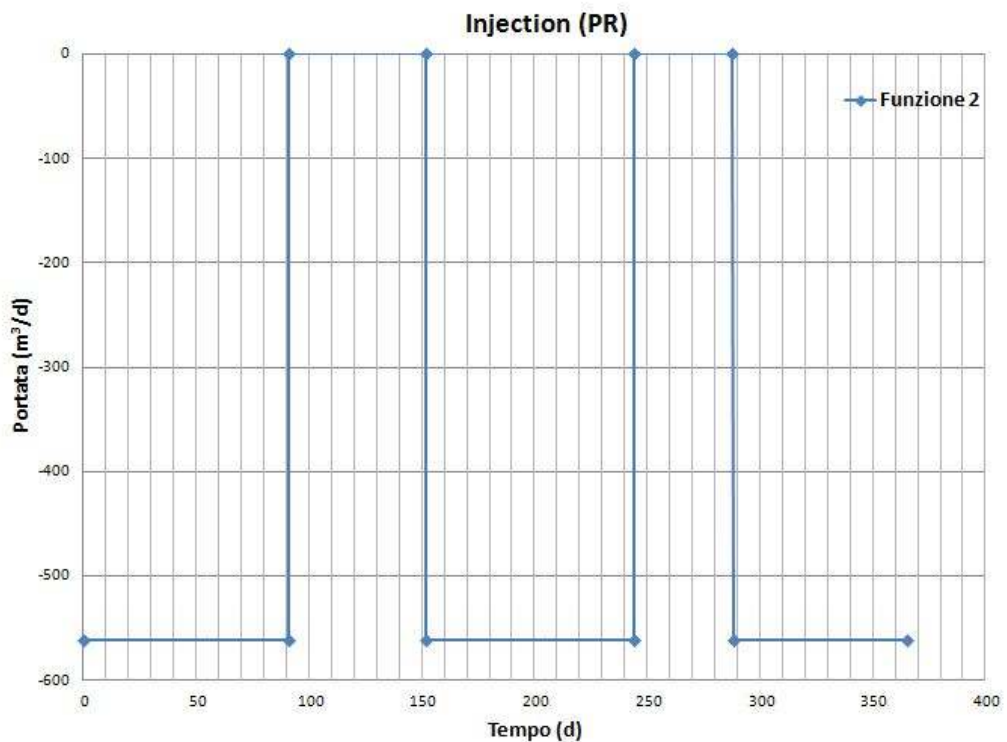


Grafico 1: Grafici delle funzioni imposte alle condizioni di flusso nei pozzi di prelievo (PE) e restituzione (PR)

Le funzioni 1 e 2, riportate nel Grafico 1, descrivono, rispettivamente, l'andamento delle portate emunte in PE e reiniettate in PR durante l'intero arco dell'anno, considerando un utilizzo "normale" dell'impianto geotermico, che prevede una portata media annua emunta e reimpressa pari a 6.5 l/s (che corrispondono a 561.6 m³/d). I valori di portata sono pari a zero negli intervalli di tempo in cui si presume che l'impianto non venga utilizzato, ovvero dai primi di Aprile a fine Maggio e dai primi di Settembre a metà Ottobre.

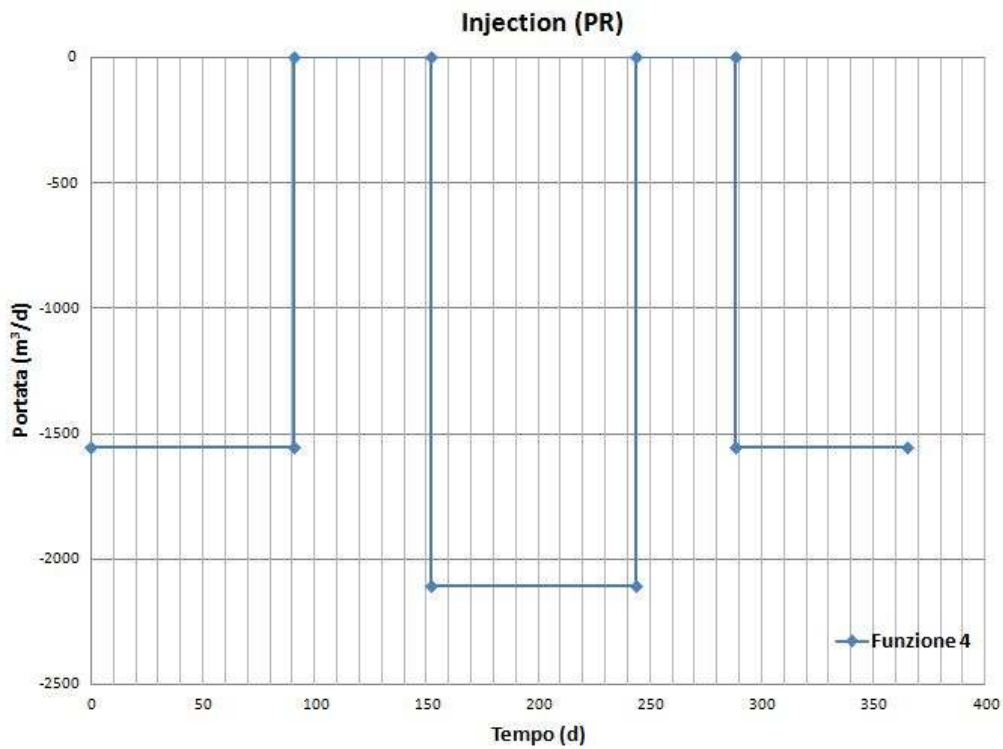
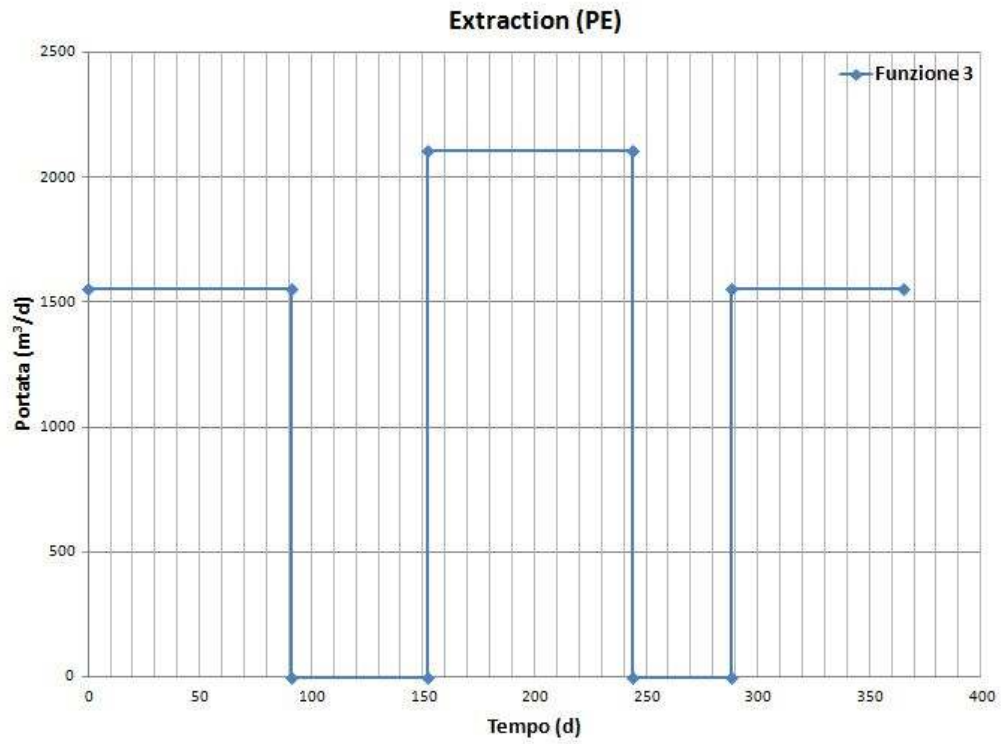
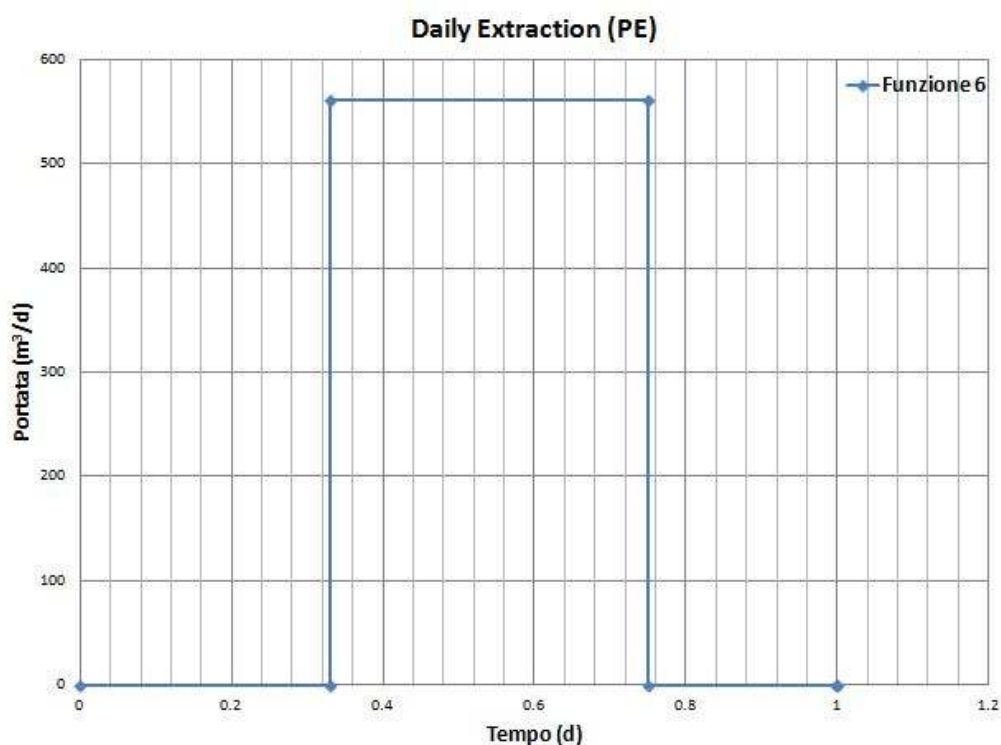


Grafico 2: Grafici delle funzioni utilizzate come condizioni di flusso nei pozzi

Le funzioni 3 e 4, riportate nel Grafico 2, descrivono, rispettivamente, l'andamento delle portate emunte dal pozzo PE, e reiniettate in PR, durante l'intero arco dell'anno, un utilizzo annuo più intensivo, con portate che raggiungono picchi di 18 l/s (1555.2 m³/d) d'inverno e valori massimi estivi di 24.4 l/s (2108.2 m³/d). Come nel Grafico 1, i valori di portata sono pari a zero negli intervalli di tempo in cui si presume che l'impianto non venga utilizzato, ovvero dai primi di Aprile a fine Maggio e dai primi di Settembre a metà Ottobre.

Si sono inoltre volute creare un altro paio di funzioni, denominate 6 e 7 e rappresentate nel Grafico 3, per simulare l'utilizzo giornaliero dell'impianto geotermico durante l'intero periodo invernale, intervallo di tempo in cui vi è il massimo utilizzo dello stesso. In pratica è stato ipotizzato un funzionamento diurno pari a dieci ore (dalle ore 08.00 alle ore 18.00) con prelievo e restituzione di una portata costante di 6.5 l/s (561.6 m³/d), ed una non attività dell'impianto nelle ore restanti (dalle 00.00 alle 08.00 e dalle 18.00 alle 24.00) per il periodo che va dalla metà di Ottobre alla fine di Marzo.



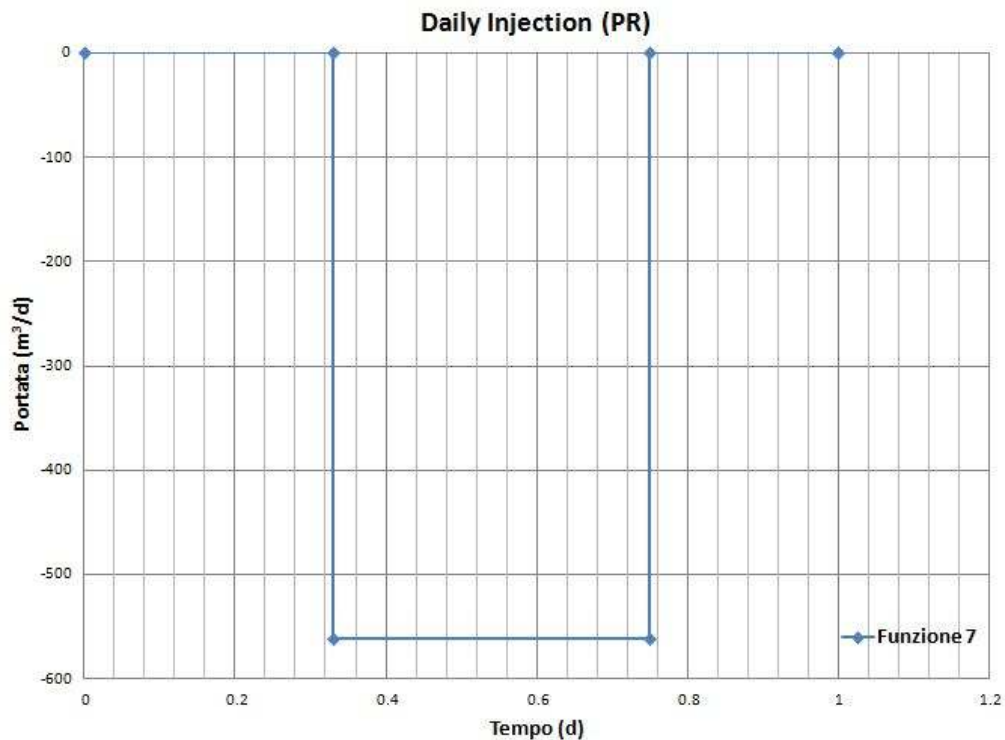


Grafico 3: Grafici delle funzioni utilizzate come condizioni di flusso nei pozzi

5.4.2 INPUT DEL TRASPORTO TERMICO

- **CONDIZIONI INIZIALI:** trattandosi di trasporto termico, è stata impostata una temperatura di 12.8 °C, ricavata da bibliografia, sulla prima slice, e tale valore è stato poi copiato in tutte le slice rimanenti (in alternativa si può caricare il modulo SetGG che compie questa operazione in automatico).
- **CONDIZIONI AL CONTORNO:** per il trasporto di calore si è assegnata sulla prima slice una condizione di primo tipo “Temperature” pari a 12.8°C, valore di temperatura media annuale superficiale ricavata da bibliografia, mentre è stato impostato il valore tabellare di flusso sull’ultima slice, che si riferisce alla condizione di secondo tipo “Heat flux”, corrispondente, in Feflow, al flusso geotermico proveniente dal basso (e quindi con segno negativo).

Si è provveduto poi a creare una Nodal Reference Distribution in modo tale da applicare all'intera prima slice il valore del flusso di calore geotermico. Esso viene letto da Feflow come gradiente.

Secondo le informazioni contenute nella Banca Dati Nazionale Geotermica del C.N.R. risalenti all'anno 1986, la città di Vicenza si troverebbe in un'area geografica in cui il flusso di calore geotermico medio è di 70 mW/m^2 . In fase di modellizzazione, però, è stato utilizzato il valore di 60 mW/m^2 , che è stato calibrato in base ai valori di temperatura dell'acqua di falda misurati sperimentalmente in campagna.

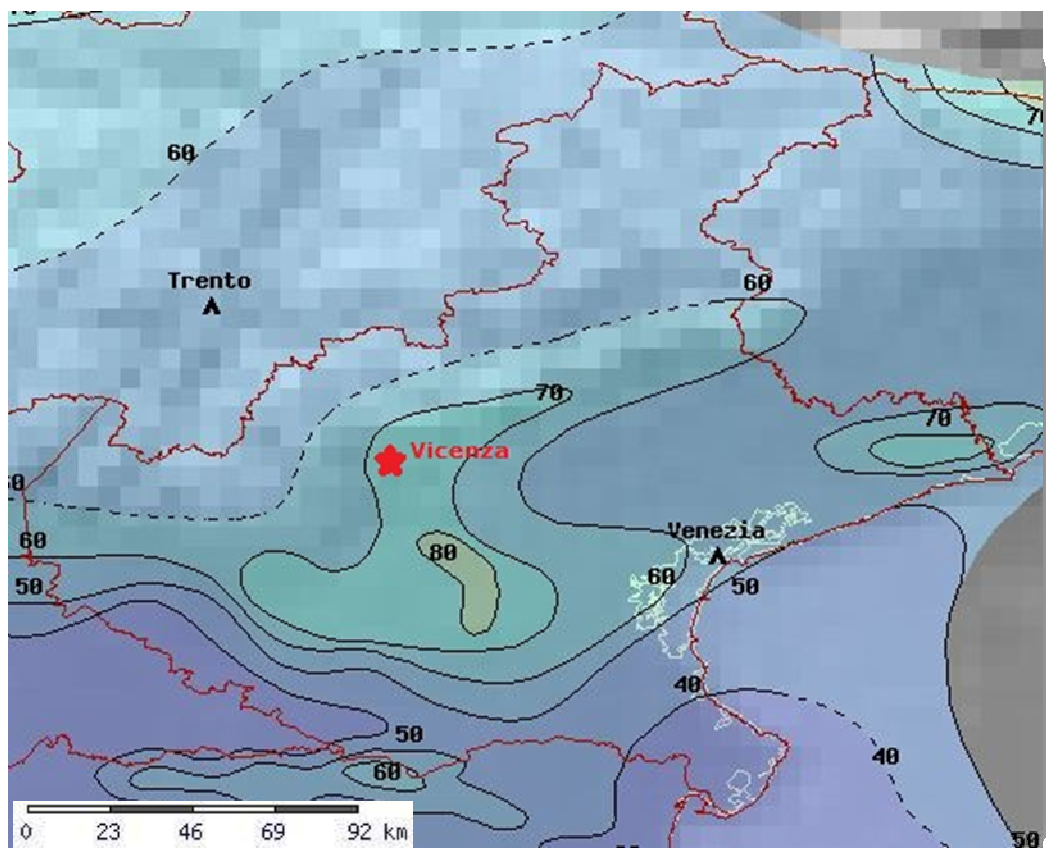


Figura 89: Mappa della distribuzione del flusso di calore geotermico in Veneto. I valori sono espressi in mW/m^2 (Banca Dati Nazionale Geotermica – Istituto di Geoscienze e Georisorse – C.N.R., 1986)

A questo punto, grazie all'applicazione del modulo SetGG, è stato possibile visualizzare nelle varie slice la variazione di temperatura all'aumentare della profondità.

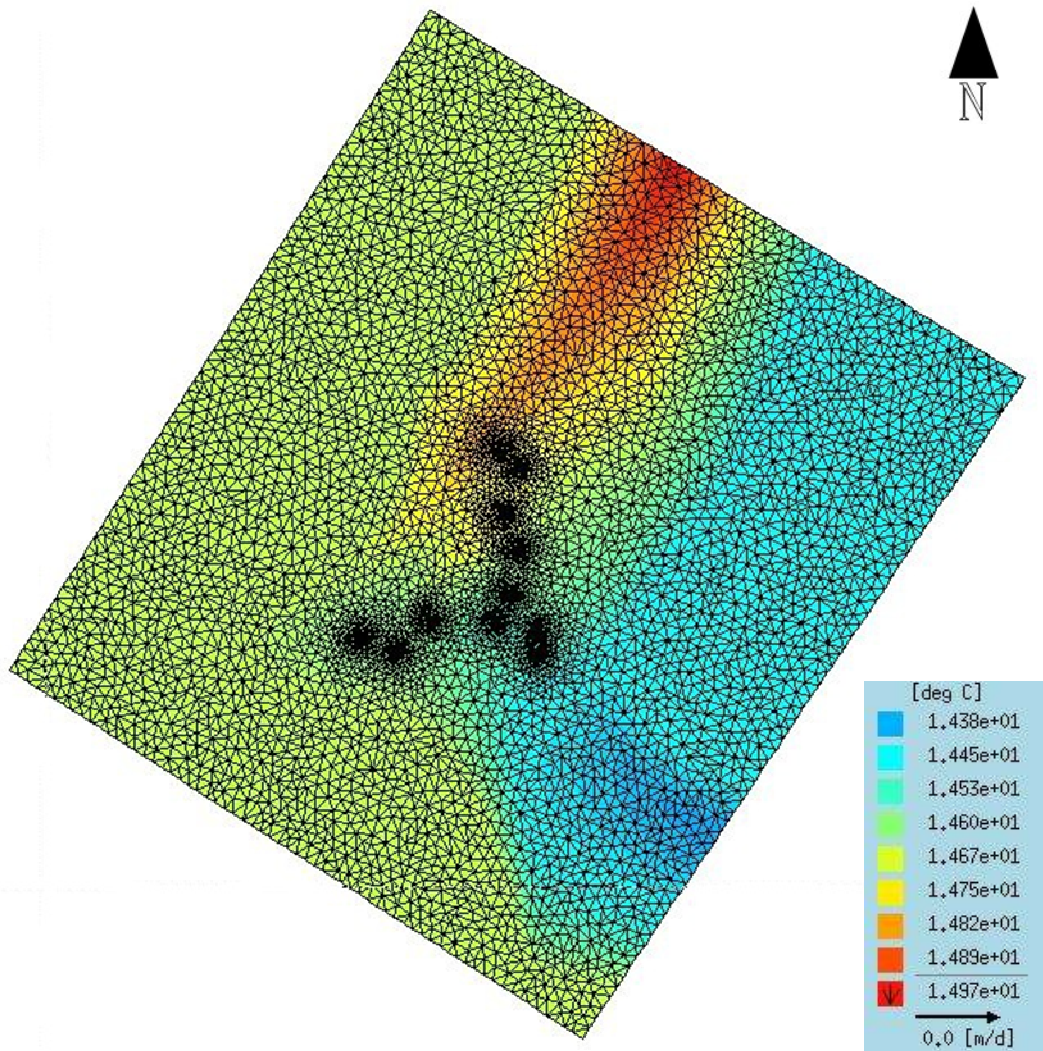


Figura 90: Visualizzazione della distribuzione di temperatura nell'acquifero utilizzato (profondità dai 30 ai 50 m (V° layer))

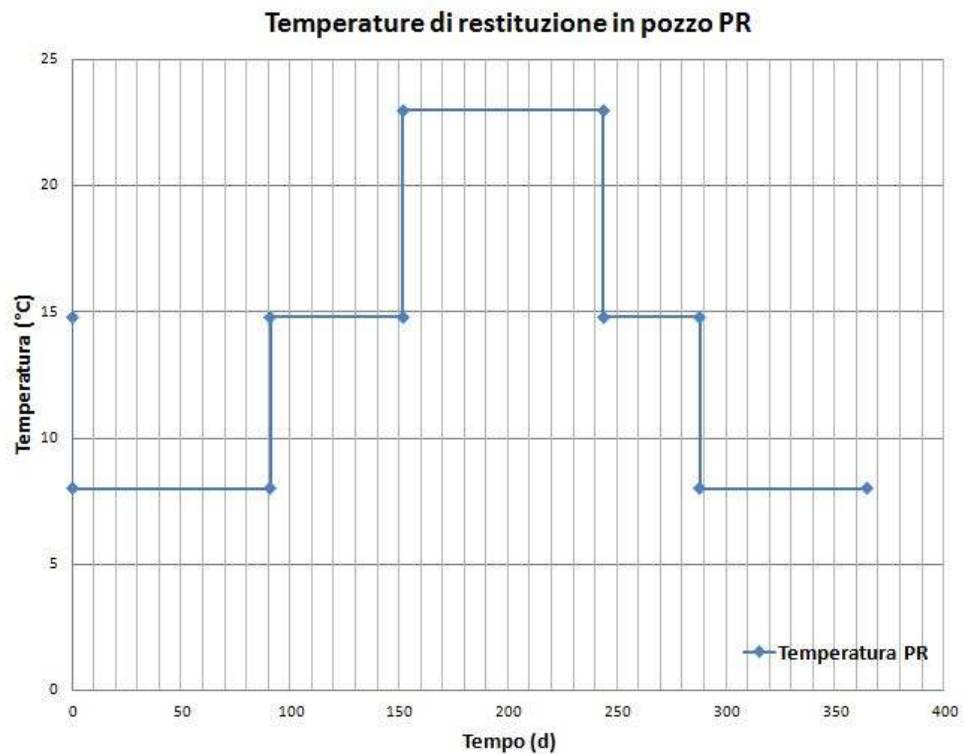


Grafico 4: Andamento della temperatura di progetto nel pozzo di restituzione nell'arco annuale di funzionamento

Il Grafico 4 descrive l'andamento della temperatura dell'acqua nel pozzo di reiniezione PR. Da esso si può dedurre l'attività del pozzo durante l'anno: il pozzo restituisce, in inverno, acqua ad una temperatura di 8°C, poiché è stato sottratto calore all'acqua al fine di riscaldamento della Basilica, mentre d'estate reimmette acqua a 23°C, perché è stato prelevato calore dall'edificio al fine di raffrescarne gli ambienti. L'impianto poi viene spento durante le mezze stagioni e si assume, in questo grafico, che l'acqua torni alla temperatura della falda indisturbata, pari cioè a 14.9°C.

Inoltre, per simulare contemporaneamente il trasporto di flusso e di calore, è stata creata per prima cosa un'apposita funzione, la funzione 5 (vedi Grafico 5), che descrive, in termini di scambio termico, la variazione di temperatura (ΔT) dell'acqua di falda durante l'anno. Durante la simulazione tale funzione è stata accoppiata alle equazioni del flusso descritte dalle due coppie di funzioni 1-2 e 3-4 illustrate nel paragrafo precedente, in modo da ottenere un modello accoppiato trasporto flusso-calore. Per poter funzionare però è stato realizzato un discrete element feature verticale, uno per ogni pozzo (PE e PR), che consente di trattare i pozzi come corpi

conduttivi verticali, ai quali è stata assegnata una conducibilità termica pari a 0.65 J/(m/s).

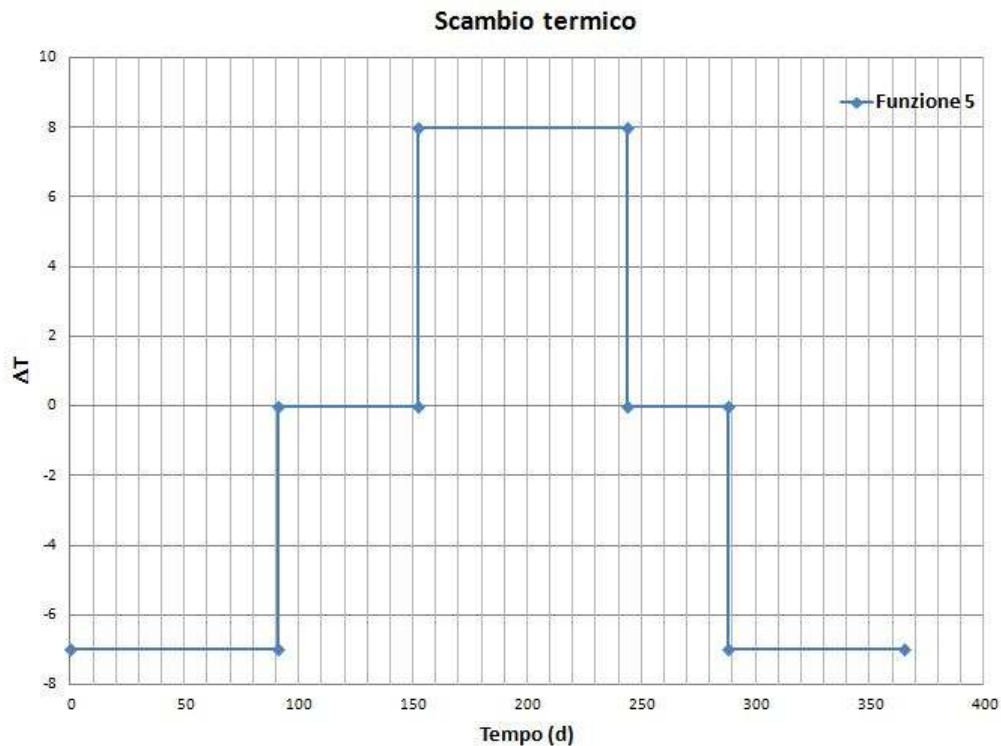


Grafico 5: Differenze di temperatura di progetto tra prelievo e restituzione, prima e dopo lo scambio termico durante l'anno

E' stata poi creata un'altra funzione (funzione 8, Grafico 6), che descrivesse lo scambio termico durante l'utilizzo diurno dell'impianto per l'intero periodo 15 Ottobre – 31 Marzo. Come le precedenti, anche questa è stata accoppiata alle funzioni 6 e 7 (vedi Grafico 3) per poter simulare il trasporto flusso-calore.

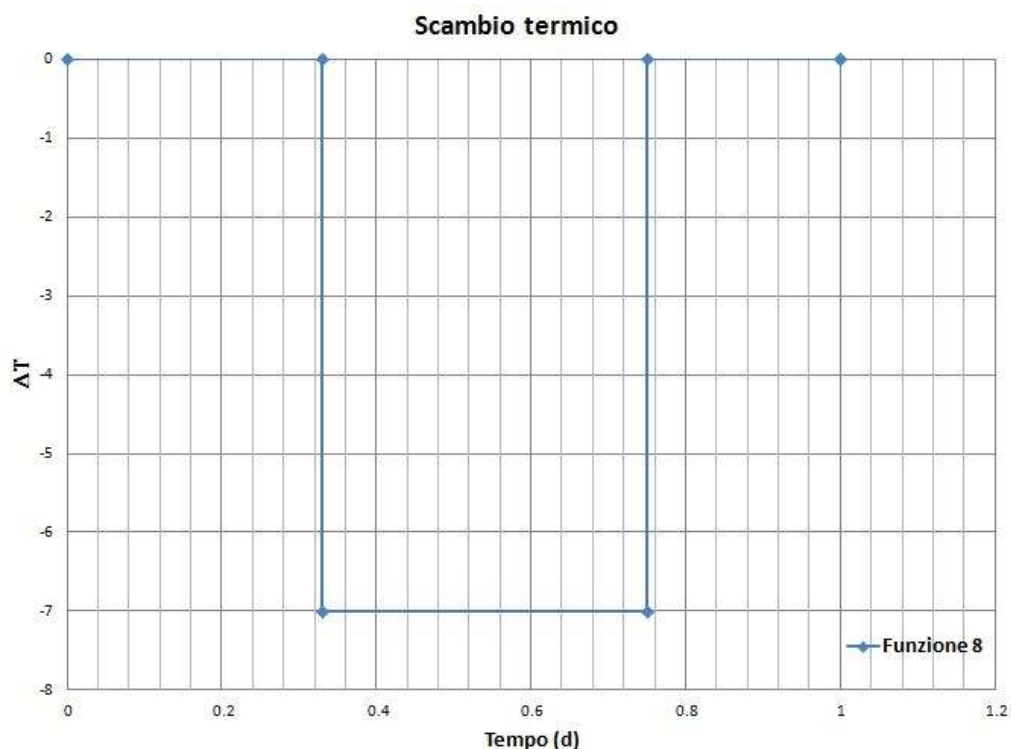


Grafico 6: Estrapolazione delle differenze di temperatura di progetto tra prelievo e restituzione, prima e dopo lo scambio termico durante la sola stagione invernale

5.4.3 PROPRIETA' DEI MATERIALI

A questo punto sono state inserite le proprietà dei materiali. Prima di tutto si assegnano le conducibilità idrauliche del modello nelle tre dimensioni. I valori della conducibilità lungo la verticale (z) sono generalmente 1/3 rispetto a quelli nelle direzioni orizzontali (xx e yy). Inoltre questa proprietà varia, per effetto della granulometria del materiale, sia orizzontalmente che verticalmente. Lungo z essa cambia a seconda della stratigrafia incontrata, assumendo valori differenti per i piani considerati. Pertanto sono stati scelti valori tipici da bibliografia relativi a vari tipi di materiali ed assegnati ad ogni layer, ad eccezione del V layer, al quale sono stati impostati i valori ricavati dall'elaborazione dei dati derivanti dalla campagna idrogeologica.

Tabella 11: Valori di conducibilità idraulica assegnati al dominio

I layer	II layer	III layer	IV layer	V layer	VI layer
$K_{xx}=K_{yy}= 5*10^{-5}$, $K_{zz}= 1.67*10^{-5}$	$K_{xx}=K_{yy}= 1.0*10^{-7}$, $K_{zz}= 3.33*10^{-8}$	$K_{xx}=K_{yy}= 5.0*10^{-5}$, $K_{zz}= 1.67*10^{-5}$	$K_{xx}=K_{yy}= 5.0*10^{-7}$, $K_{zz}= 1.67*10^{-7}$	$K_{xx}=K_{yy}= 1.12*10^{-4}$, $K_{zz}= 0.37*10^{-4}$	$K_{xx}=K_{yy}= 1.0*10^{-8}$, $K_{zz}= 3.33*10^{-9}$

È necessario poi definire le proprietà termiche dei materiali, necessarie all'analisi; tra queste la porosità e la dispersività, longitudinale e trasversale, del mezzo. Il valore della porosità è stato impostato uguale ad 1, che significa che si vuole il trasporto di solo fluido e non un trasporto solido, mentre quelli della dispersività non sono stati ricavati da delle indagini sul campo e, quindi, essendo un parametro molto variabile e difficile da valutare con esattezza, si è deciso di mantenere quelli di default del programma cioè 5m, per quella longitudinale, e 0.5m per quella trasversale.

5.4.4 SIMULAZIONI

Al fine della valutazione dell'impatto termico, derivato dall'utilizzo dell'impianto geotermico, sull'acquifero confinato preso in considerazione, si sono eseguite tre distinte simulazioni.

CASO 1 - Dapprima è stato simulato il comportamento di un impianto durante l'intero arco dell'anno, supponendo un'attività di 24 ore su 24 durante gli intervalli temporali: 1 Gennaio – 31 Marzo, 1 Giugno – 31 Agosto, 15 Ottobre – 31 Dicembre, ed un non funzionamento nei mesi restanti. In base alle informazioni in nostro possesso, è stata impostata una portata di prelievo e restituzione sempre costante, sia in estate che d'inverno, pari a 6.5 l/s (561.6 m³ al giorno), che corrisponde ad un valore medio di utilizzo, ragguagliato su base annua.

CASO 2 - E' stata poi realizzata una simulazione che tenesse conto dei valori di picco di portata, ipotizzando cioè un utilizzo dell'impianto al massimo della sua potenza. Alla pari della simulazione precedente, si è supposto un periodo di utilizzo h 24 annuale, ad eccezione degli intervalli temporali: 1 Aprile – 31 Maggio e 1 Settembre – 14 Ottobre, con portate invernali di 18 l/s (1555.2 m³ al giorno) e valori pari a 24.4 l/s (2108.2 m³ al giorno) per i mesi estivi.

CASO 3 - Infine è stato preso in considerazione il solo periodo invernale (15 Ottobre – 31 Marzo), simulando il funzionamento dell'impianto esclusivamente dalle ore 08.00 alle ore 18.00 di ogni giorno per l'intero lasso temporale, utilizzando una portata costante pari a 6.5 l/s (561.6 m³ al giorno), come nella prima simulazione.

5.4.5 RISULTATI E DISCUSSIONE

CASO 1

Una volta acceso l'impianto il primo giorno di Gennaio, come impostato da simulazione, una portata costante di acqua, pari a 561.6 m^3 al giorno viene pompata dal pozzo PE alla superficie e, dopo essere stata utilizzata per riscaldare i locali della Basilica, viene reimpressa nel pozzo PR.



Grafico 7: Profili di carico idraulico per i pozzi PE (in blu) e PR (in rosso). In ascissa è rappresentato l'intervallo di tempo della simulazione espresso in giorni [d], in ordinata il carico idraulico espresso in metri [m]

Si può notare come il livello piezometrico assoluto del pozzo di prelievo PE si abbassi e si stabilizzi su un valore pari a 28.64 m, mentre specularmente aumenta il carico idraulico nel pozzo di restituzione PR, stabilizzandosi a 35.62 m. Nei periodi in cui l'impianto è spento i livelli tornano a valori medi di 32.457 m (valore impostato come condizione iniziale del flusso).

Entrambi i profili di carico descrivono da un punto di vista qualitativo il fenomeno fisico che avviene durante il pompaggio (caduta repentina del livello dinamico nel pozzo di emungimento e innalzamento in quello di restituzione).

Per quanto riguarda l'analisi termica, è interessante osservare gli andamenti delle temperature medie durante l'arco dell'anno raffigurate nel Grafico 8.



Grafico 8: Curve di temperatura media espressa in gradi Celsius [°C] per PE (in blu) e PR (in rosso); in ordinata troviamo il tempo espresso in giorni [d]. La linea gialla individua il momento in cui comincia a manifestarsi il fenomeno della corto-circuitazione termica.

Si può notare che entrambi i pozzi intercettano l'acqua della falda indisturbata ad una temperatura media di 14.9°C (t=0). Quando viene acceso l'impianto l'acqua viene prelevata in PE a questa temperatura e poi reimpressa a 8 °C in PR, dopo aver ceduto calore nello scambiatore della pompa di calore a servizio dei locali della Basilica. Pertanto il risultato dello scambio di calore fra quest'acqua più fredda e quella di falda è visibile nella curva discendente rossa di PR.

Contestualmente alla progressiva diminuzione della temperatura media, dopo appena qualche giorno di utilizzo dell'impianto si osserva che anche la curva di temperatura di PE (in blu)

comincia a scendere; concretamente avviene un prelievo di acqua a temperature progressivamente inferiori, a causa del pescaggio dell'acqua di scarico iniettata nel pozzo di restituzione PR. L'impianto cessa poi la sua attività durante la primavera dove avviene un recupero parziale delle temperature, più consistente ovviamente in PR, che era a temperatura più bassa.

Il fenomeno fisico che avviene dopo pochi giorni è dovuto al fatto che il plume termico generato dall'interazione dell'acqua a diverse temperature che si forma via via in PR ha raggiunto il pozzo PE e ne influenza la temperatura di prelievo, abbassandola. Questo fenomeno viene definito corto-circuitazione termica e va ad inficiare la resa termica dell'impianto in termine di prestazioni energetiche (linea gialla del Grafico 8).

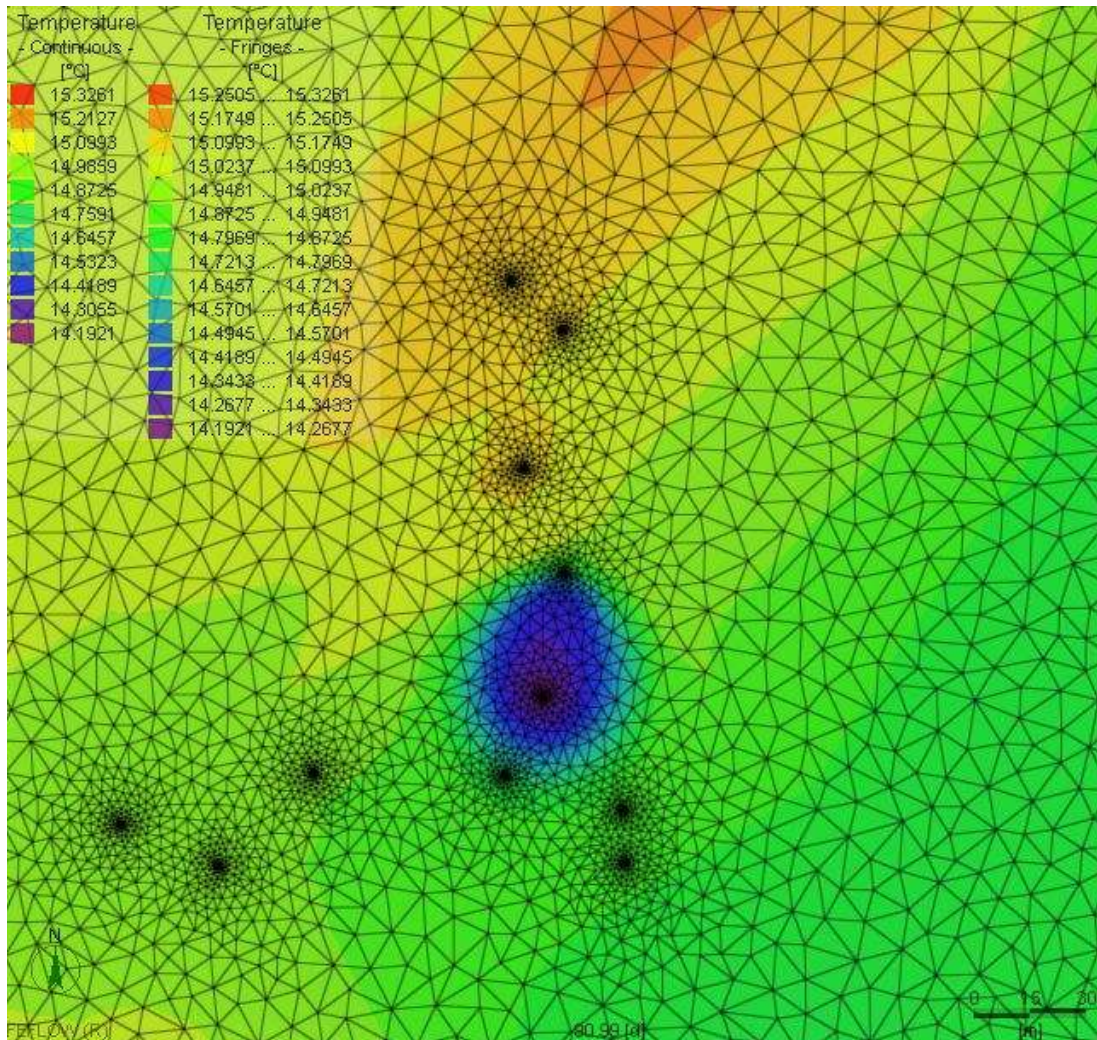


Figura 91: Plume termico relativamente più freddo che va ad interessare il punto di prelievo posto più a nord (ultimo giorno del regime invernale)

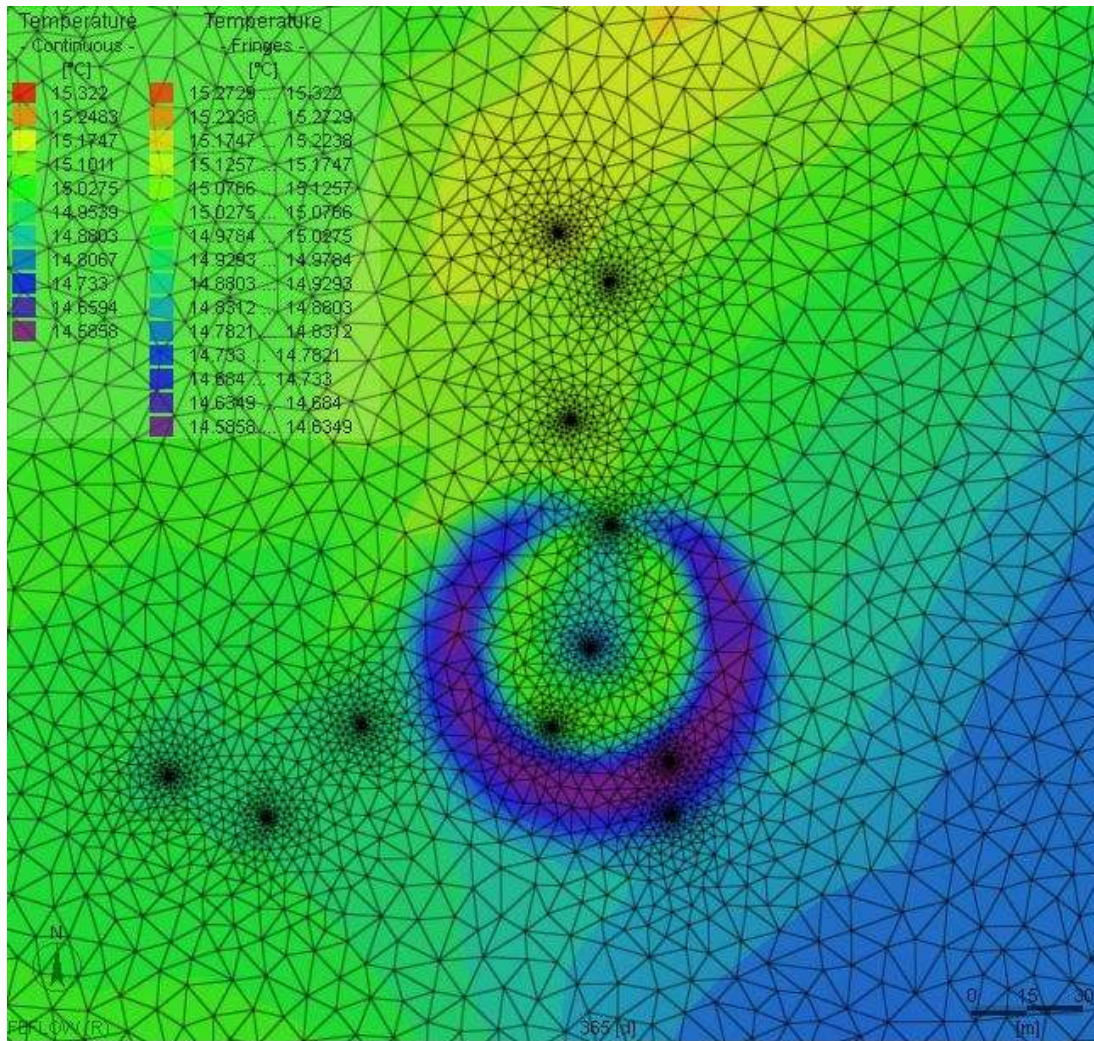


Figura 92: Situazione a fine anno (regime invernale). Si nota come le temperature non riescano a riequilibrarsi e formino pertanto un'aureola fredda

In particolare tale interferenza termica si verifica poichè durante il pompaggio e la simultanea restituzione viene a crearsi un nuovo gradiente piezometrico locale, che varia in maniera proporzionale alla portata utilizzata e che differisce sostanzialmente dal normale gradiente dell'area (0.02%). Si generano infatti due distinti coni in prossimità dei due pozzi (vedi Grafico 9): uno di depressione (nel pozzo di prelievo) che è prodotto dalla caduta di carico idraulico durante il pompaggio, e specularmente un cono di sovra-pressione nel pozzo di restituzione, contestuale all'aumento di carico idraulico dovuto alla re immissione dell'acqua in falda.

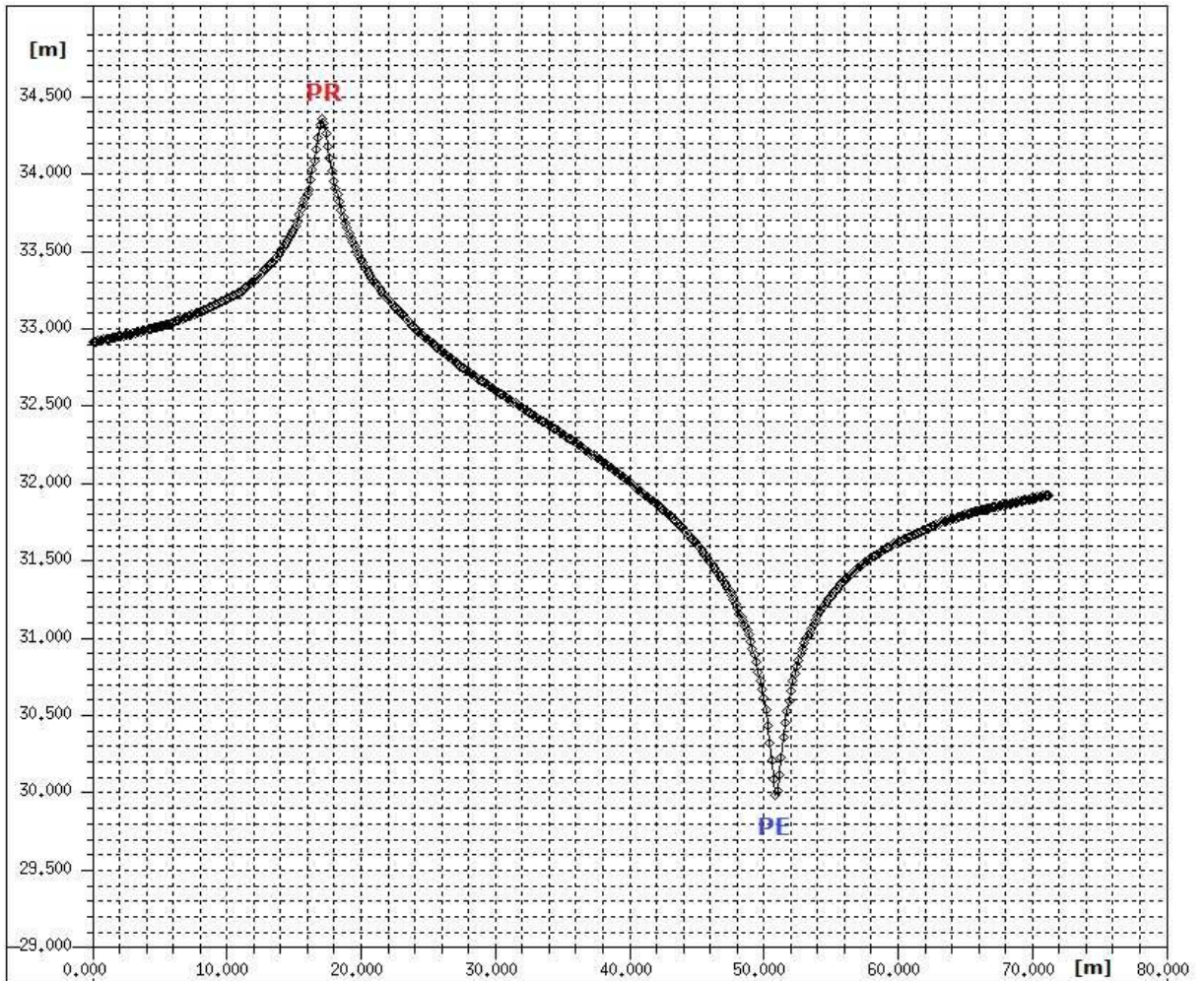


Grafico 9: Sezione rappresentante l'andamento del carico idraulico (livello piezometrico puntuale) in prossimità dei pozzi PR (cono di sovra-pressione) e PE (cono di depressione)

Quindi avviene il richiamo verso PE dell'acqua reimpressa in PR, come illustrato nella Figura 93.

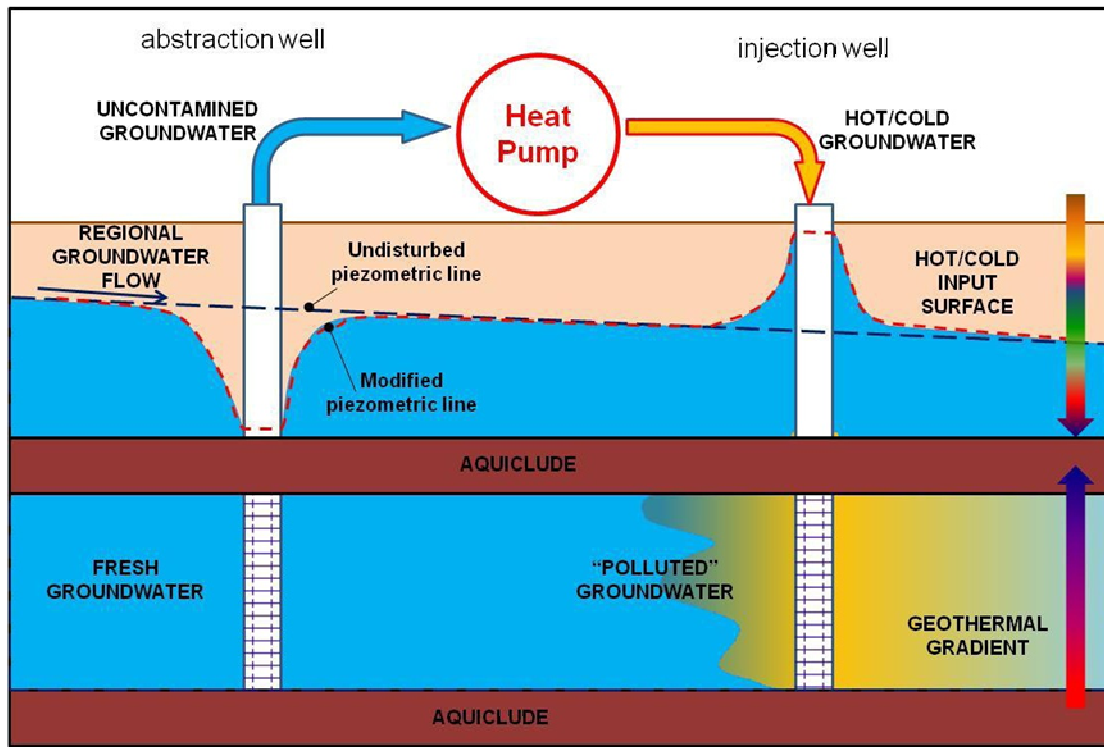


Figura 93: Sezione schematica rappresentante l'andamento del carico idraulico (livello piezometrico puntuale) in prossimità dei pozzi PR (cono di sovra-pressione) e PE (cono di depressione) (Galgaro e Cultrera, 2011 in press) se la loro distanza fosse tale da non comportare interferenza termica ed idraulica

La velocità del flusso e, di conseguenza, il momento in cui comincerà ad esserci interferenza termica in prossimità del pozzo di emungimento, dipende perciò dall'entità della perturbazione del gradiente piezometrico locale in relazione al suo valore indisturbato e dalla distanza fra i due pozzi (33.8 m).

Nel nostro caso il gradiente locale naturale ("indisturbato") ha valori piuttosto modesti (0.02%) ed è tale da non influire in alcun modo su quello generato in posto; pertanto la direzione e la velocità di propagazione del plume termico è da imputarsi principalmente al richiamo delle acque di falda generate dal pompaggio in PE ed alla modesta distanza fra PE e PR.

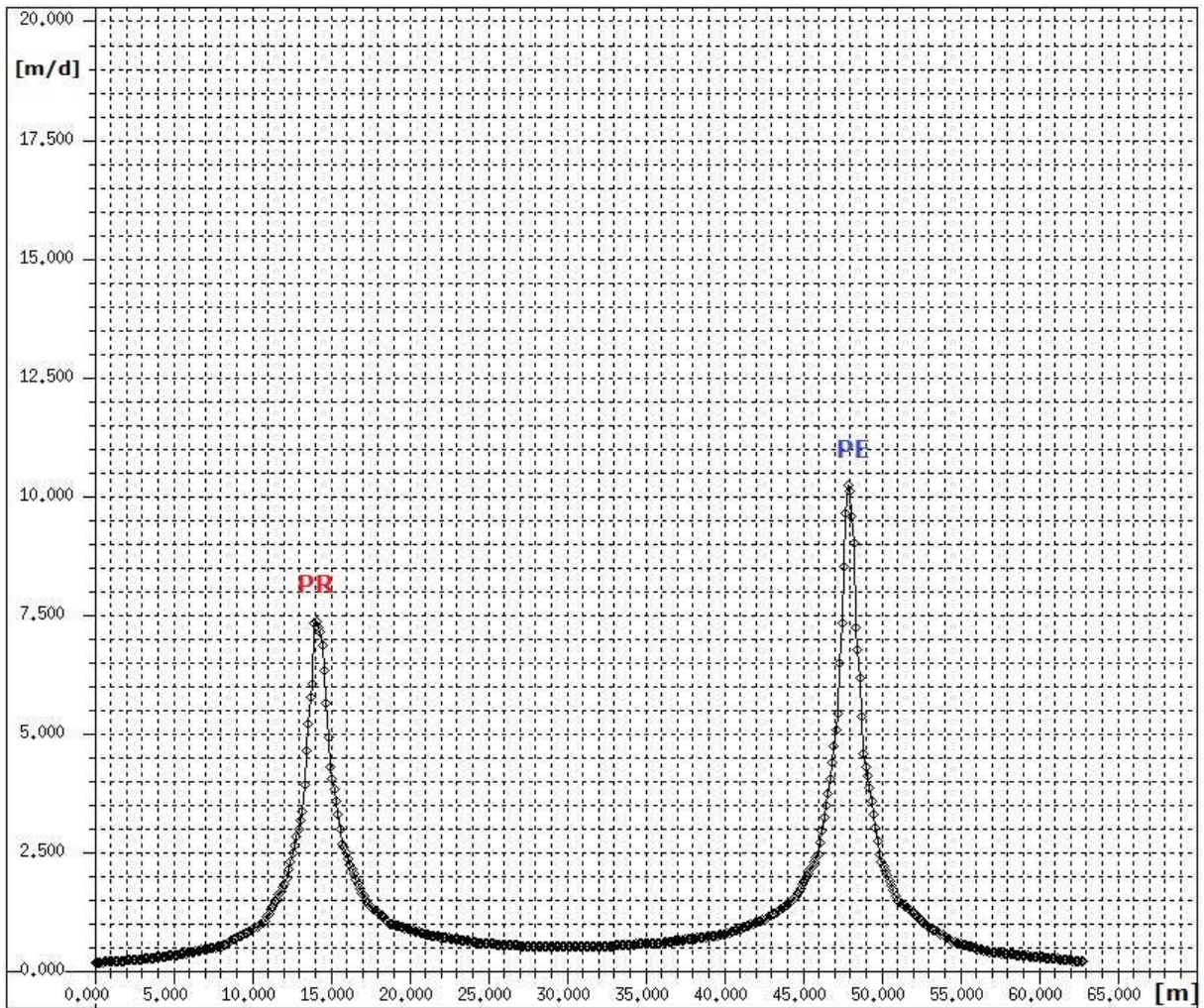


Grafico 10: Sezione che collega i due pozzi raffigurante l'andamento delle velocità medie della falda (in ordinata) espressa in [m/d]



Grafico 11: Sezione tracciata perpendicolarmente alla direzione congiungente i pozzi PE e PR (Grafico 10) ed equidistante dai due. Raffigura l'andamento delle velocità (in ordinata) espressa in [m/d]

Il 1° Giugno ricomincia il pompaggio al fine di raffrescare gli edifici; questa volta l'impianto funziona a regime invertito, ovvero viene sottratto calore, pari ad un delta termico di 8°C, agli ambienti per essere ceduto all'acqua. Si può notare nel Grafico 8 che al tempo in cui il pompaggio riprende, è ancora in corso la riequilibrio termica. Durante i primi giorni la temperatura di PE continua a scendere per poi risalire contestualmente a quella di PR. Tale effetto può essere imputato al richiamo, causato dal pompaggio, di acque relativamente ancora fredde (plume termico invernale stanziato in fase di riequilibrio).

A fine Agosto l'impianto viene nuovamente spento per la mezza stagione; la temperatura dell'acqua in PE è tornata ai valori iniziali e così si mantiene per un mese e mezzo, mentre la curva di PR scende leggermente.

Infine l'impianto torna in funzionamento il 15 Ottobre, inizio del regime invernale, e specularmente alla caduta di temperatura in PE avvenuta i primi giorni di Agosto, ora si nota un leggero aumento di temperatura in PE, dovuto all'influenza dell'ultima "porzione" di plume caldo estivo, richiamato dal pompaggio, che ha infine raggiunto PE; ben presto, però, come in PR, la temperatura ricomincia a calare e si è concluso il ciclo temporale della simulazione.

A seguire vengono riportati i principali step della simulazione. La restituzione grafica è stata ottenuta utilizzando Arcgis.

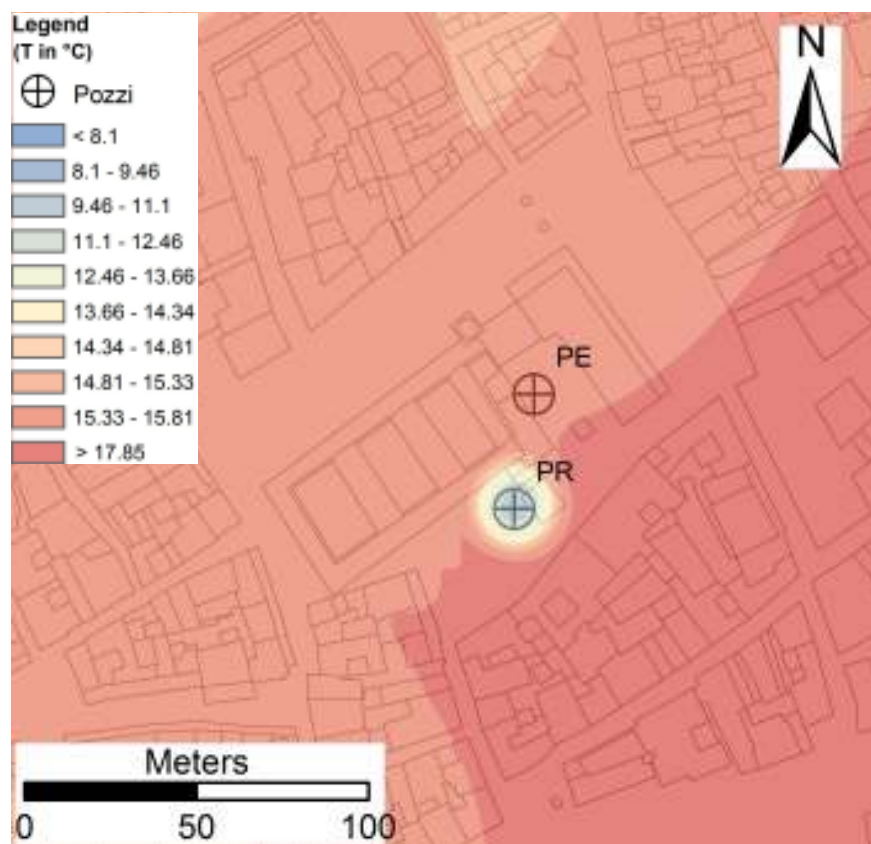


Figura 94: Situazione al 10 Gennaio: comincia a formarsi il plume freddo in prossimità del pozzo di restituzione PR

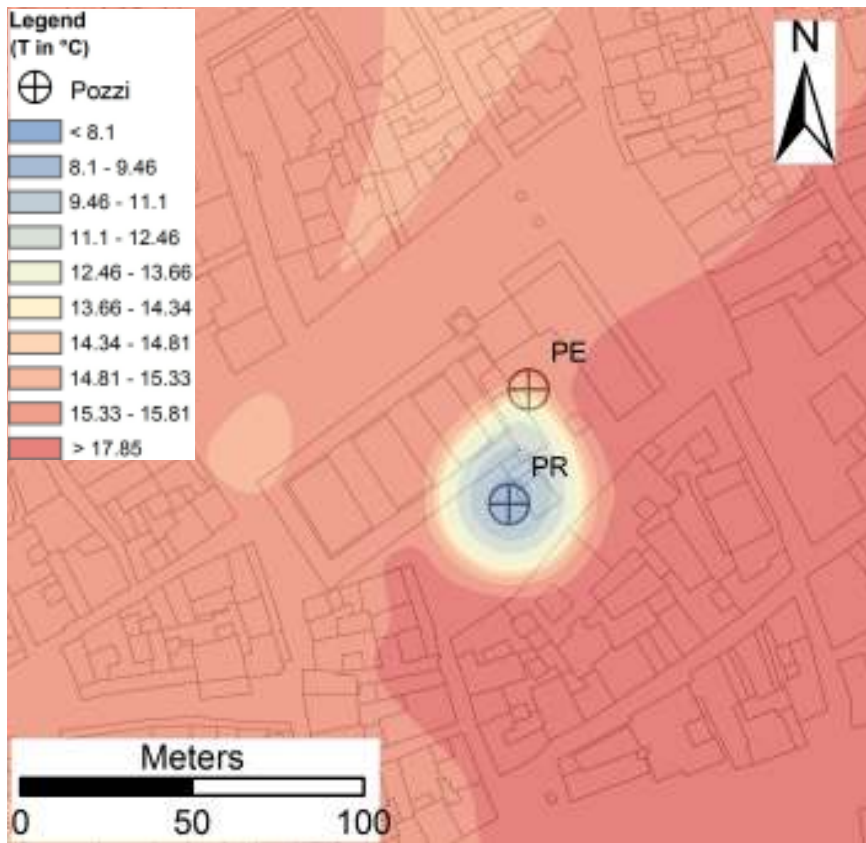


Figura 95: Situazione al 31 Gennaio, dopo un mese dell'entrata in funzione dell'impianto (interferenza termica in corso)

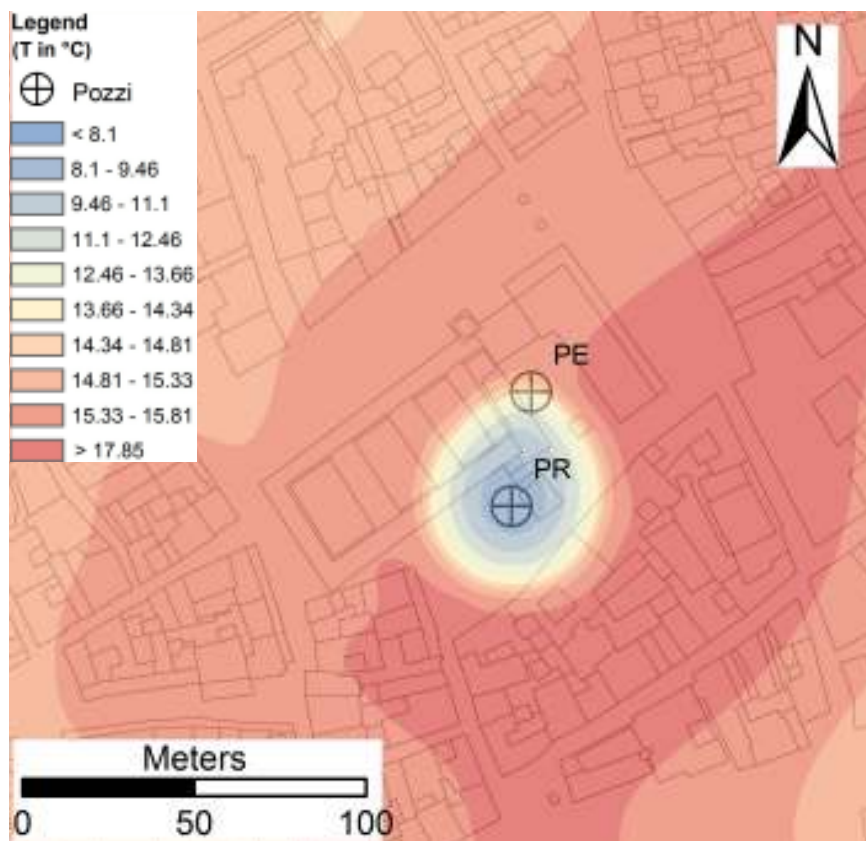


Figura 96: Situazione al 31 Marzo, ultimo giorno del regime invernale

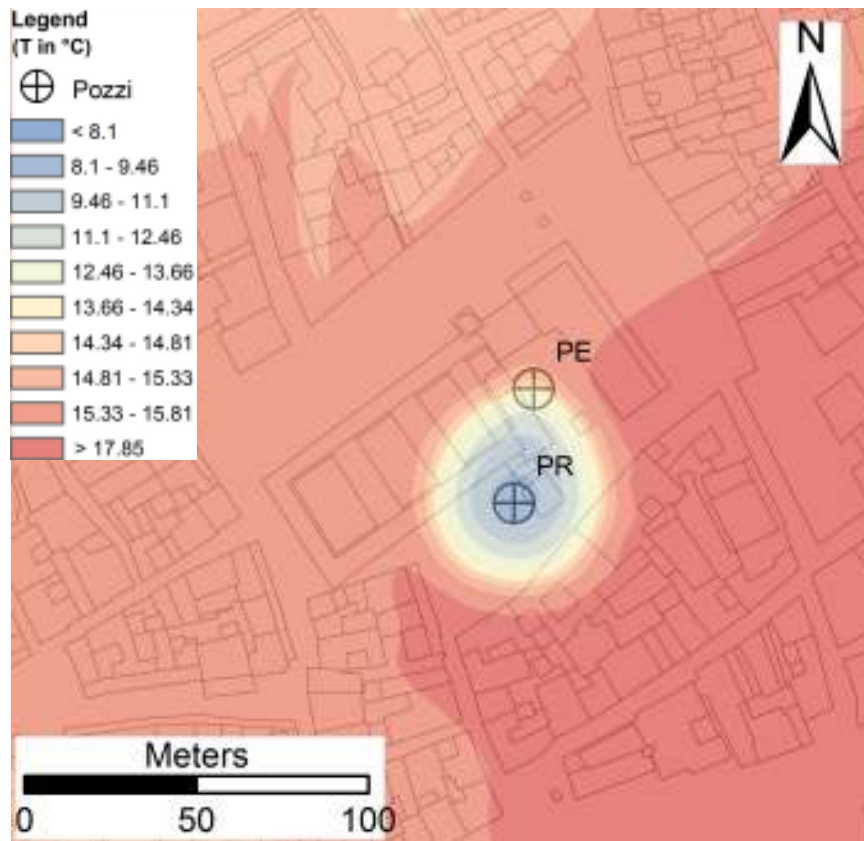


Figura 97: Situazione al 31 Maggio, ultimo giorno della pausa primaverile prima di passare al regime estivo (il riequilibrio termico è avvenuto solo in minima parte)

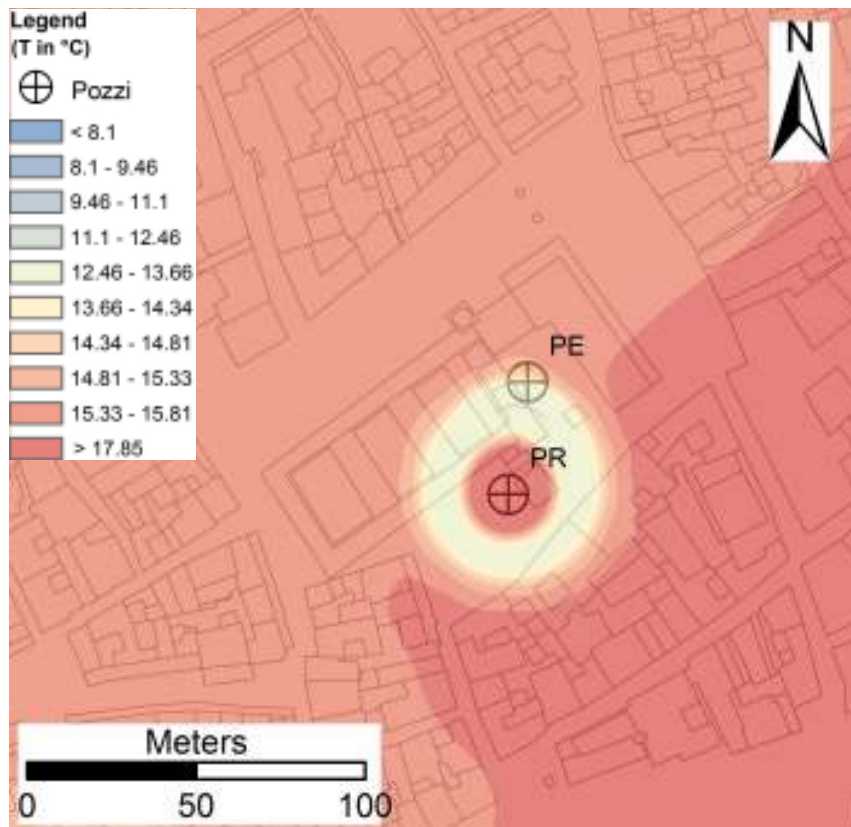


Figura 98: Situazione al 28 Giugno, in regime estivo (si sta formando il fronte caldo)

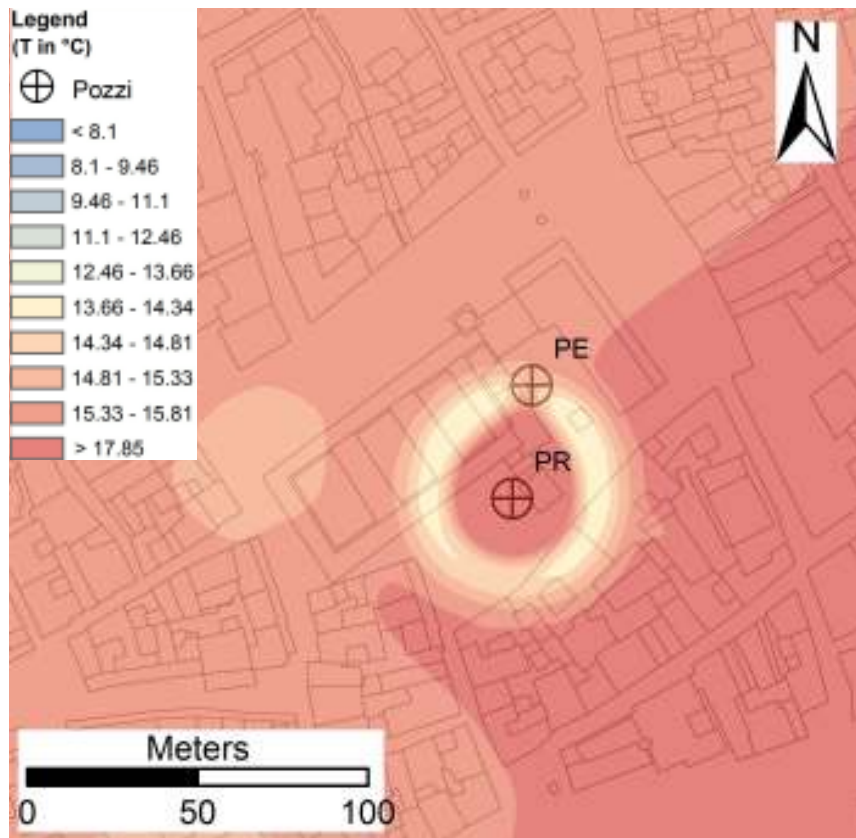


Figura 99: Situazione al 28 Luglio, in pieno regime estivo (il plume caldo interferisce con il pozzo di prelievo PE)

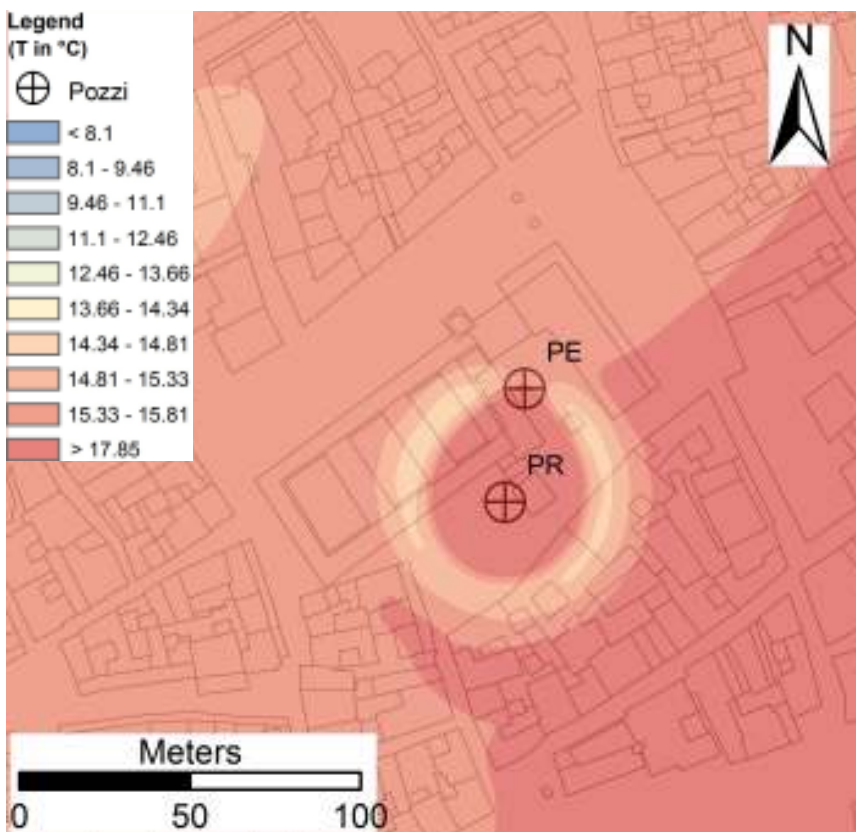


Figura 100: Situazione al 31 Agosto, ultimo giorno del regime estivo

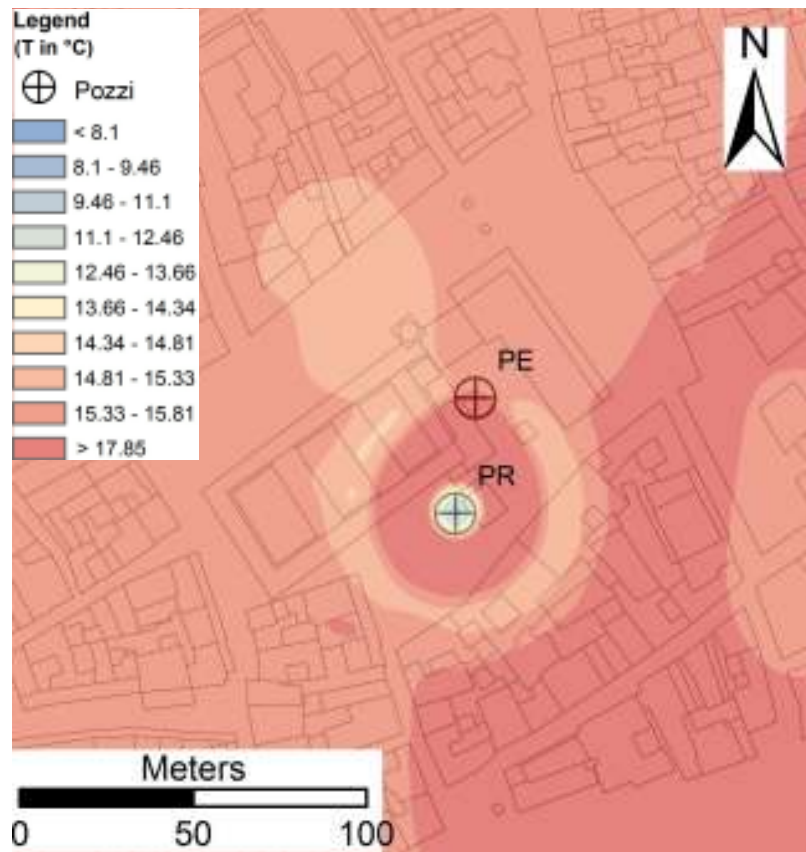


Figura 101: Situazione al 26 Ottobre, nuovo regime invernale
(si sta formando il nuovo plume freddo)

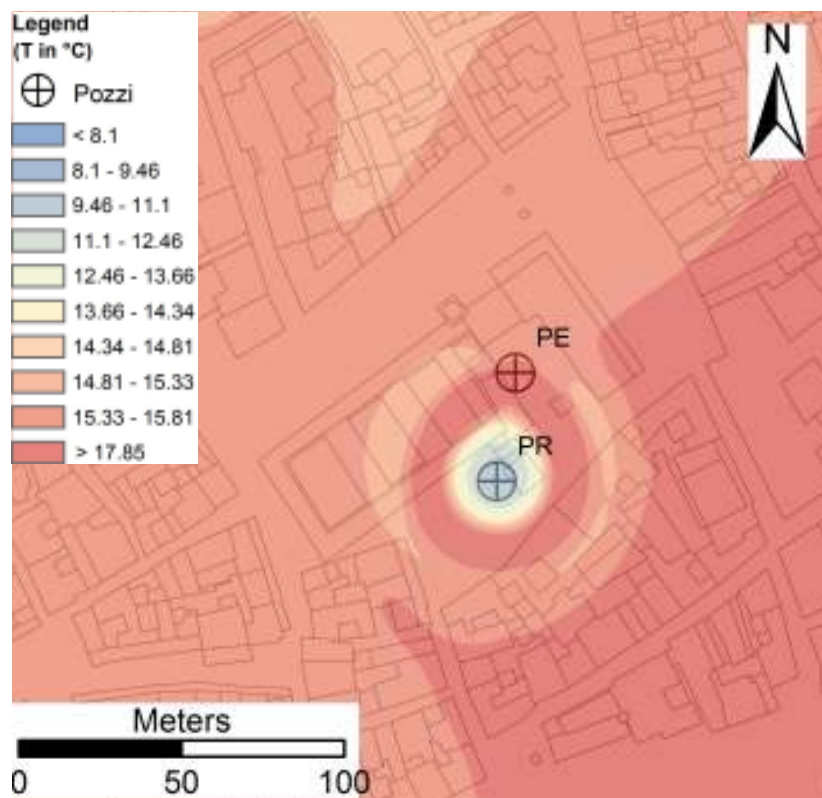


Figura 102: Situazione al 25 Novembre, nuovo regime invernale
(avanzamento del plume freddo)

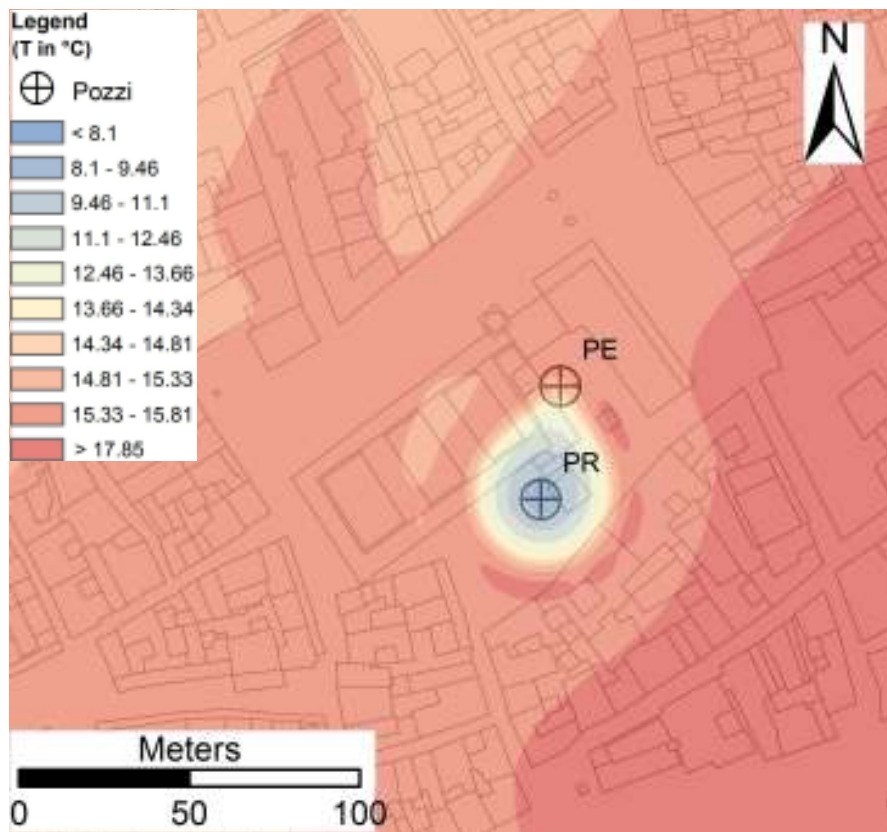


Figura 103: Situazione 31 Dicembre, ultimo giorno di funzionamento dell'impianto da simulazione (si può notare l'interferenza termica)

CASO 2

Anche in questa simulazione si è assunto un utilizzo annuale dell'impianto con pause nelle mezze stagioni. In questo caso sono stati utilizzati valori indicativi di portata di picco, forniti dai progettisti, pari a 1555.2 m³ al giorno per il prelievo-restituzione invernale e 2108 m³ al giorno per il regime estivo.

I risultati di questa simulazione presentano delle forti analogie con la simulazione precedente, ma ogni fenomeno risulta più accentuato, a causa delle maggiori portate applicate.



Grafico 12: Profili di carico idraulico per i pozzi PE (in blu) e PR (in rosso). In ascissa è rappresentato l'intervallo di tempo della simulazione espresso in giorni [d], mentre in ordinata il carico idraulico espresso in metri [m]

Come si può vedere nel Grafico 12, livello piezometrico del pozzo di prelievo PE si abbassa e si stabilizza su un valore pari a 22.15 m, mentre specularmente aumenta il carico idraulico nel pozzo di restituzione PR, stabilizzandosi a 41.19 m durante il regime invernale di funzionamento; invece, nel periodo estivo i valori sono pari a 18.45 m per PE e 44.327 m per PR. Nei periodi in cui l'impianto è spento i livelli tornano invece al valore di 32.457 m (imposto al modello come iniziale del flusso).

Entrambi i profili di carico descrivono correttamente il fenomeno fisico che avviene durante il pompaggio (caduta repentina del livello dinamico nel pozzo di emungimento e innalzamento in quello di restituzione).



Grafico 13: Curve di temperatura media espressa in gradi Celsius [°C] per PE (in blu) e PR (in rosso); in ascissa troviamo il tempo espresso in giorni [d], in ordinata la temperatura in C°. La linea gialla individua il momento in cui comincia a manifestarsi la corto-circuitazione termica.

Le curve rappresentate nel Grafico 13 mostrano in maniera simile alla simulazione precedente, la risposta termica all'utilizzo dell'impianto nei regimi estivo e invernale e nelle mezze stagioni. In questo caso la sollecitazione termica è più elevata poiché si stanno utilizzando delle portate maggiori e anche il fenomeno della corto-circuitazione termica sembra anticipare rispetto al caso precedente.

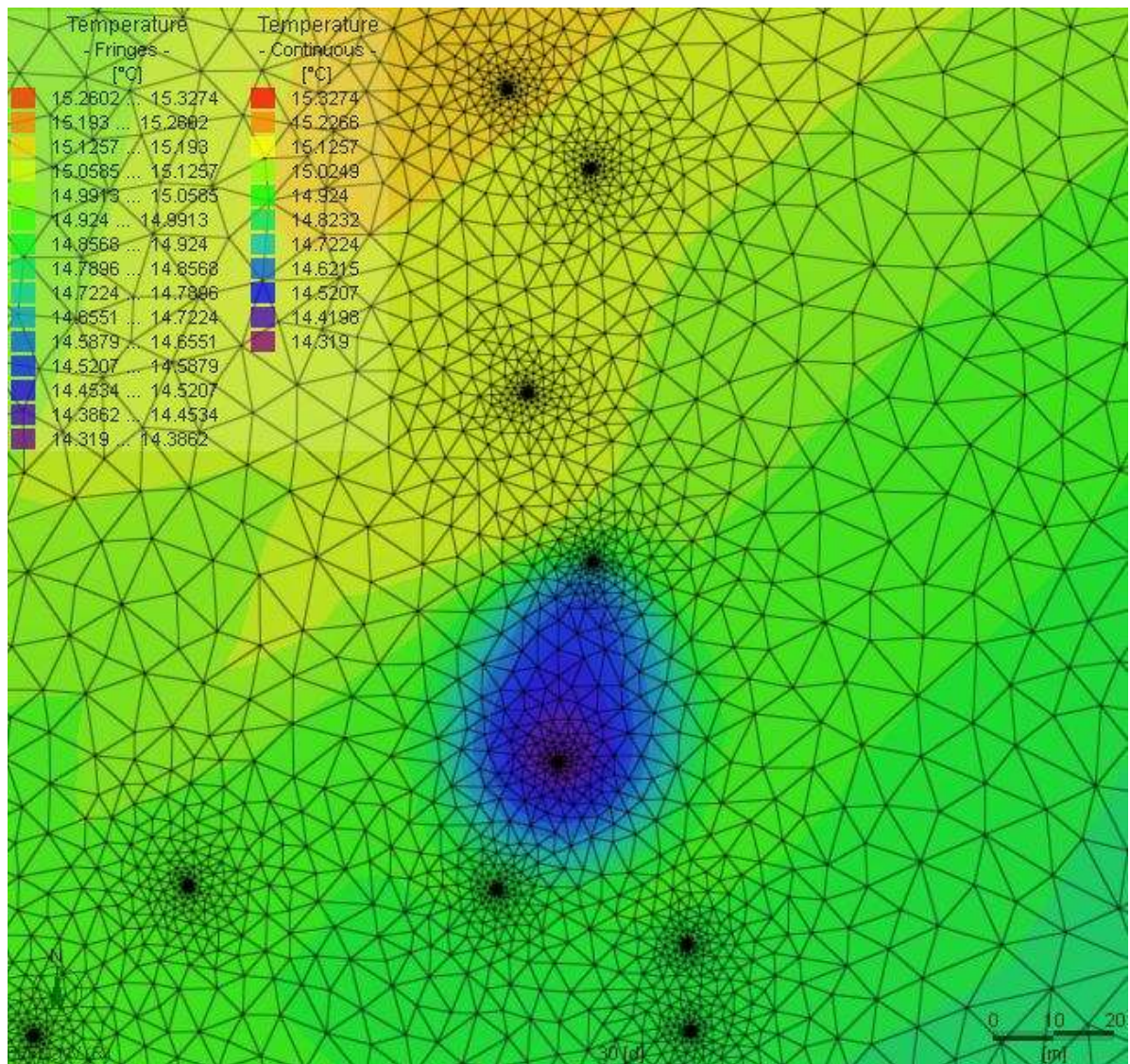


Figura 104: Fronte termico a temperatura media più fredda che si espande dal punto di reiniezione (pozzo PR) andando ad intercettare il pozzo di prelievo posto a NNE (fine gennaio)

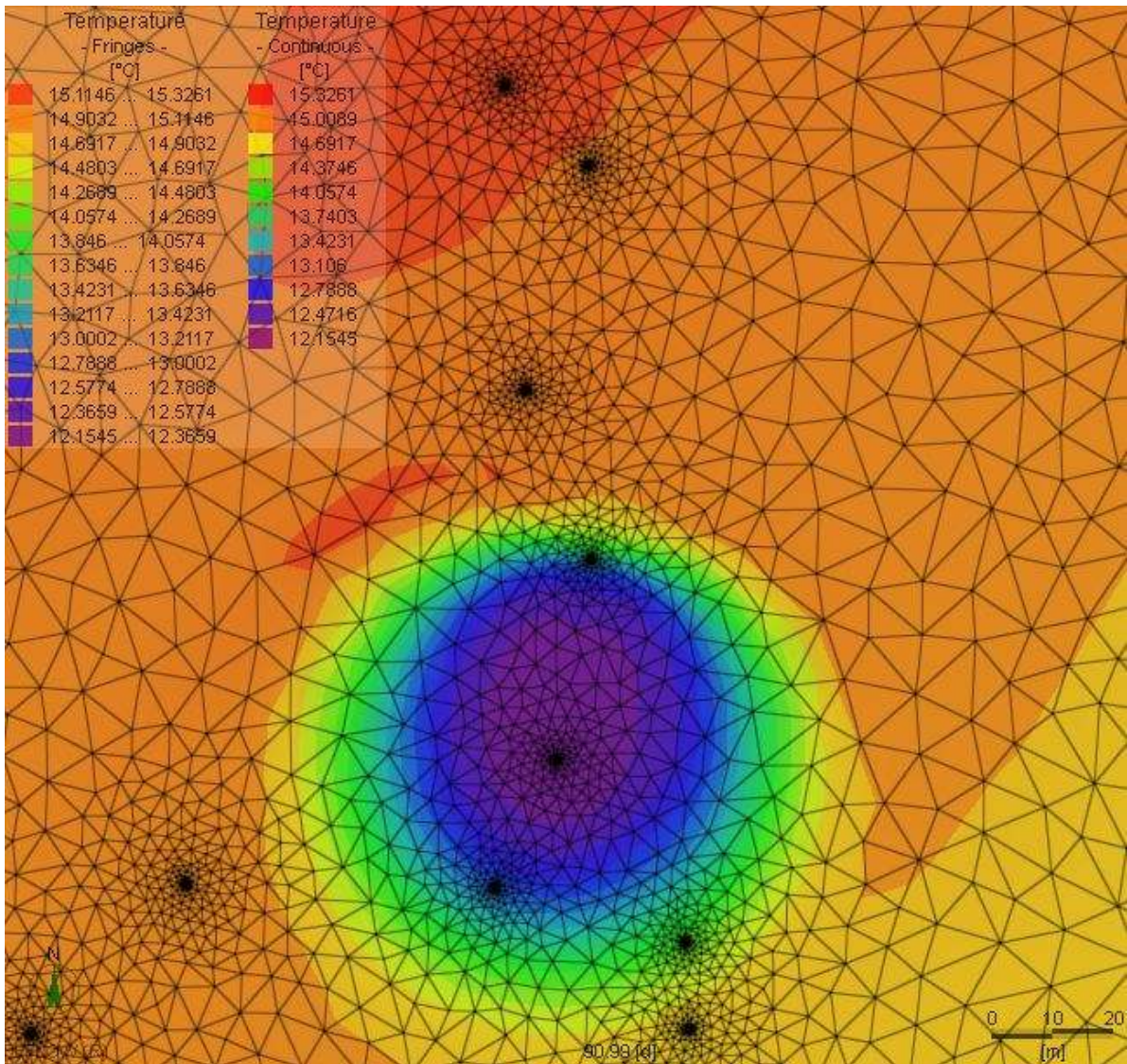


Figura 105: Situazione alla fine del mese di Marzo (regime invernale). Dal punto di restituzione (centrato nell'aureola viola) il plume freddo si espande progressivamente andando ad interessare il punto di prelievo posto a NNE (pozzo PE)

CASO 3

Nell'ultima simulazione, svolta alla fine verificare le modalità di recupero termico ad impianto fermo, è stato considerato un periodo di utilizzo dell'impianto per i soli mesi invernali (15 Ottobre – 31 Marzo) ed è stato messo in funzione ogni giorno esclusivamente dalle 8.00 del mattino alle 18 pomeridiane. Il pompaggio e la restituzione sono stati impostati sulla base di valori fissi di portata pari a 561 m^3 al giorno (6.5 l/s).

Anche in questo caso si è potuto evidenziare l'interferenza termica in prossimità di PE, dovuta all'arrivo di un plume relativamente più freddo nel punto di prelievo.

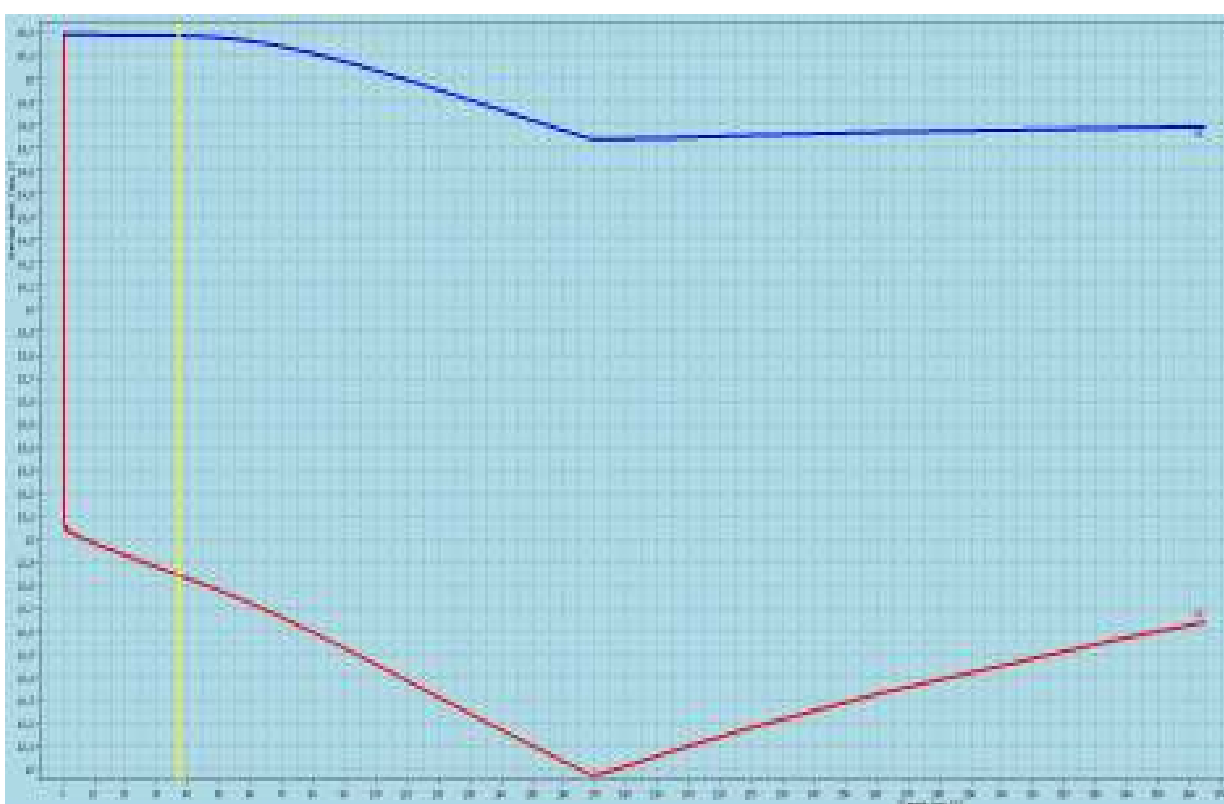


Grafico 14: Curve di temperatura media, in regime invernale (dal 15 Ottobre al 31 Marzo) espressa in gradi Celsius [°C] per PE (in blu) e PR (in rosso); in ascissa è rappresentato il tempo espresso in giorni [d], in ordinata la temperatura in C°. La linea gialla indica il momento in cui comincia a manifestarsi la corto-circuitazione termica.

Pertanto si può ipotizzare un utilizzo più efficiente dell'impianto se utilizzato a regimi di funzionamento alternati giorno-notte. Si può notare inoltre il recupero termico, che risulta rallentato dopo lo spegnimento dell'impianto. I lunghi tempi di riequilibrio termico sono probabilmente in relazione ai bassi gradienti idraulici naturali che caratterizzano gli acquiferi della zona.

5.4.6 SVILUPPI FUTURI

Alla fine del mese di Luglio 2011 è stato effettuato un rilievo tramite l'utilizzo di laser scanner distanziometrico della Torre di Piazza (o Torre Bissara), costruzione attigua all'edificio della Basilica Palladiana che si innalza per 82 metri in Piazza dei Signori.

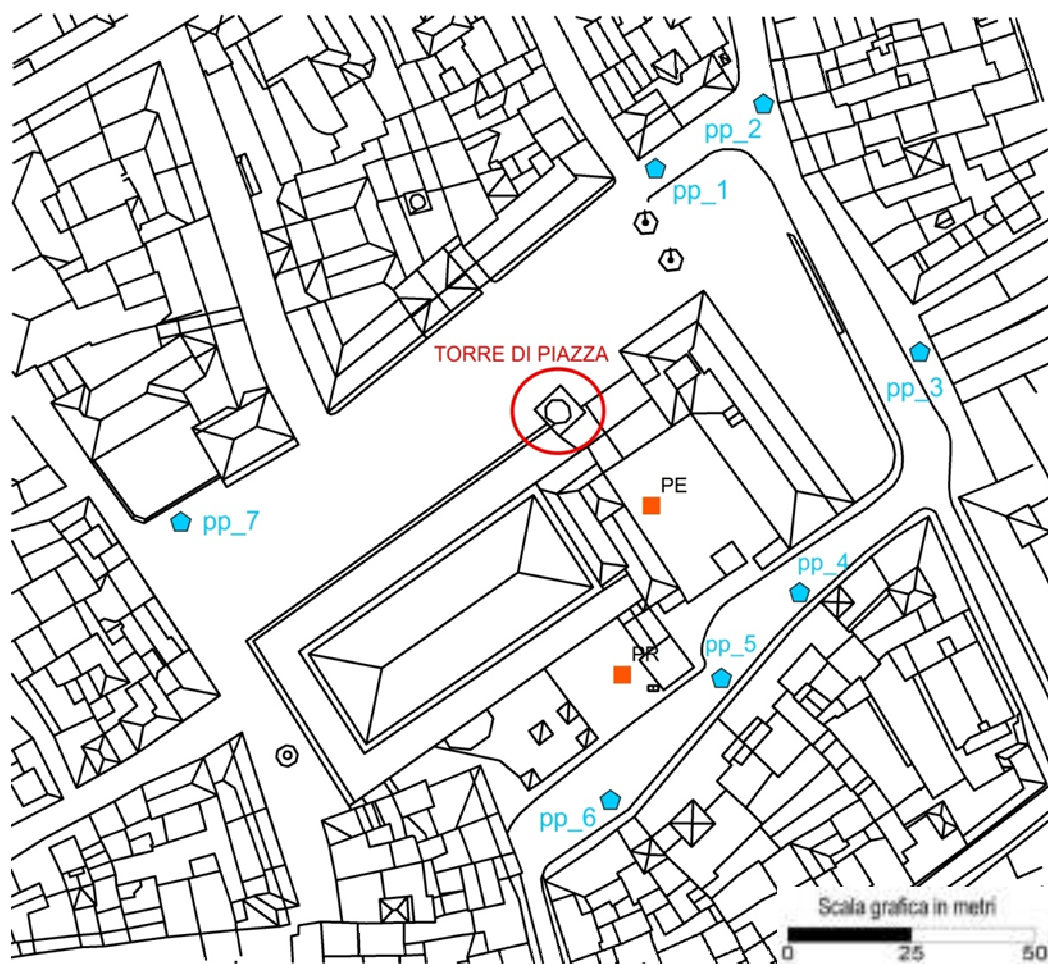


Figura 106: Collocazione dei punti di presa da cui sono state effettuate le scansioni alla Torre di Piazza

L'indagine ha costituito il primo step di una procedura di monitoraggio periodico alla Torre Bissara ed edifici limitrofi, al fine di valutarne la stabilità e descriverne gli eventuali microspostamenti nel corso del tempo anche in relazione alle operazioni di prelievo-emungimento dell'impianto geotermico in questione. Al momento i dati acquisiti sono in fase di prima elaborazione.

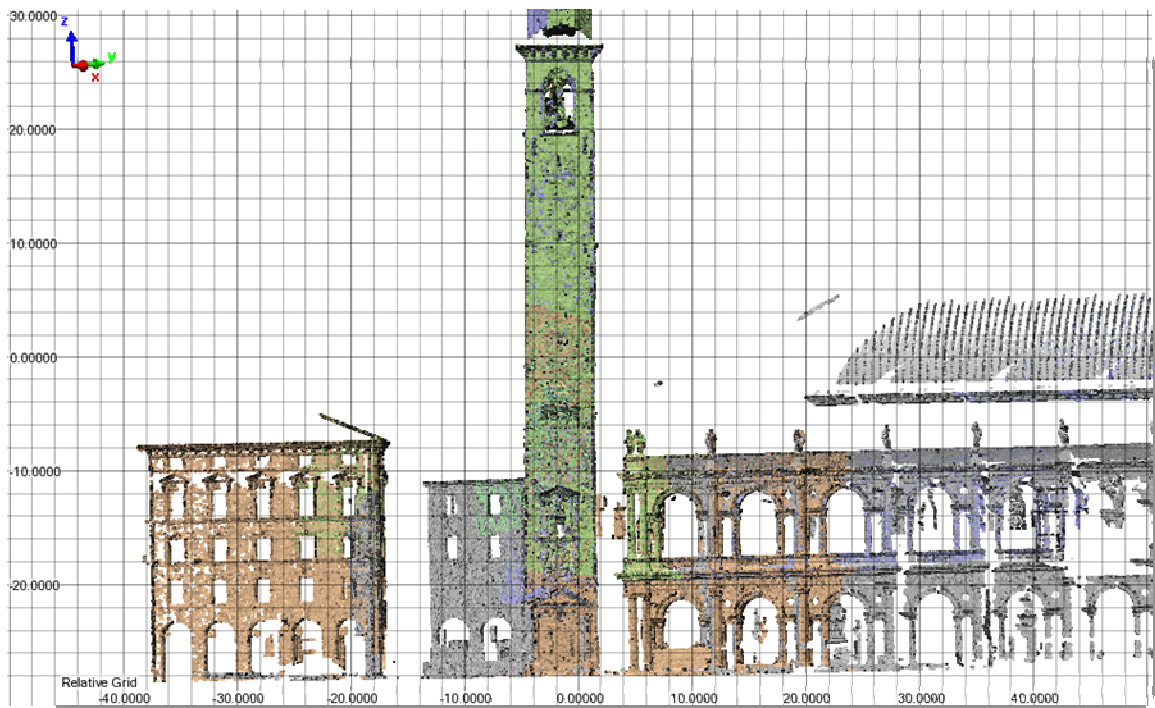


Figura 107: nuvola di punti acquisita con il laser scanner (immagine inserita a titolo esemplificativo)

Sarebbe opportuno affiancare questo tipo di studio ad indagini geotecniche, da effettuarsi su campioni di terreno provenienti dai sondaggi effettuati nell'area della Basilica e della Torre. Risulterebbe infatti interessante e opportuno determinare le proprietà meccaniche di tali terreni, al fine di valutarne la risposta meccanica alle sollecitazioni indotte dal pompaggio e re immissione in falda durante il periodo di utilizzo dell'impianto geotermico, e di conseguenza prevedere o quantomeno descrivere eventuali spostamenti differenziali degli edifici coinvolti.

CONCLUSIONI

Il presente studio ha preso in esame un esempio di utilizzo di un sistema geotermico a bassa entalpia, con uso diretto di acqua di falda, allo scopo di sviluppare un primo tentativo analitico di simulazione accoppiata di tipo fluidodinamico e termico in diverse configurazioni di funzionamento, verificando i possibili effetti prodotti durante le fasi di prelievo e restituzione nell'acquifero.

L'implementazione del modello idrodinamico-termico ha contribuito ad evidenziare le reazioni del sistema idrogeologico naturale alle sollecitazioni idrodinamiche e termiche relativamente all'acquifero confinato identificato come la più idonea sorgente energetica tale da poter soddisfare le esigenze termiche e frigorifere dell'edificio asservito ed economicamente compatibile con i costi di realizzazione in comparazione ai tempi di ritorno dell'investimento, correlati al risparmio energetico derivato dall'utilizzo di fonti rinnovabili. Pertanto l'utilizzo di questa tipologia di impianto geotermico riduce l'impatto che i tradizionali sistemi di climatizzazione hanno sull'ambiente, evitando l'emissione in atmosfera di CO₂, limitando i disturbi acustici in aree suscettibili, quali quelle urbane, attraverso l'impiego di pompe di calore collocate in spazi chiusi ed isolati, ed infine abbattendo l'impatto paesaggistico sugli edifici, specie quelli di valore storico-artistico, generato attualmente dalla presenza di sistemi di ventilazione collocati generalmente sulle terrazze o sui tetti dei fabbricati.

Trattandosi di un modello di flusso interpretativo, non è richiesta necessariamente la calibrazione (Anderson, 2002), anche se tale procedura sarebbe indispensabile nel caso in cui si volessero dare delle indicazioni di carattere specificamente previsionale sul comportamento del flusso sotterraneo, nonché delle condizioni di lavoro su base stagionale. Lo studio qui presentato costituisce pertanto un primo approccio metodologico di tipo analitico, che richiede ulteriori futuri sviluppi, sia per una modellazione idrodinamico-termica quantitativa di dettaglio a fini previsionali, che nelle azioni successive di verifica e validazione tramite azioni di monitoraggio, peraltro già previste in fase progettuale. Poiché il sistema geotermico insiste in una situazione geotecnica piuttosto sensibile, è inoltre previsto un controllo topografico degli effetti in superficie e sugli edifici, eventualmente indotti dalle operazioni di prelievo e restituzione nella falda acquifera locale. A tal fine è stato realizzato un primo rilievo laser scanner dello stato dei luoghi, generando una "fotografia" *ante-operam* del complesso della Basilica Palladiana e degli edifici limitrofi, consentendo, con opportune rioccupazioni di verificare per confronto le eventuali modificazioni topografiche.

BIBLIOGRAFIA

Anderson M. P., Woessner W. W. (2002) - *Applied groundwater modeling*. Academic press, San Diego. 381 pp.

Antonelli R., Dazzi R., Gatto G., Mari G.M., Mozzi G., Zambon G. (1990) - *Correlazioni litostratigrafiche e idrostrutturali nel complesso alluvionale della bassa valle del Fiume Agno-Guà e nella antistante pianura vicentina (Monti Lessini Orientali - Vicenza)* – In: Bollettino del Servizio Geologico d'Italia, vol. CIX, pp. 7-14 , Roma.

Aqtesolv - Copyright © 1998-2011 HydroSOLVE, Inc. and/or its suppliers, 2303 Horseferry Court, Reston, Virginia 20191-2739 U.S.A.

Basta, S., Minchio, F. (2007) – *Geotermia e pompe di calore. Guida pratica agli impianti geotermici di climatizzazione* – Ed. S. Basta, Verona.

Bertani, R. (2005) – *L'energia geotermica* – In: Analysis 3 - pp. 1-12.

Bianchi, I. (2009) – *La geotermia e le norme* - Convegno su: "Sviluppo della geotermia a bassa entalpia nella regione Veneto: problematiche amministrative e giuridiche, aspetti impiantistici e tecnici a confronto" – Vicenza.

Bondesan A., Primon, S., Bassan, V., Vitturi, A. (2008) - *Le unità geologiche della provincia di Venezia* - Verona, Cierre, 2008, pp. 72-85.

Busoni, S. (2009) – *Lo scambio termico tra risparmio energetico e tutela dell'ambiente: il punto di vista della Provincia di Treviso* - Convegno su: "Sviluppo della geotermia a bassa entalpia nella regione Veneto: problematiche amministrative e giuridiche, aspetti impiantistici e tecnici a confronto" – Vicenza.

Butler, J.J., Jr. (1988) - *Pumping tests in nonuniform aquifers, the radially symmetric case* - Journal of Hydrology, vol. 101, pp. 15-30.

Canavese, P. - *La geotermia a bassa entalpia: quadro normativo* - Energeo Studio Associato

Caputo, P., Ferrari, S., Romer, A. – *Trasmittanza dell'involucro nell'edificio* – pp. 84-91.

Cavallini, A. (2009) - *Sistemi a circuito aperto e chiuso: paragone impiantistico, energetico ed economico* - Convegno su: "Sviluppo della geotermia a bassa entalpia nella regione Veneto: problematiche amministrative e giuridiche, aspetti impiantistici e tecnici a confronto" – Vicenza.

Combs, J., Muffler L.P.J. (1973) - *Exploration for geothermal resources* - In: Kruger,P. and Otte, C., eds., *Geothermal Energy*, Stanford University Press, Stanford, pp. 95-128.

Dal Prà, A. (1983) - *Carta idrogeologica dell'alta Pianura Veneta* - Ist. Geol. Univ. Padova.

Dickson, M. H., Fanelli, M. (2004) - *Cos'è l'Energia Geotermica?..*

DHI Wasy Software (2010) - *Feflow 6.0 Training Manual*.

DHI Wasy Software (2010) - *Feflow 6.0 User Manual*.

Ferretti, M. P. (2009) – *Geotermia e ambiente: l'esperienza della provincia di Vicenza* - Convegno su: "Sviluppo della geotermia a bassa entalpia nella regione Veneto: problematiche amministrative e giuridiche, aspetti impiantistici e tecnici a confronto" – Vicenza.

Fileccia, A. (2009) – *Le prove di portata* – In: *Acque Sotterranee* 121, 2010, Geograph, Milano, pp. 43-56.

Fontana, A., Poli, F., Menci, N., Nonino, M., Giallongo, E., Cristiani, S., & D'Odorico, S. (2004) – *L'evoluzione geomorfologica della pianura veneto-friulana*. In Bondesan A., Meneghel M. (Ed.): *Note illustrative della carta geomorfologica della provincia di Venezia*. Esedra - Venezia.

Galgaro, A. (2009) – *Geoscambio e sostenibilità ambientale: il ruolo della ricerca scientifica* - Convegno su: "Sviluppo della geotermia a bassa entalpia nella regione Veneto: problematiche amministrative e giuridiche, aspetti impiantistici e tecnici a confronto" – Vicenza.

Galgaro, A., Cultrera, M. (2001 in press) - *Thermal short circuit on groundwater heat pump: analysis and solutions. The case of Rovigo (Italy)*.

Gargini, A. – *Le prove di emungimento: teoria, pratica e fattibilità concreta*.

Hikari, F., Tadasuke, I., Ryuichi, I., Youhei, U. (2007) - *Development of suitability maps for ground-coupled heat pump systems using groundwater and heat transport models* - Geothermics 36, pp. 459-472.

Hochstein, M.P. (1990) - *Classification and assessment of geothermal resources* - In: Dickson MH and Fanelli M (eds) *Small geothermal resources*, UNITAEW NDP Centre for Small Energy Resources, Rome, Italy, pp. 31-59.

Hvorslev, M.J. (1951) - *Time Lag and Soil Permeability in Ground-Water Observations* – Bull. 36, Waterways Exper. Sta. Corps of Engrs, U.S. Army, Vicksburg, Mississippi, pp. 1-50.

Jacob, C.E. (1950) - *Flow of groundwater* - In Rouse, H., ed. *Engineering hydraulics*; New York, John Wiley, pp. 321–385.

JSTP (1990) - *Thermophysical Properties Handbook* - Japan Society of Thermophysical Properties, Yokendo Co., Tokyo, Japan, 489 pp.

Kyoto Club ONG (2009) - *Studio sul potenziale di valorizzazione delle fonti rinnovabili per la produzione di energia elettrica e termica in Italia* – Roma.

Lo Russo, S., Civita, M. V. (2009) - *Open-loop groundwater heat pumps development for large buildings: A case study* - Geothermics 38, pp. 335-345.

Lumb, J. T. (1981) - *Prospecting for geothermal resources* - In: Rybach, L. and Muffler, L.J.P., eds., *Geothermal Systems, Principles and Case Histories*, J. Wiley & Sons, New York, pp. 77-108.

Minchio, F., Valvassori, R. (2009) - *Parametri tecnici d'influenza nella progettazione e nella realizzazione di sonde geotermiche* - Convegno su: "Sviluppo della geotermia a bassa entalpia nella regione Veneto: problematiche amministrative e giuridiche, aspetti impiantistici e tecnici a confronto" – Vicenza.

Mion, F. (2002) - *Acqua sotterranea nel Veneto* – Arpa Veneto.

Monopoli, B. (2010) - *Studio geologico per la realizzazione del P.A.T del comune di Martellago (VE)*, relazione geologica.

Panazzolo, G. (2009) – *Geoscambio con uso diretto di acqua di falda* – Tesi di Laurea Magistrale in Geologia e Geologia Tecnica, Università degli Studi di Padova.

PDEP (1996) - *Ground Source Heat Pump Manual* - Pennsylvania Department of Environmental Protection Fact Sheet, Harrisburg, PA, U.S.A, 2 pp.

Pedron, R. (2009) – *Il caso dell'area Appiani di Treviso: studi effettuati e risultati ad oggi conseguiti* - Convegno su: "Sviluppo della geotermia a bassa entalpia nella regione Veneto: problematiche amministrative e giuridiche, aspetti impiantistici e tecnici a confronto" – Vicenza.

Personeni, D., Ghisalberti, A., Omacini, S., Maiorano, M. (2009/2010) - *Progetto pluridisciplinare anno scolastico sulla sostenibilità*.

RCT S.r.l. (2009) – *La Geotermia, fonte di energia rinnovabile*.

Rehau S.p.a. Filiale di Milano (2007) – Opuscolo informativo.

Romer, A. (2002) - *La pompa di calore, aspetti fisico-tecnici* – Losone.

Sinergo S.r.l. (2008) - *Realizzazione di un impianto di scambio termico a circuito aperto in Comune di Montebello Vicentino (VI)* – Relazione Idrogeologica.

Sinergo: Dati forniti dalla Sinergo S.r.l - Sinergie Geologiche per l'Ambiente, Contrà del Pozzetto, 4 36100 – Vicenza.

Sottani, A. (2009) – *Geoscambio ed idrogeologia: il sito pilota di Montebello Vicentino* - Convegno su: "Sviluppo della geotermia a bassa entalpia nella regione Veneto: problematiche amministrative e giuridiche, aspetti impiantistici e tecnici a confronto" – Vicenza.

Soccorso, C. - *Sviluppo della geotermia a bassa entalpia: il quadro di riferimento normativo nella Regione Veneto* – documento della Giunta Regione Veneto.

Monopoli, B. (2010) - *Studio geologico per la realizzazione del P.A.T. del Comune di Martellago (VE)* - Relazione Geologica

Tiezzi, E., Marchettini, N. (1999) - *Che cos'è lo sviluppo sostenibile?* - Donzelli Editore, Roma, pp. 39-41.

Verein Deutscher Ingenieure (2001) - *Thermal use of the underground. Ground source heat pump systems* - VDI-Richtlinien 4640, part 2.

SITOGRAFIA

<http://www.slideshare.net/Calbeira/normativa-sulla-geotermia>

<http://www.industriadelturismo.com>

<http://www.regione.veneto.it>

<http://www.istitutoturoldo.it>

<http://www.vicenzanatura.org>

<http://www.geotherm.it>

<http://geothermal-house.com>

<http://www.rehau.com>

<http://www.dhi-wasy.de>

<http://www.oc-praktikum.de>

<http://www.enea.it>

http://web.tiscali.it/risparmio_energetico

<http://maps.google.it/maps>

<http://it.wikipedia.org>

<http://www.aqtesolv.com>

<http://www.scribd.com>

