



**UNIVERSITÀ DI PISA**  
Facoltà di Ingegneria

**Master Universitario di II livello**

***Pianificazione e gestione dei sistemi per l'energia da fonti rinnovabili***

**Anno 2008**

**Tema del progetto:**

*“Studio di fattibilità tecnico–economica dell'utilizzazione della risorsa geotermica a Bassa Temperatura per una utenza commerciale o un aggregato di utenze civili nella provincia di Lucca”*

**Struttura ospitante:** Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione, Facoltà di Ingegneria, Università di Pisa

**Autore:**

Dott.ssa Francesca Cipriani

**Tutor Master:**

Dott. Giorgio Buonasorte  
(UGI – Unione Geotermica Italiana)

**Tutor Aziendale:**

Prof. Romano Giglioli

(Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazioni, Facoltà di Ingegneria – Università di Pisa)



# Indice

<b>Introduzione</b> .....	6
<b>Metodologia di studio</b> .....	7
<b>CAPITOLO 1: La Provincia di Lucca</b> .....	9
<b>1.1</b> Inquadramento geologico .....	9
<b>1.2</b> Inquadramento idrografico .....	12
<b>1.3</b> Inquadramento idrogeologico .....	13
<b>1.3.1</b> Inquadramento idrostrutturale del Bacino del Serchio .....	13
<b>1.3.2</b> Il sistema semiconfinato della Piana di Lucca .....	14
<b>1.3.3</b> Il sistema freatico litoraneo della Piana Versiliese .....	15
<b>1.3.4</b> Il sistema idrotermale del versante appenninico del Graben del Serchio .....	15
<b>1.4</b> Caratterizzazione geotermica del territorio .....	16
<b>CAPITOLO 2: La geotermia a bassa entalpia</b> .....	19
<b>2.1</b> L'energia geotermica nel sottosuolo .....	19
<b>2.2</b> I sistemi a pompa di calore geotermica .....	20

2.2.1 Il sistema di scambio di calore .....	20
2.2.2 La pompa di calore geotermica .....	25
2.2.3 I sistemi di riscaldamento/climatizzazione .....	27
<b>CAPITOLO 3: Esempi di impianti geotermici a bassa entalpia .....</b>	<b>28</b>
3.1 Tebo Spa, San Lazzaro di Savena (BO) .....	28
3.2 Energie Alternative, Capezzano Pianore (LU) .....	28
3.2.1 Complesso turistico–alberghiero, Isola d’Elba (LI) .....	29
3.2.2 Incaba, Camaiore (LU) .....	29
3.2.3 Hotel Joseph, Marina di Pietrasanta (LU) .....	30
3.2.4 Osteria Candalla, Camaiore (LU) .....	30
<b>CAPITOLO 4: La risorsa geotermica disponibile e le necessità energetiche dell’utenza per i comuni del territorio lucchese .....</b>	<b>31</b>
4.1 Potenziali risorse geotermiche considerate .....	31
4.2 Distribuzione della domanda sul territorio esaminato .....	37
4.3 Modello per l’analisi multicriteriale .....	42

<b>CAPITOLO 5: Scegliere la tipologia di impianto</b> .....	43
5.1 Parametri per la scelta della tipologia di impianto .....	43
5.1.1 Scelta del tipo di sistema di scambio di calore .....	43
5.1.2 Vincoli normativi ed incentivi .....	44
<b>CAPITOLO 6: Riscaldamento/climatizzazione di un utenza commerciale</b> .....	45
6.1 Dati generali di progetto .....	45
6.2 Tipo di sistema di scambio di calore previsto .....	47
6.3 Descrizione dell'impianto e analisi energetica .....	48
6.4 Analisi economica .....	48
<b>CAPITOLO 7: Conclusioni</b> .....	50
<b>Bibliografia</b> .....	51
<b>Ringraziamenti</b> .....	53

**Parole chiave:** geotermia a bassa entalpia, pompa di calore, Lucca.

**Riassunto** – Lo scopo di questa ricerca è volto all’analisi ed alla valutazione della sfruttabilità delle acque del territorio lucchese per il recupero del calore, ottimizzato con l’utilizzo di pompe di calore geotermiche.

I dati raccolti, relativi a sottosuolo profondo, corpi idrici superficiali e sistemi idrotermali, sono rielaborati creando un database dedicato alle acque superficiali e profonde dell’area esaminata.

L’analisi relativa ad un impianto a pompa di calore geotermica, si suddivide in: 1\_ sistema di scambio di calore con il sottosuolo, falda acquifera o risorsa idrica superficiale; 2\_ pompa di calore; 3\_ sistema di riscaldamento/raffrescamento interno all’edificio.

Sono raccolti anche i dati del fabbisogno termico per ogni comune, allo scopo di correlarli con la risorsa idrica disponibile. Tuttavia, la distribuzione eterogenea sul territorio lucchese di tali dati ha permesso solo di creare un modello sul quale porre le basi per svolgere, in futuro, un’analisi multicriteriale mediante ArcGIS.

Inoltre, viene effettuato uno studio di fattibilità di un impianto geotermico a bassa entalpia per la sede dell’Azienda dei Trasporti Clap Spa di Lucca, al fine di produrre riscaldamento/climatizzazione ed acqua calda sanitaria, considerandone anche l’analisi economica.

**Key words:** low enthalpy geothermic, heat pump, Lucca.

**Abstract** – The purpose of this study is the analysis and the evaluation of the utilization of the water in the area of Lucca, direct towards to the heat recovering, optimized by the use of geothermic heat pumps.

The collected data of the superficial and deep water, and hydrothermal systems has been inserted in a database.

The analysis of a geothermic heat pump system consists in: 1\_ heat exchange system with the ground, with the ground water table, or with the superficial water; 2\_ heat pump; 3\_ heating/cooling system of the building interiors.

The data of thermic needs for each town has been collected, in order to make a relation with the available hydric resource. Nevertheless, the heterogeneous distribution of the data in the area of Lucca allowed us to create only a model that can be used, in the future, to carry out the multicriterial analysis by ArcGIS software.

Moreover, the Clap Spa building site of Lucca is the object of the study of feasibility of a low temperature geothermic system. The aim of the study of feasibility is the construction of heating/cooling system, and sanitary hot water, considering its economic analysis.

## **Introduzione**

Lo scopo di questa ricerca è volto all'analisi ed alla valutazione della potenzialità geotermica di bassa entalpia della Provincia di Lucca.

Per giungere ad un corretto esame dell'utilizzazione della risorsa geotermica occorre considerare sia l'aspetto geologico, ossia la disponibilità e le caratteristiche idrogeologiche delle acque (superficiali e profonde), sia l'aspetto delle applicazioni, ovvero il tipo di tecnologia disponibile sul mercato che meglio si adatta al loro impiego, sia l'aspetto economico, cioè valutare il rapporto costi/benefici nelle attuali condizioni di mercato energetico.

In generale, i fluidi a bassa entalpia per usi termici sono presenti in modo diffuso sul territorio nazionale. Affinché una loro applicazione sia economicamente vantaggiosa bisogna tener conto di utenze di dimensioni medio-grandi oppure un complesso di utenze caratterizzate da un buon coefficiente d'utilizzazione dell'energia termica, così da ripartire gli elevati investimenti iniziali.

Inoltre, i fluidi geotermici, anche di media e bassa temperatura, mostrano limitazioni di trasporto e di conservazione, infatti devono essere utilizzati nelle vicinanze dell'area sorgente. Nel corso di questa ricerca viene fatto riferimento ai dati di sottosuolo profondo, ai corpi idrici superficiali (falde acquifere, laghi, fiumi, canali) ed ai sistemi idrotermali, al fine di poter verificare la sfruttabilità delle acque (sia termali che fredde) del territorio lucchese per il recupero del calore. Tale recupero può essere ottimizzato con l'utilizzo di pompe di calore geotermiche, applicate con scambio termico a circuito chiuso/aperto con rocce del substrato o fluidi.

Dall'analisi e dalla valutazione della potenzialità geotermica di bassa entalpia della Provincia di Lucca, emerge un quadro interessante per l'utilizzo della risorsa idrica associata alla pompa di calore geotermica, al fine di produrre riscaldamento/climatizzazione ed acqua calda sanitaria, per un utenza di dimensioni medio-grandi.

A tal proposito è stata individuata una utenza in cui applicare, a titolo di esempio, uno studio di fattibilità per la sede dei trasporti Clap Spa di Lucca.

## **Metodologia di studio**

Lo studio in oggetto si articola in due fasi distinte: la prima (di tipo tecnico–scientifico) comprende, da un lato, la raccolta dei dati e delle informazioni geologiche, idrogeologiche e geotermiche della Provincia di Lucca reperibile in bibliografia e, dall’altro, l’analisi riguardante l’uso delle pompe di calore utilizzabili per il recupero del calore geotermico; la seconda è invece caratterizzata da un’analisi prevalentemente economica della sfruttabilità della risorsa geotermica.

Per quanto riguarda la raccolta dati delle acque, il contributo iniziale di maggior rilevanza è stato offerto dal documento “Inventario delle risorse geotermiche Nazionali – Regione Toscana” (1987), redatto da ENEL-UNG, ENI-AGIP SERG, CNR-IIRG, ENEA-DPAS, per il Ministero dell’Industria, Commercio e Artigianato, fornito dalla Biblioteca dell’Area di Ricerca di Pisa del CNR. I dati di tale documento sono stati integrati con elementi provenienti dalla bibliografia tecnica e scientifica del settore (Biblioteca di Scienze Naturali e Ambientali di Pisa, Biblioteca dell’Area di Ricerca di Pisa del CNR, ENEL di Pisa).

Le informazioni raccolte sono state rielaborate creando così un database dedicato alle acque superficiali e profonde dell’area presa in esame, mettendone in evidenza le caratteristiche principali (localizzazione, temperatura, portata).

Utilizzando il programma ArcGIS 9.2, è stata creata una mappatura del territorio lucchese relativa all’assetto idrografico e urbanistico, mediante dati territoriali georeferenziati provenienti dalla Provincia di Lucca (Servizio Urbanistica e Servizio Ambiente), al fine di individuare ed analizzare la risorsa idrica della provincia stessa.

La documentazione sulle pompe di calore deriva dalla raccolta delle informazioni da bibliografia, atti di vari convegni e siti web. In generale, gli aspetti che sono stati approfonditi riguardano: sonde geotermiche, tecniche di perforazione, sistemi di scambio a circuito chiuso o aperto, relativi rendimenti energetici e valutazione del tipo di tecnologia disponibile che meglio si adatta al loro impiego, impianti di distribuzione del calore a bassa temperatura per riscaldamento/raffrescamento.

I dati demografici e le informazioni riguardanti il fabbisogno termico annuo per i comuni della Provincia di Lucca sono derivati dal documento “Valutazione delle risorse geotermiche a media e bassa temperatura della Toscana – Rapporto finale di fase 1” (2005), redatto dalla Regione Toscana con Cosvig in collaborazione con UGI, offerto dalla Regione Toscana.

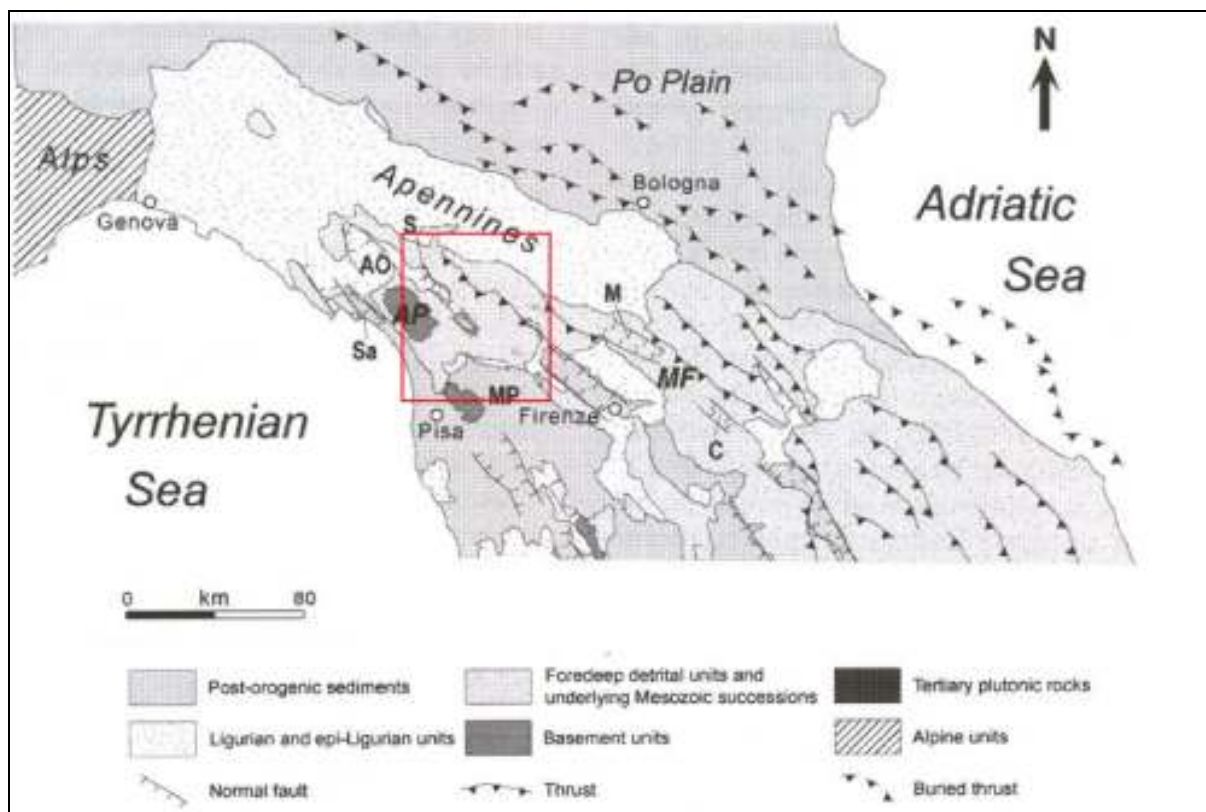
A tal proposito, occorre sottolineare che i dati georeferenziati disponibili da utilizzare con il programma ArcGis, al fine di creare un'analisi multicriteriale della risorsa idrica correlata alle necessità energetiche delle attività produttive del territorio (sulla base del fabbisogno termico delle varie utenze), purtroppo risultano distribuiti in modo eterogeneo sul territorio lucchese, ed in molti casi sono incompleti. Dunque, non si è potuto effettuare l'analisi e si è cercato di creare almeno una raccolta di base dei dati per un modello utilizzabile, in futuro, per l'analisi multicriteriale.

# CAPITOLO 1: La Provincia di Lucca

## 1.1 Inquadramento geologico

L'area di studio è ubicata nel settore geologicamente più complesso dell'Appennino Settentrionale (**Fig. 1**), dove sono comprese tutte le unità stratigrafico-strutturali che ne compongono il complesso edificio a falde di ricoprimento sovrapposte.

Sono infatti presenti terreni appartenenti sia ai livelli strutturali più profondi, appartenenti al Basamento Ercinico, con le sue coperture metamorfiche mesozoiche ("Autoctono Apuano") ed alle Unità parautoctone delle Alpi Apuane stesse, sia a quelli più superficiali della Falda Toscana e delle Unità Liguri e Subligure, fino ai depositi post-orogentici plio-quaternari (**Fig. 2**).



**Fig.1:** Schema geologico dell'Appennino Settentrionale (Balestrieri et al., 2003): AP) Alpi Apuane, MF) Monte Falterona, MP) Monti Pisani; Sa) Bacino di Sarzana, AO) Bacino di Olivola-Aulla, S) Bacino del Serchio, M) Bacino del Mugello, C) Bacino del Casentino. Nel riquadro rosso: l'area di studio.



Legenda della Fig. 2:

**Unità stratigrafico-strutturali:** Unità del M. Caio: fh) Flysch del M. Caio; cb) Complesso di base. Unità di Canetolo: acs) Argille e calcari superiori; al) “Alberese”; aci) Argille e calcari inferiori. Falda Toscana: mg) Macigno; st/nu) Scaglia Toscana/”Nummulitico”; cma) Maiolica; di) Diaspri; cst<sub>1</sub>) Calcare Selcifero Superiore; mP) Marne a Posidonia; cst) Calcare Selcifero Inferiore; crA) Rosso Ammonitico; cA) Calcari ad Angulati; cm) Calcare Massiccio; cR) Portoro, Calcari e Marne a Rhaetavicula Contorta; cv) Calcare Cavernoso–Brecce Poligeniche. Unità parautoctone: pmg1) “Pseudomacigno”; cp1) Scisti Sericitici e Cipollini; C.i.) Successione Carbonatica Mesozoica Indifferenziata; Vr.) “Verrucano” s.l.; Be) Basamento Ercinico (Paleozoico) Polimetamorfo. “Autoctono”: pmg) Pseudomacigno; scN) Scisti Sericitici, Calcari “Cipollini” e “Calcari a Nummuliti”; csE) Calcari Selciferi a Entrochi; di) Diaspri; csc) Calcescisti; cs) Calcari Selciferi e Calcescisti (nella parte alta della formazione); m) Marmi; md) Marmi Dolomitici; grm) Marmi a Megalodonti; gr) “Grezzoni” (Dolomie e Calcari Dolomitici); Vr) “Verrucano” s.l.; Be) Basamento Ercinico (Paleozoico) Polimetamorfo, prevalentemente filladico nelle Alpi Apuane e filladico-quarzitico nei Monti Pisani.

**Unità idrostrutturali** Ci- Copertura impermeabile, comprendente strutture acquifere superficiali, di limitata importanza: depositi post-orogemci plio-quadernari, continentali e marini; Successioni flyschoidi subligure e liguri; Complesso dei flysch arenacei M. Modino-M. Cervarola; Complesso preflysch-flysch Scaglia-Macigno. Sac- Sistema acquifero carbonatico: sS1) Sotto-sistema superiore, comprendente il gruppo delle formazioni mesozoiche prevalentemente carbonatiche della Falda toscana e dell’Unità delle Panie. Act1) acquicludi e acquitardi, costituiti dall’Unità di Massa, dalle Scaglie «parautoctone» di Stazzema e dal Complesso preflysch-flysch Scisti sericitici Pseudomacigno. sS2) Sottosistema inferiore, comprendente il gruppo delle formazioni mesozoiche prevalentemente carbonatiche dell’«Autoctono» apuano e dei Monti Pisani. Act<sub>2,3</sub>) acquicludi e acquitardi, costituiti da nuclei di «basamento», prevalentemente filladici, implicati in anticlinali molto strette (Anticlinali di Vinca /2/ e del Monte Tambura /3/). Si- Substrato impermeabile: basamento ercinico, filladico-quarzitico, dell’«Autoctono» apuano e dei Monti Pisani (da Baldacci et al., 1993).

## 1.2 Inquadramento idrografico

L'assetto idrografico ed idrogeologico (vedere paragrafo successivo) vengono descritti per introdurre le potenziali risorse idriche, che possono costituire altrettante risorse geotermiche.

La Provincia di Lucca, con i suoi 1773 km<sup>2</sup>, comprende il bacino imbrifero del Fiume Serchio quasi per intero, parti marginali dei bacini dei Fiumi Magra ed Arno, i tre bacini intermedi di Versilia, Baccatoio e Camaiole, nonché buona parte dei bacini a deflusso artificiale del Lago di Massaciuccoli, dei Paduli di Porta e di Bientina e della foce relitta del Versilia, o Fosso Fiumetto (Giovannini, 1993).

Il Bacino del **Fiume Serchio** (1460 km<sup>2</sup> di superficie imbrifera) si sviluppa in gran parte nella depressione morfo-strutturale compresa tra il crinale nord-appenninico e le Alpi Apuane (Baldacci et al., 1993). Il Serchio rientra nella categoria dei fiumi a regime idrometrico molto variabile, restandone il rapporto tra portate ordinarie di piena e di magra superiore al 20%: la sua **portata media istantanea**, stimabile intorno a **35.000–40.000 l/s**, scende sotto i 5.000 l/s in periodi di magra, ma può superare 1.500.000 l/s a seguito di precipitazioni persistenti (Giovannini, 1993). Tra i suoi affluenti appenninici, il maggiore in assoluto è il **Torrente Lima**, che contribuisce con una **portata media di 12.000 l/s**, mai inferiore, anche in secca, a 3.000 l/s. Mentre, fra gli affluenti apuani, la **Turrite di Galliciano** è quella che tributa al Serchio il maggiore apporto idrico, con almeno **700–800 l/s** (Giovannini, 1993).

Il **Fiume Versilia** ed i compluvi collaterali, con regime torrentizio ma dotati di sfocio autonomo al mare, drenano il versante occidentale delle Alpi Apuane, formando la Riviera della Versilia. Il bacino imbrifero misura un'estensione complessiva di 116 Km<sup>2</sup>, con una **portata media di 600 l/s** (Giovannini, 1993).

Il **Fiume Camaiole** assume tale denominazione appena a valle del paese omonimo e, vicino allo sbocco in mare, è chiamato Fosso dell'Abate. Il bacino imbrifero del Camaiole si limita al solo tratto in tramontano, misura un'estensione di circa 49 km<sup>2</sup> e la sua **portata effettiva** non supera **50 l/s** (Giovannini, 1993).

Il bacino imbrifero del **Torrente Baccatoio** può essere considerato come composto di due parti: una corrispondente all'impluvio intramontano, con estensione di circa 12 Km<sup>2</sup>, ed è un modesto corso d'acqua a regime torrentizio; l'altra coincidente col tratto di pianura litoranea e pedemontana, si estende per circa 33 Km<sup>2</sup>, e viene ad assumere una certa importanza (nella

piana costiera) come denso ventaglio di fossi della depressione bonificata posta fra le conoidi di Versilia e Camaiore (Giovannini, 1993). La sua portata è pari a **150–200 l/s**.

Il **Lago di Massaciuccoli** attualmente ha un'estensione di **6,9 km<sup>2</sup>** e, impostatosi in una depressione della piana litoranea, presenta caratteristiche tipiche dei laghi costieri, con una **profondità variabile tra 1,0–2,5 m** (Meriggi & Spandre, 1996). Il bacino imbrifero del lago racchiude una superficie di 119 km<sup>2</sup> (di cui 35 km<sup>2</sup> competono ad aree a drenaggio naturale, e 84 km<sup>2</sup> ad aree di pianura a drenaggio artificiale). Il lago possiede come emissario artificiale il **Canale Burlamacca**, nel quale confluiscono alcuni canali, tra cui: Malfante, Il Fosso Le Venti, il Fosso Le Quindici. L'**invaso lacustre** contiene abitualmente **14 milioni di m<sup>3</sup>** di acqua in equilibrio idrostatico con la falda superiore, dolce, e quella sottostante, salmastra; in caso di piogge torrenziali il livello lacustre può sfiorare i 20 milioni di m<sup>3</sup> di capienza (Giovannini, 1993).

## **1.3 Inquadramento idrogeologico**

Alla notevole estensione dell'area considerata fa riscontro una condizione di particolare complessità idrogeologica.

Dunque, è opportuno considerare le caratteristiche idrogeologiche delle differenti zone singolarmente, anche se il modello idrostrutturale del Bacino del Fiume Serchio è rappresentativo a scala regionale.

### **1.3.1 Inquadramento idrostrutturale del Bacino del Serchio**

La complessità morfo-strutturale del Bacino del Serchio si riflette sul suo assetto idrogeologico interno e sui suoi collegamenti sotterranei con i bacini adiacenti. Dall'alto verso il basso, si possono schematizzare i rapporti tra le principali unità idrostrutturali tramite la seguente successione geometrica (Baldacci et al., 1993):

1. *Copertura Impermeabile (Ci)*, ad elevata componente argillosa, i cui orizzonti acquiferi (con livelli a permeabilità secondaria decrescente, secondaria, primaria) compongono strutture idrogeologiche superficiali sede di falde freatiche;

2. *Sistema Acquifero Carbonatico (Sac)*, diviso in un sottoinsieme superiore (*sSI*) e uno inferiore (*sS2*), entrambi a dominanza carbonatica, separati dal complesso pelitico-arenaceo, che assume il ruolo di acquicludi e acquitardi;

3. *Substrato Impermeabile (Si)*, corrispondente al basamento metamorfico apuano, costituito da un complesso filladico a grado di permeabilità secondaria decrescente.

Dallo studio idrogeologico-strutturale, risulta che la maggiore circolazione sotterranea avviene nel *Sistema acquifero carbonatico (Sac)*, distribuita dai livelli più superficiali (drenati da sorgenti fredde), a quelli più profondi (originanti sorgenti termominerali).

La circolazione superficiale è regolata principalmente dagli acquitardi e dagli acquicludi presenti tra i vari acquiferi.

La circolazione profonda si sviluppa quando tali acquitardi e acquicludi si approfondiscono unitamente ad un approfondimento del substrato impermeabile; gli acquiferi appartenenti a tali strutture idrogeologiche profonde sono definiti come *Serbatoio carbonatico profondo (Scp)*. Tale circolazione alimenta sorgenti termominerali della Garfagnana.

### **1.3.2 Il sistema semiconfinato della Piana di Lucca**

La **circolazione sotterranea** è di tipo **freatico a “pelo libero”** nella parte settentrionale della Piana, dove affiorano materiali ghiaiosi-argillosi grossolani dell’apice della conoide, ed assume caratteri piezometrici di **falda artesianica confinata** sempre più decisi man mano che l’acquifero principale viene a soggiacere a crescenti spessori di sedimenti fini limoso-torbosi dei depositi palustri o di colmata lacustre (Giovannini, 1993).

La **falda freatica** si configura come un mono-acquifero unico (al più contenente minori “falde sospese”), con una **permeabilità medio-alta** ( $> 10^{-3}$  cm/s). Considerando la potenza dello strato saturo, tra l’acquicludio basale e la superficie freatica libera, attorno ai **30 m di spessore**, una stima di larga approssimazione valterebbe la **capacità utile della falda a circa 800.000.000 m<sup>3</sup>** (Giovannini, 1993).

La prevalente fonte di alimentazione della falda lucchese è costituita dagli inalveamenti laterali del Fiume Serchio. Ciò sembra confermato dalla **temperatura** delle acque, costantemente sul valore di **15°C** per tutto l’arco dell’anno, che comprova una prolungata permanenza nella fascia d’equilibrio geotermico (Giovannini, 1993).

A causa delle condizioni pluviometriche molto variabili nel tempo, a partire dal 2000, nella Piana di Lucca sono state evidenziate situazioni piezometriche altalenanti (Buscamì & Baratri, 2007).

### **1.3.3 Il sistema freatico litoraneo della Piana Versiliese**

La Piana Versiliese comprende tutto il tratto costiero fra l'ex-lago di Porta e lo sfocio del Serchio.

Gli orizzonti argillosi intercalati alle sabbie marine rappresentano acquicludi confinanti le falde in pressione contenute dalle sabbie stesse, l'orizzonte superiore di queste ultime costituisce l'**acquifero primario** della Piana, a sua volta confinato, nelle depressioni lacustri bonificate, da un modesto spessore di torbe (Giovannini, 1993).

Fra tutti, la conoide del Versilia risulta di gran lunga la più sviluppata, soggiacendo, in quasi tutta la Piana, a spessori crescenti di limi ed argille ed assumendo **caratteri artesiani di acquifero confinato**.

Il **livello freatico** segue la morfologia del terreno, assecondandone l'andamento ad una **profondità** variabile di **1–2 m** dal piano di campagna; al termine dell'estate il livello si deprime di 0,5–1 m nella zona pedemontana e di oltre 1 m nella zona litoranea (Giovannini, 1993).

Inoltre, al di sotto della prima falda, soprattutto in aree periferiche all'apparato deiettivo del Versilia, si trova almeno un **altro acquifero confinato**, rappresentato dalla lente inferiore di sabbie deltizie, che mostra un discreto spessore ed aumenta gradualmente verso la costa (Giovannini, 1993).

### **1.3.4 Il sistema idrotermale del versante appenninico del Graben del Serchio**

Nel versante appenninico del Graben del Serchio sono presenti sorgenti termominerali ubicate in prossimità di **Pieve Fosciana, Barga, Gallicano e Bagni di Lucca**.

Tali sorgenti sono allineate lungo un sistema di faglie dirette, il cui rigetto lascia contrapposti, in affioramento o al di sotto di un limitato spessore di depositi neoautoctoni, blocchi costituiti dal complesso Scaglia–Macigno. Ne deriva che la risalita in superficie dei circuiti idrotermali

avviene attraverso terreni poco permeabili (in presenza di culminazioni assiali della struttura dei calcari e/o da faglie dirette), con limitata miscelazione di acque fredde di circolazione ipodermica, e pertanto si mantengono temperature all'emergenza elevate (Baldacci & Raggi, 1982).

Il sistema idrotermale è alimentato principalmente da nuclei mesozoici carbonatici di Soraggio, Corfino, Barga e Val di Lima (Baldacci & Raggi, 1982), mediante l'infiltrazione di acque meteoriche e dei corsi d'acqua, le quali si riscaldano grazie alla profondità del circuito.

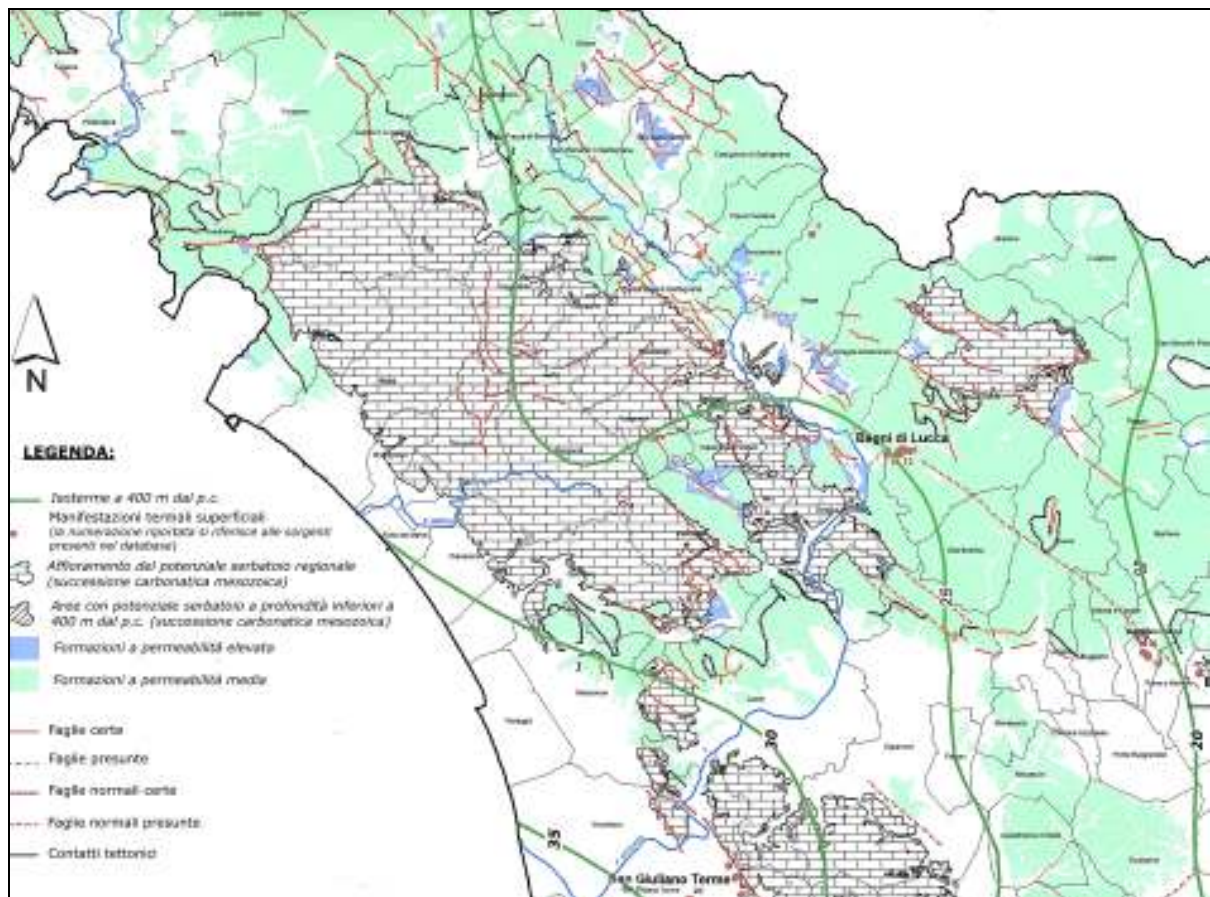
## **1.4 Caratterizzazione geotermica del territorio**

L'analisi del materiale bibliografico consultato unitamente alle carte tematiche mette in evidenza aree potenzialmente interessanti dal punto di vista della risorsa geotermica.

Mettendo in relazione le carte relative a "Idrogeologia e circuiti termali", "Distribuzione delle temperature nel sottosuolo: profondità -400 m dal p.c.", "Distribuzione delle temperature nel sottosuolo al tetto del serbatoio carbonatico regionale" (TAV. 3A-B, 4A, 5A, 6 in "Valutazione delle risorse geotermiche a media e bassa temperatura della Toscana – Rapporto finale di fase 1", 2005) si evince che nel territorio della Provincia di Lucca sono prevalentemente presenti aree a permeabilità elevata (per fessurazione-carsismo e, in secondo luogo, per porosità sia primaria che secondaria) e media (per fessurazione e per porosità), corrispondenti agli affioramenti del potenziale serbatoio regionale (successione carbonatica mesozoica), con limitate zone a bassa permeabilità, ad esclusione della fascia costiera, che mostra depositi recenti di debole spessore formati da terreni eterogenei (alluvioni, detriti, frane, discariche, etc.). In generale, è possibile affermare che il serbatoio regionale carbonatico-evaporitico delle formazioni mesozoiche toscane presenta permeabilità elevata e falde termali confinate di notevole importanza ("Valutazione delle risorse geotermiche a media e bassa temperatura della Toscana", 2005).

Inoltre, è possibile osservare che le manifestazioni idrotermali ubicate nel territorio lucchese sono posizionate al margine delle strutture carbonatiche sepolte che fungono da serbatoio ed in presenza di elementi strutturali (faglie e contatti tettonici) che consentono la risalita dei fluidi caldi in superficie.

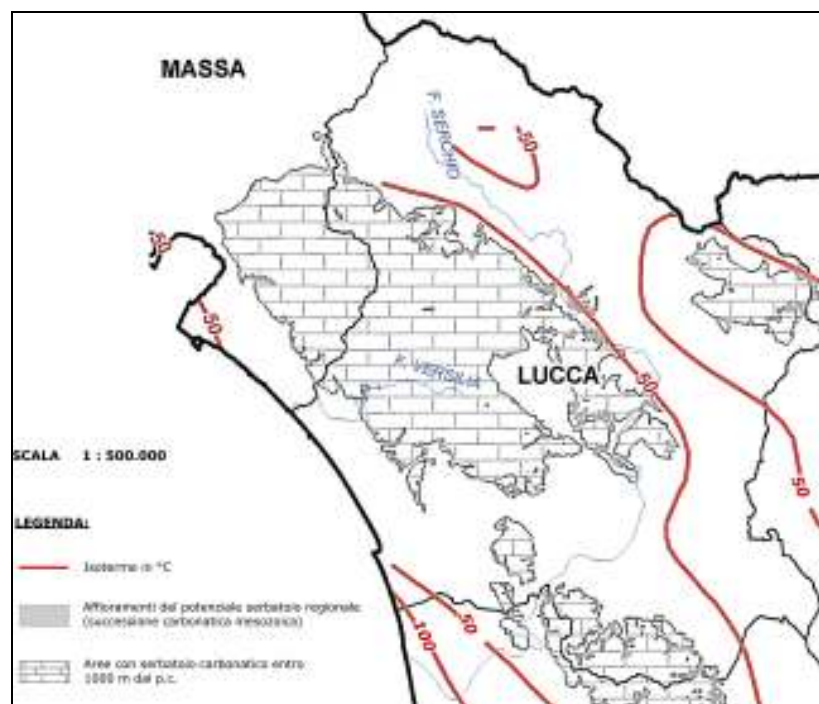
Le temperature a profondità  $-400$  m, (carta tematica relativa di Fig. 3), nella zona esaminata, sono comprese tra  $20^{\circ}\text{C}$  e  $30^{\circ}\text{C}$ . La geometria delle isoterme riflette l'assetto strutturale del serbatoio regionale. Infatti l'andamento delle T a tale profondità corrisponde ad una superficie situata generalmente al di sopra del tetto del potenziale serbatoio carbonatico, che affiora nelle zone limitrofe a Bagni di Lucca e nelle aree comprendenti i comuni di: Vagli Sotto, Seravezza, Stazzema, Molazzana, Careggine, Vergemoli, Galliciano, Fabbriche di Vallico e, subordinatamente, Castelnuovo Garfagnana, Borgo a Mozzano, Pescaglia, Camaiore, Capannori, Pietrasanta.



**Fig. 3:** Carta della distribuzione delle temperature nel sottosuolo: profondità  $-400$  m dal p.c. (da “Valutazione delle risorse geotermiche a media e bassa temperatura della Toscana – Rapporto finale di fase 1”, 2005; TAV. 5A, modificato).

La **Fig. 4** mostra la carta delle T al tetto del potenziale serbatoio; la distribuzione della temperatura è controllata dall'anomalia regionale profonda, dall'assetto strutturale e permeabilità del/dei potenziali serbatoi e dalle condizioni geoidrologiche e spessore della copertura.

La Provincia di Lucca, mostrando interessanti manifestazioni idrotermali, con **T al tetto del potenziale serbatoio di circa 50°C**, offre un panorama termico di modesto livello; le acque di bassa e media temperatura, soltanto in vicinanza delle sorgenti termali, presentano circuiti a debole profondità e possono essere facilmente intercettate sia per il potenziamento degli usi termali che per gli usi civili o industriali.



**Fig. 4:** Carta della distribuzione delle temperature nel sottosuolo al tetto del serbatoio carbonatico regionale (da "Valutazione delle risorse geotermiche a media e bassa temperatura della Toscana – Rapporto finale di fase 1", 2005; TAV. 6, modificato).

## CAPITOLO 2: La geotermia a bassa entalpia

### 2.1 L'energia geotermica nel sottosuolo

Per *energia geotermica* si intende l'energia contenuta sotto forma di calore nell'interno della Terra. Il calore terrestre si propaga costantemente dall'interno verso l'esterno del pianeta attraverso processi conduttivi, ovvero non associati a trasporto di materia, e convettivi, ovvero tramite un fluido vettore costituito da acqua (in fase liquida e/o di vapore) e gas.

Ai fini dell'utilizzo energetico, con *risorsa geotermica* si indica l'energia termica derivante dal calore terrestre estraibile mediante fluidi geotermici (che a loro volta sono quelli esistenti naturalmente nel sottosuolo o quelli immessivi artificialmente) da profondità economicamente sostenibili ed accessibili alle attuali tecnologie.

L'energia geotermica prelevata dal terreno è da considerarsi a norma di legge ed a tutti gli effetti "*energia rinnovabile*", poiché è definita tale dal D.L. n° 387 del 29/12/2003 (Art. 2, lettera a) emanato in attuazione della Direttiva Europea 2001/77/CE, che stabilisce "fonte o sorgente energetica rinnovabile" quella di origine geotermica.

La temperatura del sottosuolo varia secondo i parametri seguenti: **1\_** l'onda termica giornaliera dovuta all'irraggiamento solare si propaga nel terreno ad una profondità di circa 0,5 m dal p.c.; **2\_** l'onda termica annuale si propaga nel terreno ad una profondità di circa 12 m dal p.c. (Melegari, 2008). Più in profondità la temperatura del sottosuolo incrementa con il gradiente geotermico presente (valore medio di riferimento 3°C ogni 100 m di profondità).

A seconda del potenziale termico, si distinguono tre settori di impiego dell'energia geotermica: **1\_** geotermia ad alta entalpia, l'utilizzo di fluidi geotermici ad alta temperatura ( $T > 150^{\circ}\text{C}$ ) permette di produrre energia elettrica; **2\_** geotermia a media entalpia, i fluidi geotermici con temperature comprese tra 150–100°C vengono utilizzati sia per la produzione di energia elettrica (circuiti a fluido binario), sia per uso diretto del calore; **3\_** geotermia a bassa entalpia, i fluidi geotermici a bassa e bassissima temperatura possono essere utilizzati per il recupero del calore con le pompe di calore geotermiche.

I dati necessari per valutare la **redditività del fluido geotermico a bassa entalpia** sono principalmente: **temperatura, portata, profondità, chimismo, distanza dell'area sorgente dalla zona di utilizzazione.**

I fluidi geotermici caratterizzati da basse temperature e valori di portata rilevanti possono offrire una disponibilità di potenza termica cospicua come fonte gratuita in ingresso alla pompa di calore, la quale permette di sfruttare l'energia tra le temperature di ingresso ed uscita in funzione del processo e delle caratteristiche delle pompe (efficienza della pompa di calore).

## **2.2 I sistemi a pompa di calore geotermica**

Le pompe di calore consentono di sfruttare il calore contenuto nel terreno o nei fluidi a bassa temperatura per il riscaldamento, la climatizzazione e la produzione di acqua calda sanitaria.

Il recupero energetico con una pompa di calore permette la riduzione dei consumi, con una notevole riduzione dell'impatto ambientale e delle emissioni gassose (es. CO<sub>2</sub>).

Si tratta di una tecnologia applicabile quasi ovunque, in quanto il terreno costituisce una fonte di energia stabile a temperatura pressoché costante, a prescindere dalla presenza di anomalie geotermiche e senza bisogno di raggiungere grandi profondità.

Un impianto a pompa di calore geotermico è composto da:

- 1) sistema di scambio di calore con il sottosuolo, con la falda acquifera o con la risorsa idrica superficiale;
- 2) pompa di calore;
- 3) sistema di riscaldamento/raffrescamento interno all'edificio.

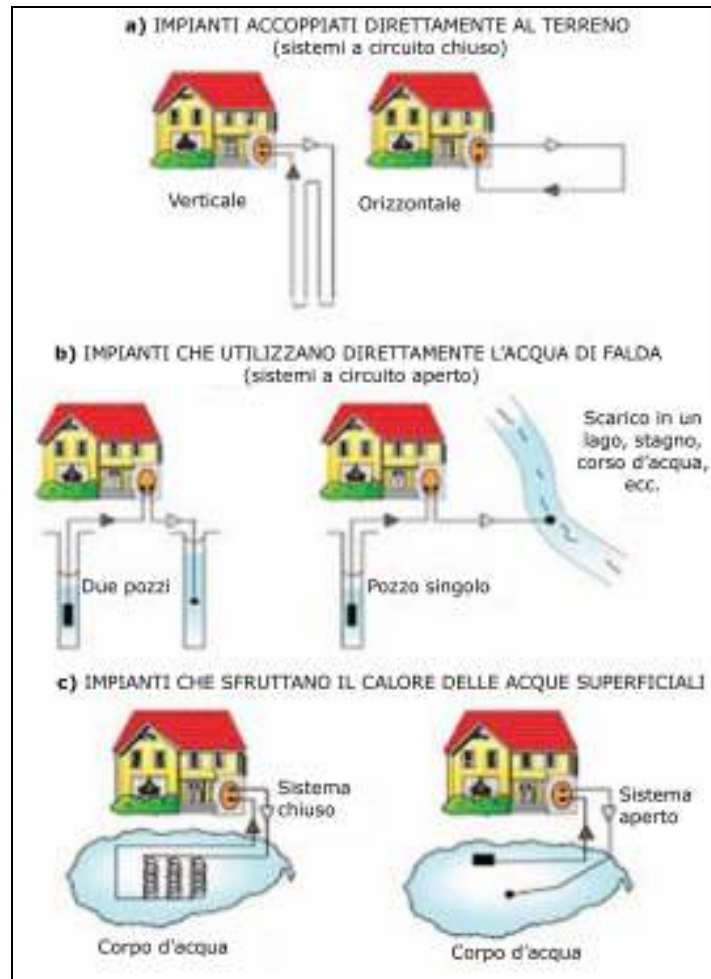
### **2.2.1 Il sistema di scambio di calore**

Il **sistema di scambio di calore** può essere effettuato mediante tre modi:

- Impianti accoppiati direttamente al terreno (geoscambio – sistemi a circuito chiuso): il calore viene estratto dal sottosuolo mediante sonde geotermiche verticali oppure orizzontali (invisibili dopo la perforazione), senza scambiare massa con il terreno (**Fig. 5.A**). Dal punto di vista ambientale, l'impianto a circuito chiuso è il più sicuro poiché il

fluido che circola nella sonda non viene a contatto con il terreno e viene salvaguardata l'integrità della risorsa idrica eventualmente presente. Inoltre, c'è il vantaggio di poter essere impiegato ovunque, a prescindere dalla presenza di acqua profonda o superficiale.

- Impianti che utilizzano direttamente l'acqua di falda (open-loop – sistemi a circuito aperto): l'acqua di falda, pompata dal sottosuolo ed utilizzata come sorgente di calore, viene poi reiniettata nello stesso acquifero o rilasciata in superficie dopo l'uso (**Fig. 5.B**). I pozzi di reiniezione devono essere disposti nella direzione del flusso a valle dei pozzi di prelievo e ad una distanza sufficiente per evitare interferenze termiche. Inoltre, si ritiene che la temperatura dell'acqua di falda non deve essere modificata di oltre  $\pm 6^{\circ}\text{C}$ . Al fine di evitare ossidazioni e corrosioni dei materiali metallici dell'impianto occorre effettuare un test delle acque di falda. Questi sistemi necessitano, perciò, di particolari autorizzazioni ed indagini preliminari ambientali che ne valutino l'impatto sul territorio. L'eventuale scarico in superficie, inoltre, necessita di autorizzazione.
- Impianti che sfruttano il calore delle acque superficiali (laghi, fiumi, canali, bacini idrici, mare): l'acqua viene utilizzata attraverso un circuito che può essere sia chiuso (geoscambio) che aperto (**Fig. 5.C**). Le risorse idriche superficiali hanno il vantaggio di non richiedere lavori di perforazione (costi e rischio minerario azzerati) e di consentire una facile misurazione dei parametri fisici di progetto (temperatura, portata).

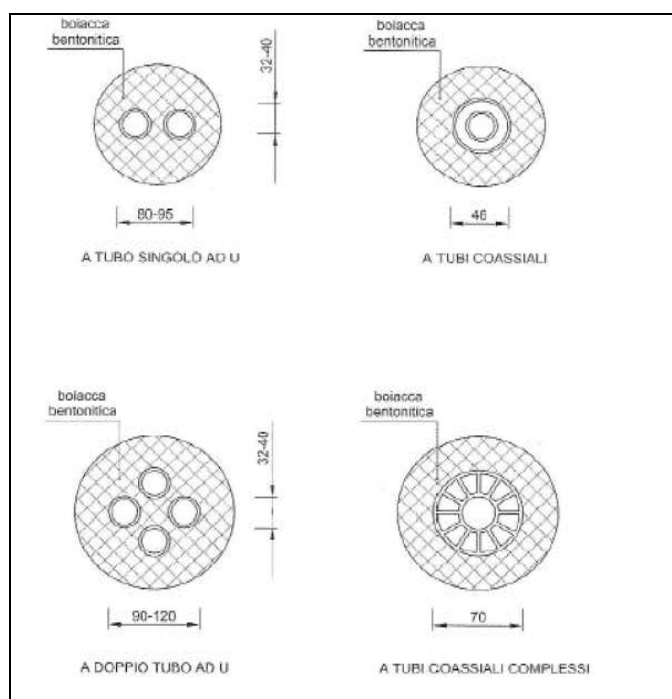


**Fig. 5:** Diverse tipologie di sistemi di scambio di calore (da documenti Istituto Geoscienze e Georisorse – CNR, Pisa).

Nel caso degli impianti del primo tipo (**geoscambio**), le **sonde verticali** sono collocate nel terreno all'interno delle perforazioni precedentemente realizzate ad una profondità variabile tra 10 e 400 m, in genere fino a 100 m. Le forme di tali sonde geotermiche possono essere (**Fig. 6**): **1\_** sonde a singola U (soluzione maggiormente adottata per semplicità di installazione e maggiore affidabilità); **2\_** sonde a doppia U; **3\_** sonde a tubi coassiali semplici; **4\_** sonde a tubi coassiali complessi.

Il foro di inserimento delle sonde deve essere riempito con un materiale di cementazione, al fine di ottimizzare lo scambio tra sonda e terreno, conferire resistenza meccanica alla sonda, mantenere isolate tra di loro eventuali falde intercettate ed evitare possibili inquinamenti dell'acqua di falda. I materiali comunemente usati sono sabbia satura, bentonite/cemento.

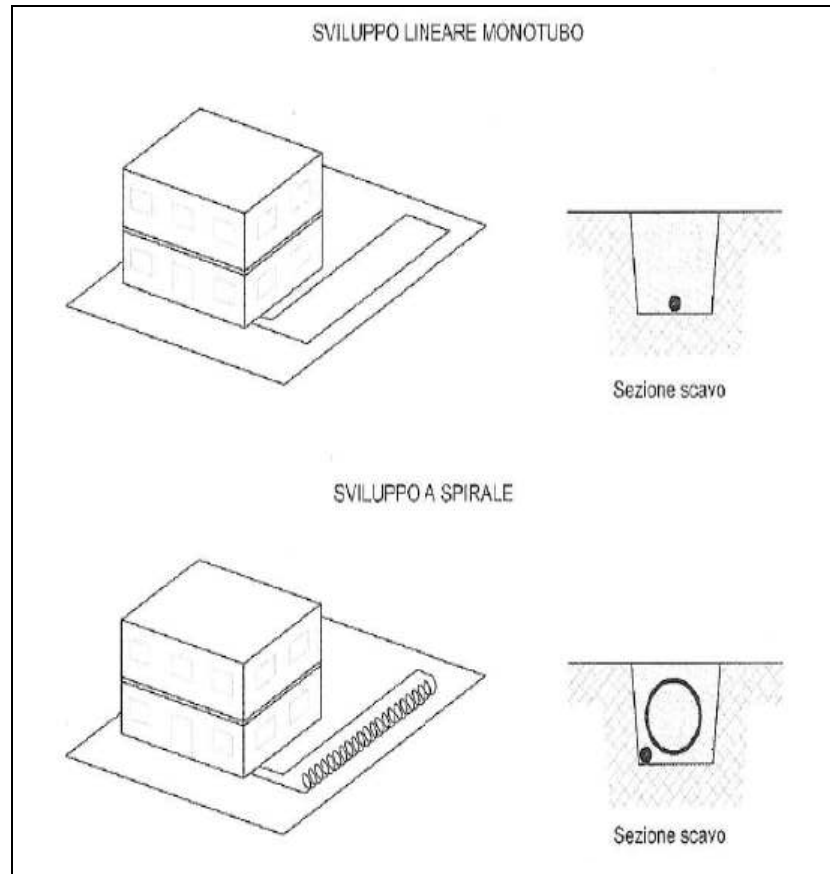
All'interno delle sonde geotermiche scorre il fluido termovettore (acqua o una miscela di acqua e glicole) che trasferisce calore dal terreno alla pompa di calore. I materiali più comuni per la realizzazione delle tubazioni sono il polietilene ad alta densità PEAD (utilizzabile in un range di  $T = -20^{\circ}\text{C}/+40^{\circ}\text{C}$ ) e il polietilene reticolato PEX (adatto per accumulo termico nel sottosuolo, con un range di  $T = -40^{\circ}\text{C}/+95^{\circ}\text{C}$ ); ed il diametro di tali tubazioni può variare tra 32 e 40 mm, con spessori rispettivamente di 2,9 mm e 3,7 mm.



**Fig. 6:** Diverse tipologie di sonde verticali.

Le **sonde orizzontali**, invece, sono distribuite nel terreno, attraverso uno sbancamento di una parte di esso o in strette trincee, ad una profondità di circa 1,2–1,5 m. Le tubazioni, realizzate in polietilene o polibutilene, devono essere installate su un letto di sabbia e coperte con un altro strato di sabbia di almeno 20 cm, in modo che la distanza di installazione tra i rami dello scambiatore orizzontale sia compresa tra 0,3–0,8m. Tali sonde sfruttano il flusso termico proveniente dalla superficie (radiazione solare, pioggia ecc..), per cui la superficie di terreno sotto la quale si trova il loop di scambiatori non deve mai essere occupata da costruzioni o

vegetazione arborea. Esistono diverse tipologie di distribuzione: a serpentino, lineare, su piani orizzontali oppure verticali, con collegamenti in serie o in parallelo (**Fig. 7**).



**Fig. 7:** Diverse tipologie di sonde orizzontali.

La progettazione della disposizione e del numero delle sonde da installare, che garantisca la massima efficienza ed il minimo costo, varia in base ai differenti fattori, quali: potenza termica richiesta, lunghezza delle sonde, potenza specifica di scambio del terreno.

Una volta eseguita la perforazione nelle vicinanze dell'utenza, le sonde geotermiche di scambio sono collegate ad un collettore esterno che convoglia il flusso proveniente dal terreno verso la pompa di calore.

## 2.2.2 La pompa di calore geotermica

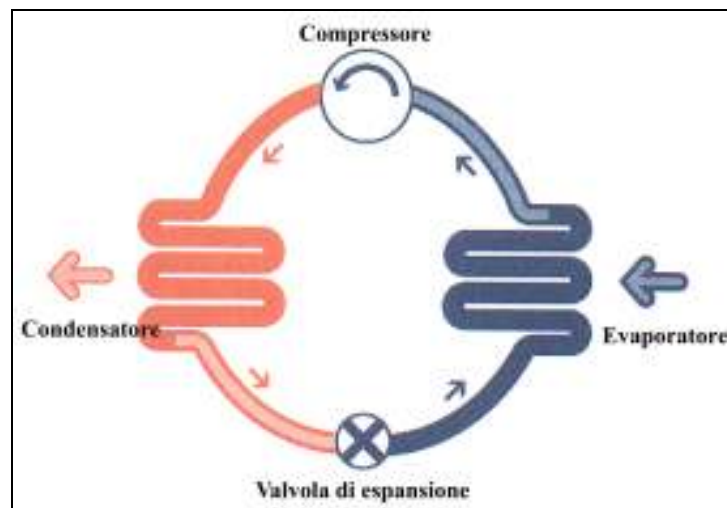
La **pompa di calore** funziona come una macchina termodinamica reversibile, consentendo di trasferire calore da un mezzo a temperatura inferiore ad un altro a temperatura superiore. D'inverno, la pompa assorbe calore ad una temperatura che può essere fino a circa 12–15°C (temperatura costante nel sottosuolo) per riscaldare acqua fino a 35–50°C ed oltre (riscaldamento/acqua sanitaria). D'estate, invertendo il ciclo, assorbe calore dall'abitazione e lo trasferisce al terreno, al fine di raffrescare gli ambienti interni (<http://www.geotermiasrl.it>). Per far questo è necessario fornire energia elettrica esterna. Il bilancio energetico è comunque a favore del sistema, poiché è in grado di fornire più energia, sotto forma di calore, di quella elettrica utilizzata per il suo funzionamento, scambiando una quota preponderante di calore con il sottosuolo. L'efficienza è espressa dal **Coefficiente di Prestazione (COP)**, che è dato dal rapporto tra l'energia prodotta e l'energia consumata. Il **Fattore di Prestazione (SPF)**, che rappresenta l'efficienza energetica reale di funzionamento durante un'intera stagione di riscaldamento, va ad integrare il COP relativamente alla stagione invernale e/o estiva. Tale indice può essere definito come il rapporto tra l'energia termica complessiva fornita all'impianto di climatizzazione e la totale energia consumata dal sistema, sotto forma di elettricità, gas o entrambi. Valori di **COP** e di **SPF** variabili **tra 3,5 e 5** sono tipici di tecnologie che utilizzano **scambiatori di calore con il terreno e sistemi di riscaldamento a pavimento**. Se invece la pompa di calore geotermica è accoppiata ad un pozzo con **scambio termico con acqua di falda**, il **COP** e l'**SPF** variano solitamente **tra 4 e 6,5** (<http://www.groundreach.eu>). In generale, minore è il salto di temperatura ( $\Delta T$ ) esistente tra le due sorgenti (fluido geotermico – acqua del circuito di riscaldamento/raffrescamento e sanitaria), tanto maggiore è il rendimento energetico; nel ciclo di tale pompa è quindi implicito il vantaggio di utilizzare acque geotermiche anche di bassa entalpia piuttosto che acque fredde superficiali.

L'**ASHRAE** (American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers) ha individuato una nomenclatura standard per differenziare i vari tipi di sistemi geotermici a pompa di calore (Ground-Source Heat Pumps – GSHP):

- **pompe di calore accoppiate al terreno** (Ground-Coupled Heat Pumps – GCHPs);
- **pompe di calore ad acqua di falda** (Ground Water Heat Pumps – GWHPs);
- **pompe di calore ad acqua di superficie** (Surface Water Heat Pumps – SWHPs).

Il funzionamento di una pompa di calore geotermica a circuito chiuso (**Fig. 8**) prevede che il fluido, che scorre attraverso le sonde geotermiche, sottrae energia termica al terreno e, ritornando in superficie ad una temperatura maggiore, provoca l'evaporazione del refrigerante che circola nel sistema della pompa di calore. Il compressore comprime il gas (refrigerante) aumentandone la temperatura. Nel condensatore (scambiatore) il fluido, passa dallo stato gassoso a quello liquido, cedendo calore all'acqua, utilizzata come fluido vettore nell'impianto di riscaldamento o per la produzione di acqua calda sanitaria. Il liquido (refrigerante) passando attraverso una valvola di espansione trasformandosi parzialmente in vapore e raffreddandosi, viene riportato così alle condizioni iniziali del ciclo. Lo stesso identico sistema, con opportuni accorgimenti impiantistici, provvede anche al condizionamento estivo.

Inoltre, le pompe di calore richiedono una minore manutenzione rispetto agli impianti tradizionali, presentano il vantaggio di avere un'unica macchina per riscaldare e climatizzare gli ambienti, con costi di gestione ridotti, e hanno una durata minima dichiarata di circa 20 anni.



**Fig.8:** pompa di calore geotermica.

### 2.2.3 I sistemi di riscaldamento/climatizzazione

Per mantenere il  $\Delta T$  basso ed il COP alto, è necessario utilizzare **sistemi di riscaldamento** che richiedono **temperature di funzionamento basse** (in media  $35^{\circ}\text{C}$  contro i  $70^{\circ}\text{C}$  dei radiatori), ovvero sistemi utilizzati per riscaldare pareti e pavimento, seguiti da fan-coils e unità di trattamento aria accoppiate a sistemi di canalizzazione dell'aria. Per il **raffrescamento**, i migliori sistemi sono a soffitto oppure a parete.

Il sistema a pannelli riscalda soprattutto per irraggiamento e, avendo per superficie l'intero pavimento, ripartisce il calore nell'ambiente in maniera pressoché uniforme. Essendo minima la presenza di moti convettivi, la temperatura diminuisce dal basso verso l'alto realizzando una condizione di benessere ed un notevole risparmio energetico.



**Fig 9:** esempio di sistema di riscaldamento domestico con pompa di calore connessa al terreno (da Sanner et al., 2003).

## **CAPITOLO 3: Esempi di impianti geotermici a bassa entalpia**

Oltre ad analizzare la sfruttabilità della risorsa geotermica nella Provincia di Lucca, sono state contattate aziende del settore, con lo scopo di prendere visione delle attività svolte e visitare impianti già realizzati.

Vengono di seguito descritti, a titolo di esempio, alcuni di questi impianti geotermici.

### **3.1 Tebo Spa, San Lazzaro di Savena (BO)**

E' stata effettuata una visita presso lo stabilimento della TEBO Spa, azienda italiana che si occupa di soluzioni elettroniche.

Per tale edificio è stato realizzato, attraverso il consorzio EGG ed il consorzio per l'energia industriale E.I.CON., un nuovo stabilimento a San Lazzaro di Savena (BO), utilizzando soluzioni costruttive tecnologicamente avanzate di efficienza energetica ed un sistema di fonti rinnovabili combinate. Tra queste ultime, la fonte geotermica a bassa temperatura per riscaldare/raffrescare gli ambienti.

Lo stabile dell'azienda presenta una **superficie totale di 2.500 m<sup>2</sup>** con un **fabbisogno termico invernale di 80 kW/h**. L'impianto geotermico a bassa entalpia consiste in un circuito chiuso con **12 sonde verticali da 100 m** ciascuna che scambiano calore con acqua di falda ( $T_{\text{acqua}} = 15^{\circ}\text{C}$ ). La **pompa di calore** ha una potenza elettrica di 25 kW, ed una **potenza termica di riscaldamento pari a 80 kW (COP  $\approx$  3.2)**. Inoltre sono presenti apparecchiature elettroniche di diagnosi per il monitoraggio del ciclo, flussi e temperature. L'impianto di riscaldamento consiste in un **sistema radiante a pavimento**.

### **3.2 Energie Alternative, Capezzano Pianore (LU)**

L'azienda "*Energie Alternative*" di Capezzano Pianore (LU) opera nel campo delle energie alternative per il rispetto dell'ambiente ed il risparmio economico ed energetico da oltre venti anni. In particolare si è specializzata nell'esecuzione di impianti geotermici a bassa entalpia.

In presenza del titolare di tale azienda, sono stati effettuati sopralluoghi presso alcuni edifici nei quali sono installati impianti geotermici a bassa entalpia associati a pompe di calore geotermiche.

A titolo di esempio, si riportano alcuni casi di impianti realizzati nella regione Toscana dalla citata azienda.

Le installazioni di questa sola azienda comunque testimoniano una penetrazione in corso del mercato delle pompe di calore geotermiche, sicuramente maggiore di quelle descritte.

### **3.2.1 Complesso turistico–alberghiero, Isola d’Elba (LI)**

Il sistema a pompa di calore geotermica è stato installato presso un complesso turistico alberghiero del Comune di Marina di Campo nell’Isola d’Elba (LI), al fine di produrre riscaldamento, climatizzazione ed acqua calda sanitaria. Ciascuna pompa preleva da un pozzo acqua a  $T = 16^{\circ}\text{C}$  pressochè costante tutto l’anno, permettendo di ottenere **COP** alti, intorno a **4** (Campioni & Ceragioli, 1992). Sono presenti **tre pompe di calore**, ciascuna con **potenza reale assorbita pari a 9 kW in riscaldamento e in raffrescamento, potenza termica uguale a 36 kW**.

### **3.2.2 Incaba, Camaiore (LU)**

L’impianto a pompa di calore geotermica installato presso Incaba, negozio di giocattoli nel comune di Camaiore (LU), produce riscaldamento e climatizzazione nell’ala più recente dell’edificio ( $\approx 4000 \text{ m}^2$ ), ed è costituito da **quattro pompe di calore**, aventi ciascuna le seguenti caratteristiche: **potenza assorbita: 11 kW, potenza termica di riscaldamento: 44 kW, COP = 4**. Mediante un pozzo preesistente, le pompe di calore prelevano acqua dalla falda sottostante ad una  $T = 15^{\circ}\text{C}$  ed a **profondità di 12 m**; e la reiniettano nella falda stessa con un secondo pozzo ubicato a distanza di qualche decina di metri dal primo per evitare interferenze termiche. I dati relativi al salto termico del fluido geotermico sono riportati in **tabella 1**.

### 3.2.3 Hotel Joseph, Marina di Pietrasanta (LU)

Presso l'Hotel Joseph, costituito da 4 piani, per un totale di circa **1.600 m<sup>2</sup>**, sono installate **due pompe di calore geotermiche** per il riscaldamento, la climatizzazione ed acqua calda sanitaria. Ogni pompa di calore presenta le seguenti caratteristiche: **potenza assorbita: 20 kW, potenza termica di riscaldamento: 80 kW, COP = 4**. Per l'acqua calda sanitaria, sono presenti **due boiler** aventi un volume di **1500 l** ciascuno, e sono collegati alla pompa di calore. Anche in questo caso l'impianto geotermico viene effettuato mediante un pozzo preesistente, che emunge acqua dalla falda sottostante ad una **T = 15°C** e a **profondità di 10 m**; la reimmissione dell'acqua nella falda stessa avviene con un secondo pozzo ubicato a distanza di qualche decina di metri dal primo per evitare interferenze termiche. I dati relativi al salto termico del fluido geotermico sono riportati in **tabella 1**.

### 3.2.4 Osteria Candalla, Camaiore (LU)

L'Osteria Candalla (**100 m<sup>2</sup>**), presso la località omonima, nel comune di Camaiore, presenta un impianto geotermico a bassissima entalpia (riscaldamento e acqua calda sanitaria) costituito da **una pompa di calore con potenza assorbita di 4 kW e potenza termica di riscaldamento pari a 16 kW**, con un valore di **COP = 4**. L'impianto geotermico ha un pozzo, che preleva acqua da un ruscello adiacente ad una **T = 9°C in inverno** e **T = 12°C in estate**; con scarico in superficie (nel ruscello stesso) dell'acqua con un secondo pozzo alla **T = 6°C**. Per l'acqua calda sanitaria, è presente **un boiler (V = 300 l)** collegato alla pompa di calore. I dati relativi al salto termico del fluido geotermico sono riportati in **tabella 1**.

Nella pompa di calore:	EDIFICIO		
	Incaba	Hotel Joseph	Osteria Candalla
T ingresso evaporatore (°C)	15,00	15,00	9,00
T uscita evaporatore (°C)	7,00	6,50	6,00
T ingresso condensatore (°C)	33,00	46,00	65,00
T uscita condensatore (°C)	70,00	51,00	

**Tab. 1:** Temperature relative al fluido nelle pompe di calore installate nei vari edifici.

# **CAPITOLO 4: La risorsa geotermica disponibile e le necessità energetiche dell'utenza per i comuni del territorio lucchese**

## **4.1 Potenziali risorse geotermiche considerate**

Nell'inquadramento idrografico ed idrogeologico sono descritte le caratteristiche delle risorse idriche superficiali (corsi e corpi d'acqua, sorgenti fredde e sorgenti termali). Qui di seguito vengono sintetizzate le caratteristiche geotermiche di tali risorse.

La valutazione del potenziale geotermico a bassa entalpia dell'area presa in esame richiede una larga disponibilità di informazioni a carattere geologico, idrogeologico, geotermico integrate con dati di stratigrafia. L'affidabilità della valutazione è strettamente legata alla quantità e qualità dell'informazione reperibile.

Sono stati reperiti i dati di numerose fonti, ma solo una parte di queste presenta caratteristiche utili all'analisi della potenzialità delle risorse geotermiche.

Il complesso dei dati di queste fonti utilizzati per la valutazione della risorsa geotermica è stato suddiviso in funzione della loro tipologia in:

- **manifestazioni termali e sorgenti fredde**: le prime sono ubicate nella zona della Garfagnana e presentano **alte temperature (fino a +54°C)**, **portate variabili** e **chimismo** prevalentemente **solfato-calcico (Tab. 2)**. Le sorgenti fredde, invece, mostrano **temperature di +10°C/+12°C**, **portate variabili** (importanti quelle delle sorgenti Chiesaccia e Polla dei Gangheri), **chimismo carbonatico (Tab. 2)**.

Manifestazione	Comune	T (°C)	Q (l/s)	Chimismo
Prà di Lama 1 (1)	Pieve Fosciana	40,00	0,60	clorurato-solfato-sodiche
Prà di Lama 2 (4)	Pieve Fosciana	31,50	0,20	clorurato-solfato-sodiche
Prà di Lama 3 (5)	Pieve Fosciana	19,00	1,00	clorurato-solfato-sodiche
Prà di Lama 4 (5)	Pieve Fosciana	15,00	1,00	clorurato-solfato-sodiche
Acqua Magnesiacca (della Gora) (1)	Barga	20,00		clorurato-solfato-sodiche
Acqua Sciocca (4)	Barga	20,10	1,00	clorurato-solfato-sodiche
Acqua Salata (2)	Gallicano	23,40	2,00	clorurato-solfato-sodiche
Doccione A (2)	Bagni di Lucca	54,00	0,30	solfato-calciche
Doccione B (2)	Bagni di Lucca	46,00	2,00	solfato-calciche
Bagno La Villa (Gran Sorgente) (1)	Bagni di Lucca	38,00	0,90	solfato-calciche
Cova (1)	Bagni di Lucca	35,00	0,40	solfato-calciche
Bernabò A (2)	Bagni di Lucca	38,40	0,30	solfato-calciche
Bernabò B (2)	Bagni di Lucca	31,20	0,10	solfato-calciche
Demidoff (2)	Bagni di Lucca	45,00	0,70	solfato-calciche
Bagno S. Giovanni (1)	Bagni di Lucca	38,00	0,50	solfato-calciche
Docce Basse / Bagno Rosso (3)	Bagni di Lucca	36,80	2,10	solfato-calciche
Varraud (3)	Bagni di Lucca	41,00	1,80	solfato-calciche
Cimitero (4)	Barga	11,20	0,30	carbonatiche
Nord Vergemoli (4)	Vergemoli	10,40	0,60	carbonatiche
Le Rocchette (4)	Vergemoli	10,00	0,30	carbonatiche
Grotta del Vento (4)	Vergemoli	12,50	0,25	carbonatiche
Chiesaccia (4)	Vergemoli	9,50	170,00	carbonatiche
Brucciano (4)	Molazzana	9,30	0,60	carbonatiche
Vallico Sopra (4)	Fabbriche di Vallico	11,00	0,03	carbonatiche
Polla dei Gangheri (4)	Gallicano	9,90	700,00	carbonatiche
Tana di Casteltendine (4)	Gallicano	8,10	3,00	carbonatiche
Eremo di Calomini (4)	Gallicano	10,70	1,00	carbonatiche

**Tab 2:** dati di temperatura, portata e chimismo per le sorgenti termali e fredde della Provincia di Lucca ( (1) Bencini et al., 1977; (2) Fancelli et al., 1976; (3) Inventario Risorse Geotermiche Nazionali Rapporto Regione Toscana; (4) Tesi Doveri, 2000; (5) Barbier & Taffi, 1970).

Al fine di fornire un'indicazione di massima del calore disponibile dalle emergenze termali, viene fatto riferimento ai valori di **potenza termica** calcolata in “Valutazione delle risorse geotermiche a media e bassa temperatura della Toscana – Rapporto Finale di Fase 1” (2005) per le **manifestazioni termali** dell'area lucchese (**Tab. 3**). Il calcolo della potenza termica si basa sulla relazione:

$$P \text{ (kcal/h)} = Q \text{ (kg/h)} * \Delta T \text{ (°C)} \quad (1)$$

Dove la portata (**Q**) considerata è quella riportata in tabella ed il salto termico considerato è la differenza tra **T** all'origine e 10°C.

Nome	Comune	T (°C)	Portata (l/h, kg/h)	Potenza termica (kcal/h)	Potenza termica (kW)
<b>Prà di Lama (1)</b>	Pieve Fosciana	40,00	2160	64800	<b>75,31</b>
<b>Acqua Magnesiacca/della Gora</b>	Barga	20,00			
<b>Acqua Salata</b>	Galliciano	23,40	7200	96480	<b>112,19</b>
<b>Doccione A</b>	Bagni di Lucca	54,00	1080	47520	<b>55,26</b>
<b>Doccione B</b>	Bagni di Lucca	46,00	7200		
<b>Bagno La Villa (Gran Sorgente)</b>	Bagni di Lucca	38,00	3240		
<b>Varraud</b>	Bagni di Lucca	41,00	6480	200880	<b>233,58</b>
<b>Docce Basse / Bagno Rosso</b>	Bagni di Lucca	36,80	7560		
<b>Bernabò A</b>	Bagni di Lucca	38,40	1080	30672	<b>35,67</b>
<b>Bernabò B</b>	Bagni di Lucca	31,20	360	7632	<b>8,87</b>
<b>Cova</b>	Bagni di Lucca	35,00	1440	36000	<b>41,86</b>
<b>Demidoff</b>	Bagni di Lucca	45,00	2520	88200	<b>102,56</b>
<b>Bagno S. Giovanni</b>	Bagni di Lucca	38,00	1800	50400	<b>58,60</b>

**Tab 3:** tabella in cui sono riportati per le sorgenti termali della Provincia di Lucca la portata, la temperatura e la potenza termica (da “Valutazione delle risorse geotermiche a media e bassa temperatura della Toscana – Rapporto finale di fase 1”, 2005; modificato).

- pozzi profondi: in località **Pontetetto**, nel comune di Lucca, è stato perforato negli anni '60 un pozzo profondo **961 m** (Pontetetto 1), utile sia per definire la litologia e la stratigrafia della zona (**Tab. 4**), sia per verificarne la temperatura in profondità (**Tab. 5**).

<b>STRATIGRAFIA:</b>		
<b>profondità (m)</b>	<b>litologia</b>	<b>Unità litostratigrafica</b>
0 - 375	argille, sabbie, conglomerati	Formazioni post-orogeniche
375 - 719	anidriti e calcari dolomitici	Calcere Cavernoso, Breccie Poligeniche
719 - 985	filladi	Verrucano

**Tab. 4:** litologia e stratigrafia alle varie profondità relative al pozzo Pontetetto 1 (Inventario Risorse Geotermiche Nazionali Rapporto Regione Toscana).

<b>T fluido (°C)</b>	<b>profondità (m)</b>
35,00	400
37,00	640
39,00	980

**Tab. 5:** temperatura nel pozzo Pontetetto 1 (Inventario Risorse Geotermiche Nazionali Rapporto Regione Toscana).

- acque superficiali: fiumi, torrenti, laghi e canali. Il **Fiume Serchio** ed il **Torrente Turrite** mostrano portate di notevole interesse per un eventuale utilizzo con le pompe di calore geotermiche, con valori rispettivamente di **35.000–40.000 l/s (portata media istantanea)** e **700–800 l/s** (Giovannini, 1993). Il **Lago di Massaciuccoli** ed i suoi canali principali (**Burlamacca, Fosso le Venti, Fosso Le Quindici, Fosso della Barra**) presentano **temperature** intorno a **+10°C/+12°C (Tab. 6)** (Spandre & Meriggi, 1997).

Canale	Comune	T (°C)	Profondità (m)
Fosso Le Quindici (ponte ferrovia)	Viareggio	11,10	1,80
Fosso Le Venti (ponte ferrovia)	Viareggio	11,80	1,70
Canale Burlamacca (La Piaggetta)	Viareggio	11,70	2,80
Canale Burlamacca (ponte ferrovia)	Viareggio	11,70	1,85
Canale Burlamacca (Porte Vinciane lato monte)	Viareggio	16,50	1,50
Canale Burlamacca (Porte Vinciane lato monte)	Viareggio	10,80	0,30
Fosso della Barra ( Ristorante Menotti)	Viareggio	11,40	1,00

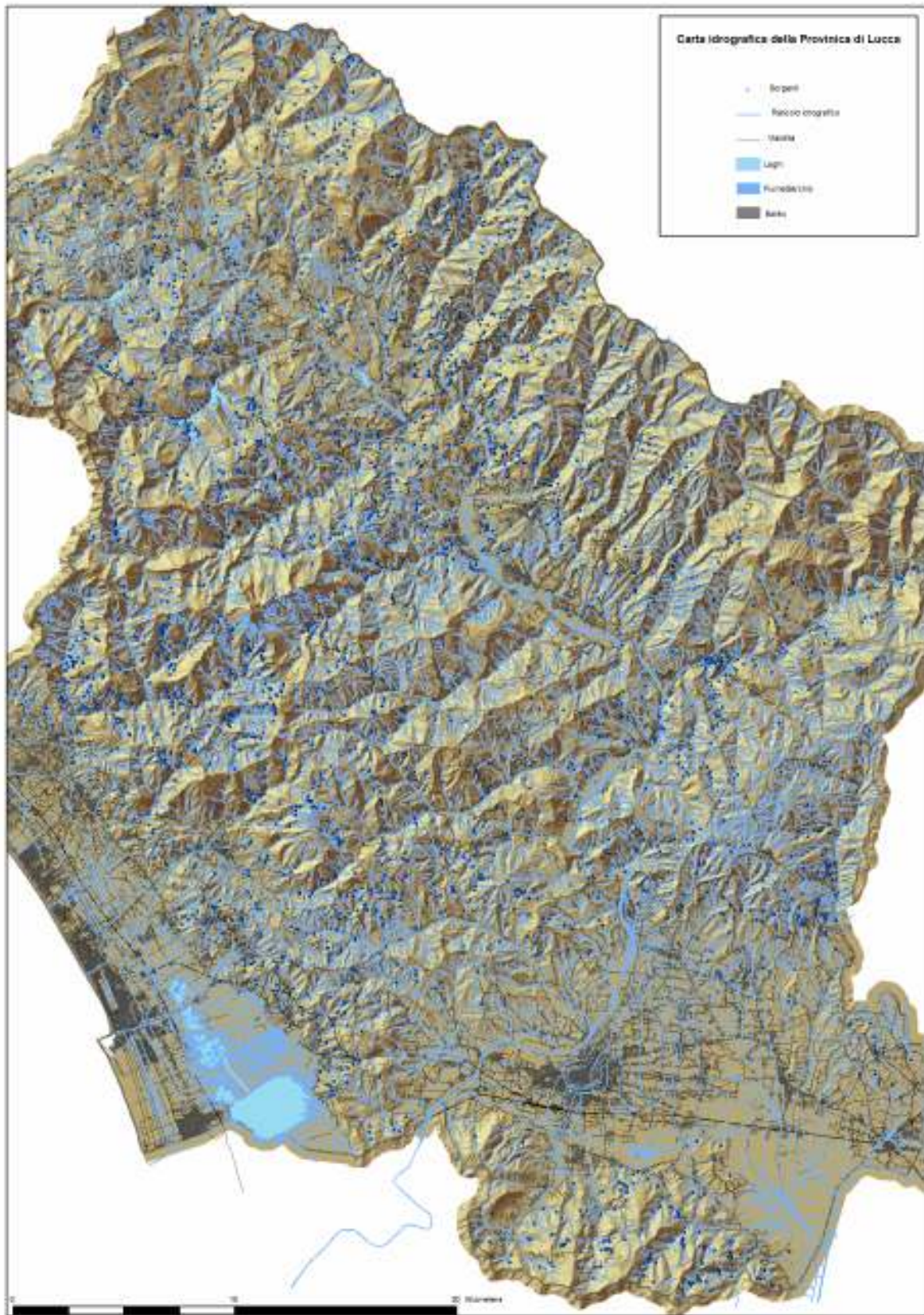
**Tab 6:** dati di temperatura alle varie profondità dei canali in prossimità del Lago di Massaciuccoli (Spandre & Meriggi, 1997).

- falda acquifera: è stata posta maggiore attenzione alla **falda acquifera della Piana di Lucca** e a quella della Piana della Versilia. Per quanto riguarda la prima, a causa delle condizioni pluviometriche molto variabili nel tempo, a partire dal 2000, sono state evidenziate situazioni piezometriche altalenanti (Buscami & R. Baratri, 2007), ma la temperatura di tali acque, risulta costantemente sul valore di **15°C** per tutto l’arco dell’anno (**Tab.7**). La **falda acquifera della Piana della Versilia**, invece, presenta **valori piezometrici** intorno a **-1/-2 m dal p.c.** e **temperatura** intorno a **+15°C/+16°C**.

Non esistono nell’area risorse geotermiche a temperatura medio alta, comunque la notevole disponibilità di risorse idriche fluenti (fiumi e canali), falde e laghi permette di affermare che la Provincia di Lucca è comunque dotata di una potenziale risorsa geotermica da utilizzare con le pompa di calore geotermiche (**Tavola 1, Carta idrografica della Provincia di Lucca**).

<b>POZZI Piana Lucca</b>	<b>T (°C)</b>	<b>profondità livello piezometrico (m dal p.c.)</b>
23	15,00	-7,54
55	16,00	-3,95
53b	15,00	-4,96
56b	15,00	-5,64
7	15,00	-2,90
13	13,50	-2,79
12	17,00	-2,11
58	14,80	-2,91
60	15,20	-4,18
15	15,10	-1,52
68b	14,70	-1,47
59	14,20	-1,90
35	16,00	-3,07
42b	15,40	-4,79
22b	15,10	-6,19
40	15,00	-10,60
65	15,00	-3,18
31	15,00	-4,10

**Tab. 7:** dati di temperatura e profondità del livello piezometrico della falda acquifera nella Piana di Lucca (Buscami & R. Baratri, 2007).



Tav. 1: Carta idrografica della Provincia di Lucca, ottenuta con i dati territoriali georeferenziati.

## 4.2 Distribuzione della domanda sul territorio esaminato

Da uno studio effettuato nel documento “Valutazione delle risorse geotermiche a media e bassa temperatura della Toscana – Rapporto finale di fase 1” (2005), emerge l’analisi e la valutazione dell’utenza termica a livello comunale per la Regione Toscana. I dati di base si riferiscono ai censimenti Istat 1991 e 2001, unitamente ai provvedimenti legislativi che fissano i parametri climatici per tutti i Comuni del territorio nazionale. Le valutazioni sono state eseguite a livello di singolo comune con determinazione dell’utenza civile, terziaria ed industriale. Lo studio dell’utenza residenziale e terziaria è stato condotto valutando: 1\_ l’analisi della consistenza volumetrica dell’edificato e della percentuale di impianti di riscaldamento dotati di rete di distribuzione; 2\_ la valutazione dei fabbisogni termici specifici per unità di volume edificata dell’utenza. I risultati ottenuti in base alle due direttrici di attività sopra descritte sono state poi assemblate per ottenere i risultati globali di fabbisogno termico annuo a livello comunale per tale settore di utenza (**Tab. 8**). Ai fini dell’indagine, è importante individuare la sola quota coperta con impianti di riscaldamento dotabili di rete di distribuzione, poiché meglio si prestano per un’alimentazione da parte di sistemi di teleriscaldamento (“Valutazione delle risorse geotermiche a media e bassa temperatura della Toscana”, 2005).

Provincia	Sup. territorio (km <sup>2</sup> )	Popolazione residente tot.	Fabb. annuo tot. allacc. (MWh/anno)			Fabbisogno termico specifico	
			CIVILE	INDUSTRIALE	TOT.	MWh/anno per km <sup>2</sup> di territorio	kWh/anno per abitante
LUCCA	1.773	372.244	964.356	494.625	1.458.981	823	3.919

**Tab. 8:** Fabbisogno termico complessivo civile + industriale (da “Valutazione delle risorse geotermiche a media e bassa temperatura della Toscana – Rapporto finale di fase 1”, 2005).

In tale documento, sono riportati i dati dei 35 comuni della Provincia di Lucca, distribuiti su una superficie pari a 1.773 km<sup>2</sup>, per un totale di 372.244 abitanti (**Tab. 9**). Sulla base di due indici (“fabbisogno termico annuo totale allacciabile” e “densità del fabbisogno termico annuo totale allacciabile”) i vari comuni sono stati suddivisi in classi, definite nei seguenti ranges:

- fabbisogno termico annuo totale allacciabile per comune nella provincia di Lucca:
 

Classe 1:	fino a 10.000	MWh/anno	17 comuni
Classe 2:	10.001 – 30.000	MWh/anno	7 comuni
Classe 3:	30.001 – 100.000	MWh/anno	8 comuni
Classe 4:	100.001 – 300.000	MWh/anno	2 comuni
Classe 5:	300.001 – 1.000.000	MWh/anno	1 comune
Classe 6:	oltre 1.000.000	MWh/anno	0 comuni
- densità del fabbisogno termico annuo totale allacciabile per comune nella provincia di Lucca:
 

Classe 1:	fino a 100	MWh/anno km <sup>2</sup>	10 comuni
Classe 2:	101 – 300	MWh/anno km <sup>2</sup>	7 comuni
Classe 3:	301 – 1.000	MWh/anno km <sup>2</sup>	10 comuni
Classe 4:	1.001 – 3.000	MWh/anno km <sup>2</sup>	7 comuni
Classe 5:	3.001 – 10.000	MWh/anno km <sup>2</sup>	1 comune
Classe 6:	oltre 10.000	MWh/anno km <sup>2</sup>	0 comuni

Dai risultati estrapolati da questo documento e dalle relative carte “Densità del fabbisogno termico per comune” e “Fabbisogno termico totale per comune”, si evince che la provincia lucchese è caratterizzata soprattutto da comuni appartenenti alle classi 1 – 4, solo un comune si colloca in classe 5, nessuno in classe 6. Poiché un valore elevato di densità del fabbisogno termico (MWh/anno per km<sup>2</sup> di territorio) corrisponde ad una minor estensione della rete di distribuzione, e quindi ad un contenimento del costo d’investimento, la densità è un indice importante per valutare l’idoneità di un’area ad essere allacciata ad un sistema di teleriscaldamento. A tal proposito, occorre considerare i comuni delle classi più alte (**Tab. 9**). Tra questi si distinguono: Viareggio, in classe 5, ed altri sette comuni in classe 4 (Lucca, Capannori, Pietrasanta, Seravezza, Altopascio, Forte dei Marmi, Porcari). Allo scopo di evidenziare i comuni aventi queste caratteristiche, sono state create delle mappe mediante il programma ArcGIS (**Tavole 2 e 3, Carta del fabbisogno termico totale annuo e Carta della densità del fabbisogno termico totale annuo, per la Provincia di Lucca**).

A titolo indicativo, un fabbisogno termico annuo di 100.000 MWh/anno (classe 4) corrisponde ad impianti di potenza totale superiore a 50 MW, mentre la soglia di classe 2 (>10.000 MWh/anno) sono relativi ad impianti di potenza termica di circa 5 MW.

Num.	Comune	Residenti	Densità per km <sup>2</sup>	Num. Famiglie	densità fabb. termico annuo	Fabb. termico Annuo tot.
1	Lucca	81862	441,2	32595	classe 4	classe 5
2	Viareggio	61103	1.916,7	25499	classe 5	classe 4
3	Capannori	42454	271,1	15590	classe 4	classe 4
4	Camaioere	30206	357,1	11916	classe 3	classe 3
5	Pietrasanta	24409	583,4	9498	classe 4	classe 3
6	Massarosa	20548	299,6	7562	classe 3	classe 3
7	Seravezza	12706	322,7	5008	classe 4	classe 3
8	Altopascio	11152	388,6	4103	classe 4	classe 3
9	Barga	10018	150,6	3827	classe 3	classe 3
10	Forte dei Marmi	8444	938,2	3413	classe 4	classe 2
11	Borgo a Mozzano	7358	101,6	2924	classe 3	classe 3
12	Porcari	7109	397,6	2524	classe 4	classe 3
13	Bagni di Lucca	6550	39,8	2875	classe 2	classe 2
14	Castelnuovo Garfagnana	6073	213,1	2208	classe 3	classe 2
15	Coreglia Antelminelli	4813	91,2	1884	classe 3	classe 2
16	Montecarlo	4345	278,7	1535	classe 3	classe 2
17	Galliciano	3795	124,4	1551	classe 3	classe 2
18	Pescaglia	3718	52,8	1422	classe 2	classe 2
19	Stazzema	3367	41,7	1412	classe 1	classe 1
20	Piazza al Serchio	2556	94,4	924	classe 3	classe 1
21	Minucciano	2521	44,2	1080	classe 2	classe 1
22	Camporgiano	2394	88,3	916	classe 2	classe 1
23	Pieve Fosciana	2367	82,3	898	classe 3	classe 1
24	Castiglione di Garfagnana	1890	38,9	719	classe 1	classe 1
25	Villa Basilica	1792	49,1	707	classe 2	classe 1
26	San Romano in Garfagnana	1432	55,0	517	classe 2	classe 1
27	Villa Collemandina	1400	40,2	556	classe 2	classe 1
28	Molazzana	1188	37,6	492	classe 1	classe 1
29	Vagli Sotto	1123	27,4	460	classe 1	classe 1
30	Sillano	784	12,6	336	classe 1	classe 1
31	Fosciandora	670	33,8	263	classe 1	classe 1
32	Careggine	642	26,2	264	classe 1	classe 1
33	Giuncugnano	538	28,4	206	classe 1	classe 1
34	Fabbriche di Vallico	526	33,9	232	classe 1	classe 1
35	Vergemoli	391	14,3	202	classe 1	classe 1
	<b>TOT.</b>	<b>372244</b>		<b>146118</b>		

**Tab. 9:** Risultati relativi al numero di residenti, densità per km<sup>2</sup>, fabbisogno termico annuo totale e densità del fabbisogno termico annuo per i comuni della Provincia di Lucca (da “Valutazione delle risorse geotermiche a media e bassa temperatura della Toscana – Rapporto finale di fase 1”, 2005, modificato con dati relativi al sito [www.comuni-italiani.it](http://www.comuni-italiani.it)).





### 4.3 Modello per l'analisi multicriteriale

Le informazioni raccolte del fabbisogno termico totale e delle densità del fabbisogno termico totale per ciascun comune, con riferimento ai dati demografici, dovrebbero essere messe in relazione ai dati ottenuti della risorsa idrica disponibile, al fine di individuare delle zone in cui applicare il teleriscaldamento a larga distribuzione.

A tal proposito, occorre sottolineare che i dati georeferenziati disponibili da utilizzare con il programma ArcGis, al fine di creare un'analisi multicriteriale della risorsa idrica correlata alle necessità energetiche delle attività produttive del territorio (sulla base del fabbisogno termico delle varie utenze), purtroppo risultano distribuiti in modo eterogeneo sul territorio lucchese, ed in molti casi sono incompleti. Dunque, non si è potuto effettuare l'analisi, e si è cercato di creare almeno una raccolta dei dati per un modello (Fig. 10) utilizzabile, in futuro, per l'analisi multicriteriale.

Tale modello fa riferimento ai dati relativi sia alla **risorsa idrica**, sia alle utenze. Per quanto riguarda la prima, vengono considerati i **dati di temperatura, portata, profondità dal p.c.** (per la falda acquifera), **distanza dall'utenza, vincoli idrogeologici**. Per le **utenze**, invece, viene fatto riferimento ai **dati di volume, superficie da riscaldare/climatizzare, potenza termica totale**.

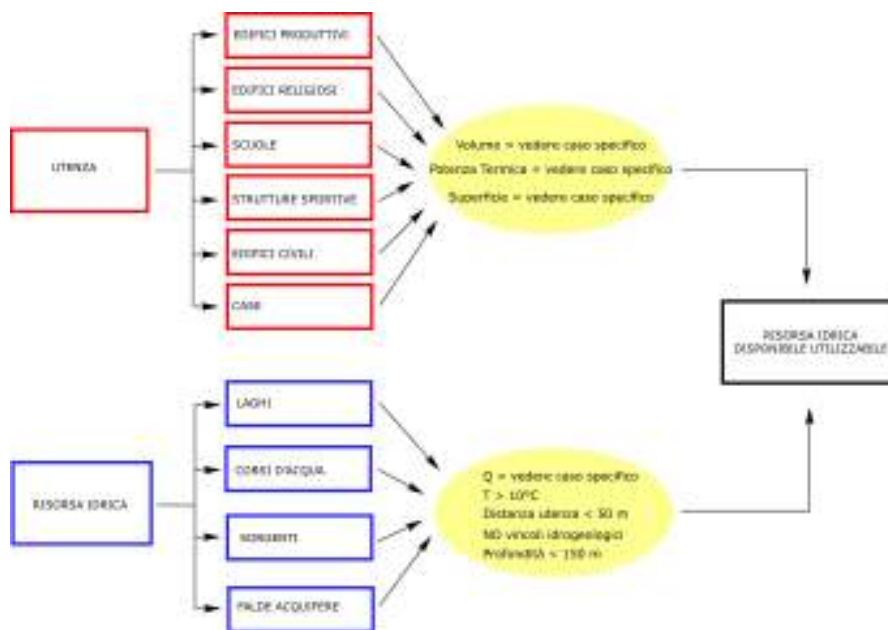


Fig. 10: modello per l'analisi multicriteriale in cui sono correlati i dati relativi alla risorsa idrica ed alle utenze per il territorio lucchese.

# CAPITOLO 5: Scegliere la tipologia di impianto

## 5.1 Parametri per la scelta della tipologia di impianto

La scelta della tipologia di impianto da installare ed il suo dimensionamento dipendono da una serie di fattori legati alle locali **condizioni idrogeologiche del sottosuolo**, alle **esigenze dell'utenza** ed ai **vincoli normativi**.

Il sistema più conveniente è quello che facilita il **miglior scambio termico** e che risulta il **più stabile nel corso del ciclo stagionale**. I fattori che influenzano le proprietà termiche del sottosuolo sono, da un lato, quelli intrinseci: conducibilità termica, densità, porosità, umidità, capacità termica; e dall'altro lato, quelli esterni: gradiente termico, eventuale presenza di falde, trasmissività dell'acquifero, velocità di scorrimento della falda, escursioni stagionali del livello piezometrico.

Dunque, in prima analisi, occorre considerare le condizioni idrogeologiche locali, ovvero studiare la **stratigrafia** del sottosuolo, verificare l'effettiva **disponibilità dell'acqua di falda** ed effettuare una valutazione delle caratteristiche di questa (profondità, permeabilità/trasmissività, acquifero a falda libera/confinata, velocità di scorrimento, gradiente di temperatura, chimismo acque); definire la **disponibilità dell'acqua di superficie** e le sue caratteristiche (distanza dall'utenza, temperatura, volume, escursioni termiche).

Inoltre, occorre stabilire se l'impianto verrà effettuato su un **edificio esistente**, oppure di **nuova costruzione** e verificare lo **spazio** per l'installazione delle sonde orizzontali o verticali. In ultima analisi, ma non per questo meno importante, bisogna tener presente i vincoli normativi in vigore, come i **limiti all'emungimento, all'estrazione da falda superficiale/profonda, la reimmissione in profondità**, e comunque, più in generale, **salvaguardare la risorsa idrica**.

### 5.1.1 Scelta del tipo di sistema di scambio di calore

Per quanto riguarda la scelta del tipo di sistema di scambio di calore, occorre fare alcune considerazioni:

- nei sistemi orizzontali, le sonde di scambio geotermiche possono avere un distanziamento variabile a seconda della configurazione ed il loro dimensionamento dipende sia dalle caratteristiche del suolo, sia dall'esposizione solare. Presentano la convenienza di avere minori costi dello scavo (circa 1/3 rispetto alle sonde verticali), un contributo dell'energia solare e necessitano di semplici processi autorizzativi. Di contro, risentono delle oscillazioni termiche e hanno bisogno di una maggiore area (circa 1,5–2 volte la superficie da climatizzare);
- i sistemi verticali presentano i seguenti vantaggi: indipendenza dalla temperatura esterna, temperatura naturale del suolo costante tra +10°C/+12°C in terreno saturo, minimo ingombro nella costruzione. Mostrano, però, maggiori costi ed autorizzazioni più complesse. Le sonde verticali vengono spesso impiegate per installazioni commerciali ed in edifici pubblici.

### 5.1.2 Vincoli normativi ed incentivi

Per quanto riguarda le autorizzazioni ed i vincoli normativi, gli impianti geotermici sono di competenza regionale e l'utilizzo diretto di calore geotermico mediante pompe di calore, anche senza prelievo di fluido, è soggetto, in Toscana, ad autorizzazione unica (LR 24 febbraio 2005 n.39, art.11).

Per quanto riguarda i **finanziamenti regionali**, si nomina il programma di incentivazione finanziaria in materia di produzione di energia da fonti rinnovabili nonché di ecoefficienza energetica (DE MINIMIS) (Decreto n. 2744 del 12/06/2008), in cui fra gli interventi ammessi al programma sono presenti gli “**impianti per l'utilizzo diretto del calore geotermico mediante pompe di calore anche senza prelievo di fluido**”, con un **finanziamento** pari al **30% dei costi ammissibili** e fino ad un massimo di Euro 50.000,00 (per i **Comuni finanziamento** fino al **40% dei costi ammissibili**).

Per **interventi di sostituzione intera o parziale** (sostenute entro il 31 dicembre 2009) di impianti di climatizzazione invernale con impianti dotati di caldaie a condensazione e non, spetta una **detrazione dall'imposta lorda** per una quota pari al **55% degli importi**, fino a un valore massimo della detrazione di 30.000 euro. (Finanziaria 2007, Art.1 Comma 347, e Finanziaria 2008 Art.1 comma 20).

## **CAPITOLO 6: Riscaldamento/climatizzazione di un utenza commerciale**

Dall'analisi e dalla valutazione della potenzialità geotermica di bassa entalpia della Provincia di Lucca, emerge un quadro interessante per l'utilizzo della risorsa idrica associata alla pompa di calore geotermica, al fine di produrre riscaldamento/climatizzazione ed acqua calda sanitaria, per un utenza di dimensioni medio-grandi.

Dalla valutazione dei due indici "fabbisogno termico annuo totale allacciabile" e "densità del fabbisogno termico annuo totale allacciabile" per i comuni della Provincia di Lucca emerge che il comune di Lucca rientra nelle classi più alte. Inoltre, la falda acquifera risulta costantemente ad una temperatura di 15°C e si trova a bassa profondità rispetto al piano di campagna. Quindi, esiste una buona corrispondenza tra domanda ed offerta per un potenziale positivo sviluppo della geotermia a bassa entalpia nel territorio lucchese.

Pur non avendo potuto eseguire l'analisi multicriteriale per confrontare la disponibilità della risorsa e la richiesta di energia termica, è stato comunque effettuato, a titolo di esempio, uno studio di fattibilità per la sede dell'Azienda dei Trasporti Clap Spa di Lucca.

### **6. 1 Dati generali di progetto**

La sede dei Trasporti Clap Spa di Lucca è ubicata in Viale Luporini.

L'edificio è rappresentato da una **superficie** da riscaldare/climatizzare pari a **4.979 m<sup>2</sup>** ed un **volume** di **20.611 m<sup>3</sup>**, costituito da: un edificio principale in cui vi sono uffici, magazzini, locali tecnici e un'officina, disposti su quattro piani (di cui un piano interrato); un corpo distaccato in cui è ubicata la portineria, disposta su un unico piano (**Fig. 11**).

Nei locali della centrale termica, ubicati nel piano interrato dell'edificio principale e al piano terra della portineria, sono installate **caldaie tradizionali a metano**, da sostituire con pompe di calore geotermiche. Inoltre, è presente un **boiler** da **1000 l** per l'acqua calda sanitaria, da poter poi collegare alle pompe di calore geotermiche.

Il desiderio di fornire **riscaldamento** e **climatizzazione** all'edificio, hanno portato ad effettuare uno studio di fattibilità per installare **pompe di calore geotermiche** da utilizzare come **unico sistema per i due scopi**.



**Fig. 11:** foto della sede dell'Azienda dei Trasporti Clap Spa di Lucca, in cui è osservabile l'edificio principale e, in alto, il corpo distaccato, costituito dalla portineria (<http://www.googleearth.it>).

Il comune di Lucca è ubicato nella zona settentrionale della Toscana, a poche decine di chilometri della costa tirrenica, ad una latitudine di  $43^{\circ}50'41''$  ed una longitudine di  $10^{\circ}30'16''$ , caratterizzato da valori medi della radiazione giornaliera media mensile uguale a  $3,94 \text{ kWh/m}^2$  e da un'insolazione annua media di  $1.432,5 \text{ kWh/m}^2$ , con un valore di gradi-giorno di 1.715, ricade nella zona climatica D.

Il valore della temperatura esterna di progetto è di circa  $-4/-5^{\circ}\text{C}$  nel periodo invernale mentre quella interna è di  $20^{\circ}\text{C}$ ; tali valori sono stati presi per il dimensionamento dell'impianto in riscaldamento. Per quanto riguarda il condizionamento estivo, la temperatura media esterna è intorno ai  $+36/+37^{\circ}\text{C}$ , e si vuole raggiungere un temperatura interna di  $26^{\circ}\text{C}$ . L'apporto

medio di energia solare avviene attraverso un vetro semplice. Si è trascurato l'apporto di calore da parte di persone e dei dispositivi elettrici.

## 6.2 Tipo di sistema di scambio di calore previsto

Poichè **minore** è il **salto di temperatura ( $\Delta T$ )** esistente tra le due sorgenti (fluido geotermico – acqua del circuito di riscaldamento/raffrescamento e sanitaria), tanto **maggiore** è il **COP**; è implicito il **vantaggio** di utilizzare **acque di falda**, che presentano una maggiore temperatura, piuttosto che acque fredde superficiali o scambio termico con il terreno.

Dunque, per questo tipo di utenza si è scelto un **sistema open-loop**.

Ovviamente, prima della fase di progettazione vera e propria, bisognerà effettuare uno studio idrogeologico specifico in loco per verificare le effettive proprietà del sottosuolo (tipo di terreno, conducibilità termica, potenza di estrazione) e degli acquiferi, con lo scopo di stimare il dimensionamento reale del sistema geotermico (lunghezza e configurazione del/i pozzi).

Nella progettazione di questi sistemi occorre considerare l'analisi chimica delle acque, per evitare incrostazioni e corrosioni delle tubazioni. Al fine di ovviare a tale inconveniente è possibile utilizzare leghe metalliche e plastiche in PVC.

Inoltre, occorre prevedere un distanziamento relativo tra il pozzo di prelievo e quello di reiniezione ed una disposizione dei pozzi su un asse perpendicolare alla direzione di deflusso della falda, al fine di evitare interferenze termiche negative. Infatti, in un sistema con prelievo dell'acqua di falda, il distanziamento tra pozzo di estrazione e pozzo di reiniezione dipende oltre che dalle caratteristiche dell'acquifero (es. permeabilità) e della falda (es. velocità), anche dalla portata estratta dal pozzo. In generale, maggiore è la portata, maggiore sarà il livello termico ottenibile all'evaporatore (quindi il COP medio stagionale sarà più elevato). Tuttavia, portate elevate comportano maggiori perdite di carico. Il dimensionamento della portata viene fatto in base al carico termico e di raffrescamento dell'edificio richiesto, caratteristiche dell'impianto, vincoli normativi su portata di prelievo e salto termico dell'acqua reimessa, temperatura di pozzo, caratteristiche tecniche della pompa di calore. Pertanto, per dimensionare la portata bisogna considerare un valore ottimale tra COP (funzione della portata) e perdite di carico.

### 6.3 Descrizione dell'impianto e analisi energetica

Nel sistema open-loop un **pozzo di prelievo** emunge acqua dalla **falda** sottostante ad una temperatura costantemente intorno a  $T = 15^{\circ}\text{C}$  ed a una **profondità** di circa **20 m**; questo valore di temperatura permette di raggiungere valori di  $\text{COP}_{\text{riscaldamento}}$  alti, intorno a **4**, ed indipendenti dalle condizioni climatiche esterne. Il  $\text{COP}_{\text{raffrescamento}}$  ha un valore inferiore, circa **3**. E' previsto anche un **pozzo di reiniezione** dell'acqua nella falda stessa, distante dal primo pozzo di qualche decina di metri, per evitare interferenze termiche negative.

La potenza termica totale dell'edificio è dipendente dal volume di tale edificio, dal limite di fabbisogno energetico e dalla resistenza di dispersione delle superfici esterne.

Sulla base delle considerazioni precedenti, si stima una **potenza termica totale** pari a **720 kW**.

In riferimento alla potenza termica totale, si considera un **numero** di pompe di calore geotermiche pari a **6**. Ciascuna pompa di calore presenta le seguenti caratteristiche: **potenza assorbita = 40 kW**, **potenza termica di riscaldamento = 160 kW**, **potenza termica in raffrescamento = 120 kW**.

### 6.4 Analisi economica

Prima di effettuare l'analisi economica occorre verificare se effettivamente la pompa di calore geotermica (acqua-acqua) è più conveniente sia rispetto ad un impianto a caldaia tradizionale a metano che ad un impianto con pompa di calore aria-aria. Per fare ciò si stima l'energia primaria di ogni tipologia di impianto ed i relativi risparmi energetici primari.

Per l'impianto tradizionale con caldaia a metano si considera un costo del metano =  $0.8 \text{ €/m}^3$ , un Potere Calorifero Inferiore =  $9,59 \text{ kWh/m}^3$ , un rendimento medio stagionale impianto = 95%. L'**energia primaria totale** (per riscaldamento e raffrescamento) risulta di **1.011.133 kWh anno**.

Considerando, invece, un impianto con pompa di calore aria-aria, caratterizzato da un  $\text{COP}_{\text{riscaldamento}} = 3$  ed un  $\text{COP}_{\text{raffrescamento}} = 2$ , l'**energia primaria totale** è = **969.732 kWh anno**.

Infine, prendendo in esame un impianto a pompa di calore geotermica (acqua–acqua), con un  $COP_{\text{riscaldamento}} = 4$  ed un  $COP_{\text{raffrescamento}} = 3$ , l'energia primaria totale è = **634.978 kWh anno**.

Dunque, il risparmio di energia primaria con una pompa di calore aria – aria è del 4% rispetto ad un impianto tradizionale, mentre il risparmio di energia primaria con una pompa di calore geotermica è di circa 40%.

Per effettuare l'analisi economica è necessario valutare il costo di: pompa di calore geotermica (considerando anche collettori, valvole ed accessori); trivellazione dei pozzi; stoccaggio delle attrezzature per la perforazione. Questo è il costo dovuto alla sostituzione di una caldaia tradizionale con la pompa di calore geotermica.

Il costo dell'impianto (spesa iniziale) e gli oneri di gas ed energia elettrica annui per i tre casi sono sintetizzati nella tabella 10.

	Impianto tradizionale Caldaia metano	Impianto con pompa di calore aria-aria	Impianto con pompa di calore acqua-acqua
Spesa iniziale	€ 107,904.68	€ 131,857	€ 347,371.26
Oneri gas energia elettrica annui	€ 76,638.14	€ 63,837.07	€ 41,800.32

**Tab. 10:** confronto dei costi iniziali e degli oneri annui tra un impianto tradizionale, un impianto con pompa di calore aria–aria ed un impianto con pompa di calore acqua–acqua (geotermica).

Per l'impianto con pompa di calore geotermica, il costo iniziale è maggiore di quello di una normale caldaia o di una pompa di calore aria–aria, ma il costo annuale di gestione è inferiore. Il tempo di ritorno dell'investimento (*Pay Back Time*) è il metodo più semplice per la valutazione della convenienza economica dell'investimento. Se la maggior spesa iniziale per una tecnologia è  $x$  e la riduzione annua dei costi è  $y$ , il periodo di ritorno dell'investimento (in anni) rispetto ad un'altra soluzione è dato da  $x/y$ . Il tempo di ritorno indica quanti anni è necessario attendere per recuperare l'investimento iniziale.

Il tempo di ritorno è stato stimato di circa 2 anni per l'impianto con la pompa di calore aria–aria, mentre per l'impianto con pompa di calore acqua–acqua è di 7 anni, senza agevolazioni statali (3 anni con le agevolazioni).

Il sistema di riscaldamento con pompe di calore geotermiche è molto conveniente sul medio e lungo periodo. Il maggior onere iniziale viene recuperato in pochi anni.

## **CAPITOLO 7: Conclusioni**

Dall'analisi e dalla valutazione della potenzialità geotermica di bassa entalpia della Provincia di Lucca, emerge un quadro interessante per l'utilizzo della risorsa idrica associata alla pompa di calore geotermica, al fine di produrre riscaldamento/climatizzazione ed acqua calda sanitaria, per un utenza di dimensioni medio-grandi. Infatti, pur non esistendo risorse geotermiche a temperatura medio alta, si nota comunque una notevole disponibilità di risorse idriche fluenti (fiumi e canali), falde e laghi sfruttabili per il recupero del calore con le pompe di calore geotermiche.

Per quanto riguarda l'impianto a pompa di calore geotermica, essa permette il recupero energetico e la riduzione dei consumi, con una notevole riduzione dell'impatto ambientale e delle emissioni gassose (es. CO<sub>2</sub>).

Inoltre, si tratta di una tecnologia applicabile quasi ovunque, in quanto il terreno o i fluidi costituiscono una fonte di energia stabile a temperatura pressoché costante, a prescindere dalla presenza di anomalie geotermiche e senza bisogno di raggiungere grandi profondità.

Il sistema di riscaldamento con pompe di calore geotermiche è molto conveniente sul medio e lungo periodo. Il maggior onere iniziale viene recuperato in pochi anni.

L'ampia diffusione di questi impianti, sia in Europa che nel resto del mondo, la sua collaudata affidabilità, rendono questi utilizzi estremamente appetibili e sostenibili nel medio e lungo termine.

## **Bibliografia**

Baldacci F., Cecchini S., Lopane G., Raggi G., 1993. Le risorse idriche del bacino del fiume Serchio ed il loro contributo all'alimentazione dei bacini idrografici adiacenti. Mem. Soc. Geol. It., 49, 365–391.

Baldacci F., Raggi G., 1982. Lineamenti geologici e idrogeologici della regione dell'Appennino Ligure Toscano a nord dell'Arno. Contributo alla conoscenza delle risorse geotermiche del territorio italiano. C.N.R., PFE – SPEG, RF 13, 67–85.

Barbier E., Taffi L., 1970. Relazione preliminare sulle acque termali di Pieve Fosciana. Rapp. IIRG, 5p, dattil.

Bencini A., Duchi V., Martini M., 1977. Geochemistry of thermal springs of Tuscany (Italy). Chemical Geology, 19, 229–252.

Buscamì A., Baratri R., 2007: Relazione tecnica “Piano per il corretto e razionale uso delle acque”. Provincia di Lucca – Settore Ecologia.

Campioni M., Ceragioli C., 1992: Climatizzazione di un complesso turistico-alberghiero con un sistema a pompa di calore. In Condizionamento dell'aria riscaldamento refrigerazione.

Doveri M., 2000. Studio idrogeochimico di sistemi acquiferi superficiali e profondi delle Alpi Apuane e della Valle del Serchio. Tesi di laurea, Università di Pisa.

Fancelli R., Fanelli M., Nuti S., 1976. Study of the waters of north–west Tuscany. Athens, 152–169.

Giovannini A., 1993. Inquadramento geologico ed idrogeologico Provincia di Lucca e Bacino del Fiume Serchio. Provincia di Lucca – Ufficio Ecologia.

Inventario Risorse Geotermiche Nazionali – Rapporto Regione Toscana, 1987. ENEL-UNG, ENI-AGIP SERG, CNR-IIRG, ENEA-DPAS.

Inventario risorse geotermiche a bassa temperatura di Lombardia, Veneto ed Emilia Romagna, 1993.

Melegari C., 2008. Geotermia a bassa entalpia. Principi applicativi, valutazione costi benefici, case histories. *Acque sotterranee*, 111, 39–47.

Meriggi A., Spandre R., 1996. Studio della circolazione idrica all'interno del padule e del lago di Massaciucoli. *Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem., Serie A*, 103, 1–15.

Sanner B., Karytsas C., Mendrinis D., Rybach L., 2003: Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage. *Geothermics*, 32, 579–588.

Spandre R., Meriggi A., 1997. Studio idrologico del bacino del Lago di Massaciucoli. Cenni M. Lago di Massaciucoli 13 ricerche finalizzate al risanamento. 2° contributo. Ente Parco Regionale Migliarino San Rossore Massaciucoli. 23 - 91.

Valutazione delle risorse geotermiche a media e bassa temperatura della Toscana – Rapporto finale di fase 1, 2005. Regione Toscana, Cosvig in collaborazione con UGI.

**Siti web:**

<http://www.comuni-italiani.it>

<http://www.geotermiasrl.it>

<http://www.googleearth.it>

<http://www.groundreach.eu>

<http://www.igg.cnr.it>

## **Ringraziamenti**

Si ringrazia il Dott. Giorgio Buonasorte ed il Prof. Romano Giglioli per i suggerimenti forniti durante l'attività di stage e per l'attenta revisione del testo, che ha contribuito al miglioramento dello stesso.

Inoltre si ringraziano: l'Assessore Maura Cavallaro e il Presidente dell'Alerr Dott. Picchi per aver messo a disposizione le strutture necessarie al reperimento dei dati (Servizio Urbanistica e Servizio Ambiente della Provincia di Lucca, Sede dei Trasporti Clap Spa di Lucca); l'architetto Frumenti per aver fornito il materiale utile alla realizzazione delle mappe gis.

Un ringraziamento particolare va al personale del CNR di Pisa: la Dott.ssa Giussani ed il Dott. Bellani per aver messo a disposizione il materiale scientifico reperibile presso la biblioteca ed il database delle sorgenti e pozzi; il Dott. Cioni ed il Dott. Doveri per aver gentilmente fornito articoli scientifici e tesi di laurea relativi ai corpi idrici superficiali e profondi della Provincia di Lucca.

Si ringraziano per la disponibilità mostrata il dott. Armando Ceccarelli dell'Enel di Pisa e il Dott. Ceragioli dell'azienda "Energie Alternative" di Capezzano Pianore (LU), che hanno permesso la raccolta dei dati delle sorgenti e dei corpi idrici nella zona lucchese e hanno fornito informazioni utili sull'utilizzo delle pompe di calore geotermiche.

Infine, si ringraziano il Dott. Paolo Basile, per gli utili consigli durante la creazione di mappe gis; l'Ing. Davide Poli e l'Ing. Luca Perni per i suggerimenti forniti durante l'analisi economica ed energetica del progetto.