

# Proposte metodologiche per la valutazione del potenziale di geoscambio: il Progetto VIGOR

## *Methodological approach for evaluating the geo-exchange potential: VIGOR Project*

Galgaro A., Di Sipio E., Destro E., Chiesa S., Uricchio V.F., Bruno D., Masciale R., Lopez N., Iaquina P., Teza G., Iovine G., Montanari, Manzella D.A., Soleri S., Greco R., Di Bella G., Monteleone S., Sabatino M., Iorio M., Petruccione E., Giaretta A., Tranchida G., Trumpy E., Gola G., D'Arpa S.

**Antonio GALGARO** ✉  
**Giordano TEZA**

Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova  
via G. Gradenigo, 6, 35122 – Padova  
Tel. 0498279123- fax.049.8279134  
antonio.galgaro@unipd.it  
giordano.teza@unipd.it

**Elisa DESTRO; Eloisa DI SIPIO; Aurelio GIARETTA;**  
Dipartimento di Geoscienze e Georisorse, CNR-IGG  
via G. Gradenigo, 6, 35122 – Padova

**Domenico MONTANARI; Adele MANZELLA;**  
**Eugenio TRUMPY; Gianluca GOLA**  
Dipartimento di Geoscienze e Georisorse, CNR-IGG  
Via G. Moruzzi 1 56124 - Pisa

**Sergio CHIESA**  
Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali, CNR-IDPA  
Via Pasubio 5, 24044 - Dalmine (BG)

**Vito URICCHIO; Delia BRUNO; Rita MASCIALE; Nicola LOPEZ;**  
**Stefania D'ARPA**  
Istituto di Ricerca Sulle Acque, CNR-IRSA  
Via F. De Blasio 5, 70132 - Bari

**Pasquale IAQUINTA; Giulio IOVINE; Roberto GRECO; Sergio SOLERI**  
Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica, CNR-IRPI  
Via Cavour 4-6 , 87036 Rende (CS)

**Guido DI BELLA**  
Istituto di Tecnologie Avanzate per l'Energia, CNR-ITAE  
Salita Santa Lucia Sopra Contesse 5, I-98126 – Messina

**Salvatore MONTELEONE; Maria SABATINO**  
Dipartimento di Geologia e Geodesia - Università di Palermo  
Via Archirafi 20, 90100 - Palermo

**Giorgio TRANCHIDA**  
Istituto per l'Ambiente Marino Costiero, CNR-IAMC, c/o NULL  
Via del Mare 3, 91021 Torretta-Granitola, Mazara TP

**Marina IORIO; Emanuela PETRUCCIONE**  
Istituto per l'Ambiente Marino Costiero, CNR-IAMC, c/o NULL  
Cala Porta di massa, interno porto di Napoli  
83133 Napoli

Ricevuto: 24 settembre 2012 / Accettato: 26 ottobre 2012  
Pubblicato online: 30 dicembre 2012

© Associazione Acque Sotterranee 2012

**Riassunto:** Nell'ambito delle attività del Progetto VIGOR, coordinato dall'Istituto di Geoscienze e Georisorse (CNR-IGG) e promosso dal Ministero dello Sviluppo Economico (MiSE), dedicato alla valutazione del potenziale geotermico nelle Regioni dell'Obiettivo Convergenza in Italia (Puglia, Calabria, Campania, Sicilia), è prevista la valutazione delle potenzialità del territorio all'attitudine allo scambio termico con il sottosuolo ai fini della climatizzazione degli edifici.

Per individuare le condizioni favorevoli allo sviluppo dei sistemi geotermici di bassa entalpia, sono stati raccolti ed organizzati a scala regionale i dati geologici e stratigrafici utili alla redazione di una cartografia tematica specifica, in grado di rappresentare in modo sinergico e semplificato le grandezze fisiche (geologiche, litostratigrafiche, idrogeologiche, termodinamiche) che maggiormente influenzano il comportamento del terreno dal punto di vista dello scambio termico.

La banca dati lito-stratigrafica ed idrogeologica realizzata per ognuna delle regioni ha permesso la produzione di diversi elaborati cartografici tematici, quali le mappe della conducibilità termica su base litologica (in affioramento) e stratigrafica, del flusso geotermico superficiale, della temperatura media annua dell'aria, della zonazione climatica, delle aree di vincolo idrogeologico.

Per ottenere una rappresentazione del grado di idoneità del sottosuolo delle aree studiate allo scambio termico, i diversi tematismi descritti sono stati combinati mediante un algoritmo di integrazione, derivato dall'approccio metodologico SINTACS, con lo scopo di pesare i vari contributi dei parametri in gioco e produrre un *output* cartografico che possa combinare le diverse grandezze considerate. Tale prodotto, qui espresso in forma preliminare a titolo di esempio e tuttora in fase di validazione, rappresenta una proposta preliminare di carta di idoneità territoriale all'utilizzo dei sistemi di geoscambio nelle regioni oggetto dello studio, basata sulla valutazione del potenziale di geoscambio derivato dalle peculiarità geologiche e considerando la presenza di vincoli normativi vigenti.

**Parole chiave:** geoscambio, proprietà termofisiche, modello concettuale, Italia meridionale.

**Keywords:** *geo-exchange, thermophysical properties, conceptual model, Southern Italy.*

**Abstract:** *In the framework of VIGOR Project, a national project coordinated by the Institute of Geosciences and Earth Resources (CNR-IGG) and sponsored by the Ministry of Economic Development (MiSE), dedicated to the evaluation of geothermal potential in the regions of the Convergence Objective in Italy (Puglia, Calabria, Campania and Sicily), is expected to evaluate the ability of the territory to heat exchange with the ground for air conditioning of buildings.*

*To identify the conditions for the development of low enthalpy geothermal systems collected and organized on a regional scale geological and stratigraphic data useful for the preparation of a specific thematic mapping, able to represent in a synergistic and simplified way the physical parameters (geological, lithostratigraphic, hydrogeological, thermodynamic) that most influence the subsoil behavior for thermal exchange.*

*The litho-stratigraphic and hydrogeological database created for every region led to the production of different cartographic thematic maps, such as the thermal conductivity (lithological and stratigraphical), the surface geothermal flux, the average annual temperature of air, the climate zoning, the areas of hydrogeological restrictions.*

*To obtain a single representation of the geo-exchange potential of the region, the different thematic maps described must be combined together by means of an algorithm, defined on the basis of the SINTACS methodology. The purpose is to weigh the contributions of the involved parameters and to produce a preliminary synthesis map able to identify the territorial use of geothermal heat pump systems, based on the geological characteristics and in agreement with the existing regulatory constraints.*

## Introduzione

La geotermia a bassa entalpia (o geoscambio) è un sistema applicabile a tutti i terreni e si basa su processi di scambio termico con il sottosuolo, inteso come massa di grande capacità termica. Grazie alla sua inerzia termica, già pochi metri sotto la superficie, il terreno risente in modo attenuato e smorzato delle fluttuazioni termiche giornaliere e stagionali dell'aria; la temperatura del terreno, a queste profondità, si può considerare costante per tutto l'arco dell'anno. Esiste perciò la possibilità di estrarre calore dal terreno durante l'inverno, e riscaldare quindi l'edificio, e cedere calore al medesimo in estate, per raffrescarlo. Per mezzo di impianti geotermici di climatizzazione si può produrre acqua per il riscaldamento ed acqua calda sanitaria, nonché acqua fredda per il raffrescamento, eliminando così i costi e le emissioni connesse all'uso dei combustibili fossili. Si preferisce, quindi, utilizzare il termine "sistema di

geoscambio" perché si tratta di un vero e proprio scambio di energia termica da e verso il sottosuolo.

Un sistema così predisposto possiede un ridotto impatto ambientale e comporta un considerevole livello di risparmio economico correlato all'accoppiamento con sistemi termodinamici (le pompe di calore) ad elevata efficienza energetica.

In Italia, nonostante le condizioni climatiche favorevoli, l'esiguo numero di installazioni è correlabile sia alla scarsa conoscenza della tecnologia, sia ai costi di realizzazione degli impianti, attualmente piuttosto elevati anche per mancanza di incentivi nazionali e regionali. Risulta quindi fondamentale, per migliorare le strategie di intervento governativo e regionale, incrementare la conoscenza del territorio e valutarne l'idoneità ad ospitare diffusamente impianti geotermici.

Il presente lavoro mostra lo stato attuale del processo di analisi e di restituzione cartografica volto alla redazione della mappa del "Potenziale di Geoscambio delle Regioni di Converggenza" (Puglia, Calabria, Campania e Sicilia) come previsto nell'ambito delle attività del progetto VIGOR, oggetto di un accordo di programma fra il CNR – IGG ed il MiSE.

In particolare, vengono trattati i temi connessi a sistemi di scambio termico che prevedono l'utilizzo di sonde a circuito chiuso, ovvero soluzioni impiantistiche in cui non avvenga movimentazione di acqua di falda, destinati a finalità di climatizzazione di edifici. Obiettivo della ricerca è la valutazione e rappresentazione dell'idoneità territoriale all'impiego di sistemi di scambio termico (geoscambio) dedicati alla climatizzazione di edifici. Si vuole illustrare la proposta metodologica adottata per la realizzazione della carta preliminare del potenziale geotermico a bassa entalpia, attualmente in via di validazione. La metodologia adottata si ispira al sistema parametrico a punteggi e pesi (PCSM) SINTACS, ideato per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Il SINTACS, una volta discretizzate le aree in esame (griglia di 0,25 – 0,50 km), assegna un punteggio moltiplicato successivamente per un peso a sette parametri, di carattere prettamente idrogeologico, in modo da descrivere la particolare situazione di impatto nell'area in esame (Civita, 1994; Civita e Demaio, 1997).

Nel nostro caso l'attenzione è rivolta in primis all'individuazione delle principali grandezze fisiche che regolano il comportamento del terreno nei processi di scambio termico, successivamente informatizzate in ambiente GIS per la realizzazione di prodotti cartografici specifici.

## Materiali e metodi

L'approccio metodologico adottato si basa sulla definizione di un modello concettuale geotermico di bassa o, più correttamente, bassissima entalpia, che prevede l'utilizzo del sottosuolo quale serbatoio termico dotato di stabilità termica con temperature variabili tipicamente nel range 5-25°C. Le profondità interessate dagli scambi termici prodotti tramite sonde verticali sono limitate, in genere, ai primi 100 m.

Tale modello viene definito sulla base di una serie di analisi ed elaborazioni di informazioni di carattere geologico, idrogeologico, geotermico, geofisico/geotecnico provenienti da fonti

diverse (Province, Regioni, Autorità di Bacino, Genio Civile etc...), ed è il risultato di uno sforzo di integrazione, validazione ed omogeneizzazione di grandi quantità di dati spesso caratterizzate da connotazioni di disomogeneità quali-quantitative. In particolare si differenzia la valutazione delle capacità di scambio termico del sottosuolo da quella dell'idoneità al geoscambio. La prima comporta la zonazione geotermica propriamente detta, definita sulla base dei parametri termo-fisici idonei al geoscambio. La seconda, invece, è data dal confronto della capacità di geoscambio con le normative e i vincoli esistenti, in grado di limitare l'utilizzo del territorio anche in aree potenzialmente favorevoli allo sfruttamento della risorsa geotermica a bassa entalpia.

La zonazione a livello regionale richiede compromessi di scala correlati alla necessità di generalizzazione e alla difficoltà di reperimento di dati omogeneamente distribuiti e rappresentativi, relativi ad aree molto estese. Una scala di lavoro e di rappresentazione più piccola potrebbe invece consentire un'analisi di maggior dettaglio.

Per fornire indicazioni utili all'analisi di fattibilità di impianti geotermici e per stabilirne i metodi di corretta messa in opera è indispensabile conoscere le proprietà termiche del sottosuolo principi fondanti dei processi di scambio termico. A tal riguardo, si prevede, da un lato, la realizzazione di un database lito-stratigrafico opportunamente predisposto, contenente tutti i dati disponibili, dall'altro la creazione di una cartografia tematica specifica in ambiente GIS, in grado di sintetizzare le grandezze fisiche (geologiche, litostratigrafiche, idrogeologiche, termodinamiche) che maggiormente influenzano il comportamento del terreno dal punto di vista termico (Fig.1).

### **Il sistema informativo e l'organizzazione dei dati: il database geotermico di bassa entalpia**

L'importante patrimonio geologico raccolto allo scopo di creare una banca dati informatica dedicata alle caratteristiche termo-fisiche e stratigrafiche del territorio costituisce una

risorsa informativa utile, da un lato, per la realizzazione della cartografia di indirizzo geotermico, dall'altro per finalità legate alla pianificazione edilizia o urbanistica e a qualsiasi possibile applicazione che richieda la conoscenza dell'assetto geologico del territorio.

In totale, i database stratigrafici hanno comportato la digitalizzazione, organizzazione e validazione di 1719 stratigrafie per la Calabria, 4263 per la Puglia, 400 per la Campania e 427 per la Sicilia.

Le informazioni stratigrafiche inserite si riferiscono a profondità comprese tra 30 e 100 m, limite suggerito dalla necessità di rappresentare il comportamento del terreno a profondità confrontabili con quelle tipiche di sonde geotermiche verticali. Il database così ottenuto risulta caratterizzato da un'elevata flessibilità che consente di modificare e creare nuove combinazioni tra tabelle con campi diversi, interrogabili in base alle diverse esigenze dell'utente, legate alla notevole complessità ed eterogeneità dell'assetto geologico ed idrogeologico delle regioni considerate.

In particolare, è stato realizzato un *software web* dedicato, finalizzato alla gestione di una Banca Dati Stratigrafica ad indirizzo geotermico. L'applicativo permette la gestione dei dati relativi a pozzi/sondaggi/perforazioni, consentendo la definizione degli attributi principali, suddivisi per regione, come ad esempio l'identificativo (IDpozzo), la geolocalizzazione, il tipo litologico, la quota, la profondità, la condizione *dry/wet* e quindi le condizioni di soggiacenza della falda etc.

### **La cartografia tematica**

Le grandezze fisiche che maggiormente influenzano il comportamento del terreno dal punto di vista termico sono:

- le proprietà di carattere prettamente geologico-stratigrafico;
- le informazioni di tipo idrogeologico;
- le grandezze di tipo termodinamico.

Le informazioni litostratigrafiche costituiscono un elemento fondamentale nella valutazione delle proprietà termiche dei

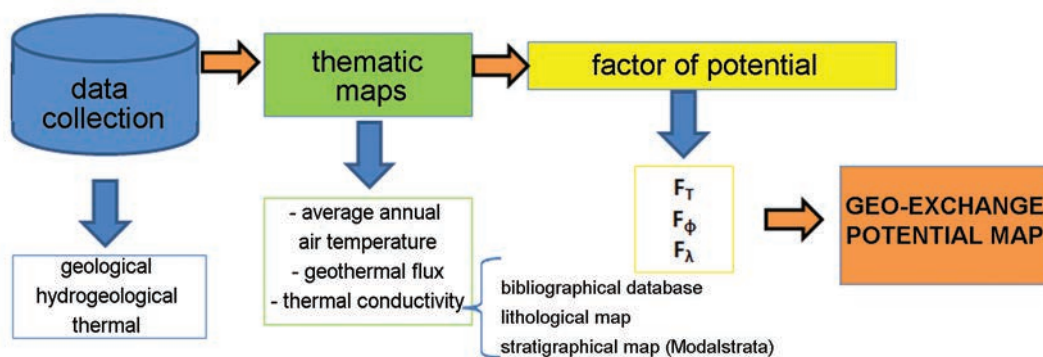


Fig. 1 - Diagramma di flusso relativo all'approccio metodologico adottato.

Fig. 1 - Flow chart of the methodological approach adopted.



singoli materiali costituenti le successioni geologiche individuate. I parametri di tipo idrogeologico, come la quota della prima falda, invece, permettono di valutare il contributo dell'eventuale presenza di acqua nei pori nell'assegnazione dei competenti valori di conducibilità termica. La conoscenza delle condizioni di saturazione dei materiali del sottosuolo costituisce, infatti, un fattore discriminante per l'identificazione delle capacità di scambio termico.

Inoltre, allo scopo di individuare le effettive possibilità di utilizzo delle soluzioni dedicate al geoscambio, sono state individuate le aree soggette a particolari vincoli, soprattutto di carattere idrogeologico, che possono limitare o precludere, in alcuni casi, l'utilizzo di sonde geotermiche.

La cartografia legata alla distribuzione della popolazione nel territorio (per comune o per km<sup>2</sup>) cerca, invece, di individuare le possibili aree di maggior sviluppo per la tecnologia geotermica, coincidenti con quelle maggiormente urbanizzate.

I dati raccolti sono stati validati, omogeneizzati ed interpolati, utilizzando diversi approcci statistici semplificati, variabili a seconda del tematismo considerato e sulla base della

diversa distribuzione delle informazioni di base.

Per Puglia, Calabria, Sicilia e Campania sono state completate, in formato vettoriale e raster, le seguenti cartografie tematiche necessarie alla valutazione del potenziale geotermico di bassa entalpia:

- temperatura media annua dell'aria (°C)
- flusso geotermico superficiale (mW/m<sup>2</sup>) (da dati CNR)
- conducibilità termica su base litologica (W/mK)
- conducibilità termica su base stratigrafica (W/mK)
- zonazione climatica
- aree di vincolo idrogeologico
- distribuzione della popolazione intesa come *numero di abitanti/comune* (dati ISTAT 2001)
- distribuzione della popolazione intesa come *numero di abitanti/km<sup>2</sup>* (dati ISTAT 2001)

Un esempio di cartografie tematiche attualmente prodotte nell'ambito dello studio delle potenzialità geotermiche di bassa entalpia (geoscambio) è riportato in figura 2.

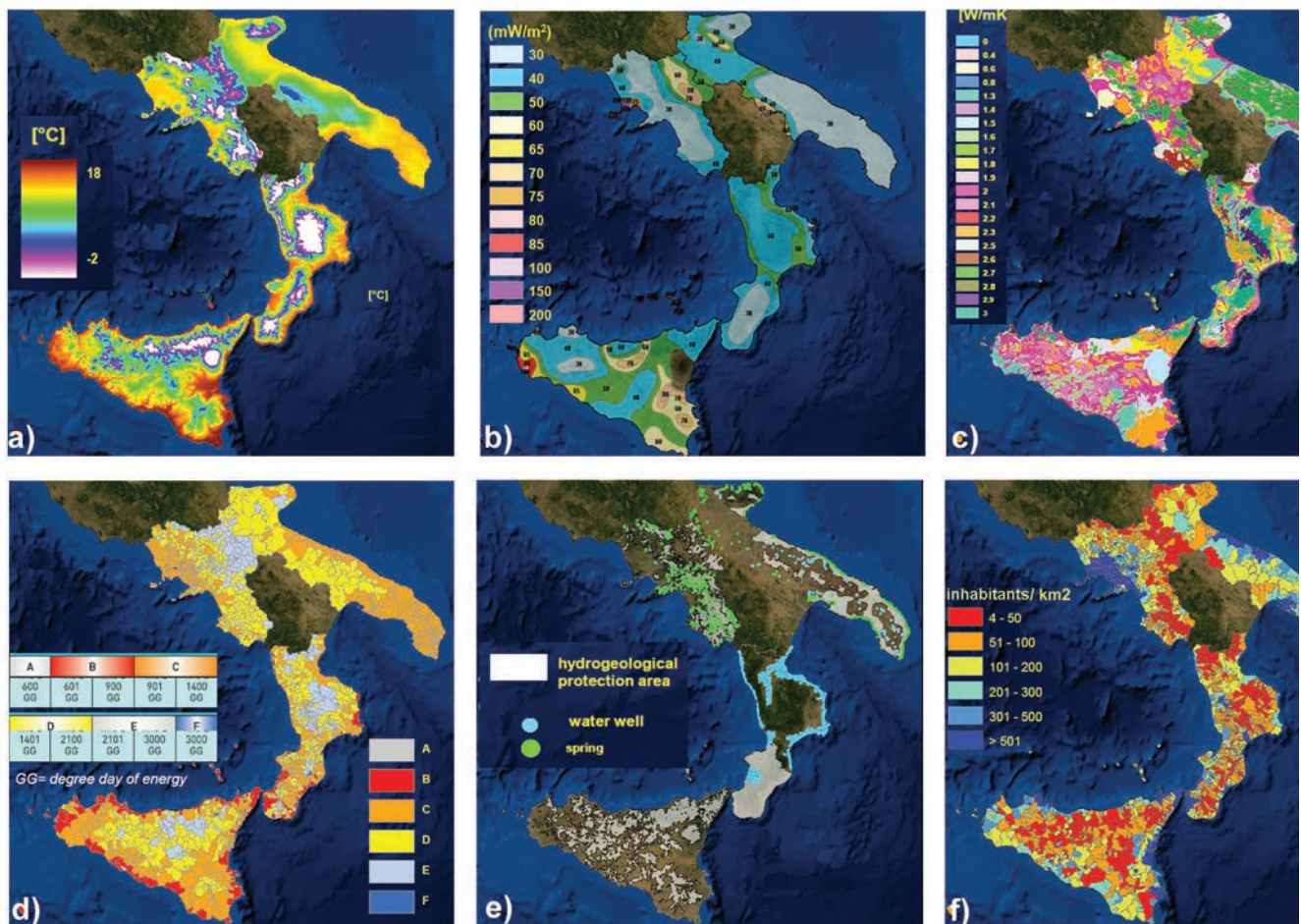


Fig. 2 - Carte tematiche a scala regionale: (a) temperatura media annua dell'aria; (b) flusso geotermico superficiale; (c) conducibilità termica su base litologica; (d) zonazione climatica; (e) aree di vincolo idrogeologico; (f) numero di abitanti / km<sup>2</sup>.

Fig. 2 - Thematic maps on a regional scale: (a) average annual air temperature, (b) surface geothermal flux, (c) thermal conductivity (litological), (d) climate zones, (e) areas of hydrogeological constrains, (f) number inhabitants / km<sup>2</sup>.

## Risultati

All'interno della cartografia tematica prodotta, particolare attenzione è stata rivolta alla realizzazione delle carte della temperatura media annua dell'aria, del flusso di calore e della conducibilità termica media equivalente dei terreni. Infatti, questi parametri fisici sono stati considerati i più utili per la zonazione geotermica del sottosuolo.

### La carta della temperatura media dell'aria

La temperatura competente al primo sottosuolo è stata assegnata sulla base di serie temporali di temperatura media annua dell'aria, che si assume corrispondente a quella delle prime decine di metri di profondità, in assenza di anomalie geotermiche locali.

La temperatura media annua dell'aria è funzione della quota altimetrica e della latitudine.

L'analisi dei dati raccolti in diverse stazioni di misura distribuite a livello regionale consente la caratterizzazione del regime termometrico nel territorio, utilizzando variabili geografiche e morfologiche (quota altimetrica e latitudine) tramite un modello di regressione multipla, modificato da Claps et al. 2003, che ha permesso di ottenere la relazione seguente.

$$T_{ma} = a + bZ + cLat$$

in cui

$T_{ma}$  = temperatura media annua dell'aria

$a-b-c$  = costanti sperimentali ottenute dal modello di regressione multipla e dall'interpolazione dei dati a disposizione

$Z$  = quota altimetrica

$Lat$  = latitudine

La  $T_{ma}$  si assume rappresentativa della temperatura media annua del suolo e, pertanto direttamente proporzionale al potenziale di geoscambio.

### La carta del flusso di calore

La temperatura del sottosuolo in profondità è strettamente legata al contributo del calore geotermico di origine endogena. Per il calcolo del flusso geotermico si fa riferimento alla legge di Fourier che mette in relazione il flusso geotermico ed il gradiente di temperatura per calcolare la conducibilità termica:

$$\lambda = \frac{Q}{A \left( \frac{d\theta}{dz} \right)}$$

dove:

$\lambda$  = conducibilità termica ( $Wm^{-1}K^{-1}$ )

$Q$  = flusso geotermico ( $mWm^{-2}$ )

$d\theta/dz$  = gradiente geotermico ( $K/m$ );

$A$  = superficie su cui si calcola il flusso ( $m^2$ ).

Considerando ( $A$ ) l'estensione di una superficie unitaria si può ricavare il valore del flusso geotermico

$$Q = \lambda \frac{d\theta}{dz}$$

I dati di flusso di calore utilizzati nel presente studio sono stati ricavati dalla carta del flusso geotermico realizzata dall'Istituto di Geoscienze e Georisorse del CNR in collaborazione con ENI, reperibile al sito web del Progetto GeoThopica. Generalmente il flusso termico medio sulla superficie terrestre è pari a  $63 mW/m^2$  e in Italia varia da 30 a  $100 mW/m^2$ , con picchi fino a  $450 mW/m^2$  nella zona tirrenica.

### La carta della conducibilità termica

La conducibilità termica di un materiale è una misura dell'attitudine di una sostanza a trasmettere il calore ed è definita come la quantità di calore che fluisce in un'unità di tempo attraverso un'area unitaria di un determinato materiale a causa della formazione di un gradiente unitario (Clarke et al, 2008):

$$\lambda = \frac{Q}{d\theta/dL}$$

dove:

$\lambda$  = conducibilità termica ( $Wm^{-1}K^{-1}$ );

$Q$  = flusso geotermico ( $mWm^{-2}$ );

$d\theta/dL$  = gradiente termico ( $K/m$ );

In geotermia la conducibilità termica di un terreno è di fondamentale importanza per una corretta progettazione degli impianti (ad esempio, la lunghezza delle sonde), onde garantire un efficace scambio di calore, evitando sovradimensionamenti eccessivi e quindi sprechi dal punto di vista economico.

I valori di conducibilità dei materiali naturali variano in genere da 0 a  $10 W/mK$  e sono condizionati da fattori quali la porosità, la fase mineralogica predominante, la presenza d'acqua, lo stato del reticolo cristallino, la presenza di quarzo e la temperatura dell'ambiente in cui si trova la roccia o il sedimento (Clauser et al., 1995).

Le diverse litologie presentano comportamenti differenti l'una dall'altra e a seconda che si riscontrino o meno condizioni di saturazione.

Per caratterizzare la conducibilità termica dei materiali, lapidei e non, presenti nelle regioni della convergenza è stato necessario:

- creare un database su base bibliografica dei valori di conducibilità termica di rocce e materiali sciolti mediante l'analisi comparativa di numerose fonti bibliografiche. Il quadro di sintesi aggiornato ottenuto costituisce la base di riferimento per la realizzazione della carta della conducibilità termica su base litologica e stratigrafica.
- riconoscere, su base cartografica, le unità litologiche dominanti in ogni regione, ovvero quelle affioranti aventi la maggiore estensione areale espressa in  $km^2$  (carta geologica d'Italia scala 1:250.000, ISPRA), e confrontarle con la densità di popolazione (abitanti/ $km^2$ ) per identificare le litologie più rappresentative nelle aree più urbanizzate, in cui lo sviluppo dei sistemi a pompe di calore può essere favorito

- assegnare ad ognuno dei raggruppamenti individuati un adeguato valore di  $\lambda$  (*carta della conducibilità termica lito-stratigrafica*, Fig.4a)
- definire, nelle aree caratterizzate da depositi quaternari, la conducibilità termica sull'intera colonna stratigrafica equivalente mediante l'ausilio del software "Modalstrata", estendendo successivamente l'informazione ottenuta a livello puntuale su scala di bacino mediante tecniche geostatistiche quale l'*Inverse Distance Weight (IDW)* (*carta della conducibilità termica stratigrafica*, Fig.4b)
- validare i valori di  $\lambda$  assegnati su base bibliografica mediante esecuzione di misure di conducibilità termica in laboratorio su campioni opportunamente prelevati in situ
- creare la carta di sintesi della conducibilità termica per ogni regione, data dalla sovrapposizione di quella della conducibilità litologica e di quella della conducibilità stratigrafica (*carta della conducibilità termica stratigrafica di sintesi*, Fig.4c)

La carta della conducibilità termica su base litologica è in grado di indicare in maniera speditiva le caratteristiche termiche delle regioni in esame. Tuttavia, per una visione più realistica dell'effettiva propensione del territorio allo sfruttamento della risorsa geotermica a bassa entalpia, è necessario considerare l'influenza dell'intera sequenza stratigrafica sullo spessore di sottosuolo generalmente perturbato dalle sonde geotermiche e interessato dalle operazioni di scambio di calore.

Nelle aree interessate da depositi sedimentari, in ognuna delle regioni di convergenza, sulla base dei sondaggi disponibili inseriti nella banca dati stratigrafica sono stati selezionati diversi dati lito-stratigrafici suddivisi per classi di profondità (< 50 m, tra 50 e 150 m, > 150 m).

Dato che la distribuzione areale sul territorio delle informazioni raccolte è scarsa e non uniforme, un approccio geostatistico classico basato sull'analisi della continuità spaziale di variogrammi sperimentali e interpolazioni geostatistiche (*kriging*) non è realistico.

Pertanto, ci si avvale di un approccio statistico più semplice,

basato sull'analisi della moda della distribuzione dei dati mediante il pacchetto software MATLAB Modalstrata (Cultrera et al., 2011). La moda di una funzione di distribuzione è il suo punto di massimo, il valore che corrisponde al picco. A differenza della media e della mediana, che richiedono dati quantitativi, la moda può essere utilizzata per studiare le caratteristiche qualitative, definite in modo sufficientemente preciso da consentire alcune misurazioni, ma non esprimibili con un numero. Nel nostro caso l'obiettivo è ottenere una sequenza stratigrafica-tipo (100 m di profondità), che rappresenti un dominio spaziale sostanzialmente omogeneo, definito dal punto di vista litologico. Quindi, negli istogrammi sperimentali, i valori della moda indicheranno le categorie litologiche di massima frequenza, secondo una spaziatura verticale pari a 5m lungo una colonna stratigrafica di 100 metri totali (Fig.3a). L'analisi è quindi qualitativa, essendo riferita a categorie (o specie) e non a valori numerici, o al più semi-quantitativa, essendo le categorie comunque ordinate in modo che quelle adiacenti siano più simili rispetto a quelle non adiacenti.

La stratigrafia equivalente basata sulla moda e rappresentativa di ogni sottozona si otterrà attraverso una procedura che prevede:

- scelta della profondità iniziale  $z_0$  (ad esempio  $z_0 = 0$ ), della profondità finale e dell'intervallo di profondità adeguato a descrivere la variabilità-tipo ( $\Delta z$ , per esempio pari a 5 m). Verifica, per ognuno degli  $n+1$  intervalli di profondità così ottenuti, cioè in ogni intervallo  $[z_{k-1}, z_k]$ , dove  $z_k = z_{k-1} + \Delta z$ , con  $k = 0, 1, \dots, n$ , che la corrispondente distribuzione delle litologie sia unimodale. Visualizzazione grafica ed esportazione dei risultati
- analisi di sensitività dei risultati, eseguita determinando un valore denominato "flag", tale che assuma valore pari a 1 in ogni griglia in cui il numero di sondaggi utilizzato per determinare la stratigrafia equivalente sia maggiore o uguale a 3, e valore pari a 0 in ogni griglia in cui il numero di sondaggi utilizzato per determinare la stratigrafia equivalente sia minore di 3 (Fig.3b, 4b)

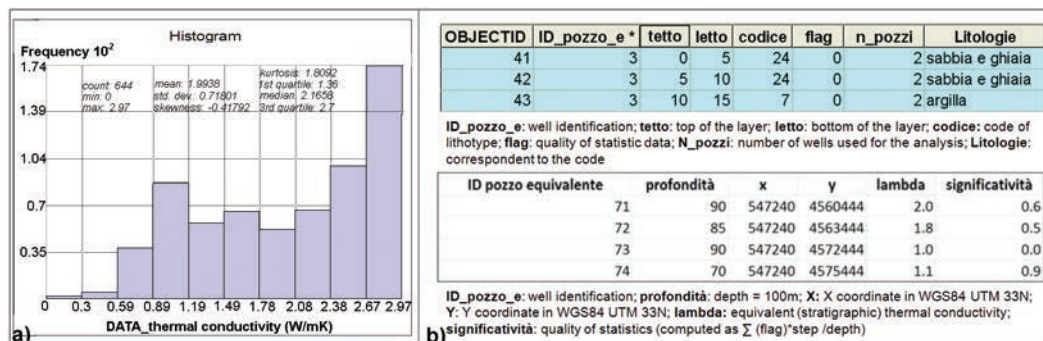


Fig. 3 - Software Modalstrata: (a) istogramma ottenuto da dati sperimentali con distribuzione unimodale; (b) esempio di database realizzato per la definizione della stratigrafia equivalente (sopra) e della conducibilità termica equivalente stratigrafica (sotto).

Fig. 3 - Software Modalstrata: (a) histogram obtained from experimental data with unimodal distribution; (b) example of database created for the definition of the equivalent stratigraphy (above) and the equivalent stratigraphic thermal conductivity (below).



Da un punto di vista operativo, si è proceduto come di seguito indicato:

- come in SINTACS, il territorio è stato suddiviso in ogni regione in griglie regolari. Per rendere confrontabili tra loro bacini sedimentari caratterizzati da differenti estensioni areali e da una diversa distribuzione dei dati disponibili, sono state scelte delle maglie di 3 km di lato
- le stratigrafie dei bacini quaternari sono state riviste assegnando ad ogni intervallo stratigrafico il codice litologico definito in Modalstrata
- i valori modali ottenuti indicano le categorie litologiche di massima frequenza da assegnare alla stratigrafia equivalente presente in ogni mesh (per la Calabria ottenute ben 371 stratigrafie equivalenti Fig.4b)
- assegnazione dei valori di  $\lambda$  (W/mK) ad ogni categoria litologica fino ad ottenere per ogni sequenza stratigrafica equivalente una conducibilità stratigrafica valida per tutta la colonna (Fig.3a-b) e confrontabile con i risultati dei test di risposta termica (TRT)
- interpolazione dei valori di conducibilità termica stratigrafica equivalente con il metodo IDW (*Inverse Distance Weighted*) per estendere l'informazione puntuale a livello areale fino ad ottenere la carta della conducibilità termica stratigrafica (Fig.4b)
- creazione della carta di sintesi della conducibilità termica mediante sovrapposizione di quella litologica e di quella stratigrafica.

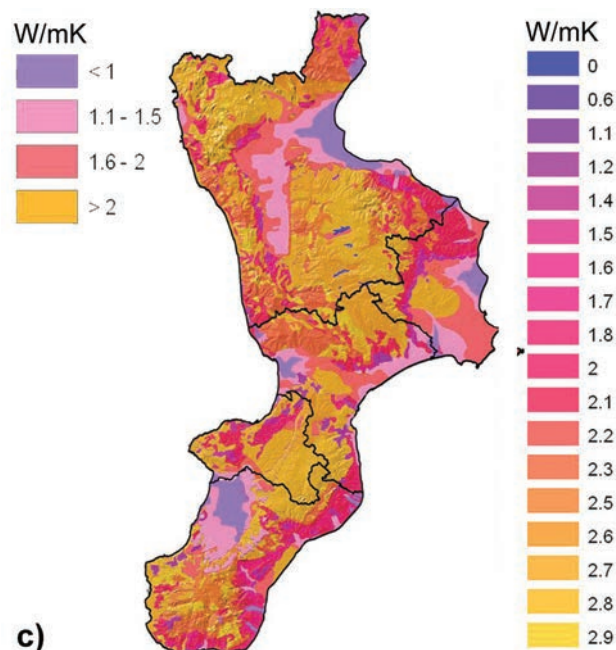
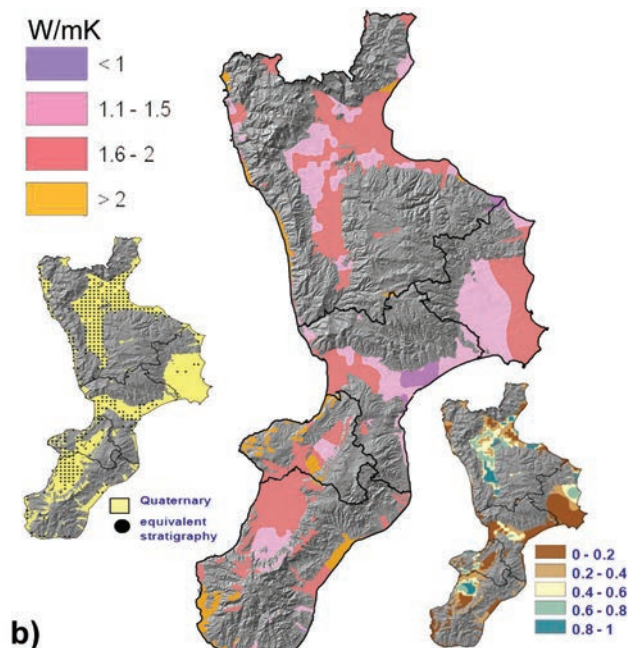
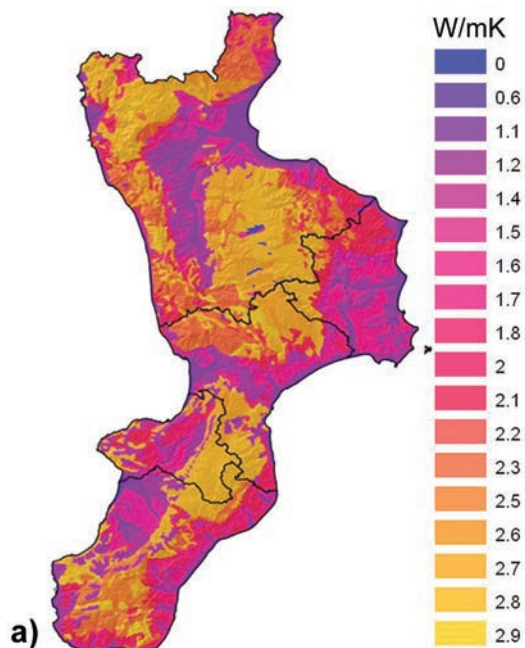


Fig. 4a, b, c - Carta della conducibilità termica della regione Calabria su base litologica (a), su base stratigrafica (b) con annessa la griglia delle stratigrafie equivalenti e l'analisi di sensibilità ottenute da Modalstrata, carta di sintesi della conducibilità termica (c).

Fig. 4a, b, c - Thermal conductivity map of Calabria (VIGOR Project): lithological (a), stratigraphical (b) together with the grid of equivalent stratigraphies and the sensitivity analysis obtained from Modalstrata, summary map of thermal conductivity (c).

## Discussione

Sulla base dei risultati raggiunti, il potenziale di geoscambio ( $G_{ex}$ ) può essere definito come la combinazione di quattro fattori fondamentali

$$G_{ex} = F_{vf} \cdot F_{Tma} \cdot F_{\varphi} \cdot F_{\lambda}$$

in cui

$G_{ex}$  = potenziale di geoscambio

$F_{vf}$  = fattore velocità della falda

$F_{Tma}$  = fattore temperatura media annua dell'aria

$F_{\varphi}$  = fattore flusso geotermico

$F_{\lambda}$  = fattore conducibilità termica

La capacità di scambiare calore con il terreno è direttamente influenzata dalla presenza di un flusso di falda (velocità della falda - Vf), dai valori della temperatura media annua dell'aria (Tma) rappresentativi delle condizioni di temperatura indisturbata del sottosuolo, dal flusso geotermico superficiale ( $\varphi$ ) e dalla conducibilità termica ( $\lambda$ ) caratteristica di ogni area considerata, definita sulla base delle unità geologiche presenti. La temperatura della falda pur rappresentando un'informazione di interesse non è stata al momento considerata data la scarsità e disomogeneità dei dati a disposizione e alla loro scala di lavoro e rappresentazione nell'ambito del progetto VIGOR.

I fattori (F) vengono definiti mediante l'utilizzo di soglie specifiche, differenti per ognuno dei parametri considerati, e sono caratterizzati ognuno da valori compresi nell'intervallo 0-1. In questo modo, è possibile pesare l'influenza di ogni singolo parametro e, nel computo del potenziale, la combinazione dei singoli fattori (F) mediante semplice moltiplicazione consente di definire come 1 ( $G_{ex}=1$ ) un territorio in cui esistono ottime condizioni di sfruttamento della risorsa a bassa entalpia (potenziale di geoscambio elevato) e con 0 ( $G_{ex}=0$ ) aree in cui le possibilità di sfruttamento sono nulle o molto difficili (potenziale di geoscambio basso).

### Fattore velocità della falda ( $F_{vf}$ )

La velocità della falda è definita come

$$V_f = Ki$$

in cui

$V_f$  = velocità della falda

$K$  = conducibilità idraulica (m/s)

$i$  = gradiente idraulico ( $i=\Delta h/L$ )

In generale, a scala regionale i valori disponibili relativi a  $V_f$  sono caratterizzati da un'estrema variabilità spaziale e dalla frammentarietà di informazione, che non consente una rappresentazione omogenea del parametro considerato. Pertanto, sebbene la presenza di una falda in movimento possa incrementare notevolmente l'efficienza dei sistemi di geoscambio, si è deciso di non considerare la  $V_f$  nel computo finale del potenziale, adottando un approccio cautelativo. Infatti, la presenza di una falda sotterranea statica non apporta alcun giovamento alla valutazione del potenziale, mentre una in

movimento favorisce la dispersione del plume termico creato nel sottosuolo per effetto degli scambiatori di calore, permettendo un rapido ripristino delle condizioni iniziali e quindi l'equilibrio del sistema.

Tuttavia, nelle analisi di dettaglio a scala provinciale, sarà necessario e possibile determinare anche le variabili idrodinamiche di falda per una più accurata valutazione del potenziale locale.

La formula viene pertanto modificata come segue:

$$G_{ex} = F_{Tma} \cdot F_{\varphi} \cdot F_{\lambda}$$

### Fattore temperatura media annua dell'aria ( $F_{Tma}$ )

Per determinare il fattore  $F_{Tma}$  sono state fissate quattro soglie di temperatura ( $T_{F1}=10^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{F2}=13^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{F3}=16^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{F4}=18^{\circ}\text{C}$ ) che identificano cinque classi qualitative rappresentative della resa degli impianti GSHP:

1.  $T_x < T_{F1}$ , la resa del sistema geotermico a pompe di calore (Ground Source Heat Pump - GSHP) in modalità riscaldamento è *BASSA*
2.  $T_{F1} < T_x < T_{F2}$ , la resa del sistema GSHP in modalità riscaldamento è *MEDIA*
3.  $T_{F2} < T_x < T_{F3}$ , la resa del sistema GSHP in modalità di raffreddamento e riscaldamento è *OTTIMA*
4.  $T_{F3} < T_x < T_{F4}$ , la resa del sistema GSHP in modalità di raffreddamento è *MEDIA*
5.  $T_x > T_{F4}$ , la resa del sistema GSHP in modalità di raffreddamento è *BASSA*

dove  $T_x$  è la  $T_{ma}$  relativa al punto di campionamento considerato estratto in ambiente GIS dalla carta tematica precedentemente costruita secondo un passo di campionamento pari a 200 m. Infine, ad ognuna delle classi è stato associato un valore di  $F_{Tma}$  nell'intervallo 0-1 tale per cui

$$F_{Tma} = 0.33 \text{ se } T_x < T_{F1} \text{ e } T_x > T_{F4}$$

$$F_{Tma} = 0.66 \text{ se } T_{F1} \leq T_x < T_{F2} \text{ in cui}$$

$$T_x = \frac{T_x - T_{F1}}{T_{F2} - T_{F1}}$$

$$F_{Tma} = 0.66 \text{ se } T_{F3} < T_x \leq T_{F4} \text{ in cui}$$

$$T_x = \frac{T_{F4} - T_x}{T_{F4} - T_{F3}}$$

$$F_{Tma} = 1 \text{ se } T_{F2} \leq T_x \leq T_{F3}$$

### Fattore flusso geotermico ( $F_{\varphi}$ )

Per determinare il fattore  $F_{\varphi}$  sono state fissate due soglie di flusso ( $\Phi_1=30 \text{ mW/m}^2$ ,  $\Phi_2=70 \text{ mW/m}^2$ ) che individuano tre classi di appartenenza:

$\Phi_x < \Phi_1$  situazione poco performante in condizioni di riscaldamento, resa del sistema GSHP considerata *MEDIA*

$\Phi_1 < \Phi_x < \Phi_2$ , situazione performante sia in condizioni di raffreddamento sia di riscaldamento, ottimale per l'equilibrio, resa del sistema GSHP considerata *ALTA*

$\Phi_x > \Phi_2$ , situazione poco performante in condizioni di raf-



frescamento, resa del sistema GSHP considerata *MEDIA*

dove  $\Phi_x$  è il flusso relativo al punto di campionamento considerato, estratto in ambiente GIS dalla carta tematica precedentemente costruita secondo un passo di campionamento pari a 200 m. Infine, ad ognuna delle classi è stato associato un valore di  $F_\phi$  nell'intervallo 0-1 tale per cui

$$\begin{aligned} F_\phi &= 0.5 \text{ se } \Phi_x < \Phi_1 \text{ e } \Phi_x > \Phi_2, \\ F_\phi &= 1 \text{ se } \Phi_1 \leq \Phi_x < \Phi_2 \end{aligned}$$

### Fattore conducibilità termica ( $F_\lambda$ )

Per determinare il fattore  $F_\lambda$  sono state fissate tre soglie di conducibilità termica ( $\lambda_1=0.5$  W/mK,  $\lambda_2=1.5$  W/mK,  $\lambda_3=2.5$  W/mK), che individuano quattro classi di appartenenza così definite:

1.  $\lambda_x < \lambda_1$  materiale sciolto in condizioni anidre, non formante, resa per sistemi GSHP *BASSA*
2.  $\lambda_1 < \lambda_x < \lambda_2$  materiale sciolto da anidro a saturo, resa per sistemi GSHP *MEDIA*
3.  $\lambda_2 < \lambda_x < \lambda_3$ , materiale sciolto saturo e materiali lapidei, resa per sistemi GSHP *ALTA*
4.  $\lambda_x > \lambda_3$  materiale lapideo buon conduttore, performante, resa per sistemi GSHP *MOLTO ALTA*

dove  $\lambda_x$  è la  $\lambda$  relativa al punto di campionamento considerato, estratto in ambiente GIS dalla carta tematica precedentemente costruita secondo un passo di campionamento pari a 200 m. Infine, ad ognuna delle classi è stato associato un valore di  $F_\lambda$  nell'intervallo 0-1 definito come segue:

$$\begin{aligned} F_\lambda &= 0.25 \text{ se } \lambda_x < \lambda_1 \\ F_\lambda &= 0.50 \text{ se } \lambda_1 \leq \lambda_x \leq \lambda_2 \quad \text{in cui} \end{aligned}$$

$$F_\lambda = \left( \frac{\lambda - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \right) \cdot \frac{1}{2}$$

$$F_\lambda = 0.75 \text{ se } \lambda_2 \leq \lambda_x \leq \lambda_3 \quad \text{in cui}$$

$$F_\lambda = \left( \frac{\lambda - \lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_2} + 1 \right) \cdot \frac{1}{2}$$

$$F_\lambda = 1 \text{ se } \lambda_x > \lambda_3$$

Una volta stabilita la procedura di assegnazione dei valori ai fattori costituenti la relazione di geoscambio e pesati i contributi dei singoli parametri nel calcolo finale, è stata realizzata una carta preliminare del potenziale geotermico relativa alla sola provincia di Foggia (Fig.5).

### Conclusioni

La metodologia multidisciplinare proposta, articolata in diverse fasi, permette di produrre carte tematiche specifiche a livello regionale, in grado di rappresentare in modo significativo i parametri che maggiormente influenzano le capacità di scambio termico del sottosuolo.

Le conoscenze acquisite hanno permesso di produrre una carta preliminare del potenziale di geoscambio, necessariamente semplificata, sia per motivi di scala di lavoro che di rappresentazione.

Tuttavia, la stretta correlazione tra flusso geotermico superficiale e temperatura media annua dell'aria risulta più complessa rispetto a quella semplificata adottata. Ulteriori sforzi sono attualmente incentrati alla definizione più raffinata dell'equazione preliminare, considerando il contributo di ogni singolo parametro in forma combinata e le relazioni di contemporaneità di effetto sulla valutazione del potenziale di geoscambio complessiva.

Nonostante i risultati presentati possano considerarsi ancora provvisori, la carta del potenziale geotermico prodotta è un primo strumento propositivo, utile ad orientare le pubbliche amministrazioni verso una regolamentazione consapevole ed una pianificazione urbanistica ad elevata sostenibilità energetica. La cartografia dedicata al tema geotermico di bassa entalpia costituisce inoltre un valido strumento di analisi di pre-fattibilità per progettisti ed operatori del settore. Nell'esempio riportato relativo alla provincia di Foggia, si può dedurre che lo sviluppo delle soluzioni tecnologiche dedicate al geoscambio dovrà essere prevalentemente indirizzato a soddisfare la richiesta di raffrescamento delle unità residenziali. Nel territorio comunale in esame, il potenziale di geoscambio competente risulta appartenere alla classe "alto potenziale", in considerazione della presenza, nei primi 100 m di profondità, di terreni buoni conduttori di calore ( $\lambda = 1,5-2,5$  W/mK) e di una combinazione di temperatura media annua dell'aria / flusso di calore favorevole alle necessità sito-specifiche di climatizzazione degli edifici.

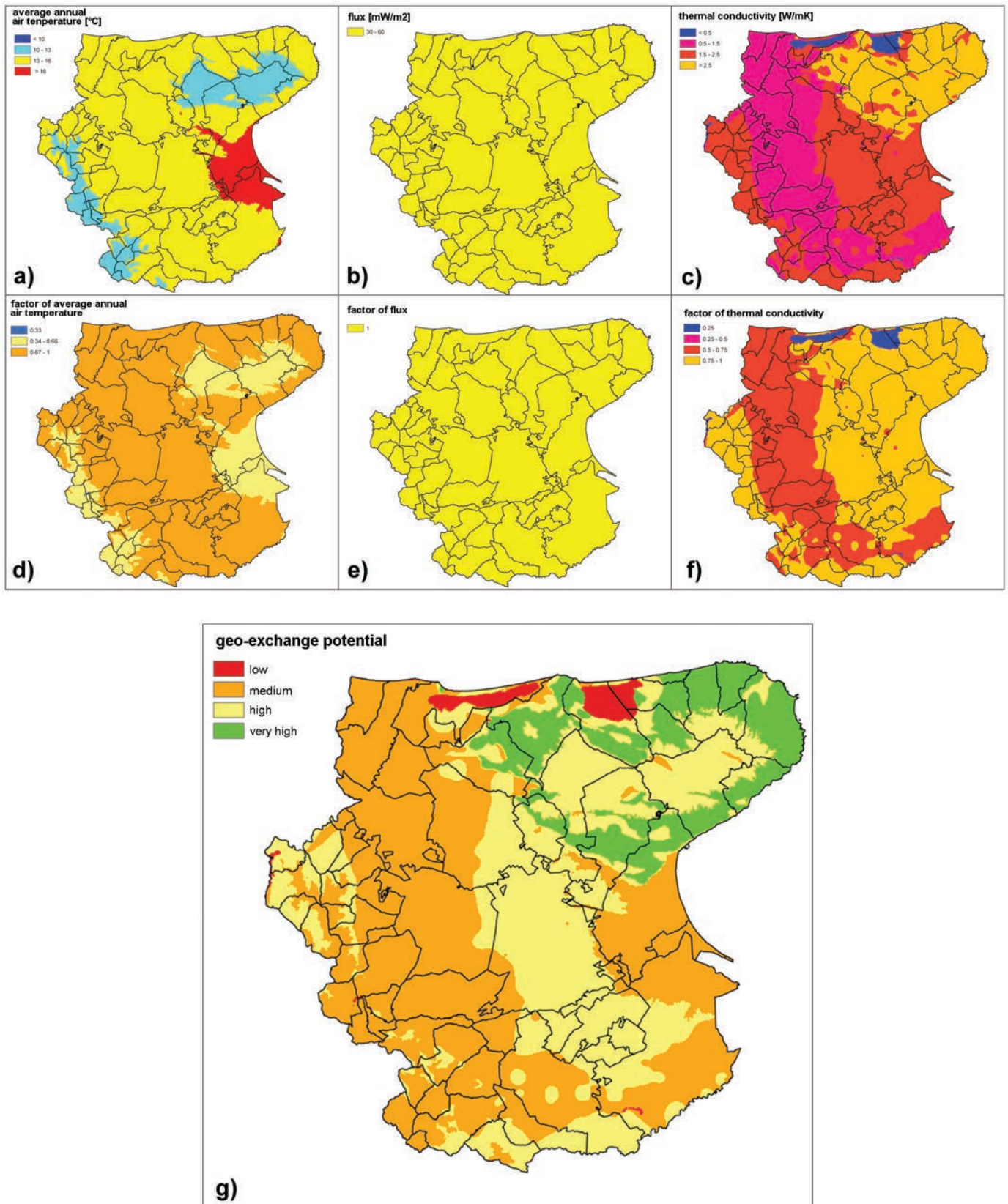


Fig. 5 - Carta del potenziale di geoscambio per la provincia di Foggia (g), ottenuta dall'individuazione dei valori di soglia dei parametri di temperatura media annua dell'aria (a), di flusso (b) e di conducibilità termica di sintesi (c) e dall'assegnazione dei pesi ai fattori di calcolo corrispondenti (d-e-f).

Fig. 5 - Geo-exchange potential map for the Foggia Province (g), obtained from the identification of the threshold values for the parameters of average annual air temperature (a), geothermal flux (b) and the final thermal conductivity (c), and from assigning weights to the corresponding calculation factors (d-e-f).

## Bibliografia

- Abu-Hamdeh, N.; Khedair, A. & Reeder, R. (2001), A comparison of two methods used to evaluate thermal conductivity for some soils. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 44(5): 1073-1078.
- Civita M. (1994). *Le Carte della Vulnerabilità degli Acquiferi all'Inquinamento. Teoria e Pratica. "Acquifer vulnerability maps to pollution"*. Pitagora Ed. (publisher), Bologna.
- Civita M., Demaio M. (1997). SINTACS: un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento – Metodologia e automatizzazione "SINTACS: a parametric system for the assessment and mapping of groundwater vulnerability to pollution - Methodology and automation". Pitagora Editrice, Bologna.
- Claps P., Giordano P., Laguardia G. (2003). Analisi quantitativa della distribuzione spaziale delle temperature medie in Italia "Quantitative analysis of the spatial distribution of average temperatures in Italy". Working paper 2003, Politecnico di Torino, 1-22
- Clarke, B. G.; Agab, A. & Nicholson, D. (2008). Model specification to determine thermal conductivity of soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering* 161(3): 161-168
- Clauser, C. & Huenges, E.T., A (ed) (1995). *Thermal conductivity of rocks and minerals*. In: *Rock Physics and Phase Relations*. American Geophysical Union, Washington.
- Cultrera, M., Antonelli, R., Teza, G., Castellaro, S., (2011). A new hydrostratigraphic model of Venice area (Italy). *Environmental Earth Sciences* (doi: 10.1007/s12665-011-1307-2).
- Davis, Michael G., D. S. C. T. M. V. W. & Armstrong, P. A. (2007). Thermal conductivity anisotropy of metasedimentary and igneous rocks. *Journal of Geophysical Research* 112(B05216): 1-7.
- Deming, D. (1994). Estimation of the thermal conductivity anisotropy of rock with application to the determination of terrestrial heat flow. *Journal of Geophysical Research* 99(11): 22,087-22,091.
- Diao, N.; Li, Q. & Fang, Z. (2004). Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection. *International Journal of Thermal Sciences* 43(12): 1203 - 1211.
- Hellström, G. & Sanner, B. (2000). *EED Earth Energy Designer User manual Version 2.0'*, Dept. of Mathematical Physics, Lund University, P.O.Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden.
- Jougnot, D. & Revil, A. (2010). Thermal conductivity of unsaturated clay-rocks. *Hydrology and Earth System Sciences* 14: 91-98.
- Kavanaugh, S. P.; Xie, L. & Martin, C. (2001). *ASHRAE 1118-TRPRE-SEARCH SUMMARY Methods for Determining Soil and Rock Formation Thermal Properties from Field Tests*. Technical report, The University of Alabama, Department of Mechanical Engineering.
- Krishnaiah, S.; Singh, D. N. & Jadhav, G. N. (2004). A methodology for determining thermal properties of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41(5): 877 - 882.
- Lee, C.; Park, M.; Min, S.; Kang, S.-H.; Sohn, B. & Choi, H. (2011). Comparison of effective thermal conductivity in closed-loop vertical ground heat exchangers. *Applied Thermal Engineering* 31 (17-18): 3669-3676
- Ministero dell'Interno Programma Operativo Nazionale PON - Sicurezza per lo sviluppo - Obiettivo Convergenza 2007-2013 "Ministry of National Operational Programme PON - Security for Development - Towards Convergence 2007-2013"
- Nam Y., Ooka R. (2011) Development of potential map for ground and groundwater heat pump systems and the application to Tokyo. *Energy and Buildings* 43: 677-685
- Noorollahi Y., Itoi R., Fujii H., Tanaka T. (2008) Gis integration model for geothermal and well siting. *Geothermics* 37: 107-131.
- Noorollahi Y., Yousefi H., Itoi R., Ehara S. (2009). Geothermal energy resources and development in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13: 1127-1132.
- Ould-Lahoucine, C.; Sakashita, H. & Kumada, T. (2002). Measurement of thermal conductivity of buffer materials and evaluation of existing correlations predicting it. *Nuclear Engineering and Design* 216(1-3): 1 - 11.
- Pasquale, V.; Gola, G.; Chiozzi, P. & Verdoya, M. (2011). Thermophysical properties of the Po Basin rocks. *Geophysical Journal International* 186(1): 69--81.
- Prol-Ledesma R. M. (2000). Evaluation of reconnaissance results in geothermal exploration using GIS. *Geothermics* 29: 83-103.
- Robertson, E. C. (1988). *Thermal properties of rocks*. Technical report, United States Department of the Interior - U. S. Geological Survey.
- Robertson, E. C. (1979). *Thermal conductivity of rocks*. Technical report, United States Department of the Interior - U. S. Geological Survey.
- Salomone, L. & Marlowe, J. (1989). *Soil and Rock Classification for the Design of Ground-Coupled Heat Pump Systems - Field manual*. International Ground Source Heat Pump Association, 482 Cordell South Stillwater, Oklahoma 74878 USA.
- Sass, J. H., J. P. K. J. E. P. S. & Wendt, W. E. (1984). *Laboratory line-source methods for the measurement of thermal conductivity of rocks near room temperature*. Technical report, USGS - United States Department of the Interior Geological Survey.
- Singh, T.; Sinha, S. & Singh, V. (2007). Prediction of thermal conductivity of rock through physico-mechanical properties. *Building and Environment* 42(1): 146 - 155.
- Tüfekçi N., M. Lütfi Süzen, Güleç N. (2010). GIS based geothermal potential assessment: A case study from Western Anatolia, Turkey. *Energy* 35: 246-261.
- Yousefi H., Noorollahi Y., Ehara S., Itoi R., Yousefi A., Fujimitsu Y., Nishijima J., Sasaki K. (2010). Developing the geothermal resources map of Iran. *Geothermics* 39: 140-151.
- Waples, D. & Waples, J. (2004). A Review and Evaluation of Specific Heat Capacities of Rocks, Minerals, and Subsurface Fluids. Part 2: Fluids and Porous Rocks. *Natural Resources Research* 13: 123-130.