



INGV
terremoti
vulcani
ambiente

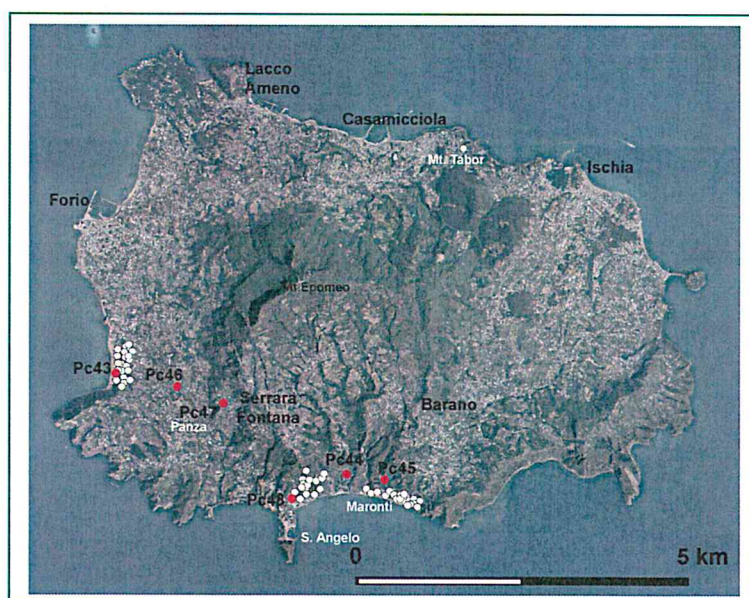
ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

ISTITUTO NAZIONALE di GEOFISICA e VULCANOLOGIA
Sezione di Napoli "OSSERVATORIO VESUVIANO"
Via Diocleziano 328, 80124 Napoli

ALLEGATO 3

**Permesso di Ricerca per Risorse Geotermiche Finalizzato alla
Sperimentazione di Impianti Pilota Denominato "FORIO"**

Modellazione Numerica del Serbatoio Geotermico



Il Relatore

INDICE

1. Modellazione numerica del Serbatoio Geotermico	pag.3
1.2. Introduzione	pag.3
1.3. Simulazioni numeriche e modeling termodinamico	pag.3
1.4. Modello fisico	pag.3
1.5. Risultati della modellazione	pag.7
2. Conclusioni	pag.16
Bibliografia	pag.17

1. Modellazione Numerica del Serbatoio Geotermico

1.2 Introduzione

Qualunque valutazione sullo stato dei sistemi geotermali e sulla loro dinamica implica l'esistenza di un modello concettuale, basato sui dati geofisici e geochimici, e l'utilizzo di modelli fisici attendibili. Questi ultimi hanno molteplici ruoli, tra cui i seguenti sono particolarmente rilevanti ai fini del progetto: (i) permettono di esplorare relazioni tra grandezze fisiche, e di verificare l'attendibilità dei modelli concettuali (ii) permettono di identificare associazioni di grandezze misurabili che possono consistentemente essere relazionate sia all'osservato che a processi fisici non direttamente osservabili. Nell'ambito dell'utilizzo delle fonti geotermiche, una volta stabilite le caratteristiche dei serbatoi geotermici (temperature, pressioni, volumi, contenuto in vapore, etc.) e definito un modello concettuale allo stato stazionario, le modellazioni fisiche consentono di valutare le perturbazioni del sistema geotermale (in termini di temperatura, pressione e flussi) indotte da attività di estrazione e reiniezione dei fluidi utilizzati per la produzione di energia termica o elettrica. Nel caso in esame è stato utilizzato il software TOUGH2®.

Nella presente relazione saranno utilizzate simulazioni numeriche basate su un modello di sistema geotermale ricavato sia dallo studio delle fonti bibliografiche scientifiche, sia dai dati delle perforazioni geotermiche eseguite nell'isola d'Ischia dalla società SAFEN (secondo quanto riportato nella Relazione Geologico Tecnica). Le simulazioni sono indirizzate a comprendere la sostenibilità della risorsa, a seguito dello sfruttamento del serbatoio geotermico per la produzione di 5MWe. Tale produzione avverrà attraverso l'emungimento di 300th^{-1} di fluido geotermale, da n°2 pozzi di produzione, e la reiniezione totale del fluido stesso, dopo un Ciclo di Rankyne, in n°1 pozzo di reiniezione. In particolare si valuteranno le variazioni di temperatura e pressione del sistema geotermale, al fine di verificare la sostenibilità della risorsa, dopo 30 anni di produzione di energia elettrica. Inoltre, sarà verificato il grado di subsidenza del suolo a seguito della diminuzione di pressione nelle zone di emungimento e l'interazione con il campo di stress locale per la valutazione della possibile sismicità indotta (*Allegato 5*), in particolare, dall'attività di reiniezione dei fluidi. Il modello adottato tiene conto della topografia dell'isola, specie in considerazione del fatto che il campo pozzi è localizzato a una quota di circa 500 m s.l.m., e della geometria dei pozzi.

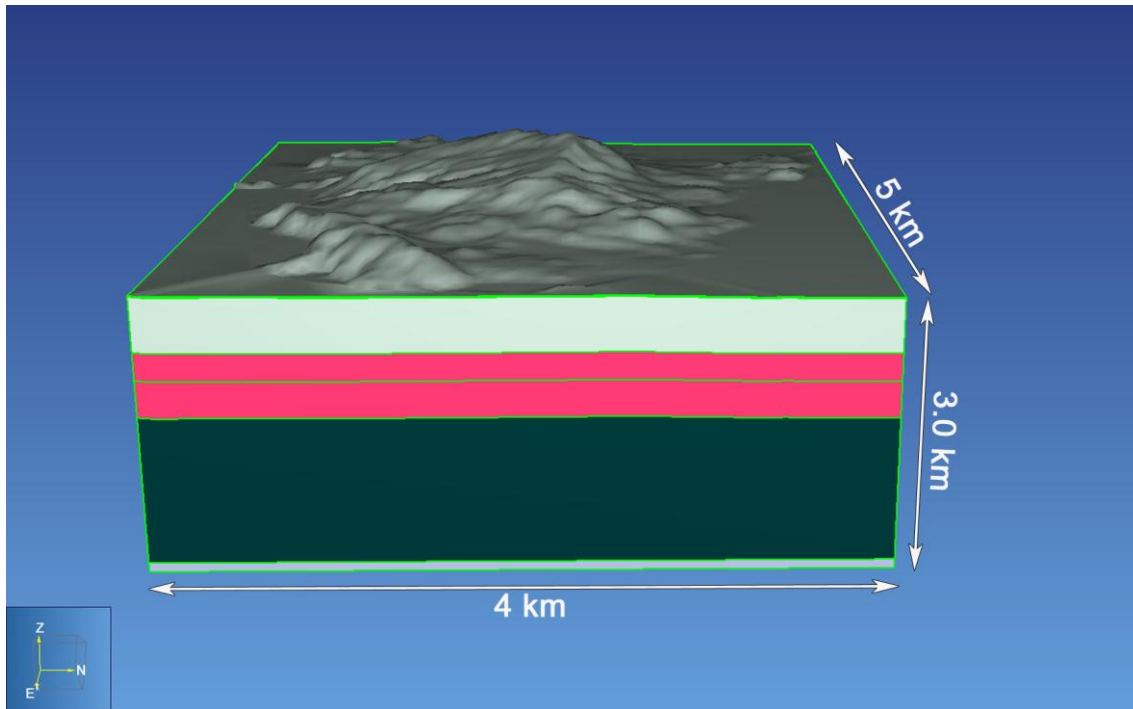
1.3 Simulazioni numeriche e Modeling termodinamico

Viene presentato un set di simulazioni numeriche mirato a studiare gli effetti dell'iniezione ed emungimento di fluidi all'interno del reservoir geotermico in esame, dal punto di vista delle

variazioni di pressione e di temperatura indotte, nonché degli effetti di deformazione del suolo. I dati ricavati dalle simulazioni saranno utilizzati anche per l'analisi della possibile sismicità indotta dalla reiniezione dei fluidi (Allegato 5). Le simulazioni sono eseguite utilizzando il codice di calcolo numerico TOUGH2[®] ed il codice Comsol Multiphysics[®]. TOUGH2 permette il calcolo degli scambi di massa e di calore dovuti al flusso tridimensionale di misture multifase (gas e liquidi) di varie specie chimiche all'interno di un mezzo poroso di permeabilità assegnata, assumendo l'equilibrio locale tra fluidi e matrice rocciosa. Le equazioni di conservazione della massa e dell'energia, che descrivono le condizioni termodinamiche del sistema, vengono discretizzate nella loro forma integrale, in uno schema detto metodo delle differenze finite integrali (Edwards, 1972). Le soluzioni consistono in un insieme di valori di due variabili termodinamiche indipendenti (nel nostro caso pressione P e temperatura T) che definiscono univocamente lo stato del sistema. Queste variabili vengono stimate, in funzione del tempo, nei centri delle celle in cui il volume discretizzato è stato suddiviso. I flussi di fluidi sono descritti tramite l'equazione di Darcy, espressa in una forma multifase e multicomponente. Il flusso di calore viene descritto considerando termini conduttivi e convettivi. La natura e le proprietà delle misture di fluidi che scorrono nel mezzo poroso vengono considerate nelle equazioni attraverso i parametri fisici (densità, viscosità, entalpia), calcolati in funzione delle condizioni termodinamiche stimate.

1.4 Modello Fisico

Per la realizzazione del modello tridimensionale dell'isola di Ischia sono stati utilizzati i dati geologici, geofisici e di sottosuolo dei pozzi disponibili in letteratura (*Penta e Conforto, 1951; AGIP, 1987; Carlino et al., 2012, 2014*) ed i risultati riportati nel paragrafo conclusivo dell'Allegato 1. In particolare, la ricostruzione del tetto del serbatoio geotermico è stata realizzata ricostruendo in 3D la superficie topografica estrapolata dal modello digitale del terreno con risoluzione di 20m e considerando una zona a prevalente regime conduttivo, così come evinto dalle termometrie dei pozzi più prossimi all'area di interesse, che dalla superficie topografica si estende all'incirca fino al livello del mare. Questo spessore rappresenta, almeno nei livelli inferiori, una zona a più bassa permeabilità, probabilmente per la presenza di depositi argillificati formati a seguito dell'attività tettonica e vulcanica degli ultimi 33.000 anni. Sottostante questo livello, è stato considerato un acquifero di circa 800 m di spessore, con temperatura di circa 200°C, che sovrasta un basamento impermeabile (Fig. 1.4.1). L'acquifero è costituito prevalentemente da spessori di lave fratturate, sottostanti il Tufo Verde del Monte Epomeo. Se si considera l'estensione verticale minima ricavata dai gradienti di temperatura dell'acquifero più profondo, il volume minimo dell'acquifero interessato dalla circolazione di acque termali ammonterebbe a circa 10 km³. In tal caso il volume medio dei fluidi circolanti sarebbe pari a circa 2km³, per una porosità media del mezzo di 0.20, escludendo tuttavia il contributo volumetrico relazionato alla fratturazione del mezzo.



*Figura 1.4.1. Modello tridimensionale di riferimento utilizzato durante le simulazioni numeriche. Il dominio considerato consta di un prisma di 5 km * 4 km *3 km. La topografia dell'isola di Ischia è stata imposta al top del Volume.*

L'isola è stata approssimata ad un dominio complessivo con una superficie approssimativamente di 5 km * 4 km ed uno spessore di 3 km a cui è stata sovrapposta la topografia. Il volume così composto è stato suddiviso in una griglia di 67.963 celle trapezoidali elementari di area massima pari ad 80.000 m², ridotta in prossimità dei pozzi a 500 m² (Fig. 1.4.2). Il sistema di riferimento considerato prevede l'asse x in direzione WE, l'asse y in direzione SN e l'asse z orientato verso l'alto. L'origine degli assi è posta nel punto centrale della griglia, corrispondente alla posizione geografica 407860E, 4509030N nel sistema UTM di coordinate.

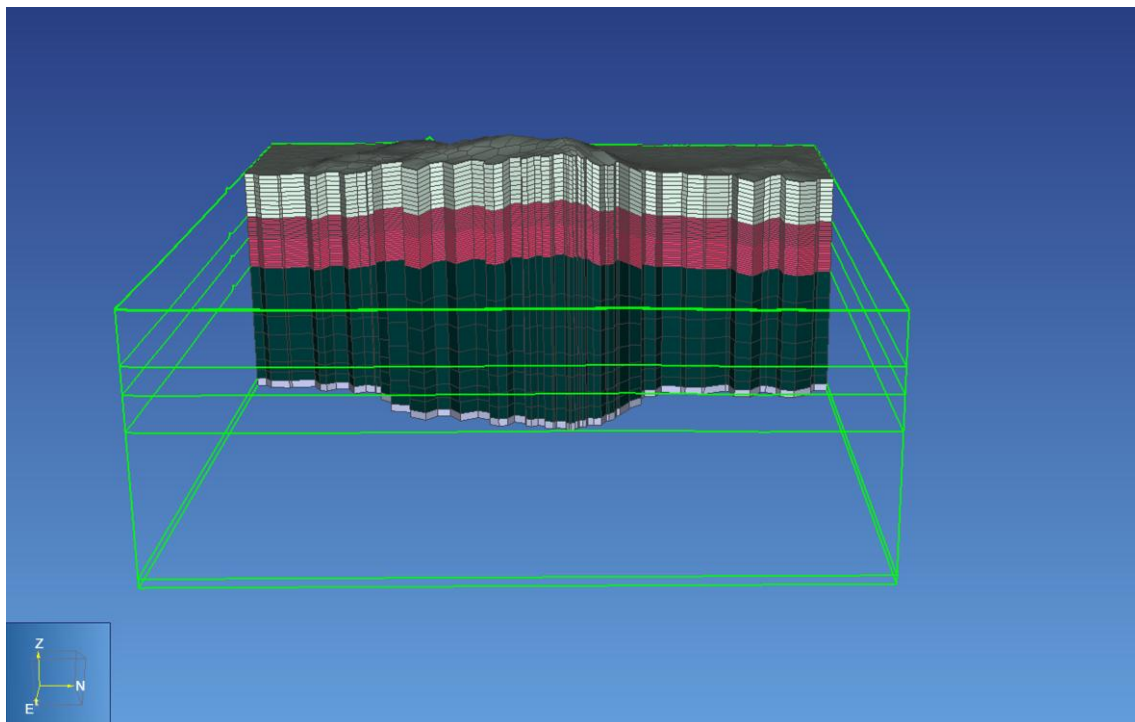


Figura 1.4.2. Spaccato tridimensionale del modello considerato con la discretizzazione in celle. I differenti colori rappresentano i materiali imposti all'interno dei singoli strati.

I tre strati geologici, in cui è stata suddivisa l'isola, vengono caratterizzati da una permeabilità pari, rispettivamente, a 10^{-16} m^2 , 10^{-14} m^2 e 10^{-18} m^2 (Fig. 1.4.3). E' stata imposta una porosità media del 20%, una conducibilità termica della matrice rocciosa pari a $2.1 \text{ Wm}^{-1}\text{°C}^{-1}$, un calore specifico pari a $1000 \text{ Jkg}^{-1}\text{°C}^{-1}$ ed una densità media delle rocce pari a 2.100 Kgm^{-3} . Le condizioni al bordo prevedono che temperatura e pressione siano fissate in superficie e sul fondo del modello, una volta determinato lo stato stazionario. La simulazione tiene conto della direzione dei pozzi, così configurati: n° 2 pozzi di emungimento (Pe) con profondità massima di 1.300m dal piano campagna e deviazione a 500m circa dal piano campagna; distanza orizzontale massima tra fondo pozzo e l'asse verticale del pozzo pari a 600m; n° 1 pozzo di reiniezione (Pr) con le stesse caratteristiche. In pianta i pozzi avranno la seguente configurazione azimutale: Pr= N90°E, Pe₁= N240°E, Pe₂= N300°E (Fig. 1.4.4). In tal modo la distanza relativa tra ogni pozzo (fondo pozzo) sarà pari a circa 1km. I pozzi di emungimento avranno una zona di pescaggio dal reservoir (casing finestrato) tra 400m e 800m di profondità rispetto al livello del mare, il pozzo di reiniezione avrà lo stesso range di profondità di re-immissione in falda dei condensati. La temperatura di emungimento è pari a 200°C mentre quella di reiniezione è pari a circa 90°C.

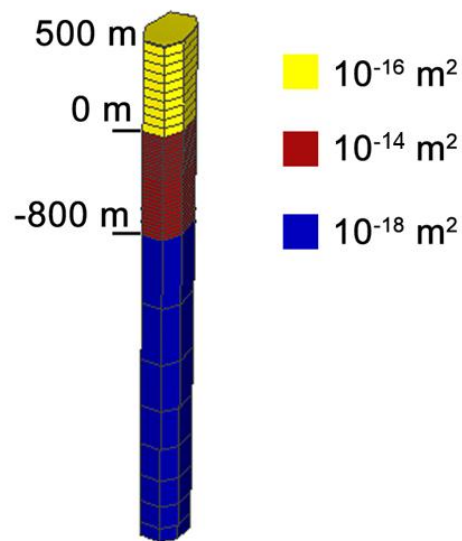
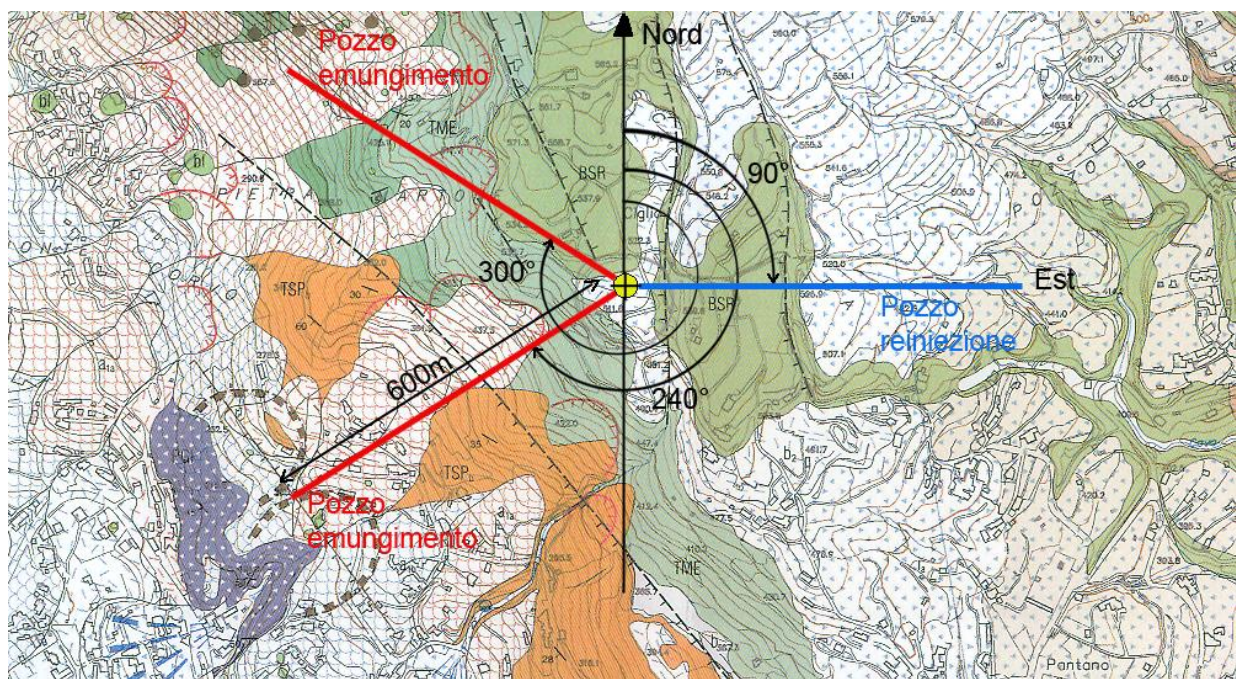


Figura 1.4.3. Profilo di permeabilità caratteristico del modello considerato. Le quote riportate sono relative alla posizione della diramazione dei pozzi (0=livello del mare).



- Depositi tufacei rimaneggiati (depositi di versante e di frana)
- Scorie di Punta della Cannuccia (lapilli e bombe scoriacee)
- Depositi tufacei da debris avalanche
- Tufi di Serrara-Cava petrella
- Tufo Verde del Monte Epomeo

Figura 1.4.4. Traccia della deviazione dei pozzi sulla carta geologica dell'isola d'Ischia. L'azimut dei pozzi è pari rispettivamente a: N90°E (pozzo reiniezione), N240°E (pozzo emungimento 1), N300°E (pozzo di emungimento 2). La distanza orizzontale massima tra l'asse centrale dei pozzi ed il fondo pozzo è di 600m.

1.5 Risultati della modellazione

La prima parte della modellazione ha avuto l'obiettivo di ricostruire lo stato naturale del sistema, inteso come condizione di quasi equilibrio (stato stazionario) in cui i cambiamenti naturali siano trascurabili rispetto a quelli indotti dalla coltivazione geotermico dei pozzi ed in cui gli andamenti della pressione e della temperatura siano compatibili con quelle attuali dell'isola. A tal fine le simulazioni sono state calibrate considerando un profilo idrostatico di pressione ed i gradienti di temperatura estratti dai pozzi profondi presenti nell'isola (Carlino et al., 2014).

Le condizioni che caratterizzano lo stato stazionario sono riportate in Fig. 1.5.1 per la Pressione ed in Fig. 1.5.2 per la Temperatura. La differenza di temperatura tra i dati rilevati nei pozzi profondi e quelli ottenuti con la simulazione risulta compatibile con una buona affidabilità dei risultati. A titolo di esempio, si riporta in Fig. 1.5.3 la geoterma sperimentale in corrispondenza del Pozzo Ischia 3 (Pc46) (prossimo ai pozzi di progetto) e la geoterma corrispondente allo stato stazionario.

Partendo dalla soluzione stazionaria precedentemente ottenuta, sono stati introdotti nel modello i pozzi di produzione e reiniezione previsti nel progetto pilota (Fig. 1.5.4), per valutare la sostenibilità di coltivazione del campo mediante impianti geotermoelettrici a reiniezione totale del fluido. Le portate di prelievo imposte, come previste dal progetto, sono state di 41 kg/s per ciascun pozzo di prelievo e di 82 kg/s per il pozzo di reiniezione. Il tempo di sfruttamento simulato è di 30 anni.

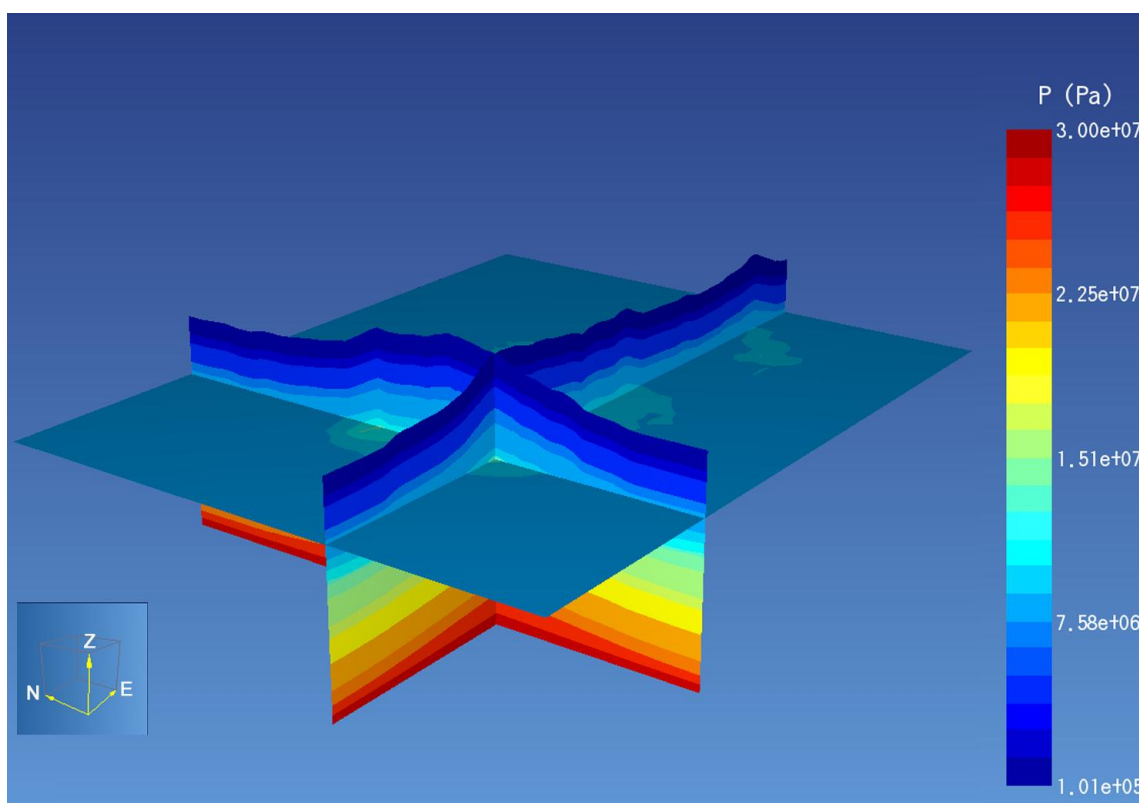


Figura 1.5.1. Sezioni rappresentative dell'andamento delle isobare all'interno del sottosuolo allo stato stazionario (tempo simulato 100 milioni di anni). Le sezioni si incrociano in corrispondenza della testa pozzo.

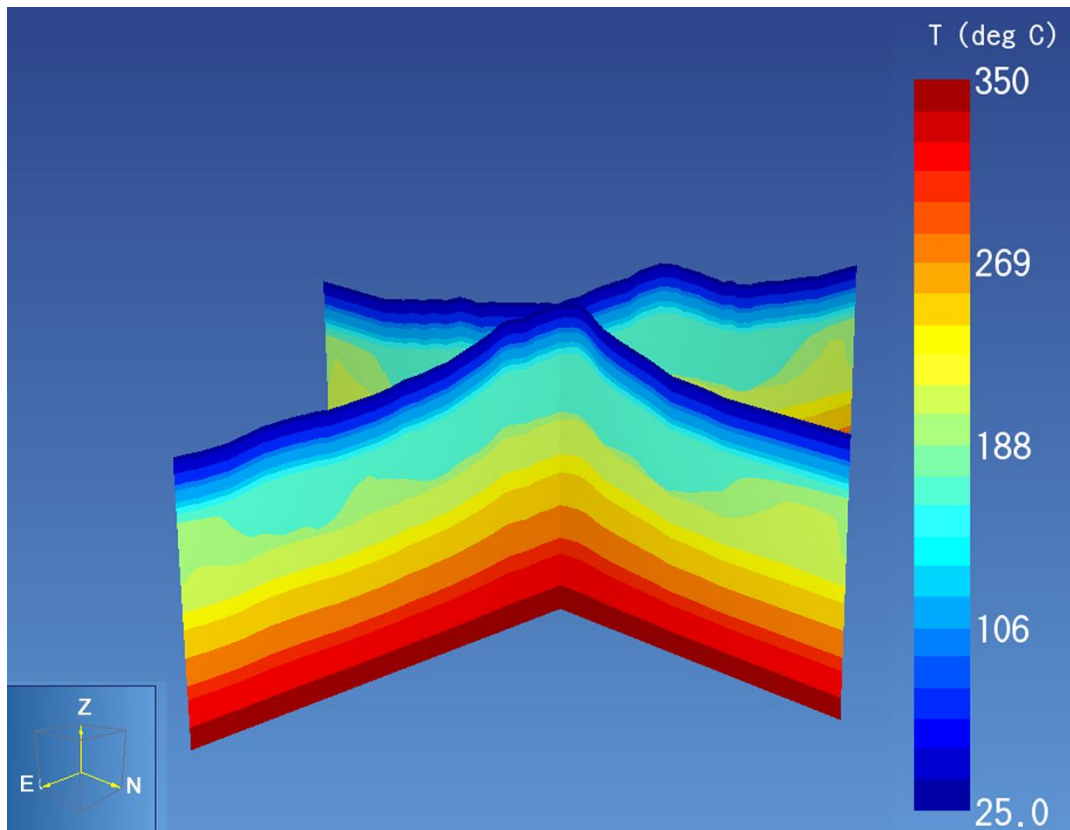


Figura 1.5.2. Sezioni rappresentative dell'andamento delle isoterme all'interno del sottosuolo allo stato stazionario (tempo simulato 100 milioni di anni).

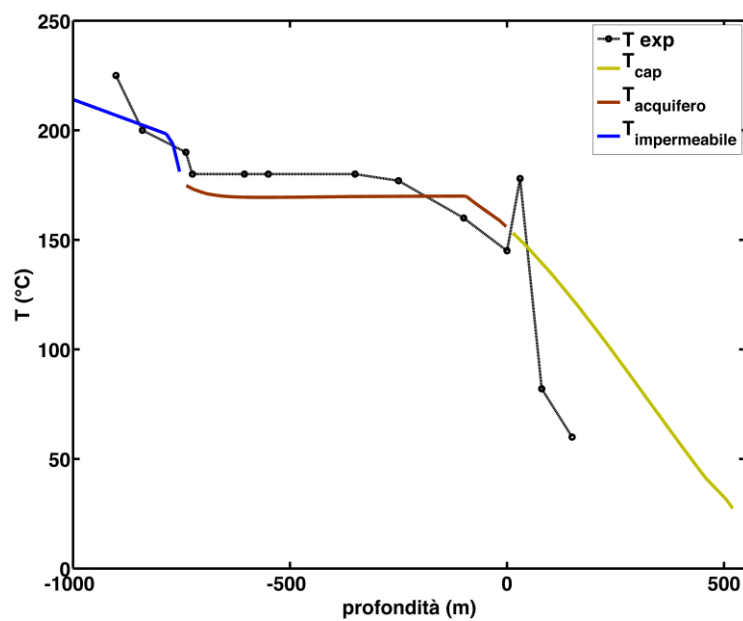


Figura 1.5.3. Geoterma sperimentale (linea nera tratteggiata) in corrispondenza del Pozzo Ischia 3 (Pc46) e geoterma corrispondente allo stato stazionario (linea continua, i differenti colori sono relativi ai differenti strati geologici del modello).

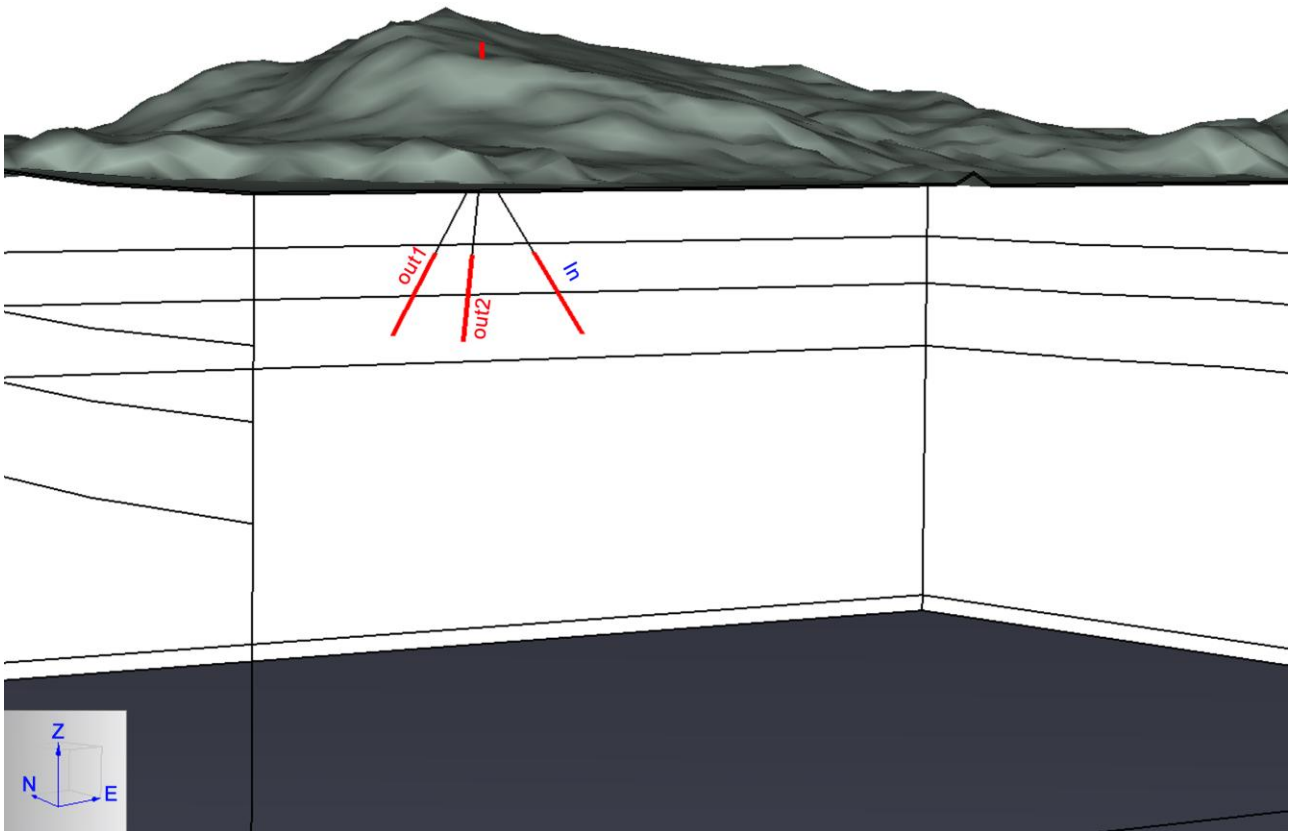


Figura 1.5.4. Schema essenziale della disposizione del campo pozzi modellata numericamente.

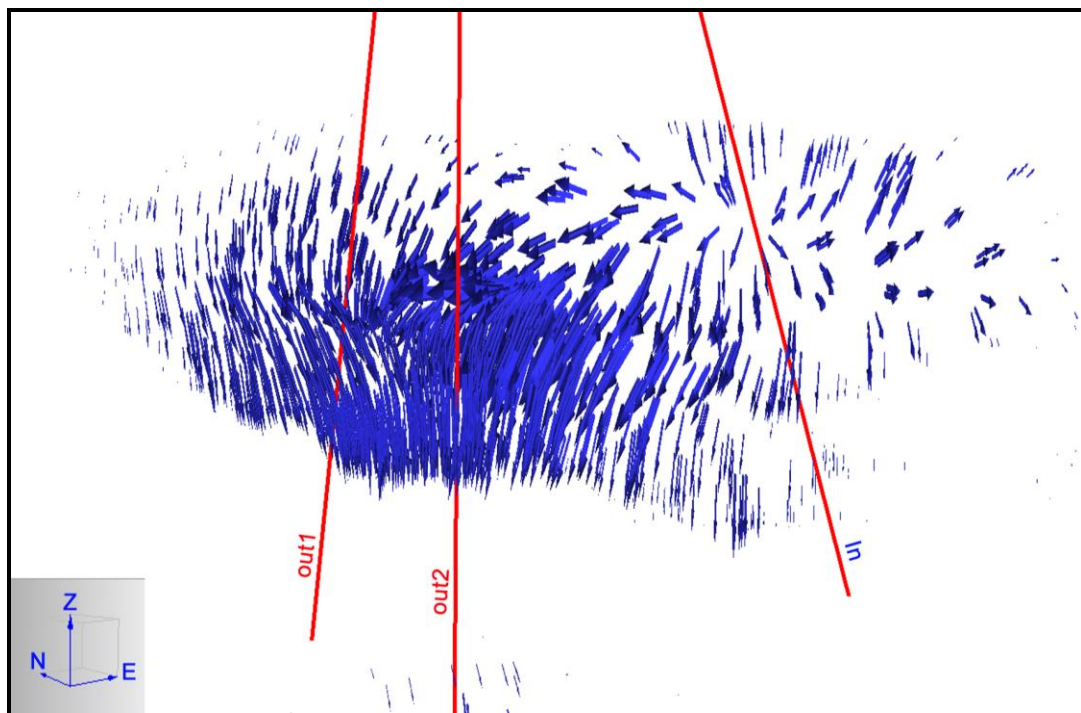


Figura 1.5.5. Dettaglio dell'andamento dei vettori rappresentativi del flusso di fluido in prossimità delle zone di emungimento e di reiniezione dei pozzi.

In Fig. 1.5.5 è riportato l'andamento dei vettori rappresentativi del flusso di fluido in prossimità della zona di emungimento e della zona di reiniezione dei pozzi. In figura 1.5.6 e 1.5.7 sono riportate le variazioni termodinamiche riscontrate al termine della coltivazione del serbatoio geotermico simulata. Variazioni negative di pressione sono ovviamente localizzate intorno alle zone di emungimento dei pozzi, mentre variazioni positive nella zona di reiniezione. In particolare in Fig. 1.5.6 sono stati individuati due volumi principali, all'interno dei quali si verificano le variazioni negative e positive uguali o superiori (in valore assoluto) a 3bar (0.3 MPa) e 1bar (0.1MPa) rispettivamente. Tali volumi sono pari a: $6.4 \cdot 10^7 \text{m}^3$ per variazioni di -3bar nella zona di emungimento; $5.3 \cdot 10^8 \text{m}^3$ per variazioni di -1 bar nella zona di emungimento; $1.6 \cdot 10^7 \text{m}^3$ per variazioni di +3bar nella zona di reiniezione; $7.2 \cdot 10^8 \text{m}^3$ per variazioni di +1 bar nella zona di reiniezione;

Le variazioni massime di pressione si verificano in corrispondenza dell'asse deviato dei pozzi, nella zona finestrata di emungimento e/o reiniezione, in volumi poco significativi e del tutto trascurabili. Dalla figura 1.5.8 si evince che il decremento di pressione massimo nella zona di emungimento è pari a circa -3bar. Tale variazione è misurata, nella simulazione, in corrispondenza dell'asse del pozzo di emungimento, nella sezione più profonda della zona finestrata. Nella stessa figura si riporta la variazione relativa alla zona di reiniezione, da cui si evince il massimo incremento relativo di pressione è pari a circa 6 bar. Le variazioni di pressione causate dalla coltivazione del campo pozzi tendono a stabilizzarsi dopo i primi 5 anni di produzione, raggiungendo un rate di variazione molto basso.

Le variazioni di temperatura dopo 30 anni di simulazione risultano poco significative nella zona di emungimento (sono pari a una diminuzione di 1-2 gradi °C e non vengono riportate graficamente perché poco apprezzabili). Più significative sono le variazioni dello stato termico nella zona di reiniezione. Qui la differenza tra la temperatura del serbatoio di reiniezione, che si è supposto pari a 200 °C, e quella dei condensati (circa 90 °C) determina una diminuzione della temperatura superiore a 50 °C, in un volume intorno al pozzo (nel range di profondità della zona di reiniezione) pari a circa 10^7m^3 . Variazioni di -10 °C si verificano, invece, in un volume di circa $7 \cdot 10^8 \text{m}^3$. E' importante sottolineare che dalla simulazione emerge l'assenza di qualsiasi significativa interazione termodinamica tra la zona perturbata dall'emungimento e la zona perturbata dalla reiniezione dei fluidi.

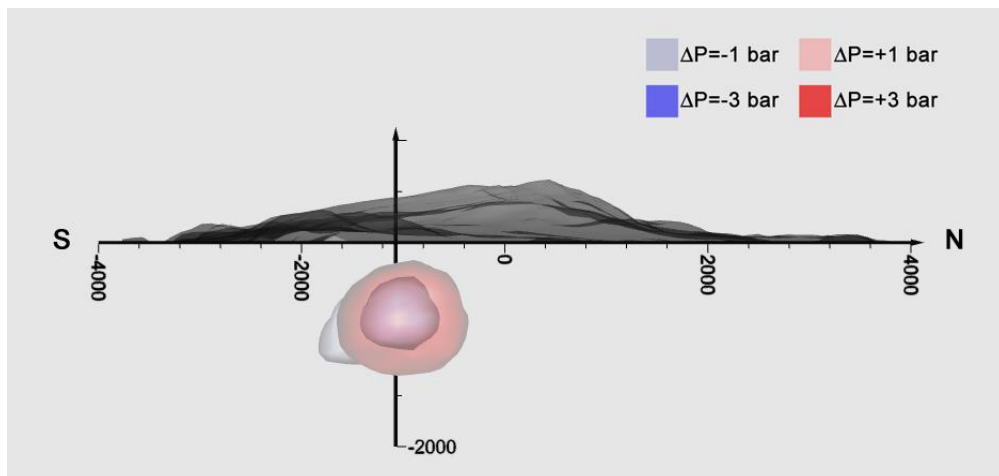
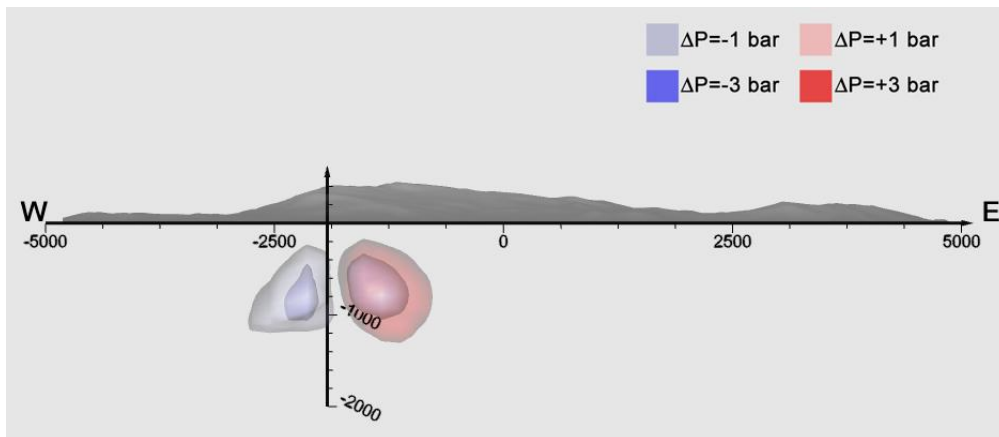
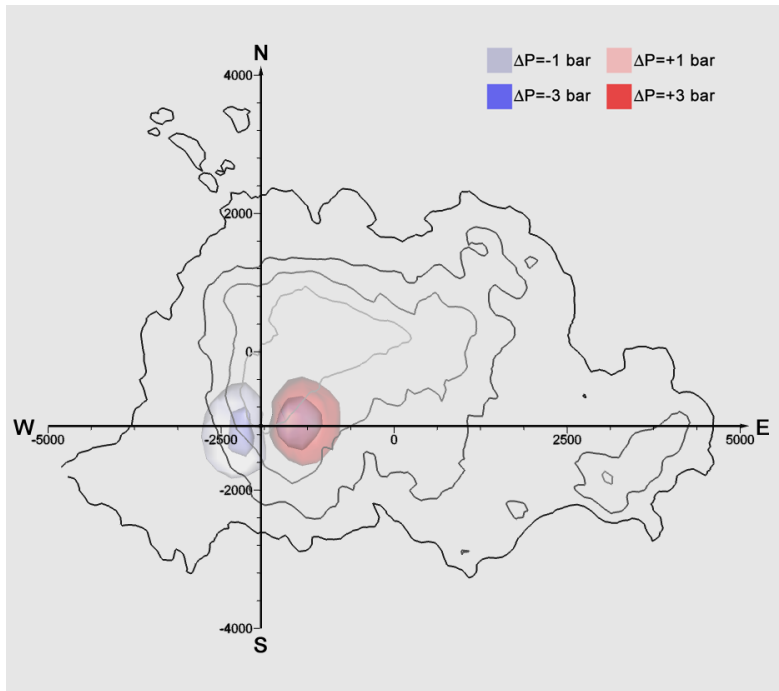


Figura 1.5.6. Isosuperfici delle variazioni di pressione generate da un periodo di coltivazione della risorsa di trent'anni, relative ai valori di ± 1 bar (0.1MPa) ed a ± 3 bar (0.3MPa). Le variazioni sono riportate in pianta (in alto) ed in sezione lungo le direttrici E-W e N-S (al centro ed in basso rispettivamente).

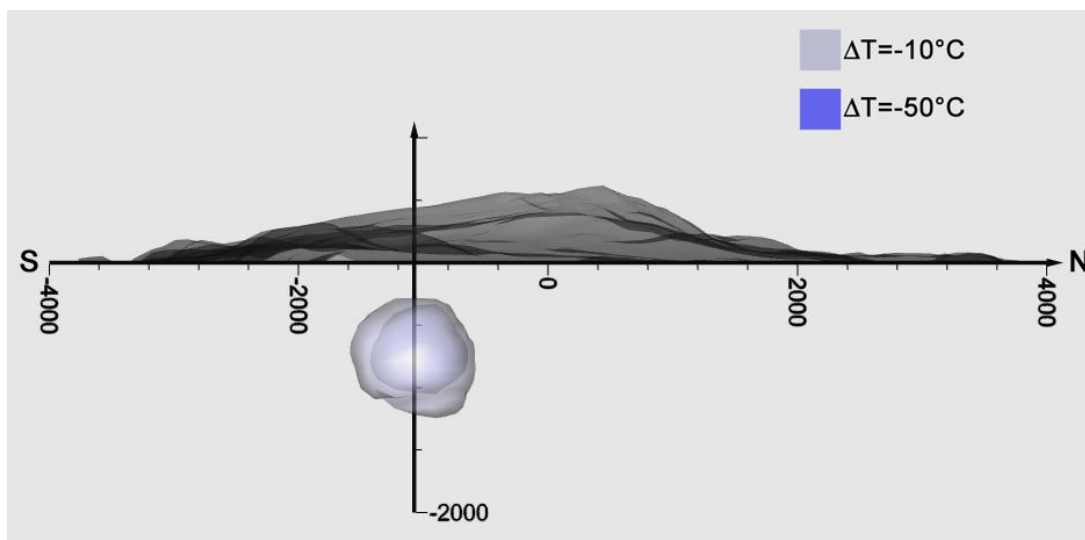
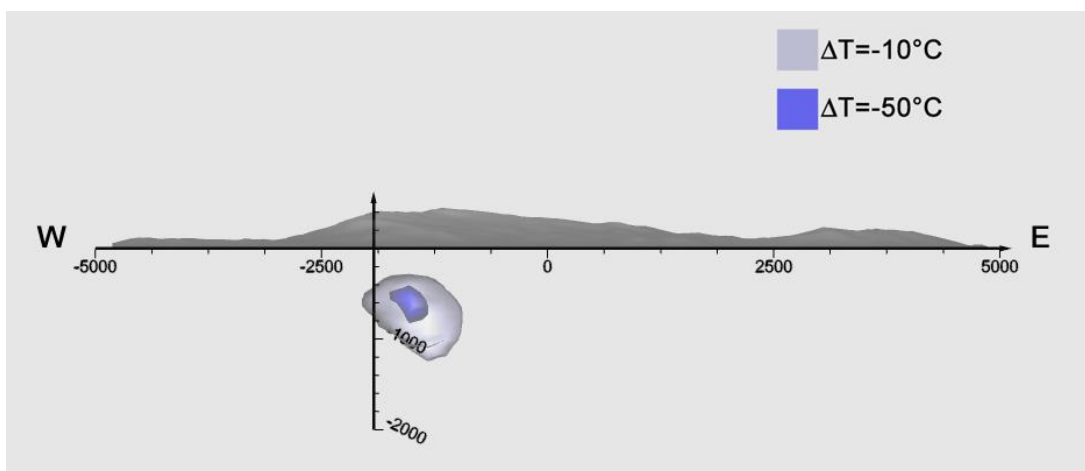
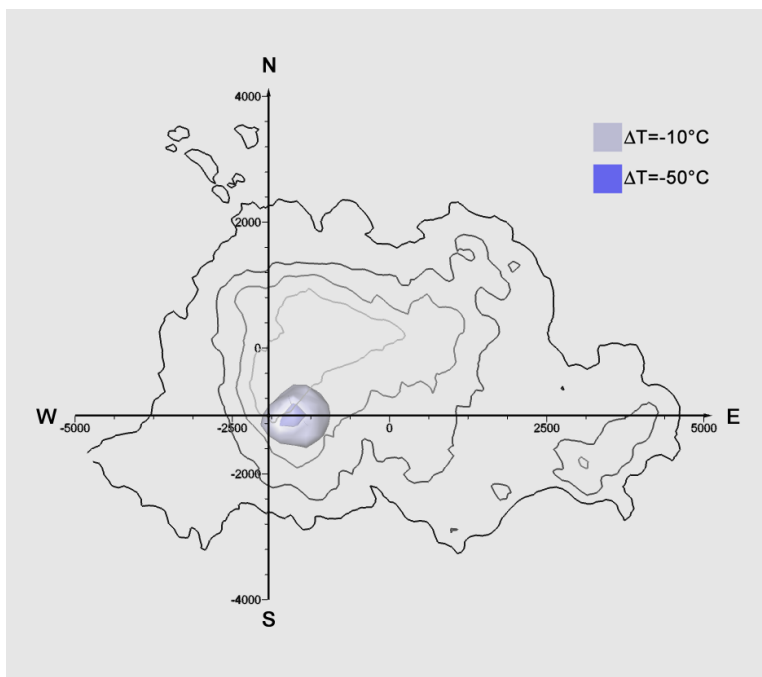


Figura 1.5.7. Isosuperfici delle variazioni di temperatura generate da un periodo di coltivazione della risorsa di trent'anni, relative a -10°C ed a -50°C . Le variazioni sono riportate in pianta (in alto) ed in sezione lungo le direttrici E-W e N-S (al centro ed in basso rispettivamente).

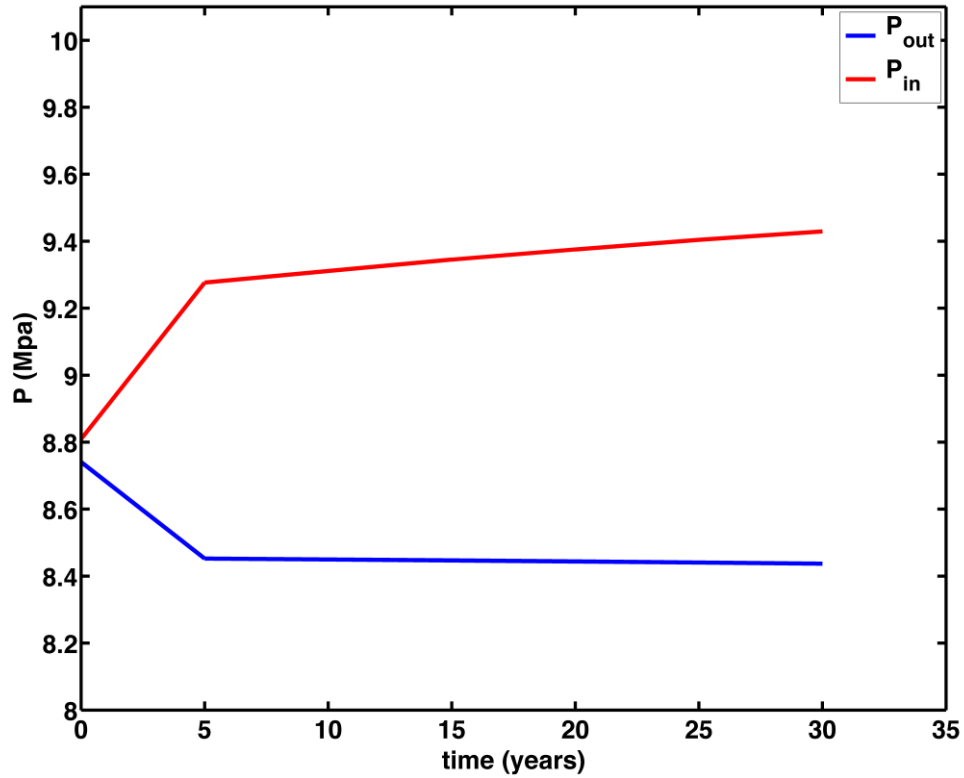


Figura 1.5.8. Simulazione dell'andamento della pressione assoluta al fondo della zona di emungimento dei pozzi. L'aumento massimo relativo di pressione (P_{in}) è pari a circa 0.6MPa (6 bar) dopo 30 anni di coltivazione della risorsa. La diminuzione massima relativa (P_{out}) è invece pari a 0.3MPa (3bar). Si nota che la variazione di pressione significativa si verifica all'incirca nei primi 5 anni di produzione, successivamente il rate di variazione è notevolmente inferiore.

2. Conclusioni

Le simulazioni condotte sono state finalizzate a valutare le variazioni termodinamiche del sistema geotermale di Ischia, a seguito dell'attività di emungimento di fluidi caldi ($T \approx 200^\circ\text{C}$) e reiniezione totale dei condensati ($T \leq 90^\circ\text{C}$) dal e nel reservoir geotermico (per i risultati concernenti la subsidenza e la sismicità indotta si veda *l'Allegato 5 - Sismicità e subsidenza stimolata dall'esercizio dell'impianto*). Le simulazioni sono basate su un modello concettuale di serbatoio geotermico, ricavato dallo studio della letteratura scientifica, dalle indagini geofisiche e geochemiche e dall'analisi e interpretazione dei dati derivanti dalle campagne di esplorazione geotermica condotti dalla società SAFEN a partire dal 1949 nell'isola d'Ischia (*Allegato 1 - Geologia ed Inquadramento Geotermico*).

I risultati principali delle simulazioni, eseguite per un periodo di coltivazione della risorsa di 30 anni, possono così essere sintetizzati:

- Un incremento di pressione (≥ 3 bar) si osserva nel dominio del pozzo re-iniettivo, in un volume piuttosto contenuto pari a $1.6 \cdot 10^7 \text{m}^3$. La pressione massima registrata in corrispondenza del pozzo (alla base della zona di reiniezione) è pari a 6bar ed è confinata intorno all'asse del pozzo (il cui volume è trascurabile); variazioni fino a 1 bar si osservano invece in un volume pari a $7.2 \cdot 10^8 \text{m}^3$;
- Un decremento di pressione (≥ 3 bar) si osserva nel dominio dei pozzi di emungimento, in un volume, anche questo piuttosto contenuto, pari a $6.4 \cdot 10^7 \text{m}^3$. Il decremento massimo si osserva in corrispondenza dei pozzi di emungimento (alla base della zona di estrazione) ed è pari a -3bar; variazioni fino a -1bar si osservano invece in un volume pari a $5.3 \cdot 10^8 \text{m}^3$;
- Il campo termico non mostra sostanziali variazioni di temperatura nel dominio dei pozzi di emungimento, mentre si osserva una diminuzione della temperatura superiore a 50°C , in un volume intorno alla base della zona di reiniezione pari a circa 10^7m^3 . Variazioni di -10°C si verificano, invece, in un volume di circa $7 \cdot 10^8 \text{m}^3$;
- Le variazioni di pressione del sistema geotermale nel dominio dei pozzi (emungimento e reiniezione) mostrano tassi d'incremento e decremento simili, elevati nei primi 5 anni di coltivazione della risorsa, che tendono poi diminuire notevolmente nel restante periodo di simulazione.

- Non si evidenziano interazioni termodinamiche tra il dominio spaziale delle perturbazioni causate dall'emungimento dei fluidi e il dominio spaziale delle perturbazioni causate dalla reiniezione dei condensati;
- Le perturbazioni termiche e di pressione sono confinate nella zona dell'acquifero produttivo, a più elevata permeabilità, mentre non si evidenziano interazioni con i livelli di falda molto superficiali (0-100m), la cui acqua calda è utilizzata per l'attività termale e balneare dell'isola

Le simulazioni mostrano in definitiva che le perturbazioni termodinamiche del sistema geotermale di Ischia, indotte dall'attività di estrazione e reiniezione dei fluidi per la portata indicata di 82 l/s, sono sostenibili sia per quanto attiene le variazioni del campo termico e del campo di pressioni sia per quanto concerne l'interazione delle perturbazione tra il dominio della zona di emungimento e quella di reiniezione.

Bibliografia

AGIP (1987). Geologia e geofisica del sistema geotermico dei Campi Flegrei, Technical report. Settore Esplor e Ric Geoterm-Metodol per l'Esplor Geotermica, San Donato Milanese Italy, 1–23.

Carlino S., Cubellis E., Luongo G., Obrizzo F. (2006) On the mechanics of caldera resurgence of Ischia Island (southern Italy). In: Troise C, De Natale G and Kilburn CRJ (eds) 2006. Mechanisms of Activity and Unrest at Large Calderas. Geological Society, London, Special Publications 269, 181–193.

Carlino S. (2012). The process of resurgence for Ischia Island (southern Italy) over the last 55 ka: the laccolith model and implications for eruption forecasting, Bulletin of Volcanology, doi: 10.1007/s00445-012-0578-0.

Carlino S., Somma R., Troise C. and De Natale G. (2012). The geothermal exploration of Campanian volcanoes: Historical review and future development, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 16, Issue 1, 1004-1030

Carlino S., Somma R., Troiano A., Di Giuseppe M.G., Troise C. and De Natale G. (2014) The geothermal system of Ischia Island (southern Italy): critical review and sustainability analysis of geothermal resource for electricity generation. Renewable Energy, 62 – 177-196.

Edwards, A. L. (1972). Trump: A Computer Program for Transient and Steady State Temperature Distributions in Multidimensional Systems, National Technical Information Service, National Bureau of Standards, Springfield, Va.

Penta F, Conforto (1951). Risultati di sondaggi e di ricerche geominerarie nell'isola d'Ischia dal 1939 al 1943 nel campo di vapore, delle acque termali e delle forze endogene in generale. Annali di Geofisica 1951;4:159-91.