



Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio
del Mare – D.G. Valutazioni e Autorizzazioni Amb

E.prot DVA – 2015 – 0020191 del 31/07/2015

AL MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA TUTELA DEL TERRITORIO E DEL MARE

Direzione Generale Per Le Valutazioni Ambientali

Divisione II Sistemi di Valutazioni Ambientale

Via Cristoforo Colombo, 44

00147 – Roma

Fax: 06.57223040

PEC: dgsalvanguardia.ambientale@pec.minambiente.it

DVA-UDG@minambiente.it; dva@minambiente.it

ALLA REGIONE CAMPANIA

Unità Operativa Dirigenziale Valutazioni Ambientali

Fax: 081.7963048

PEC dg05.uod07@pec.regione.campania.it

AL COMUNE DI POZZUOLI

PEC sindaco@pec2.comune.pozzuoli.na.it

sindaco.pozzuoli@comune.pozzuoli.na.it

AL COMUNE DI NAPOLI

Fax: 081.7949944

sindaco@comune.napoli.it

direzione.generale@comune.napoli.it

DA PROF. TIZIANA VANORIO

PROFESSORE DI GEOFISICA – FISICA DELLE ROCCE

DIRETTORE DEL LABORATORIO DI FISICA DELLE ROCCE

STANFORD UNIVERSITY, CALIFORNIA, USA

Oggetto: Nota sul progetto per la realizzazione di un impianto geotermico pilota nell'area del Permesso di Ricerca "Scarfoglio" (<http://www.va.minambiente.it/it-IT/Oggetti/Info/1542/>)

Questa nota è redatta come cittadina italiana, a titolo personale, sulla base dell'esperienza e delle conoscenze acquisite come geofisico delle rocce serbatoio.

Sono professore di geofisica alla Stanford University in California, Stati Uniti, dove dirigo il Laboratorio di Fisica delle Rocce. Mi occupo di caratterizzazione chimico-meccanica di rocce serbatoio dei giacimenti di idrocarburi, dei sistemi geotermali, e degli acquiferi. Questo tipo di caratterizzazione svolge una funzione fondamentale per le compagnie di esplorazione e produzione, sia per valutare le proprietà delle rocce serbatoio prima delle operazioni di trivellazione, sia per monitorarne i cambiamenti durante la produzione. Le mie competenze, la produzione scientifica e i numerosi premi e riconoscimenti a livello internazionale sono visibili alla seguente pagina web (<https://earth.stanford.edu/tiziana-vanorio>).



Come esperta di Fisica delle Rocce applicata alla caratterizzazione di rocce serbatoio, lavoro a stretto contatto con le più importanti società petrolifere mondiali, ed una trivellazione in un'area come quella di Pozzuoli (Napoli) non è una sfida tecnica-scientifica di poco conto.

In particolare, la documentazione tecnico-scientifica presentata a corredo del progetto per la realizzazione di un impianto geotermico pilota nell'area del Permesso di Ricerca "Scarfoglio" appare lacunosa ed, a tratti, errata. Ne consegue, che essa potrebbe risultare fuorviante e incidere in maniera erronea sullo studio di valutazione ambientale. Elenco qui di seguito i punti salienti della mia valutazione supportandoli con dati di letteratura tecnico-scientifica, sia antecedenti al 2014 (anno di stesura della documentazione "Scarfoglio") che di più recente pubblicazione.

Premessa

Il sistema vulcanico-idrotermale dei Campi Flegrei è una depressione calderica la cui ossatura è costituita da rocce meta-carbonatiche (i.e., carbonati impuri di tipo marnoso) confinate da una formazione di roccia vulcanica a bassa permeabilità. Questa formazione vulcanica svolge una duplice funzione: essa funge da copertura (*caprock*) delle rocce serbatoio profonde (al di sotto di ca. 1400-1600 m) e sostiene l'acquifero più superficiale (al di sopra dei 1000 m) (Cameli et al., 1975; Bruni et al., 1981; Agip, 1987; Carella e Guglielminetti, 1986; Rapolla et al., 1989). L'estensione areale della roccia di copertura è stata tracciata, sebbene a bassa risoluzione (ca. 500 m), dalla tomografia sismica da micro-terremoti registrati durante l'evento bradisismico del 1982-1984 (Vanorio et al., 2005). La roccia di copertura costituisce un elemento cruciale del sistema vulcanico-idrotermale sia da un punto di vista sismogenetico, sia per il potenziale sfruttamento geotermico dell'area. Come indicato da Vanorio et al., (2005), la roccia di copertura sigilla la formazione di roccia sottostante che, a sua volta, permeata da gas in sovrappressione risulta essere la sede dell'attività sismica registrata ai Campi Flegrei. Come si può evincere dalle tomografie sismiche (Aster and Mayer, 1988; Vanorio et al., 2005) la maggioranza dei micro-terremoti avviene, infatti, sotto la roccia di copertura, tra 1.5 e 3.5 km di profondità (Figure 1).

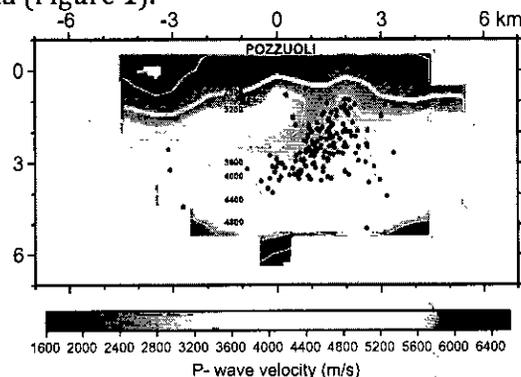


Figura 1: Ricostruzione del sottosuolo dei Campi Flegrei tramite tomografia sismica da micro-terremoti registrati durante l'evento bradisismico del 1982-1984 (Vanorio et al., 2005). Le linee in grigio evidenziano la profondità della roccia di copertura che sovrasta la zona sismogenetica (i.e., area di origine dei terremoti, questi ultimi evidenziati da cerchi neri).

Recentissime analisi (Vanorio e Kanitpanyacharoen, 2015) delle proprietà delle rocce dei pozzi profondi, trivellati fino a 3 chilometri nei Campi Flegrei negli anni 1978-1982, hanno rivelato la natura della roccia di copertura. Trattasi di una roccia fibrosa simile al calcestruzzo romano che si forma grazie ad un processo del tutto naturale frutto della combinazione di fluidi ricchi in calce e pozzolana. Fungendo da copertura, tale roccia sovrasta le rocce serbatoio del sistema geotermico sede dell'attività sismica e di reazioni chimiche a catena.

Fatta questa premessa introduttiva, elenco qui di seguito le mie osservazioni:

- 1) La presenza di sovrappressioni dovute dell'esistenza di uno strato di copertura rappresenta uno dei maggiori rischi durante una trivellazione, sia in termini di sicurezza, sia di costi. Eventuali pressioni di fluido in eccesso rispetto alle pressioni esercitate dal carico litostatico sono tipicamente causa di esplosioni in pozzo. Esempi di queste ultime sono ben noti in letteratura e, per quanto concerne l'area geotermica napoletana, riportati da Penta (1949). Sebbene evidenziato in letteratura da vari autori, nonché dal Rapporto Finale per la Protezione Civile del 2012, la relazione geologica-geotermica AMRA-INGV (SCA-006-SIA-00-A01) non fa menzione dello strato di copertura, né riguardo al rischio di trivellare immediatamente sopra la zona sismogenetica, né riguardo alla presenza di gas in sovrappressione riportati da Vanorio et al., 2005 e da successivi autori. Al fine di minimizzare i rischi, sarebbe innanzitutto necessario ricostruire un'immagine dettagliata del sottosuolo nella zona oggetto delle trivellazioni utilizzando metodi sismici ad alta risoluzione (ordine dei metri). Una tale ricostruzione, infatti, consentirebbe di delineare con precisione la profondità dello strato di copertura e, conseguentemente, stimare le pressioni di fluido di poro attese (fase *pre-drilling*). La stima della soglia di pressione di fluido con tecniche comunemente in uso in Fisica delle Rocce risulterebbe anche funzionale ad uno studio più accurato della sismicità indotta (vedasi punto 3);
- 2) Viste le considerazioni di cui sopra, si evidenzia che le indagini geofisiche di tipo geoelettrico e magnetotellurico presentate nella relazione geologica-geotermica AMRA-INGV sono da ritenersi integrative *e non sostitutive di un'indagine sismica ad alta risoluzione, tipica dell'industria petrolifera e geotermica*. Infatti, le indagini geofisiche di tipo geoelettrico e magnetotellurico forniscono principalmente un'immagine di massima (i.e., bassa risoluzione) e non univoca del sottosuolo. Come evidenziato da Penta (1954, pagina 354), nelle aree geotermiche il dato geoelettrico è di difficile interpretazione poiché la conducibilità elettrica dipende contemporaneamente da diversi fattori come ad esempio la salinità, la saturazione e la temperatura del fluido che permea la formazione rocciosa. Ne consegue che nelle aree siffatte un'alta conducibilità elettrica non è univocamente indicativa di alte temperature, ma potrebbe semplicemente essere una conseguenza dell'alta salinità di un fluido di bassa temperatura. Il dato sismico dunque risulta essere uno strumento discriminante

fondamentale ai fini della corretta ubicazione dei pozzi. Tuttavia, nella relazione geologica-geotermica AMRA-INGV non c'è alcuna evidenza di dati sismici acquisiti on-shore comprovanti un'immagine del sottosuolo ad alta risoluzione che possano essere di corredo ai dati sismici acquisiti in precedenza nell'area (dati acquisiti da Askania-Prakla nel 1954; Finetti e Morelli, 1974; Zollo et al., 2008). Per quanto in un'area come quella di Pozzuoli dati di tipo sismico siano di difficile acquisizione a causa dell'intensa urbanizzazione, tuttavia si tratta di dati imprescindibili per un tipo di progetto quale quello in oggetto.

- 3) La relazione geologica-geotermica AMRA-INGV (SCA-006-SIA-00-A01) afferma che, al fine di una valutazione della sismicità indotta, "le variazioni di pressione indotte dall'emungimento e dalla reiniezione per l'impianto in oggetto (simulazioni ottenute con TOUGH2®) non eccedono i 30 bar".

Il risultato di queste simulazioni merita un approfondimento soprattutto per comprenderne le limitazioni. Come primo aspetto, è importante ricordare che le *interferenze sismiche*, come riportato nella relazione AMRA-INGV (ma leggasi *sismicità indotta* come riportato nella letteratura scientifica internazionale) possono avvenire anche in condizione di bassi regimi pressori in presenza di faglie attive. In secondo luogo, le simulazioni con TOUGH2® sono puramente meccanicistiche e, quindi, non tengono in dovuto conto le interazioni chimiche fluido-roccia che caratterizzano il sottosuolo flegreo (Agip, 1987; Vanorio e Kanitpacharoen, 2015). Infine, una simulazione di flusso di portata a scopo industriale richiede sia modelli di ricostruzione del sottosuolo a più alta risoluzione (sismica a riflessione di cui al punto 2) che parametri di permeabilità che non siano né teorici, né tantomeno acquisiti in condizioni che non sono rilevanti per le rocce serbatoio dei Campi Flegrei (i.e., temperature e pressione). Infatti, i suddetti parametri, quando acquisiti in condizioni di pressione effettive e/o temperature tipiche del sistema vulcanico-idrotermale dei Campi Flegrei, risultano essere più bassi di quelli utilizzati nelle simulazioni AMRA-INGV (Vanorio et al., 2002; Heap et al., 2014; Vanorio e Kanitpanyacharoen, 2015).

La trivellazione di un pozzo è, per sua natura, un'operazione invasiva, sia in fase di reiniezione sia in quella di emungimento, a causa dell'ingresso di fluidi estranei al sistema. La letteratura scientifica è vasta e le ricerche in quest'ambito sono concordi nell'affermare che la reiniezione di fluidi (che non va confusa con il concetto di idrofratturazione o fracking) è responsabile per l'aumento della sismicità (Healy et al., 1968; Simpson, 1976; Raleigh et al., 1976; Frohlich et al., 2011; Kim 2013; Ellsworth, 2013; Frohlich et al., 2014; Walsh e Zoback, 2015). Infatti, si ritiene che non è l'idrofratturazione il meccanismo responsabile per la sismicità indotta ma piuttosto la reiniezione in profondità di fluidi reflui di smaltimento (<http://earthquake.usgs.gov/research/induced/myths.php>). Inoltre, il problema non è da considerarsi semplicemente pressorio. A tal riguardo, si riportano qui di seguito, tre punti fondamentali dell'argomento in oggetto.

Walsh e Zoback, (2015) dimostrano che le aree caratterizzate da sismicità indotta corrispondono ad aree interessate dalla re-immissione di fluidi (pagina 4, quinto rigo). Gli autori evidenziano che, in aree come quella dei Campi Flegrei, caratterizzate dalla presenza di faglie pre-esistenti ed attive, e quindi con molta probabilità vicine allo stress critico, anche piccole perturbazioni di pressione di fluido di poro hanno la potenzialità di avviare movimenti di scivolamento lungo faglie, e quindi essere causa di sismicità di apprezzabile entità (pagina 6, diciannovesimo rigo). La sismicità, dunque, non è associata all'idrofratturazione ad alta pressione.

Inoltre, Vanorio, (2015) dimostra che l'iniezione di fluidi non in equilibrio termodinamico con la roccia che li ospita, induce nel breve termine dei cambiamenti permanenti nella roccia stessa, alterandone la sua permeabilità, porosità e rigidità. Questi cambiamenti vanno presi in considerazione nelle simulazioni di flusso per valutare non solo fenomeni di sismicità indotta ma anche quelli che originano perdite sotterranee con conseguente inquinamento della falda e commistione di fluidi di diversa natura. Le simulazioni con TOUGH2®, per l'inerente natura del software, non considerano interazioni fluido-roccia, tipiche di ambienti geotermici.

Infine, la città di Pozzuoli è situata sulla costa ed i fluidi delle rocce serbatoio, sia al di sopra che al di sotto della roccia di copertura (ca. 1000 m), sono o in comunicazione diretta con l'acqua marina o derivano da essa (Cameli et al., 1975; Baldi et al., 1975; Penta, 1953; Agip 1987). Questo attesta che ci può essere una comunicazione diretta, attuale o pregressa, con il mare. L'estrazione di fluidi dal sottosuolo è nota per favorire il drenaggio da zone limitrofe: nelle zone costiere l'emungimento può determinare quindi l'ingresso di acqua marina. Come evidenziato da Vanorio e Kanitpanyachoen (2015, pagina 3, seconda colonna, quartultimo rigo e video correlato all'articolo scientifico - <https://www.youtube.com/watch?v=LrL5ARjmFSs>, minuto 3.18), un qualsiasi fluido esterno in disequilibrio chimico con il sistema geotermico dei Campi Flegrei può facilmente riattivare processi chimici che hanno già raggiunto una fase di equilibrio (i.e., decarbonazione del basamento carbonatico e conseguente formazione di CO₂). Questi processi determinano una sovrabbondanza di gas, quali anidride carbonica, vapore e metano che, se non smaltiti dal sistema rapidamente e con facilità, creano le sovrappressioni evidenziate in Vanorio et al., (2005), il sollevamento del suolo e quindi, in ultimo, micro-terremoti (i.e., un aumento della pressione di fluido determina una diminuzione dello stato di stress effettivo, e di conseguenza, sismicità). Anche in questo caso, il problema non è semplicemente pressorio: la natura fibrosa, e quindi duttile, della roccia di copertura è compromessa in un ambiente acido (pH al di sotto di 12.5, Meta e Monteiro, 2014) che viene a determinarsi in presenza di forti concentrazioni di CO₂. A tal proposito, si riporta, come già evidenziato in letteratura, che la natura della CO₂ ai Campi Flegrei abbia una forte componente sedimentaria e quindi associata a fenomeni di decarbonazione (Panichi et al., 1975; Allard et al., 1991).

- 4) Si consiglia di rivedere le direzioni del flusso delle acque sotterranee ai Campi Flegrei ed in particolare "quelle situate nella parte sud-occidentale confinate dai limiti della caldera flegrea, in cui il flusso delle acque sotterranee si dirige direttamente verso il mare" (pagina 19, relazione geologica-geotermica AMRA-INGV (SCA-006-SIA-00-A01)).

La carta delle isopiezometriche è, gioco forza, una mappa parziale poiché l'ubicazione dei punti di misura per la costruzione della piezometria è confinata alla terraferma. Tuttavia, la carta delle anomalie gravimetriche in Figura 2 (pannello di sinistra) (da Cameli et al., 1975, Figura 7, pagina 322) fornisce un ottimo valore indicativo per studiare le direzioni di flusso in zone dove si è impossibilitati a rilevare dei punti di misura (i.e., in mare). Come si può notare dal confronto tra la carta delle anomalie gravimetriche e quella delle isopiezometriche (Figura 2, a destra), esiste, infatti, una corrispondenza tra le zone di massimo gravimetrico (segnati dal segno "+" in verde, dorsale Quarto-Parete) e gli spartiacque sotterranei (i.e., alti strutturali dovuti a zone di risalita del basamento carbonatico di più alta densità) da cui dipartono le direttrici di flusso. La zona di Pozzuoli è tuttavia una zona di minimo gravimetrico (segnati dal segno "-" in rosso) dovuto al materiale di bassa densità e di riempimento della caldera, il cui orlo chiude il golfo di Pozzuoli (Zollo et al., 2004). Ne consegue che la città di Pozzuoli si trova al centro di questa depressione (i.e., minimo strutturale) e, dal punto di vista idrogeologico, potrebbe facilmente fungere da zona di ristagno delle acque. Le direzioni del flusso delle acque sotterranee ai Campi Flegrei andrebbero rivalutate e l'eventuale ristagno di acque discusso.

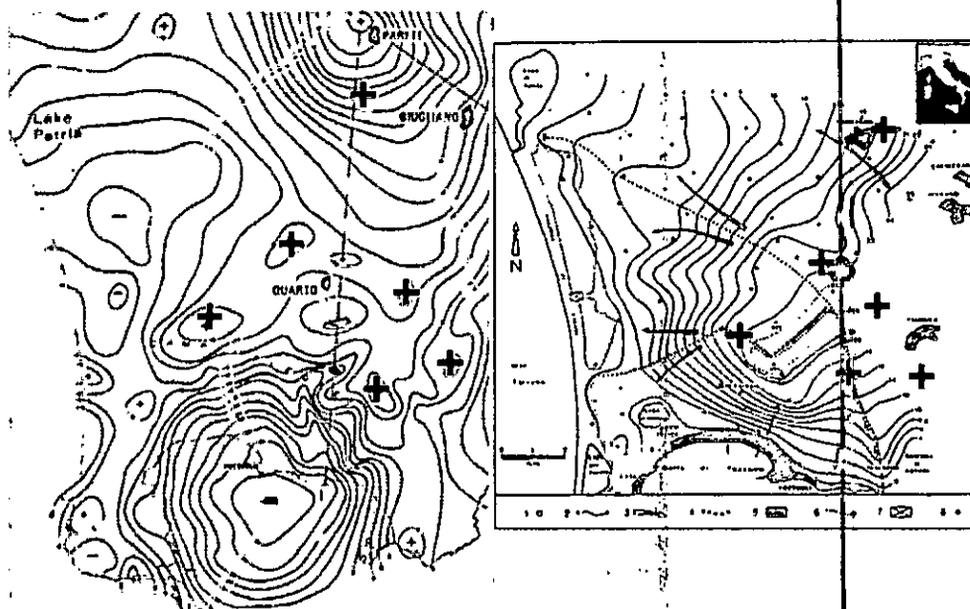


Figura 2: Confronto tra la carta delle anomalie gravimetriche (a sinistra) e quella delle isopiezometriche (a destra).

5) Si consiglia di rivedere i dati delle temperature dei pozzi riportati in Figura 3.1.1.3 (pagina 46, relazione geologica-geotermica AMRA-INGV (SCA-006-SIA-00-A01) e quindi Figura 1-4 del Progetto definitivo (SCA-001-PD-00-RT). Da un confronto dei dati delle Figure 3.1.1.3 e 1-4 con quelli riportati nei rapporti Agip e relative pubblicazioni (e.g., Carella e Guglielminetti, 1986) i dati dei pozzi Mofete 1 e 2 sembrano essere erroneamente traslati verso le alte temperature (si veda, ad esempio, la Figura 6 da Carella e Guglielminetti, 1986 relative al pozzo Mofete 1, riportata qui di seguito in Figura 3). Nel grafico di Figura 3 qui riportato (da Carella e Guglielminetti, 1986), i due profili di temperatura si riferiscono rispettivamente alla fase che segue immediatamente la perforazione (profilo 1) e al profilo misurato in una fase di equilibrio a distanza di due mesi dalla perforazione (profilo 2). Entrambi risultano più bassi rispetto a quelli riportati in Figura 3.1.1.3 e Figura 1-4 rispettivamente riportati nella relazione geologica-geotermica AMRA-INGV e nel Progetto definitivo.

Inoltre, si fa notare che il pozzo San Vito 8d è un pozzo deviato, come tale, va riportata nel grafico di Figura 3.1.1.3 e Figura 1-4 la temperatura in funzione della sua effettiva profondità verticale.

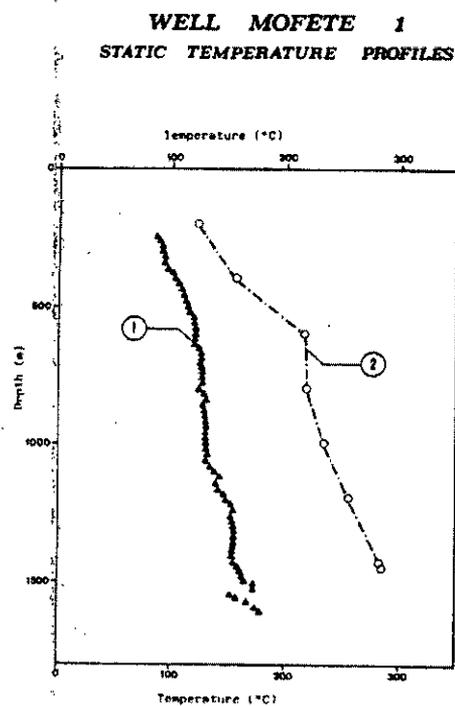


FIG. 6

Figura 3: Profili di temperatura del pozzo Mofete 1 (Agip, 1987; Carella e Guglielminetti, 1986). I due profili di temperatura si riferiscono rispettivamente alla fase che segue immediatamente la perforazione (profilo 1) e al profilo misurato in una fase di equilibrio a distanza di due mesi dalla perforazione (profilo 2).

Considerazioni conclusive

Come mostrato in questa relazione l'operazione di trivellazione in un'area come quella di Pozzuoli non è una sfida tecnica-scientifica di poco conto a causa della complessità del sistema Flegreo, dell'eterogeneità delle rocce vulcaniche, e dei rischi a queste connessi. Una corretta valutazione di questi aspetti richiede:

a) indagini geofisiche ad alta risoluzione (ordine di metri) per permettere una corretta ubicazione di pozzi, sia ai fini produttivi, che di stime delle pressioni di fluido di poro. Modelli concettuali dei serbatoi privi di ricostruzioni sismiche ad alta risoluzione sono da ritenersi di massima e, di conseguenza, non idonei ai fini di ubicazione, perforazione e sfruttamento di una risorsa;

b) una simulazione accurata dei flussi di portata del fluido e delle reazioni nella roccia serbatoio. Questa deve essere basata su parametri corrispondenti alle rocce dei Campi Flegrei e misurati sotto condizioni di pressione e temperatura attinenti alla profondità del serbatoio;

c) un'analisi approfondita della sismicità indotta dovuta sia all'estrazione che alla reiniezione di fluidi che tenga in dovuta considerazione: condizioni pressorie minime su faglie attive individuate dalla ricostruzione geofisica in 3D, interazioni fluido-roccia, e la vulnerabilità del territorio flegreo (e.g., area densamente abitata, caratterizzata da tipologie costruttive non sempre antisismiche, presenza di condutture sotterranee di gas metano);

d) una revisione più accurata dei dati di letteratura al fine di consentire delle stime corrette e valutazioni pertinenti.

Detto questo, anche se gli aspetti di cui sopra fossero riveduti attraverso una più attenta analisi dei dati e dei rischi, rimangono alcune considerazioni prettamente legate alle proprietà delle rocce serbatoio dei Campi Flegrei, alla loro produttività e, di conseguenza, al beneficio apportato alla città di Pozzuoli. Ne discuto brevemente le linee principali.

Il tentativo di trovare nel sottosuolo flegreo formazioni di roccia produttive, contenenti fluidi ad alta temperatura da utilizzare per la produzione di energia elettrica è stato un tema ricorrente nella storia del sistema vulcanico-idrotermale dei Campi Flegrei - ricerche e trivellazioni eseguite a diversa profondità si sono susseguite in diverse aree della regione napoletana nel 1939-1943, 1949-1954, 1969-1973, in ultimo nel 1978-1983. Tuttavia, "la croce e delizia" del sistema flegreo è sempre stata la seguente: a fronte di alte temperature registrate sotto i 1000m di profondità (da cui deriva l'alta entalpia del fluido -flowing enthalpy da Tabella 2) (vedasi Tabella 2 qui sotto riportata, da Billi et al., 1986), si è sempre dovuto fare i conti con grossi fattori limitanti quali la bassa permeabilità a dispetto della porosità delle rocce vulcaniche (da cui derivano bassi flussi di portata -flow rate da Tabella 2), l'estrema salinità (causa di precipitazioni ed occlusioni dei fori) e le qualità corrosive del fluido dovute alla presenza di fluidi acidi ricchi in zolfo. Sebbene la tecnologia moderna possa meglio affrontare i problemi legati all'elevato tenore

salino e corrosività del fluido, le proprietà' fisiche della roccia serbatoio non cambiano di molto nel tempo. Di conseguenza, a meno di stimolare il flusso della formazione rocciosa con l'idrofratturazione, il problema della bassa permeabilità rimane.

Table 2. Wells drilled for electrical utilization of geothermal resources to 1 January 1985

Locality	Years of drilling	No. of wells	Type of well*	Total metrage	Max temp. (°C)(a)	Flowing enth. (kJ/kg)(b)	Flow-rate (kg/s)(c)
Larderello	1924 - 84	578	E-P	423,675	260	2845 (d)	794
Travale-Radicondoli	1933 - 84	59	E-P	67,730	238	2820 (d)	64
Bagnore	1958 - 84	26	E-P	25,560	148	2740 (d)	24
Piancastagnaio	1961 - 84	36	E-P	40,530	205	2803 (d)	54
Poggio Nibbio	1960 - 82	10	E-P	11,065	150	2740 (e)	5
Latera	1979 - 84	11	E-P-I	23,400	230	900	200
Cesano	1974 - 83	12	E-P-I	30,205	210	900	100
Torre Alfina	1973 - 77	9	E-P-I	10,795	140	550	140
Phlegraean-Fields	1978 - 84	12	E-P-I	28,595	264	2778 (e)	22
Other areas	1957 - 84	25	E-P	35,535	Generally cooler, at temperatures between 100 and 200°C		

*E = Exploration, P = Production, I = Injection; (a) temps refer to fluid produced; (b) average values; (c) total production as of Dec. 1984; (d) steam at power plant manifold; (e) flashed steam available.

(da Billi et al., 1986)

Come sottolineato da Penta (1954, pagina 352), infatti, a differenza del sistema geotermale di Larderello dove il fluido nel serbatoio sedimentario (non vulcanico!) è di tipo *vaporifero, surriscaldato e producibile, nei Campi Flegrei si parte da manifestazioni idrotermali ed esalative, dimostratesi "secondarie" (i.e., un miscuglio di acqua e vapore a basso titolo, ca. 20% nei primi 1000 m - come anche riportato dalla relazione geologica-geotermica AMRA-INGV (SCA-006-SIA-00-A01) e dal Progetto definitivo (SCA-001-PD-00-RT). La causa di un basso contenuto di vapore è attribuibile principalmente alla combinazione di temperature minori di 250° C con le basse permeabilità delle rocce vulcaniche che, a causa dei bassi valori di portata, provocano un notevole raffreddamento delle acque durante l'ascesa verso la superficie.*

Di contro, la migliore permeabilità della roccia serbatoio, valutata in base alle ultime prove di reiniezione effettuate agli inizi degli anni 80 nel campo di Mofete (Agip, 1987), *"è stata riscontrata in corrispondenza delle isoterme di 300°C ad una profondità variabile fra i 1400m e 1600m. Questa avrebbe permesso una stima della capacità termoelettrica di ca. 7 MW (Agip, 1987)".*

Tuttavia, si fa notare come questa potenziale roccia serbatoio si trovi sotto la roccia di copertura (i.e., nella zona sismogenetica), e ben al di sotto della profondità stimata come target massimo per la profondità dei pozzi geotermici in progetto (ca. 1000m - relazione geologica-geotermica AMRA-INGV (SCA-006-SIA-00-A01) e Progetto definitivo (SCA-001-PD-00-RT).

Fatte queste considerazioni, concludo con un semplice confronto con due delle maggiori aree geotermiche Italiane: Larderello-Travale/Radicondoli e Monte Amiata. Da dati disponibili in letteratura (vedasi link qui sotto riportato) l'effettiva

capacità termoelettrica di queste aree è pari a 711 MW. Questa fornisce una quantità lorda di energia elettrica generata di 5.5 TW/h, corrispondente all'1,8% dell'energia elettrica prodotta a livello nazionale ed al 25% di quella prodotta nella regione Toscana.

(http://www.geothermal-energy.org/print/electricity_generation/italy.html)

Sarebbe opportuno, quindi, valutare semplicemente per un'analisi **costi-rischi-benefici** quanto l'anticipata capacità termoelettrica di 5MW (come indicata nella relazione geologica-geotermica AMRA-INGV (SCA-006-SIA-00-A01) inciderebbe a livello regionale in termini di energia elettrica generata e sul fabbisogno energetico di della città Pozzuoli.

In Fede

Prof. Tiziana Vanorio



Bibliografia Citata

- Agip (1987), Geologia e geofisica del sistema geotermico dei Campi Flegrei, internal Report, 17 pp., Milan, Italy.
- Allard, P., A. Maiorani, A. Tedesco, G. Cortecchi, and B. Turi (1991), Iso- topic study of the origin of sulfur and carbon in Solfatara fumaroles, Campi Flegrei caldera, J. Volcanol. Geotherm. Res., 48, 139-159.
- Aster, R. C., and R. P. Meyer (1988), Three-dimensional velocity structure and hypocenter distribution in the Campi Flegrei caldera, Italy, Tectono- physics, 149, 195-218.
- P. Baldi, G. Ferrara, C. Panichi (1975), Geothermal Research in Western Campania (Southern Italy): Chemical and Isotopic Studies of Thermal Fluids in the Campi Flegrei, 2nd U.N. Symp. Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco
- Billi, B., Cappetti, G., Luccioli, F.: ENEL activity in the research, exploration and exploitation of geothermal energy in Italy, Geothermics, 15, (1986), 765-779.
- Bruni, P., Sbrana, A. and Silvano, A., 1981. Risultati preliminari dell'esplorazione geotermica nell'area dei Campi Flegrei. Rend.Soc.Geol.It. V01.4, pp.231-236.
- Cameli, G.M., Puxeddu, M., Rendina, M., Rossi, A., Squarci, P., and Taffi, L., 1975, Geothermal research in Western Campania (Southern Italy): Geological and geophysical results, 2nd U.N. Symp. Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco
- Carella, R., and M. Guglielminetti, (1986), Multiple reservoirs in the Mofete field, Naples, Italy, IX Workshop on Geothermal Reservoirs Engineering, Rep. SGP-TR-74, pp. 53-64, Stanford Univ., Stanford, California.
- Ellsworth W. F., (2013). Injection-induced earthquakes. Science 341, 1225942

- Finetti I., Morelli C., 1974, Esplorazione sismica a riflessione nei golfi di Napoli e Pozzuoli. *Boll Geof. Teor. Appl.* 16, 175-222
- Frohlich C., C. Hayward, B. Stump, E. Potter, The Dallas-Fort Worth earthquake sequence: October 2008 through May 2009. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 101, 327-340 (2011).
- Frohlich C., W. Ellsworth, W. A. Brown, M. Brunt, J. Luetgert, T. MacDonald, S. Walter, (2014) The 17 May 2012 M4.8 earthquake near Timpson, East Texas: An event possibly triggered by fluid injection. *J. Geophys. Res.* 119, 581-593.
- Healy J. H., W. W. Rubey, D. T. Griggs, C. B. Raleigh, (1968), The Denver earthquakes. *Science* 161, 1301-1310.
- Heap M. J., P. Baud, P. G. Meredith, S. Vinciguerra, T. Reuschlé, (2014), The permeability and elastic moduli of tuff from Campi Flegrei, Italy: Implications for ground deformation modelling. *Solid Earth* 5, 25-44 (2014). doi:10.5194/se-5-25-2014
- W.-Y. Kim, (2013), Induced seismicity associated with fluid injection into a deep well in Youngstown, Ohio. *J. Geophys. Res.* 118, 3506-3518.
- P. K. Mehta, P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (McGraw-Hill Education, New York, ed. 4, 2014).
- Panichi, C., and Tongiorgi, E., 1975, Carbon isotopic composition of CO₂ from springs, fumaroles, mofettes, and travertines of central-south Italy-A preliminary prospecting method of a geothermal area, 2nd U.N. Symp. Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco
- Penta, F., 1949, Temperature nel sottosuolo della regione "Flegrea": *Annali Geofisica*, v. 11, no. 3.
- Penta, F., 1954, Ricerche e studi sui fenomeni esalativo-idrotermali ed il problema delle "forze endogene": *Annali Geofisica*, v. 8, no. 3.
- Raleigh C. B., J. H. Healy, J. D. Bredehoeft, An experiment in earthquake control at Rangely, Colorado. *Science* 191, 1230-1237 (1976).
- Rapolla A., Fedi M., Fiume M.G., 1989, Crustal Structure of the Ischia-Phlegrean Geothermal Fields, near Naples, Italy, from Gravity and Aeromagnetic Data, *Geophys. Journ.* 97, 409-419
- Simpson D. W., (1976) Seismicity changes associated with reservoir loading. *Eng. Geol.* 10, 123-150 .
- Vanorio T., (2015) Recent advances in time-lapse, laboratory rock physics for the characterization and monitoring of fluid-rock interactions, *GEOPHYSICS*, VOL. 80, NO. 2 P. WA49-WA59, 10.1190/GEO2014-0202.1
- Vanorio T., W., Kanitpanyacharoen (2015) Rock physics of fibrous rocks akin to Roman concrete explains uplifts at Campi Flegrei Caldera, *Science* DOI: 10.1126/science.aab1292.
- Vanorio T., J. Virieux, P. Capuano, G. Russo, Three-dimensional seismic tomography from P wave and S wave microearthquake travel times and rock physics characterization of the Campi Flegrei Caldera. *J. Geophys. Res.* 110, B03201 (2005). doi:10.1029/2004JB003102
- Vanorio, T., M. Prasad, A. Nur, and D. Patella (2002), Ultrasonic velocity measurements in volcanic rocks: Correlation with microtexture, *Geophys. J. Int.*, 149, 22-36.
- Walsh F. R., M. D. Zoback, (2015) Oklahoma's recent earthquakes and saltwater disposal. *Sci. Adv.* 1, e1500195
- Zollo, A., et al. (2003), Evidence for the buried rim of Campi Flegrei caldera from 3-d active seismic imaging, *Geophys. Res. Lett.*, 30(19), 2002, doi:10.1029/2003GL018173.
- Zollo A., Maercklin N., Vassallo M., Dello Iacono D., Virieux J. and Gasparini P., (2008). Seismic reflections reveal a massive melt layer feeding Campi Flegrei caldera, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L12306, doi:10.1029/2008GL034242.