

## I distretti vulcanici sottomarini del Tirreno: una possibile risorsa geotermica?

Patrizio Signanini<sup>1</sup>, Raffaele Madonna<sup>1</sup>, Gianluca Iezzi<sup>2</sup>, Paolo Favali<sup>3</sup>, Bruno Di Sabatino<sup>2</sup>, Giancarlo Crema<sup>1</sup>, Umberto Antonelli<sup>4</sup>, Diego Paltrinieri<sup>4</sup>

<sup>1</sup>DiGAT - Dipartimento di Geotecnologie per l'Ambiente e il Territorio - Università "G. D'Annunzio" di Chieti, Campus Universitario, Via dei Vestini 30, 66013 Chieti Scalo, Italia, signanini@unich.it, raffaelemadonna@unich.it, Via Curiel, 22 61032 FANO – PU

<sup>2</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, Università "G. D'Annunzio" Chieti, g.iezzi@unich.it, disabat@unich.it

<sup>3</sup>Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) Roma, paolofa@ingv.it

<sup>4</sup>Eurobuilding spa, Ancona, u.antonelli@eurobuilding.it, diegopaltrinieri@tin.it

### *The Submarine volcanic districts of Tyrrhenian sea: a possible geothermal resource?*

**ABSTRACT:** The geothermal energy represents one of the best types of ecological energetic resources, with costs nowadays competitive. The relatively recent volcanic areas host the main geothermal structures. Three are the parameters which in turn determine the presence of a geothermal field: a hot body which supplies heat to the system, a reservoir in which circulating the hydrothermal fluids and a cap rock which isolates or limits the loss of heat and/or fluids from the system. All these parameters are necessary, but not yet sufficient. In fact it is important also to evaluate the hydric (thermal) recharge capacity of the reservoir and its degree of self sealing. In Italy the study of geothermal fields has been conducted up to the end of '80 years, on the volcanic structures cropping along the on-shore tyrrhenian coastline. These studies have shown a high potentiality, but on the other hand a low usability because the hydrothermal fluids were highly saline. Here we propose an investigation of the geothermal resource with the aim to project deep explorative submarine drills, always on the tyrrhenian area, but this time off-shore. The Tyrrhenian basin reveals high positive heat flux anomalies. They are mainly centred on the volcanic seamounts structures (Magnaghi, Vavilov, Marsili, etc.), that can be also active from a magmatic point of view. These volcanic structures are expanded on areas ranging from some units of km<sup>2</sup> up to several tens of km<sup>2</sup>, in an extensional tectonic context. This magmatism is mainly basic, with associate calc-alkaline events. Therefore both the volcanic structures and the related bathial planes, are theoretically characterised by lava successions, of both pillow and massive types. The peripheral and distal areas of these volcanoes are probably characterised by epiclastic deposits. At the same time moving from the centre of the volcano to the distal zone, the pelagic deposits would be progressively thick. The whole amount of geological and geophysical data could be in principle used to infer the presence of some geothermal fields. The hydrothermal fluids would be the marine water, with its salinity as a function of T and P. The presence of the hydrostatic marine pressure would determine a sensible difference of the physical-chemical features of the water, compared to that of the counterpart on-shore geothermal fields. The boiling point of the water in fact would be sensibly changed as a function of T and P, such to limit the frequently problems related to the self-sealing phenomena. However the nowadays available data do not yet let to have a clear and exhaustive picture of the geology and geophysics of the Tyrrhenian basin, except from the geodynamical point of view. Thereby we here propose new and detailed scientific analyses by the means of a series of planned surveys, such to characterise restricted and local area eventually relevant for geothermal topics.

*Key terms:* geothermal fields, Tyrrhenian off-shore volcanism

*Termini chiave:* geotermia, vulcanismo off-shore tirrenico

### **Riassunto**

La geotermia rappresenta una delle migliori tipologie di approvvigionamento energetico eco-compatibile, con costi di esercizio odiernamente competitivi. Le aree vulcaniche relativamente giovani rappresentano le principali strutture geotermiche. Tre sono i parametri che determinano la strutturazione di un sistema geotermico: hot body che fornisce calore al sistema, reservoir con relativo fluido che veicola l'energia termica ed un cap rock che sigilla o limita la dispersione di calore via fluido. Tali parametri sono

condizioni necessarie ma non sufficienti. Infatti va valutata anche la capacità di ricarica del reservoir e il suo grado di self-sealing. In Italia lo studio dei campi geotermici è stato perseguito fino agli inizi degli anni '80, sulle strutture vulcaniche peritirreniche on-shore. Tali studi hanno rivelato sia una elevata potenzialità, ma una moderata sfruttabilità per via delle limitazioni dovute alla salinità dei fluidi. Qui si propone una investigazione della risorsa geotermica, finalizzata a sondaggi esplorativi geotermici profondi, nell'areale tirrenico, ma off-shore. Il bacino tirrenico presenta flussi di calore anomali significativamente positivi.

Tali anomalie sono maggiormente centrate sulle strutture vulcaniche dei seamount sottomarini (Magnaghi, Vavilov, Marsili, ecc.), alcuni dei quali probabilmente magmaticamente ancora attivi. Queste strutture vulcaniche si estendono su aree di estensioni variabili tra qualche km<sup>2</sup> a qualche decina di km<sup>2</sup>, in un contesto di tettonica distensiva tuttora attivo. Il magmatismo è di tipo prevalentemente basico, con associati episodi calcocalcini. Quindi le strutture vulcaniche e le relative piane batiali circostanti, sono teoricamente contraddistinte da successioni laviche, sia a pillow che massivi. Le zone periferiche e distali dei vulcani sono probabilmente caratterizzate da depositi epiclastici. Allontanandosi dalla zona centrale dei vulcani, i depositi marini pelagici dovrebbero aumentare progressivamente la loro potenza. L'insieme dei dati geologici e geofisici potrebbero in teoria essere usati per rilevare la presenza di sistemi geotermici. Il fluido termale sarebbe quindi rappresentato dall'acqua marina, con il suo carico salino in funzione di T e P. La presenza della colonna d'acqua marina determinerebbe significative differenze dello stato liquido dell'acqua idrotermale, a differenza dei sistemi geotermici on-shore. La temperatura di ebollizione verrebbe quindi sensibilmente variata proprio in funzione di T e P, in modo da ridurre i classici problemi legati al self-sealing. Tuttavia i dati odiernamente disponibili non consentono ancora di tracciare un quadro esaustivo della geologia e della geofisica del bacino Tirrenico, se non alla sola scala regionale. Si propone quindi un avanzamento delle conoscenze scientifiche tramite nuove campagne di prospezione, in modo da caratterizzare aree locali, eventualmente rilevanti ai fini geotermici.

## 1. Introduzione

La geotermia rappresenta teoricamente una delle migliori tipologie di approvvigionamento energetico, sia dal punto di vista quantitativo che ambientale. Un dato fortemente significativo riguarda la percentuale di porzione terrestre la cui temperatura è al disotto dei 100°C; tale percentuale è inferiore all' 1%. Quindi una quantità enorme e praticamente inesauribile di energia è rappresentata dalla emissione da parte della Terra di energia termica. Un classico campo geotermico si compone di tre elementi principali: a) un corpo caldo (hot body), che fornisce energia termica al sistema; b) un reservoir, dove circola il fluido che veicola l'energia geotermica derivante dal corpo caldo e la cui principale caratteristica è valutabile in termini di permeabilità-trasmissività idraulica; c) una copertura (cap rock), che isola il reservoir dalla superficie e, se è fratturato, permette la presenza delle tipiche manifestazioni idrotermali. Oltre ai tre elementi precedenti un qualsiasi campo geotermico, per essere utilizzabile, va valutato attraverso i due seguenti parametri: 1) la portata di ricarica naturale del reservoir, dipendente dalla dimensione del bacino di alimentazione; 2) la necessità che i fenomeni di self-sealing (occlusione del reservoir) siano minimizzati,

essendo tale parametro inversamente proporzionale al network delle fratture e alla loro dimensione e/o direttamente proporzionale alla salinità dei fluidi idrotermali. La geotermia è nata in Italia agli inizi del XX secolo, avendo avuto un forte impulso fino agli anni sessanta, come ben evidenziato dai due campi geotermici storici tuttora funzionanti di Larderello e Pian Castagnaio. Viceversa negli ultimi decenni i numerosi studi eseguiti non hanno portato a significativi risultati applicativi, eccetto forse il caso di Latera. Tutti e tre questi campi geotermici appaiono molto simili tra loro. Infatti il corpo caldo è sempre rappresentato dalle manifestazioni vulcaniche alcalino-potassiche del bordo orientale tirrenico, i reservoir sono sempre impostati nelle serie carbonatiche mesozoiche, sigillati da un cap-rock rappresentato dalle coltri terrigene terziarie. Non è nemmeno da escludere nella precedente analisi, una presenza significativa di circuiti idrogeologici profondi, non ancora ben conosciuti, colleganti le aree vulcaniche on-shore direttamente col Tirreno. A livello mondiale praticamente tutte le aree geotermiche sono caratterizzate dalla presenza di corpi caldi superficiali, cioè zone aventi forti flussi di calore. Tali zone sono quasi sempre coincidenti con le aree vulcaniche. Fondamentalmente esistono due tipi di sistemi vulcanici con potenzialità geotermiche: i sistemi arco-fossa, come quelli neozelandesi, giapponesi, indonesiani, e i sistemi distensivi quali quelli islandesi, etiopici ("Rift Valley"), il "Basin and Range" (USA). Per quanto concerne i reservoir le tipologie riscontrabili sono estremamente varie. Praticamente qualsiasi roccia altamente permeabile (sia primaria che secondaria) può fungere da reservoir. Ad esempio in Islanda le medesime rocce magmatiche vulcaniche costituiscono il reservoir, mentre nella "Rift Valley" questo è rappresentato dalle estese serie alluvionali. Analogamente anche la geologia di un cap rock può essere estremamente variabile, basta però che soddisfi ai requisiti di bassa permeabilità. In questo studio sono stati dapprima raccolti i vari dati bibliografici geologici e geofisici presenti in letteratura, con particolare attenzione agli studi più recenti. L'insieme dei dati ottenuti è stato poi criticamente analizzato in chiave geotermica. Si è poi progressivamente postulata e valutata la presenza ipotetica di corpi caldi, rocce serbatoio ed eventuali coperture basso permeabili per alcune estese strutture magmatiche del fondale tirrenico.

## 2. Possibili campi geotermici off shore tirrenici

Le principali anomalie positive dei flussi di calore sono legate alle aree vulcaniche attive. Tali aree possono essere suddivise tra zone on-shore e off-shore. Mentre per i primi tipi di campi geotermici italiani il loro studio e il loro funzionamento è sufficientemente chiaro, per quanto riguarda i vulcani sottomarini tirrenici il loro studio è tutt'ora in una fase embrionale, data la difficoltà di reperimento (dragaggi, leg oceanografici, ecc.) dei depositi vulcanici e la loro scarsa osservabilità diretta (Serri et alii,

2001; Trua et alii, 2002; Finetti, 2004). A tal proposito, per quanto riguarda le informazioni a nostra disposizione, le rocce vulcaniche tirreniche mostrano possedere età variabili da qualche milione di anni ad età molto recenti, dell'ordine delle diverse centinaia di migliaia di anni (Serri et alii, 2001).

Soprattutto nella parte meridionale del Tirreno le strutture vulcaniche sommerse sembrano avere attività piuttosto recenti, probabilmente anche inferiori ai 0.1 Ma (Trua et alii, 2002). Inoltre i dati acquisiti del progetto EC ORION-GEOSTAR-3 (Favali et alii, 2005a) che mostrano tra l'altro una attività sismica nel Tirreno non significativamente rilevata dalle stazioni continentali, potrebbero aprire nuovi scenari di attività sismica correlabile ad eventi vulcano-tettonici. Tale ipotesi è fortemente oggi avvalorata dal recentissimo riscontro di una manifestazione vulcanica a seguito di un forte terremoto in area marina a nord est di Palermo (Favali et alii, 2005b).

I dati esistenti del Tirreno sono principalmente rappresentati da dati di batimetria multibeam (Marani et alii, 2004a; 2004b; 2004c, 2004d) e da analisi di sezioni sismiche high-resolution, relativamente tarate sui pochi dati disponibili derivanti da indagini dirette (carote e dragaggi) (Finetti, 2004). Tali dati evidenziano a scala regionale la presenza di fondali batiali tirrenici (profondità superiori ai 3400 m) prevalentemente costituiti da rocce basaltiche, con diverse aree in cui la copertura sedimentaria è praticamente assente. Tali dati appaiono corroborare ulteriormente l'esistenza di attività vulcaniche piuttosto recenti.

In ultima analisi va evidenziato che la temperatura media della zona batiale tirrenica risulta essere insolitamente elevata. Inoltre i flussi di calore misurati in diverse aree tirreniche raggiungono anomalie fino a varie volte maggiori dei normali flussi oceanici. I dati bibliografici disponibili potrebbero risultare di un grande interesse in chiave geotermica (hot body). La spiegazione di un elevato flusso di calore per la semplice presenza di distensione tettonica non appare qui esaustiva, viste le forti anomalie positive dei flussi di calore, comparabili e/o superiori anche a quelle delle zone di dorsali oceaniche, per alcune aree tirreniche. Potrebbe quindi apparire più verosimile che oltre ad un apporto di calore medio dovuto alla presenza di una litosfera assottigliata, vi possano essere significative componenti aggiuntive di calore, potenzialmente ascrivibili ad attività vulcaniche a bassa profondità dal fondo marino piuttosto recenti, almeno per certe aree ben delimitate della porzione meridionale tirrenica.

La figura 1, tratta da Trua et al. (2004), mostra uno schema della topografia del fondale tirrenico, evidenziando chiaramente le maggiori strutture geologiche. Esse sono per la maggior parte di origine magmatica, come ad esempio i grossi apparati vulcanici del Marsili, del Vavilov, del Magnaghi, che si ergono per migliaia di metri dalle circostanti zone batiali, oppure i vari seamounts: Palinuro, Glabro, Alcione, Lametini, Eolo, Enarete, Prometeo, Sisifo,

Glauco (Marani et alii .2004a; Trua et alii, 2004) di dimensioni più ridotte, ubicati nell'arco eoliano.

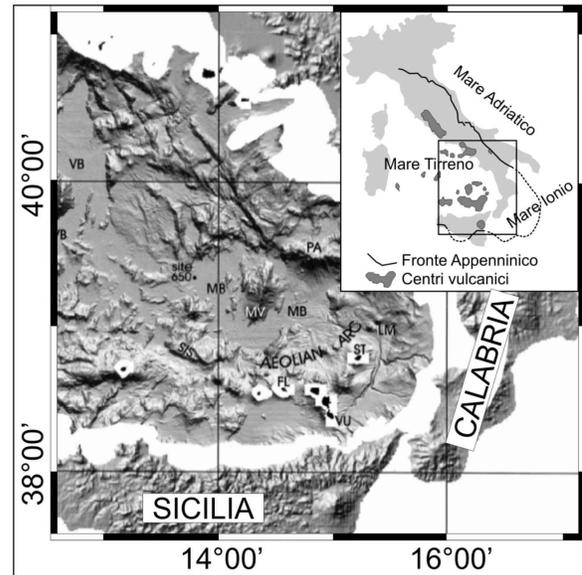


Fig. 1: Ubicazione geografica dell'areale tirrenico. Nel riquadro in alto a destra sono riportate le aree in cui affiorano le rocce magmatiche. Nella figura grande, tratta da Trua et alii. (2004a), vengono riportati gli elementi fisiografici del fondale tirrenico e le ubicazioni delle principali strutture geologiche.

*Geographical map of Tyrrhenian sea area. In the above-right inset are reported the zone on which crop out the magmatic rocks. In the rest of the figure, from Trua et al. (2004b), have been reported the physic and geographical elements of the tyrrhenian marine sounding, with the position of the main geological structures.*

In figura 2 sono invece riportate le anomalie regionali del flusso di calore del bacino tirrenico, tratta da Zito et al (2003). Da esse risultano ben evidenti due zone praticamente circolari, al cui interno sono centrati forti massimi di anomalie di flusso termico. Tali aree sono posizionate nella parte meridionale del mar Tirreno.

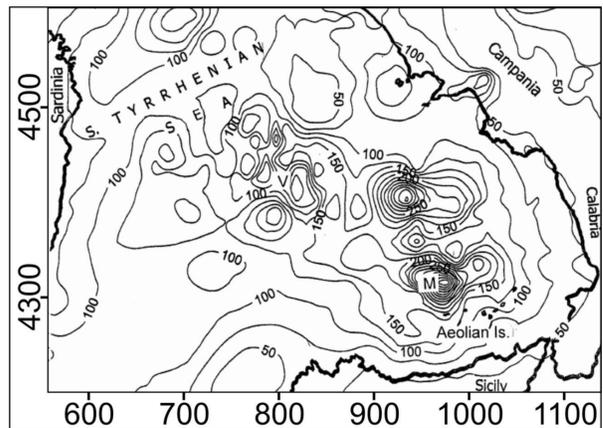


Fig. 2: Anomalie regionali dei flussi di calore tirrenici ( $mW/m^2$ ), tratta da Della Vedova et alii. (2001)

*Regional heat flux anomalies of Tyrrhenian sea ( $mW/m^2$ ), from Della Vedova et al. (2001)*

La comparazione di questa seconda figura con la prima inequivocabilmente testimonia un grado di corrispondenza tra strutture vulcaniche e zone a forte anomalia termica positiva. Tra le due aree a forte flusso di calore, l'esempio migliore appare essere quello del Marsili. Si noti come per la parte centrale e sommitale del Marsili si riscontrano zone in cui il flusso di calore eguaglia o supera i 250 mW m<sup>-2</sup>.

Sulla base delle considerazioni sopra riportate si può ipotizzare, come precedentemente affermato, che l'attività magmatica dei vulcani tirrenici possa essere ancora più recente dei 10000 anni (Serri et alii, 2001). Ad ogni modo l'attività magmatica tirrenica, soprattutto nell'area meridionale, si è esplicata con età coeve, se non addirittura più recenti, a quelle delle attuali aree geotermiche toscane e laziali on-shore, con evidenti risvolti scientifici e applicativi.

Per quanto riguarda la possibile presenza e ubicazione dei reservoir all'interno di strutture geologiche tirreniche, si deve considerare una situazione molto articolata per via della complessità geologica (Finetti, 2004). Se gli apparati vulcanici continentali (on-shore), in funzione della profondità delle camere magmatiche, della composizione e quantità dei magmi e relativi volatili disciolti in essi e della contaminazione crostale dei fusi primitivi, danno luogo ad eruzioni di varia tipologia (effusiva ed esplosiva), il vulcanismo sottomarino, ubicato nell'area centro meridionale del Tirreno, dovrebbe dar luogo maggiormente ad eruzioni effusive o comunque di bassa esplosività. Quindi le colate laviche massive e/o le lave a pillow con associati depositi ialoclastitici dovrebbero essere i prodotti maggiormente rappresentati. Va inoltre qui evidenziato che normalmente lungo i lati dei vulcani sottomarini e/o dei seamounts sono presenti in misura molto significativa dei prodotti vulcanici ed epiclastici dovuti sia a fenomeni esplosivi idrovulcanici e sia a debris flow di ialoclastiti (Cas e Wright, 1987). Tuttavia tali fenomeni sono ancora poco conosciuti, essendo stati studiati solo in alcune ristrette aree oceaniche.

Una ulteriore considerazione molto importante ai fini della possibile determinazione di un reservoir appare qui essere quello della tettonica. Infatti tutto il bacino tirrenico è interessato da movimenti tettonici di grossa intensità da qualche milione di anni a tutt'oggi, ringiovanenti da nord verso sud e da ovest verso est; tale migrazione appare anche guidare il timing delle attività magmatiche e l'andamento geografico dei flussi di calore (Serri et alii, 2001; Zito et alii, 2003; Finetti, 2004).

I due elementi sopra riportati, cioè il tipo di litologie e la tettonica, almeno per quanto concerne i vari apparati vulcanici tirrenici, appaiono indicare la probabile presenza di un certo grado di permeabilità-trasmissività al loro interno, cioè essi potrebbero risultare dei veri e propri reservoir. E' interessante notare che quindi Q

in diverse isole oceaniche, tali strutture geologiche attualmente sopra il livello marino, costituiscono le principali rocce serbatoio in cui si accumulano le riserve e

risorse idriche (es. isole di Capo Verde). Pertanto è opinione degli autori che gli apparati vulcanici tirrenici, come ad esempio il Marsili, siano probabilmente assimilabili a giganteschi reservoir. Questa conclusione appare avvalorata da dati magnetici ed in minor misura dai dati gravimetrici su scala regionale. La magnetometria evidenzia zone ad alta termalità per via dell'effetto Curie, mentre la gravimetria testimonia la presenza di rocce con densità relativamente basse, tenendo conto della tipologia litologica e della sua omogeneità almeno nell'areale tirrenico meridionale (Carta gravimetrica ed aereomagnetica d'Italia).

In base a tutte le considerazioni geologiche e geofisiche sopra esposte, i vari apparati vulcanici sottomarini tirrenici potrebbero in prima analisi possedere caratteristiche di permeabilità-trasmissività piuttosto rilevanti, tali da renderle potenzialmente atti a fungere da reservoir per fluidi idrotermali. Se una tale ipotesi venisse confermata da ulteriori studi ed investigazioni, una struttura vulcanica come ad esempio quella del Marsili potrebbe rivelarsi come un esteso serbatoio sottomarino al cui interno potrebbero essere veicolati enormi volumi di acqua marina a temperature relativamente elevate.

Tuttavia, anche nella ipotesi favorevole sopra prospettata, un tale "sistema geotermico" potenzialmente potrebbe non essere ancora utilizzabile in assenza di strutture geologiche fungenti da cap-rock; di conseguenza l'assenza di litologie basso permeabili al tetto di questi ipotetici reservoir potrebbe non consentire e/o limitare l'accumulo di fluidi idrotermali. Il parametro legato al cap-rock appare quindi essere un ulteriore aspetto limitante nella nostra analisi e nella nostra ipotesi di lavoro. Va però notato che sistemi idrotermali di estensioni tipo quella del Marsili o del Vavilov ad esempio, potrebbero addirittura non necessitare di un vero e proprio cap rock data l'estrema estensione delle aree interessate da termalità elevate (vedi figura 2). D'altro canto è ipotizzabile una presenza di orizzonti a bassa permeabilità-trasmissività nelle vicinanze delle porzioni più esterne degli apparati vulcanici dovuti a diversi fattori. Infatti, come precedentemente detto, in alcune zone tirreniche la copertura sedimentaria pelagica è addirittura assente. Ciò però è valido principalmente per le aree interessate da recenti attività vulcaniche. Quindi i fianchi o le porzioni più periferiche dei vari vulcani e/o seamounts tirrenici dovrebbero essere maggiormente ricoperti da uno strato di sedimenti molto fini, procedendo dal centro della struttura verso la periferia. Tali aree sono inoltre interessanti dall'accumulo dei processi sedimentari dovuti ai materiali epiclastici che nel corso del tempo vengono ad essere progressivamente asportati dalle zone rilevate in favore delle zone batimetricamente inferiori, come appunto i fianchi e/o i fondali batiali circostanti gli edifici vulcanici. Un terzo fattore importante da tener conto è il self-sealing. Le acque idrotermali circolanti nelle rocce magmatiche degli apparati vulcanici tirrenici in linea generale hanno un potere di solubilità legato alla loro temperatura assoluta; infatti a termalità più elevate

corrispondono maggiori contenuti di sali disciolti. All'interno di tali sistemi i sali possono essere suddivisi in due grosse tipologie: i sali marini come cloruri, carbonati, solfati e i sali connati (alogenuri, solfati, solfuri, ecc.) derivanti direttamente dai fluidi magmatici. A differenza della loro origine la quantità di sali disciolti dipenderà principalmente dalla termalità del fluido acquoso. Le acque termali più calde tenderanno sempre a risalire verso il fondale marino, progressivamente raffreddandosi. Durante tale processo tenderanno a riprecipitare i sali disciolti in esse. Tale deposizione determinerà una riduzione della porosità-trasmissività, proprio per un processo, seppur lieve, di self-sealing man mano che ci si sposterà verticalmente e orizzontalmente verso il fondale marino. Probabilmente, ipotizzando una forte caduta di temperatura dovuta all'incontro delle acque idrotermali con le acque marine non termali, potenzialmente determinerà una precipitazione di sali relativamente molto accentuata, secondo una geometria ricalcante quella delle isoterme delle acque termali. Probabilmente il fenomeno del self feeling potrebbe verificarsi anche nelle zone più profonde, ma solo al superamento delle condizioni di supercriticalità dell'acqua. Generalmente tale geometria avrà un andamento simile alla conformazione geometrica dell'apparato vulcanico. L'influsso delle correnti marine o la presenza di discontinuità geologiche potrebbe però modificare tale andamento.

Per quanto invece concerne la limitazione della ricarica di un ipotetico sistema geotermico avremo che, considerando la pressione della colonna d'acqua sovrastante, praticamente non si dovrebbe avere nessun problema, tenuto conto dei volumi d'acqua marina. Proprio la pressione dell'acqua marina comporterà un ulteriore vantaggio anche in condizioni di bassa permeabilità-trasmissività di un ipotetico reservoir, poiché una diminuzione della pressione idrica nel sistema endogeno produrrebbe subito un forte richiamo della acque circostanti dovuto al gradiente idraulico.

### 3. Ipotesi di progetto preliminare

Le argomentazioni fin qui illustrate derivano dall'analisi dei vari dati bibliografici esistenti sull'assetto geologico generale del bacino tirrenico, nonché da considerazioni fisiche, chimiche, idrodinamiche, magmatologiche-vulcanologiche e geofisiche. Tali dati sono intrinsecamente limitati data la difficoltà delle osservazioni e il loro difficile reperimento in ambienti sottomarini, soprattutto a profondità dell'ordine delle unità chilometriche. Quindi risulta necessario programmare ricerche atte ad implementarne la conoscenza delle varie situazioni geologiche e geofisiche delle varie strutture situate nel bacino tirrenico. Chiaramente data l'estensione del mar Tirreno è opportuno restringere tali indagini ad aree geograficamente ben circoscritte (ordine dei km o decine di km). Le aree centrate sui massimi dei flussi di calore sono

evidentemente le zone ove programmare tali ricerche. In figura 2 appare evidente che due aree risultino possedere forti anomalie di flusso di calore positivo, come già detto sopra. Queste due aree, riportate da Della Vedova et al. (2001), sono perfettamente comparabili sia dal punto di vista termico che della loro estensione alle aree vulcaniche toscane, laziali, campane ed eoliane. In particolare l'area del Marsili appare essere l'ipotesi di lavoro più favorevole per il reperimento di aree di interesse geotermico. Tale zona, infatti, è termicamente l'area più estesa a flusso di calore positivo presente in Europa, ad esclusione dell'Islanda, avendo una estensione di circa 2000 km<sup>2</sup> in cui l'anomalia termica è uguale o superiore ai 200 mW m<sup>-2</sup> (Della Vedova et alii, 2001).

Il secondo e fondamentale step dovrà essere finalizzato alla caratterizzazione geologica locale (ordine dei chilometri) degli apparati insistenti all'interno delle zone ad alto flusso di calore precedentemente individuate. Ad esempio concentrando la nostra attenzione sulla struttura del Marsili, dovranno essere condotte una gran mole di ricerche atte a definire: a) tipologia dell'attività magmatica (composizione dei magmi e relativi volumi, tipologie delle attività vulcaniche, presenza di attività idrotermali attuali e giacitura degli eventuali prodotti epiclastici); b) assetto morfo-tettonico in maniera da evidenziare la geometria delle maggiori strutture dislocative, la loro età e il rapporto con l'attività di sedimentazione; c) indagini indirette di tipo geofisico tese ad evidenziare le caratteristiche fisiche e la potenzialità idrica del reservoir (anomalie gravimetriche, magnetiche, termiche, flussi di calore, permeabilità-trasmissività, ecc). Probabilmente un'indagine geoelettrica potrebbe testimoniare la presenza o meno di fluidi caldi. Infatti si rileverebbero differenze relative tra le zone più conduttive e quelle più resistive; le prime saranno caratteristiche delle zone a forte presenza di acqua, mentre le seconde saranno tipiche per rocce non sature o gas saturate. La presenza di gas chiaramente è imputabile a temperature superiori al valore critico per l'acqua marina o ad un effetto combinato di T e P.

Eventualmente, sulla base dei risultati ottenibili da una campagna oceanografica sopra riportata, in cui si evincerebbero tutte le peculiarità geologiche e chimico-fisiche caratterizzanti il Marsili e le sue acque (sia marine che eventualmente idrotermali), si potrebbero successivamente impostare progetti di perforazioni esplorative. L'ipotesi di una perforazione esplorativa chiaramente dovrebbe tener conto non solo delle caratteristiche fisico-chimiche di un eventuale sistema geotermico, ma anche delle grosse difficoltà operative per una perforazione in mare aperto a profondità batimetriche ragguardevoli.

Vanno però già da ora evidenziati alcuni pregi che potrebbero derivare dalla utilizzazione di un apparato geotermico come quello del Marsili, qui ipotizzato. Rispetto allo sfruttamento di una risorsa geotermica on-shore inevitabilmente si avranno dei vantaggi e dei svantaggi. La

perforazione in ambiente continentale disporrà evidentemente di una facilitazione tecnologica e di una riduzione dei costi per l'approvvigionamento geotermico. D'altro canto una eventuale utilizzazione di una risorsa geotermica sottomarina risulterà avere un aggravio in termini di costi di progettazione e manutenzione molto più elevato. Dal punto di vista teorico, l'utilizzo di fluidi idrotermali marini ha però alcuni marcati vantaggi. Un primo è rappresentato dalla quantità di acqua a disposizione che praticamente risulterebbe essere inesauribile. La presenza di acqua a forte pressione renderebbe utilizzabile anche un sistema geotermico con reservoir a bassa permeabilità-trasmissività relativa. Inoltre di nodale importanza risulterebbe essere la possibilità di regolare a scelta il passaggio dell'acqua allo stato di vapore; infatti tale passaggio è funzione di T e P. Quindi si potrebbero progettare dei recuperi della sola parte vapore regolando il sistema in funzione della temperatura dell'acqua e della batimetria, superando definitivamente il problema del self-sealing tipico dei sistemi geotermici on-shore.

Ben consci delle limitazioni tecniche ed economiche di

un tale progetto, e di un possibile risultato negativo in chiave geotermica, gli studi qui proposti hanno anche un risvolto perfettamente fruibile in chiave di mitigazione del rischio vulcanico. Effettivamente l'assenza di un modello dell'evoluzione magmatica del centro vulcanico del Marsili, sia per il suo comportamento passato e sia per il suo stato attuale, non permette la conoscenza di un eventuale rischio derivante da eruzioni esplosive sottomarine di grandi profondità. Tale campo di ricerca appare solo oggi muovere i primi passi a livello scientifico mondiale. E' bene infine evidenziare che la struttura vulcanica del Marsili è perfettamente comparabile volumetricamente con quella dell'Etna. Tuttavia il tipo di attività prevalentemente effusiva e/o di bassa esplosività dell'Etna è ben noto, mentre il comportamento vulcanico del Marsili è tutt'ora poco conosciuto. In ogni caso gli autori, concordemente con la maggior parte degli scienziati e dei tecnici implicati nello sfruttamento dei campi geotermici, sono dell'idea che l'estrazione di fluidi idrotermali in detti contesti contribuisca alla mitigazione del rischio, sia sismico e soprattutto vulcanico-freatomagmatico.

## Bibliografia

- Cas R.A.F., Wright J.V. (1987) - Volcanic succession, modern and ancient. Ed. Chapman and Hall, 528.
- Della Vedova B., Bellini S., Pellis G., Squarci P., 2001. Deep temperatures and surface heat flow distribution. In *Anatomy of an orogen, The Apennines and adjacent Mediterranean basins*. ed. Vai G.B., Martini I.P., 65-76.
- Favali P., Beranzoli L., D'Anna G., Gasparoni F., Marvaldi J., Clauss G., Gerber H.W., Nicot M., Marani M.P., Gamberi F., Millot C., Flueh E.R., 2005a. A fleet of multiparameter observatories for geophysical and environmental monitoring at seafloor. *Ann. Geophys.* (in stampa).
- Favali P., De Santis A., D'Anna G., Di Sabatino B., Sedita M., Rubino E., 2005b. A new active volcano in the Tyrrhenian Sea?. *Ann. Geophys.*, in stampa.
- Finetti J.R., 2004. Innovative seismic highlights on the Mediterranean region. In *Geology of Italy. Special volume of the Italian Geological Society*, 131-140.
- Marani, M.P., Gamberi F., 2004a. Distribution and nature of submarine volcanic landforms in the Tyrrhenian Sea: the arc vs. the back-arc, in *From seafloor to deep mantle: architecture of the Tyrrhenian back-arc basin*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., LXIV, Marani, M.P., Gamberi F., Bonatti E. (Ed.), 109-126.
- Marani, M.P., Gamberi F., Bonatti E. (Ed.), 2004b. From seafloor to deep mantle: architecture of the Tyrrhenian back-arc basin. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., LXIV, pp.195.
- Marani, M.P., Gamberi F., Bortoluzzi G., Carrara G., Ligi M., Penitenti D., 2004c. Seafloor morphology of the Tyrrhenian Sea (1:1000000), in *From seafloor to deep mantle: architecture of the Tyrrhenian back-arc basin*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., LXIV, Marani, M.P., Gamberi F., Bonatti E. (Ed.), pp.195.
- Marani, M.P., Gamberi F., Bortoluzzi G., Carrara G., Ligi M., Penitenti D., 2004d. Tyrrhenian Sea bathymetry (1:1000000), in *From seafloor to deep mantle: architecture of the Tyrrhenian back-arc basin*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., LXIV, Marani, M.P., Gamberi F., Bonatti E. (Ed.), pp.195.
- Serri G., Innocenti F., Manetti P., 2001. Magmatism from Mesozoic to Present: petrogenesis, time-space distribution and geodynamics implications. In *Anatomy of an orogen. The Apennines and adjacent Mediterranean basins*. Vai G.B., Martini I.P. (Ed.), 77-104.
- Trua T., Serri G., Marani M., Renzulli A., Gamberi F., 2002. Volcanological and petrological evolution of Marsili seamount (southern Tyrrhenian sea). *J. Volc. Geoth. Res.*, 114, 3-4: 441-464.
- Trua, T., Serri G., Rossi P.L., 2004. Coexistence of IAB-type and IOB-type magmas in the southern Tyrrhenian back-arc basin: evidence from recent seafloor sampling and geodynamic implications, in *From seafloor to deep mantle: architecture of the Tyrrhenian back-arc basin*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., LXIV, Marani, M.P., Gamberi F., Bonatti E. (Ed.), 83-96.
- Zito G., Mongelli F., De Lorenzo S., Doglioni C., 2003. Heat flow and geodynamics in the Tyrrhenian sea. *Terra Nova*, 15: 425-432.