



**IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO
"CASA DEL CORTO"**

**[ID: 3212 - 3214] Risposte alle
Richieste di Integrazioni**

***Allegato 6: Documentazione Tecnica per il
Riconoscimento del Carattere Nazionale
della Risorsa Geotermica***

Preparato per:
Svolta Geotermica Srl

Dicembre 2016

Codice Progetto:
P16_CAE_021

Revisione: 0

STEAM
Sistemi Energetici Ambientali
Via Ponte a Piglieri, 8
I – 56122 Pisa
Telefono +39 050 9711664
Fax +39 050 3136505
Email : info@steam-group.net



STEAM



**PERMESSO DI RICERCA PER IMPIANTO PILOTA
GEOTERMICO "CASA DEL CORTO"**

**Documentazione Tecnica per il
Riconoscimento del Carattere Nazionale
della Risorsa Geotermica**

*In ottemperanza alla Circolare Esplicativa dei Criteri di
Valutazione trasmessa dal DGS-UNMIG in data 20/07/2016*

Preparato per:
Svolta Geotermica Srl

Luglio 2016

Codice Progetto:
P15_CAЕ_010

Revisione: 0

STEAM
Sistemi Energetici Ambientali
Via Ponte a Piglieri, 8
I – 56122 Pisa
Telefono +39 050 9711664
Fax +39 050 3136505
Email : info@steam-group.net



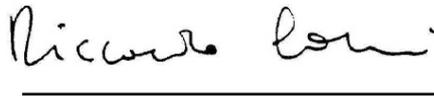
STEAM

Svolta Geotermica S.r.l.

**PERMESSO DI RICERCA PER IMPIANTO PILOTA
GEOTERMICO "CASA DEL CORTO"**

**Documentazione Tecnica per il
Riconoscimento del Carattere Nazionale
della Risorsa Geotermica**

*In ottemperanza alla Circolare Esplicativa dei Criteri di
Valutazione trasmessa dal DGS-UNMIG in data 20/07/2016*



Ing. Riccardo Corsi
Project Director



Geol. Giorgio Buonasorte

Progetto	Rev.	Preparato da	Rivisto da	Approvato da	Data
P15_CAE_010	0	PB, LF	GB	RC	26/07/2016

INDICE

0	SOMMARIO E CONCLUSIONI	1
1	INTRODUZIONE E SCOPO DEL LAVORO	2
1.1	CARATTERISTICHE TECNICO-PROGETTUALI	2
2	INQUADRAMENTO GEOTERMICO DI RIFERIMENTO DEL PROGETTO “CASA DEL CORTO”	4
2.1	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	4
2.2	MODELLO GEOTERMICO DELL’AREA DEL PERMESSO DI RICERCA	10
2.3	STIMA CARATTERISTICHE PRODUTTIVE DEL CAMPO GEOTERMICO	18
2.4	STIMA CARATTERISTICHE CHIMICHE DEL FLUIDO E TENDENZA ALL’INCROSTAZIONE	19
2.4.1	Considerazioni sulla Possibilità di Incrostazioni	20
2.5	MODELLO DEL SERBATOIO - CRITERI DI PRODUZIONE E OBIETTIVI DELL’IMPIANTO PILOTA	23
2.5.1	Scelta del Numero e dell’Ubicazione dei Pozzi	23
2.5.2	Modellazione Numerica del Serbatoio Geotermico - Previsione degli effetti della produzione/reiniezione sul comportamento del sistema geotermico	23
2.5.3	Sismicità Indotta e Subsidenza	29
2.5.4	Pressione di Reiniezione e di Produzione	30
3	BIBLIOGRAFIA	32

0

SOMMARIO E CONCLUSIONI

L'area del Permesso di Ricerca "Casa del Corto", è situata nel bordo orientale della grande anomalia geotermica del Monte Amiata, a circa 3 - 4 km ad Est del Campo Geotermico di Piancastagnaio (Concessione di coltivazione geotermica di Enel Green Power) e risulta quindi in continuità con esso.

Sono state esaminate le stratigrafie e i dati di produzione dei pozzi più vicini ai confini del Permesso di Ricerca. In particolare sono stati presi in considerazione i dati dei pozzi Piancastagnaio 4, Piancastagnaio 11, Piancastagnaio 25, Piancastagnaio 25bis, Piancastagnaio 29, Piancastagnaio 35, Piancastagnaio 35A, Piancastagnaio 44, Piancastagnaio 36, Piancastagnaio 30, Piancastagnaio 27, Paglia 1, Radicofani1 presenti nel raggio di circa 2-4 km dai confini del Permesso di Ricerca.

Le caratteristiche produttive di alcuni di questi pozzi sono stati esaminati con l'intento di costruire il modello concettuale di riferimento e di stimare con ragionevole approssimazione le caratteristiche chimico fisiche del fluido e le pressioni e temperature attese del serbatoio.

Tali dati insieme alle prospezioni geologiche disponibili dalla bibliografia hanno permesso di ricostruire e tarare il modello geologico e geotermico (come richiesto dalla Circolare esplicativa dei criteri di valutazione trasmessa dal DGS-UNMIG in data 20.07.2016).

I risultati delle simulazioni, eseguite con codice di calcolo Tough2, mostrano che, dal punto di vista termico, la coltivazione del serbatoio, con le modalità previste dal progetto (ubicazione pozzi produttivi e reiniettivi, portate di ~ 45 kg/s per ciascun pozzo di produzione e di ~45 kg/s per ciascun pozzo di reiniezione e temperatura del fluido di reiniezione pari ad 80 °C) induce una modesta interferenza tra pozzi produttivi e reiniettivi. Infatti, le variazioni di temperatura nei pozzi produttivi in un tempo di simulazione di 50 anni risultano sempre inferiori a 1 °C, garantendo la sostenibilità della risorsa nel corso della vita del progetto.

Le variazioni di pressione, indotte nei pozzi produttivi e reiniettivi, risultano modeste e quindi non in grado di produrre variazioni apprezzabili nello stato tensionale del serbatoio.

Nel caso dei pozzi produttivi si rileva, infatti, una depressurizzazione, indotta dall'emungimento del fluido, che raggiunge il valore di 4 bar in 5 anni e che rimane pressappoco costante per gli ulteriori 50 anni di attività di produzione simulati.



PROGETTO

P15_CAE_010

TITOLO

SVOLTA GEOTERMICA SRL:
 PERMESSO DI RICERCA PER IMPIANTO PILOTA
 GEOTERMICO "CASA DEL CORTO".
 DOCUMENTAZIONE TECNICA PER IL RICONOSCIMENTO DEL
 CARATTERE NAZIONALE DELLA RISORSA GEOTERMICA

REV.

0

Pagina

1

1

INTRODUZIONE E SCOPO DEL LAVORO

Il presente documento è stato predisposto al fine di ottemperare a quanto richiesto nella “*circolare esplicativa dei criteri di valutazione*” per il riconoscimento del carattere nazionale della risorsa geotermica, interessata dal progetto di Impianto Pilota Geotermico “Casa del Corto” (Provincia di Siena), ai fini dell’iscrizione al registro ex decreto interministeriale 23.6.2016, trasmessa, dal Ministero dello Sviluppo Economico in data 20 luglio 2016 al proponente.

L’istanza di permesso di ricerca per Impianto Pilota è stata presentata in data 25/11/2011 da Svolta s.r.l., ed ha ottenuto parere favorevole dalla commissione CIRM del Ministero dello Sviluppo Economico nella seduta del 03/07/2012 come da comunicazione dello stesso Ente in data 03/08/2012, per una potenza teorica netta immessa in rete pari a 2,5 MWe.

Successivamente, in data 11/03/2011, la Società Svolta s.r.l. provvedeva a chiedere il conferimento di ulteriori 2,5 MWe, determinando in 5 MWe la potenza media annua netta immessa in rete dall’impianto pilota.

Il progetto pilota “Casa del Corto”, come risulta dalla comunicazione MiSE dell’8 aprile 2015 n°0007571, ha riottenuto, nella seduta del 27 novembre 2014, parere favorevole dal CIRM/MiSE che ha ritenuto il programma dei lavori presentato congruo per gli aspetti sia tecnici che economici.

1.1

CARATTERISTICHE TECNICO-PROGETTUALI

All’interno del PR Casa del Corto (*Figura 1.1a*) è prevista la perforazione di tre pozzi (di cui due devianti) da una singola postazione di produzione e di 3 pozzi (di cui due devianti) dalla postazione di reiniezione, per un totale di sei pozzi. La profondità verticale attesa di fondo pozzo è di 2.000 metri e la temperatura stimata tra i 170 e 200 °C. In questa trattazione si assumerà una temperatura media di serbatoio pari a 180 °C.

Con questa nuova configurazione sarà possibile prelevare una portata di circa 460 t/h e, grazie al migliore rendimento della macchina ORC (dovuto ad una temperatura maggiore del fluido geotermico ed un’ottimizzazione del ciclo termodinamico), ricavare una potenza elettrica netta media annua immessa in rete di 5 MWe. I fluidi esausti, dopo lo scambio termico all’impianto pilota, verranno reiniettati nelle stesse formazioni geologiche di provenienza.



PROGETTO

P15_CAE_010

TITOLO

SVOLTA GEOTERMICA SRL:
 PERMESSO DI RICERCA PER IMPIANTO PILOTA
 GEOTERMICO “CASA DEL CORTO”.
 DOCUMENTAZIONE TECNICA PER IL RICONOSCIMENTO DEL
 CARATTERE NAZIONALE DELLA RISORSA GEOTERMICA

REV.

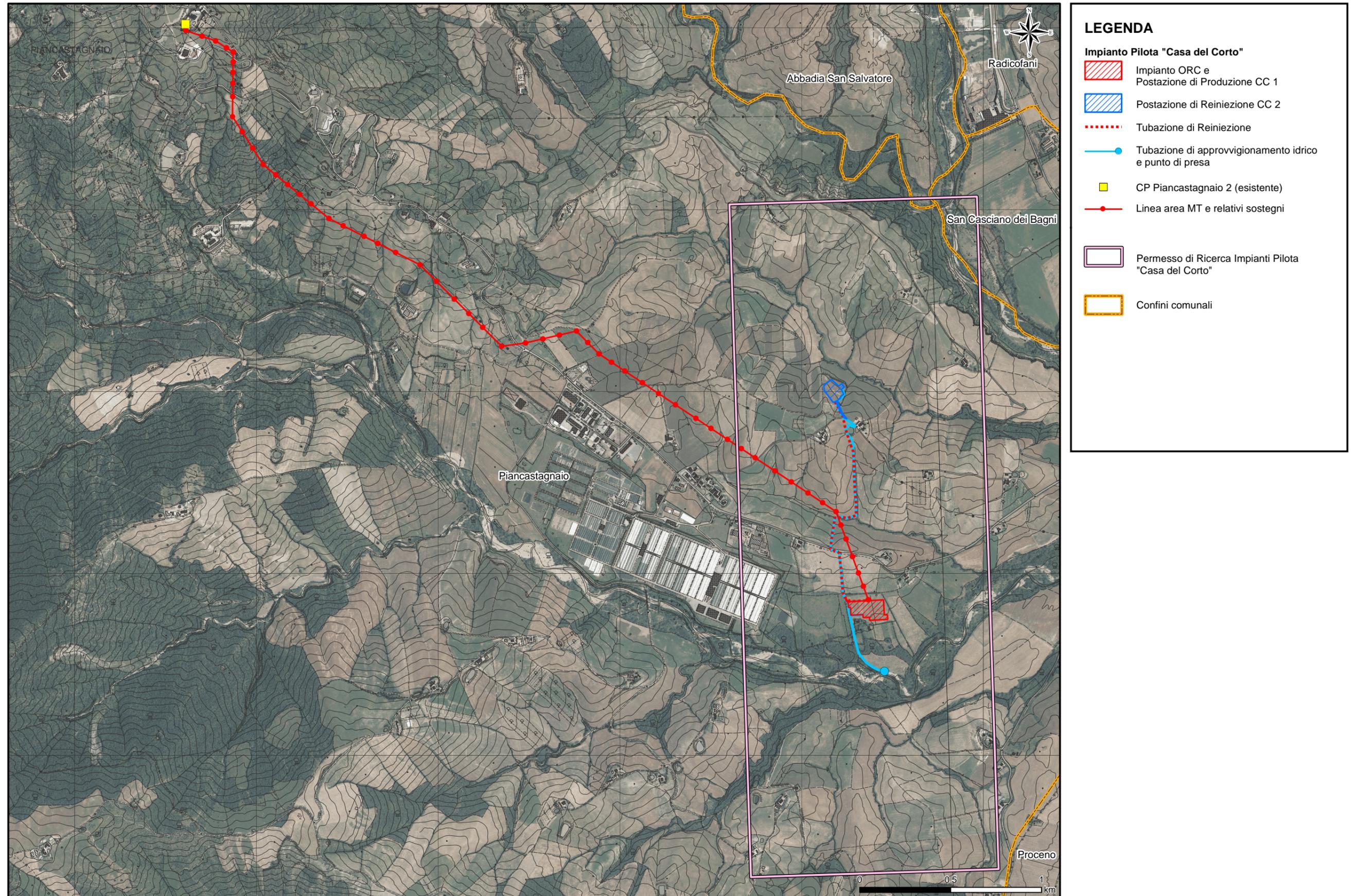
0

Pagina

2

Figura 1.1a

Localizzazione Impianto Pilota Geotermico Casa del Corto e relative Opere Connesse con Identificazione Permesso di Ricerca



Tale configurazione impiantistica consentirà un ottimale sfruttamento energetico del serbatoio geotermico sotteso nell'area del Permesso di Ricerca "CASA DEL CORTO".

In particolare la definizione dell'elettrodotto è conforme all'accettazione da parte del Proponente, della proposta di connessione alla rete di Enel Distribuzione (09/04/2015).

La seguente tabella riassume le caratteristiche tecnico-progettuali dell'impianto Pilota.

Tabella 1.1a Caratteristiche Tecnico Progettuali dell'Impianto Pilota

CARATTERISTICHE TECNICHE-PROGETTUALI	
Potenza Elettrica Lorda	7,86 MWe
Potenza Elettrica Netta	5,0 MWe
Rendimento elettrico Lordo centrale ORC	14,80%
Ausiliari di centrale e pompe sommerse	2,86 MWe
Portata di Produzione	460 t/h
Temperatura di Produzione	180 °C
Temperatura di Reiniezione	80 °C
Produzione con pompa immersa e pressione di esercizio alla pressione di bolla degli incondensabili	60 bar a 180 °C
Pozzi Produttivi	N°3
Portata di ciascun Pozzo Produttivo	150 t/h
Pozzi Reiniettivi	N°3
Distanza Media tra le zone di serbatoio Produttive e Reiniettive	1,2 km
Quota dell'impianto Pilota	320 m dal p.c.
Quota della Postazione di Produzione	320 m dal p.c.
Quota della Postazione di Reiniezione	340 m dal p.c.
Profondità dei Pozzi verticali	2.000 m dal p.c.
Profondità verticale dei Pozzi deviati / Scostamento Orizzontale	2.000 m dal p.c./ 400-900 m
Tubazione di Reiniezione	1.500 m
Elettrodotto MT per la connessione alla rete elettrica esistente.	5,3 km

2 INQUADRAMENTO GEOTERMICO DI RIFERIMENTO DEL PROGETTO "CASA DEL CORTO"

2.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

L'area del Permesso di Ricerca "Casa del Corto", per lo sviluppo di un Impianto Pilota, è situata nel bordo orientale della grande anomalia geotermica del Monte Amiata, a circa 3 - 4 km ad Est del Campo Geotermico di Piancastagnaio (Concessione di coltivazione geotermica di Enel Green Power) e risulta quindi in continuità con esso.

L'assetto geologico - strutturale dell'area intorno al Vulcano del Monte Amiata è stato definito dalle ricerche per i campi geotermici di Bagnore (ad Ovest) e Piancastagnaio (ad Est), condotte dall'ENEL nel corso degli anni.

I dati pubblicati di queste ricerche sono stati integrati dalla comunità scientifica con approfondimenti tematici (geologici, idrogeochimici e geofisici) che hanno dato luogo a nuove interpretazioni geologico - strutturali, poi oggetto di ulteriori pubblicazioni.

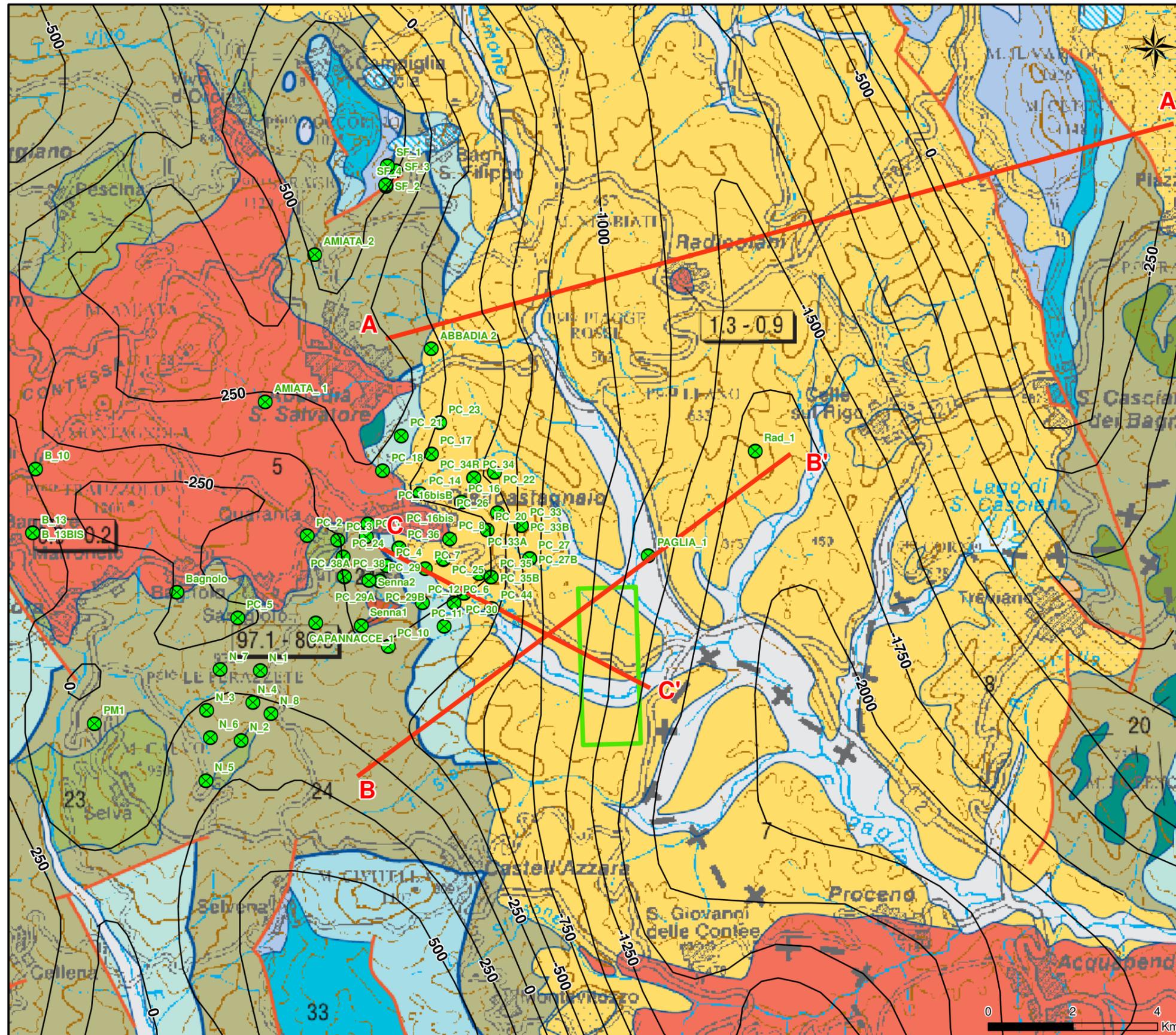
La cartografia Geologica dell'area di studio, in scala 1:100.000, è riportata nella *Figura 2.1a* estratta dalla Carta Geologica della Toscana a scala 1:250.000; la stratigrafia dell'area rappresentata è costituita dall'alto verso il basso dalla seguente successione strutturale – stratigrafica (i numeri fanno riferimento ai codici utilizzati per la rappresentazione cartografica della carta Geologica della sola area rappresentata - *Figura 2.1a*; le sigle fanno riferimento allo schema tettonico - stratigrafico *Figura 2.1b*; *Batini et al., 2003* con modifiche; *Barelli et al., 2010*):

- Depositi vulcanici quaternari (5) comprendenti:
 - Complesso Vulcanico del Monte Amiata (lave da trachiti-daciti a olivin-latitiche, datate da 0,29 a 0,18 Ma - *Ferrari & Tonarini 1985; Ferrari et al., 1996*);
 - Trachibasalti e andesiti olivinlatitiche del vulcano di Radicofani (1,3 - 0,9 Ma);
 - Complesso vulcanico dei Monti Volsini (lave e colate piroclastiche e tufi, tefritico - leucitici; 0,8 - 0,33 Ma);
- Complesso Quaternario e Neogenico (1-7; M-P-Q), costituito da depositi (trasgressivi sul substrato preneogenico - unconformity) terrigeni marini e continentali, che hanno colmato il Bacino sedimentario di Radicofani;
- Complesso Ligure (LU) costituito da unità prevalentemente argillitiche, dall'alto verso il basso, comprendono: Unità Ofiolitifera, 18 - Formazione delle Argille a Palombini Cretacico inf., contenente anche le Ofioliti giurassiche (20); Unità Sub-liguri esterne, 21 - Formazione Alberese,



Figura 2.1a

Stralcio della Carta Geologica della Toscana in scala 1:250.000 (Scala 1:100.000)



LEGENDA

- Permesso di Ricerca "Casa del Corto"
- Sezione Geologica (X-X')
- ⊗ Pozzo Geotermico
- Tetto del Serbatoio (m s.l.m.)

GEOLOGIA

Depositi Continentali Pliocenici Quaternari

- 1 - Sabbie, Ciottolami e Limi (Quaternario)
- 2 - Travertini (Pliocene - Olocene)

Depositi Vulcanici Quaternari

- 5 - Lave e Piroclastiti dei Complessi Vulcanici del M.Amiata e Vulsino; Lave del Vulcano di Radicofani (Quaternario)

Complesso Quaternario e Neogenico

- 7 - Argille, Argille Siltoso - Marnose (Zandeano - Piacenziano)

Complesso Flyschoido

Unità Liguri Interne

- 18 - Formazione delle Argille a Palombini (Cretacico inf.)
- 20 - Ofiolti, Peridotiti e Gabbri (Giurassico)

Unità Liguri Esterne

- 21 - Formazione dell'Alberese Calcari, Marne ed Arenarie (Paleocene - Eocene Med.)
- 23 - Formazione della Pietraforte Arenarie, Siltiti e Ruditi (Cretacico Sup.)
- 24 - Formazione di Santa Fiora Argilliti, Arenarie (Cretaceo - Paleocene)

Formazioni dell'Unità Toscana

- 32 - Formazione della Scaglia Toscana (Cretacico Inf. - Oligocene)
- 33 - Formazioni di Piattaforma e Pelagiche Marne, Argilliti e Calcari (Lias Inf. - Cretacico Inf.)
- 35 - Formazione di Burano Dolomie ed Anidriti (Triassico Sup.)

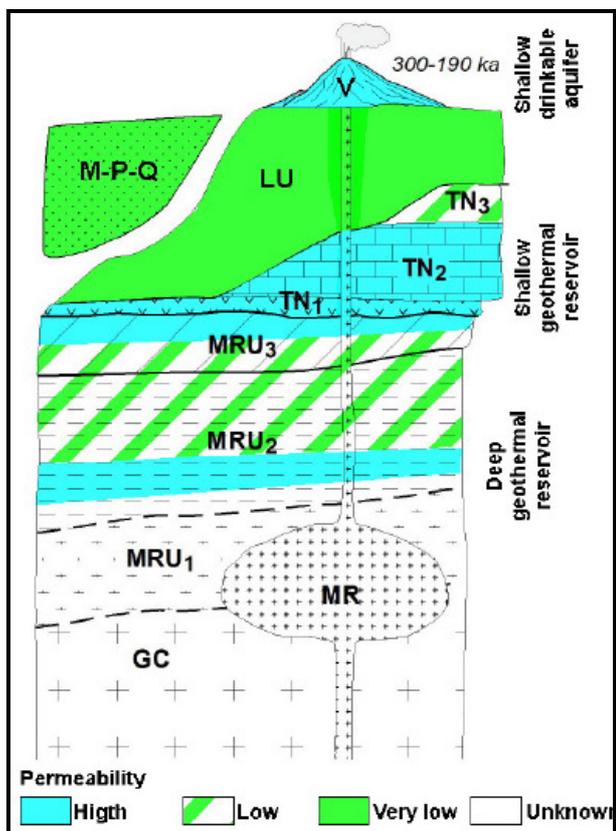
Faglie

prevalentemente marnosa - Paleocene Eocene; Unità di Santa Fiora, 23 - Formazione arenacea della Pietraforte - Cretaceo; 24 - Formazione di Santa Fiora - Cretaceo Paleocene;

- L'Unità Toscana (32, 33, 35), tettonicamente sottostante alle precedenti unità, è costituita negli affioramenti di M. Rotondo e Poggio Zoccolino, dall'alto verso il basso, dai litotipi calcareo argillitici del Cretaceo – Paleogene ed arenacei dell'Oligocene - Miocene inferiore (TN3), dalla successione pelagica calcareo silicea del Giurassico – Cretacico e dai calcari massicci di piattaforma del Lias inf. (TN2); i pozzi perforati nella zona di Piancastagnaio - Abbadia San Salvatore non hanno attraversato le formazioni appena citate, ma hanno incontrato direttamente le sottostanti dolomie e anidridi evaporitiche del Trias sup. (Formazione di Burano - Serie Toscana Ridotta Auct.; TN1);
- Il Complesso Metamorfico Toscano (Paleozoico - Trias medio) attraversato nella parte profonda dei pozzi di Piancastagnaio, è correlato alla Unità di Monticiano Roccastrada (MRU). Questa è articolata in Gruppo Mesozoico – Paleozoico del Verrucano (quarziti e filladi con calcari e dolomie - MRU3), Gruppo Paleozoico Filladico Quarzítico (MRU2) e Gruppo dei Micascisti MRU1) e Gneiss del Paleozoico (CG);
- Un corpo intrusivo anatectico (Rocce Magmatiche; MR) è stato ipotizzato in profondità sulla base di informazioni geofisiche all'interno delle rocce del Complesso Metamorfico (*Gianelli et al., 1988*).



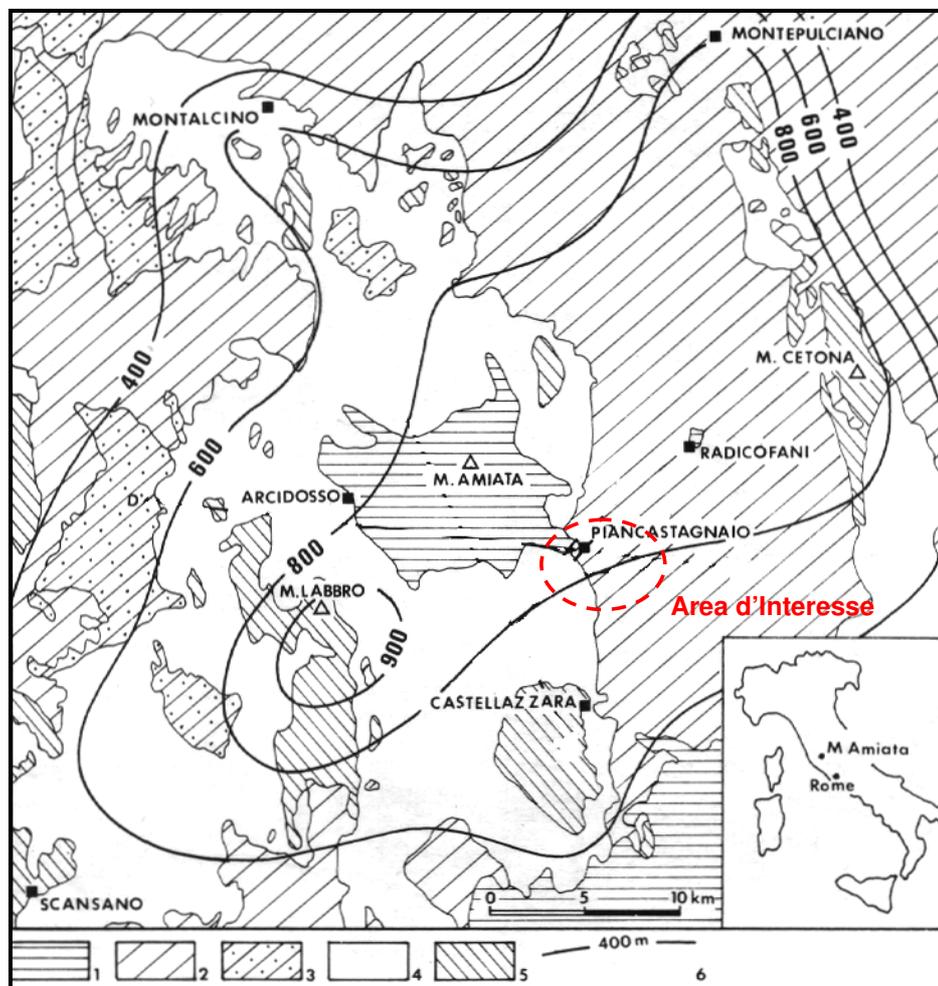
Figura 2.1b Schema dei rapporti delle Principali Unità Tettoniche - Stratigrafiche (con indicazioni delle caratteristiche di Permeabilità (da Batini et al., 2003 con modifiche; Barelli et al., 2010)



Il Vulcano del Monte Amiata si trova al centro di un'area fortemente sollevata (Figura 2.1c), come testimoniato dalla presenza di sedimenti marini Mio-Pliocenici a quote comprese tra 600 e 1.000 m.

Il sollevamento dell'area del Monte Amiata, che interessa ad Est anche parte del bacino sedimentario del Graben di Radicofani, è strettamente collegato alla grande intrusione magmatica anatettica (50 km x 35 km) all'interno delle formazioni del Basamento metamorfico. L'intrusione, attualmente in raffreddamento, è ipotizzata tra i 4 ed i 7 km di profondità (Batini et al., 1986; Gianelli et al., 1988; Marinelli et al., 1993; Acocella V., 2000).

Figura 2.1c - Sollevamento pliocenico dell'area del Vulcano del Monte Amiata (Gianelli et al, 1988). 1) lave trachitiche, dacitiche ed olivinlitiche del Complesso del M. Amiata (0,18 - 0,29 Ma); 2) Sedimenti clastici, prevalentemente argillosi del Complesso Neogenico (M-P-Q); 3) Depositi arenacei Oligomioceni della F. Macigno (TN3); Formazioni cretaceo - Eoceniche del Complesso Ligure (LU); 5) Formazioni della Unità Toscana (TN3 e TN2); 6) Quote dei sedimenti del Complesso Neogenico (m s.l.m.).



La zona occidentale dell'area, rappresentata in Figura 2.1a, è caratterizzata da una dorsale morfologica che si estende da Nord a Sud a partire di rilievi di Poggio Zoccolino (subito ad Ovest di Bagni San Filippo) fino a quelli di Monte Rotondo, in prossimità di Castell'Azzara; questi rilievi sono costituiti da affioramenti delle formazioni della Unità Toscana.

Nell'area di Piancastagnaio - Abbadia San Salvatore la dorsale presenta una inflessione assiale, infatti, i calcari e le anidriti della Formazione di Burano sono presenti ad alcune centinaia di metri di profondità, sotto la copertura prevalentemente argillitica dei Flysch Liguri.

L'assetto profondo della dorsale descritta deriva dall'attività tettonica compressiva sin-collisionale occorsa tra l'Oligocene superiore ed il Miocene

medio, che ha determinato la sovrapposizione delle Unità Liguri s.l. al di sopra della Unità Toscana, che a sua volta è avanscorsa sulle sottostanti Unità metamorfiche. La sequenza paleozoica del sottostante “Basamento Metamorfico” dei campi geotermici di Bagnore e Piancastagnaio è caratterizzata da analoghe strutture compressive tipo “Duplex” (raddoppi tettonici; *Bertini et al., 1995; Pandeli et al., 1988*).

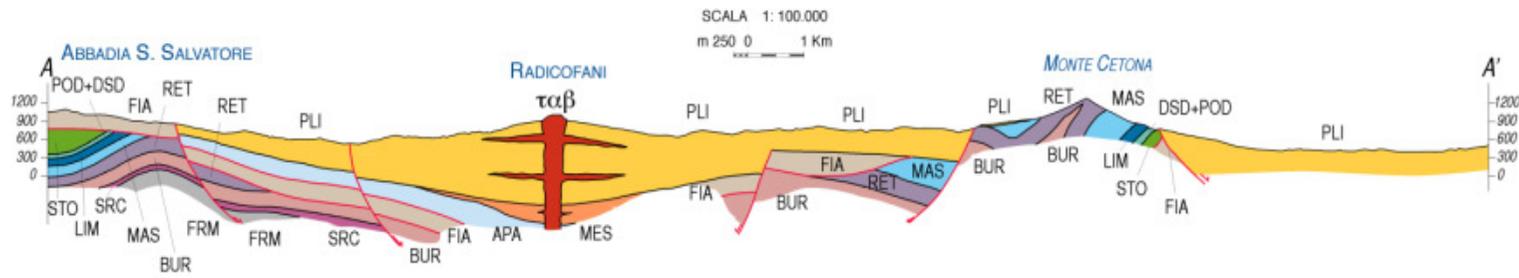
L'insieme del complesso edificio strutturale che ne è derivato è stato interessato, a partire dal Miocene medio superiore, da fenomeni estensionali con sistemi di faglie normali a basso angolo, che hanno disarticolato non solo le formazioni della Unità Toscana (nella quale sono presenti localmente vistose elisioni tettoniche – Serie Toscana Ridotta Auct.) ma anche quelle della più complessa sequenza tettonica delle Unità Liguri e Sub - Liguri. Inoltre, durante le successive fasi tettoniche distensive nel Miocene Sup.-Pliocene, si è sviluppato un importante sistema di faglie a direzione circa N-S, che hanno determinato la formazione del vasto bacino sedimentario (graben) di Radicofani, successivamente colmato con potenti successioni Mio - Plioceniche di materiale clastico con argille, sabbie e localmente conglomerati (*Brogi, 2008*).

In particolare, sulla spalla occidentale del graben, subito ad Est della dorsale amiatina Poggio Zoccolino - Piancastagnaio - Monte Rotondo, la prima fase tettonica miocenica estensionale ha determinato faglie a basso angolo, che poi sono state dissecate dalle successive faglie plioceniche ad alto angolo, che hanno determinato un rigetto complessivo di diverse centinaia di metri (*Brogi & Fabbrini 2009*).

Per concludere ed illustrare meglio l'assetto strutturale profondo della zona orientale del Monte Amiata si riporta una sezione geologica A - A' (*Figura 2.1d*) che da Abbadia San Salvatore taglia tutto il bacino sedimentario del Graben di Radicofani fino alla sua spalla orientale del Monte Cetona (CARG, FOGLIO 321-ABBADIA S. SALVATORE, Coordinatore scientifico: Prof. A. Costantini).

Come si vede dalla figura, lo stile tettonico del bordo occidentale del bacino (area di Abbadia San Salvatore - Piancastagnaio) è caratterizzato dalla presenza di un rilevante sistema di faglie dirette sub verticali, con rigetti totali di diverse centinaia di metri. Tale stile tettonico strutturale è stato confermato dai pozzi geotermici perforati nel campo in coltivazione geotermica di Piancastagnaio.

Figura 2.1d Sezione A – A' (CARG, Foglio 321-ABBADIA S. SALVATORE, Coordinatore scientifico: Prof. A. Costantini)



LEGENDA Sezione geologica a scala 1:100.000

ταβ Trachiandesiti basaltiche potassiche di Radicofani	Unità della Falda Toscana	BUR Formazione anidritica di Burano <i>Trias sup.</i>
PLI Depositi marini pliocenici	STO Scaglia toscana <i>Cretacico inf.-Paleogene</i>	Unità toscane metamorfiche
MES Depositi miocenici	DSD+POD Diaspri, Marne a <i>Posidonomya</i> <i>Lias-Malm p.p.</i>	SRC Gruppo del Verrucano <i>Ladinico sup.-Carnico</i>
APA Argille a palombini <i>Cretacico inf.</i>	LIM Calcare selcifero di Limano <i>Lias medio-sup.</i>	FRM Formazione del Farma <i>Paleozoico sup.</i>
FIA Formazione di S. Fiora <i>Cretacico sup.-Paleocene</i>	MAS Calcare massiccio <i>Lias inf.</i>	
	RET Calcari e marne a <i>Rhaeticula contorta</i> <i>Retico</i>	



L'intrusione granitica profonda, precedentemente menzionata, ha generato la grande anomalia termica positiva del Monte Amiata, che comprende le aree in coltivazione di Bagnore ad Ovest e di Piancastagnaio ad Est, che gradualmente declina verso il graben di Radicofani.

L'area sottesa dal Permesso di Ricerca "Casa del Corto" è caratterizzata dalla presenza di un assetto termico, idrogeologico e strutturale analogo a quello del campo geotermico in coltivazione Piancastagnaio.

Infatti, l'assetto tettonico, strutturale, stratigrafico, idrogeologico e termico del campo di Piancastagnaio prosegue senza soluzione di continuità ad Est verso l'area del permesso in oggetto.

In questa zona è presente lo stesso potenziale acquifero profondo, di importanza regionale, ospitato nelle rocce carbonatiche Mesozoiche sepolte della Falda Toscana (TN1 di *Figura 2.1b*). Tale acquifero è sepolto sotto una coltre di rocce a bassa permeabilità rappresentata dalle Unità Liguri (LU) del Complesso flyschioide, costituite da argilliti, siltiti, arenarie, marne, e calcari e dai depositi clastici prevalentemente argillosi del Miocene - Pliocene (M-P-Q), che hanno colmato il bacino di Radicofani.

Le Unità Liguri del Complesso flyschioide sono tettonicamente sradicate dal loro originario substrato e, completamente disarticolate, risultano inglobate in una matrice prevalentemente argillitica che ne determina una permeabilità molto bassa e, quindi, fungono da acquicludi. L'acquifero carbonatico del primo serbatoio, invece, come testimoniato nei pozzi geotermici del Monte Amiata, è costituito dalle formazioni prevalentemente calcaree mesozoiche e, in particolare nell'area di Piancastagnaio, dai calcari, dolomie ed anidriti triassici della Formazione di Burano (TN1).

Per descrivere l'assetto strutturale e termico profondo dell'area di interesse sono state effettuate due ulteriori sezioni geologiche, considerando i dati stratigrafici di riferimento dei pozzi profondi: Piancastagnaio 11, Piancastagnaio 44, Piancastagnaio 36, Piancastagnaio 30, Piancastagnaio 27, Paglia 1, Radicofani 1 (riportati in *Tabella 2.2a*).

La prima B - B', riportata in *Figura 2.2a*, descrive la distribuzione stratigrafica e termica più regionale, circa fino al centro del bacino (Pozzo Radicofani 1, perforato per ricerche petrolifere nel 1970), la seconda C - C' (*Figura 2.2b*) descrive meglio l'assetto profondo dell'area del Permesso di Ricerca "Casa del Corto", nella zona dove si prevede di perforare i pozzi di progetto.

Il pozzo geotermico Paglia 1 (profondo 3.866 m), perforato a circa 800 m a NE del permesso "Casa del Corto", fornisce utili indicazioni di previsione stratigrafica e termica.

Infatti, sulla base delle considerazioni geologico strutturali precedentemente illustrate, i dati del pozzo possono essere estrapolati lateralmente all'interno del permesso, in quanto questo insiste nello stesso assetto strutturale, di spalla occidentale ad andamento circa N-S del Graben di Radicofani.

Tabella 2.2a Dati stratigrafici dei pozzi geotermici presenti nel Campo di Piancastagnaio

Pozzo	Cod	q (m s.l.m.)	Strati	Da (m da p.c.)	a (m da p.c.)	Formazioni Geologiche
PIANCASTAGNAIO 11	PC_11	435	1	0	467	Liguridi s.l.
			2	467	561	Form. Del Calcare Cavernoso
PIANCASTAGNAIO 27	Pc_27	400	1	0	550	Argille
			2	550	660	Argille e Sabbie
			3	660	990	Argille a Palombini
			4	990	1.190	Form. Calcare Cavernoso
			5	1.190	1.260	Gruppo del Verrucano
			6	1.260	1.735	Form. del Farma
			7	1.735	2.300	Filladi Cloritiche
			8	2.300	2.661	Form. del Farma
PIANCASTAGNAIO 30	PC_30	446	1	0	70	Argille
			2	70	400	Form. Calcari a Palombini
			3	400	448	Form. S. Fiora
			4	448	1.270	Form. Calcare Cavernoso
			5	1.270	3.340	Form. del Farma
			6	3.340	3.565	Calcare Termometamorfo
PIANCASTAGNAIO 36	PC_36	690	1	0	100	Calcari a Palombini
			2	100	500	Gruppo Form. S. Fiora
			3	500	1.220	Breccia Anidriti e Dolomie
			4	1.220	1.350	Gruppo Form. del Verrucano
			5	1.350	2.223,7	Form. del Farma

Pozzo	Cod	q (m s.l.m.)	Strati	Da (m da p.c.)	a (m da p.c.)	Formazioni Geologiche
PIANCASTAGNAIO 44	PC_44	380	1	0	220	Argille e Conglomerati
			2	220	555	Argille Siltose
			3	555	937	Calcari Dolomitici, Anidriti
Paglia 1	Paglia 1	330	1	0	1.020	Argille
			2	1.020	1.130	Conglomerati
			3	1.130	1.670	Gruppo Form. S. Fiora
			4	1.670	2.075	Form. Calcare Cavernoso
			5	2075	2.160	Gruppo del Verrucano
			6	2160	2.440	Form. del Farma
			7	2.440	3.215	Filladi Cloritiche
			8	3.215	3.866	Form. del Farma



Figura 2.2a Sezione Geologica B – B'

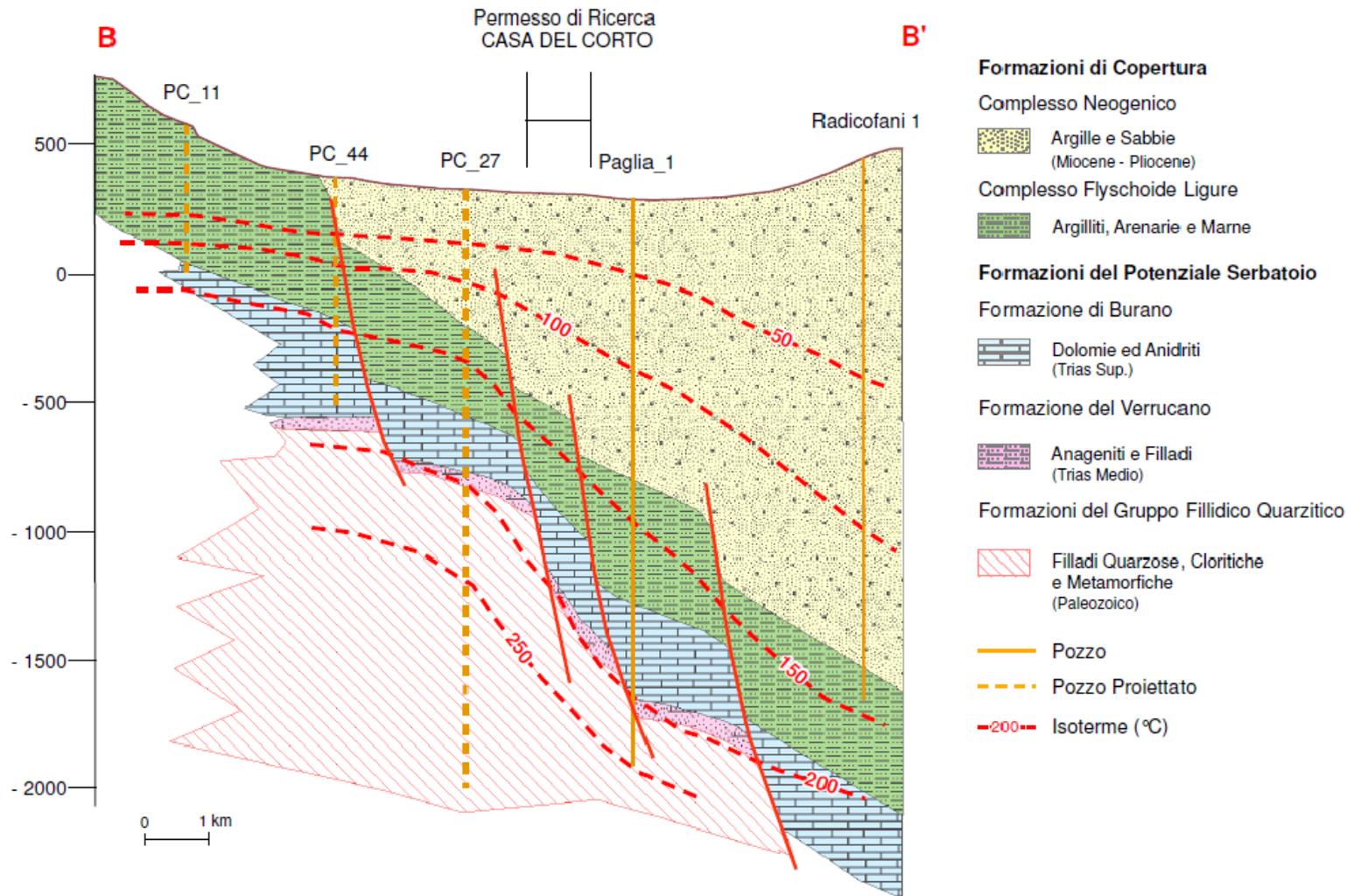
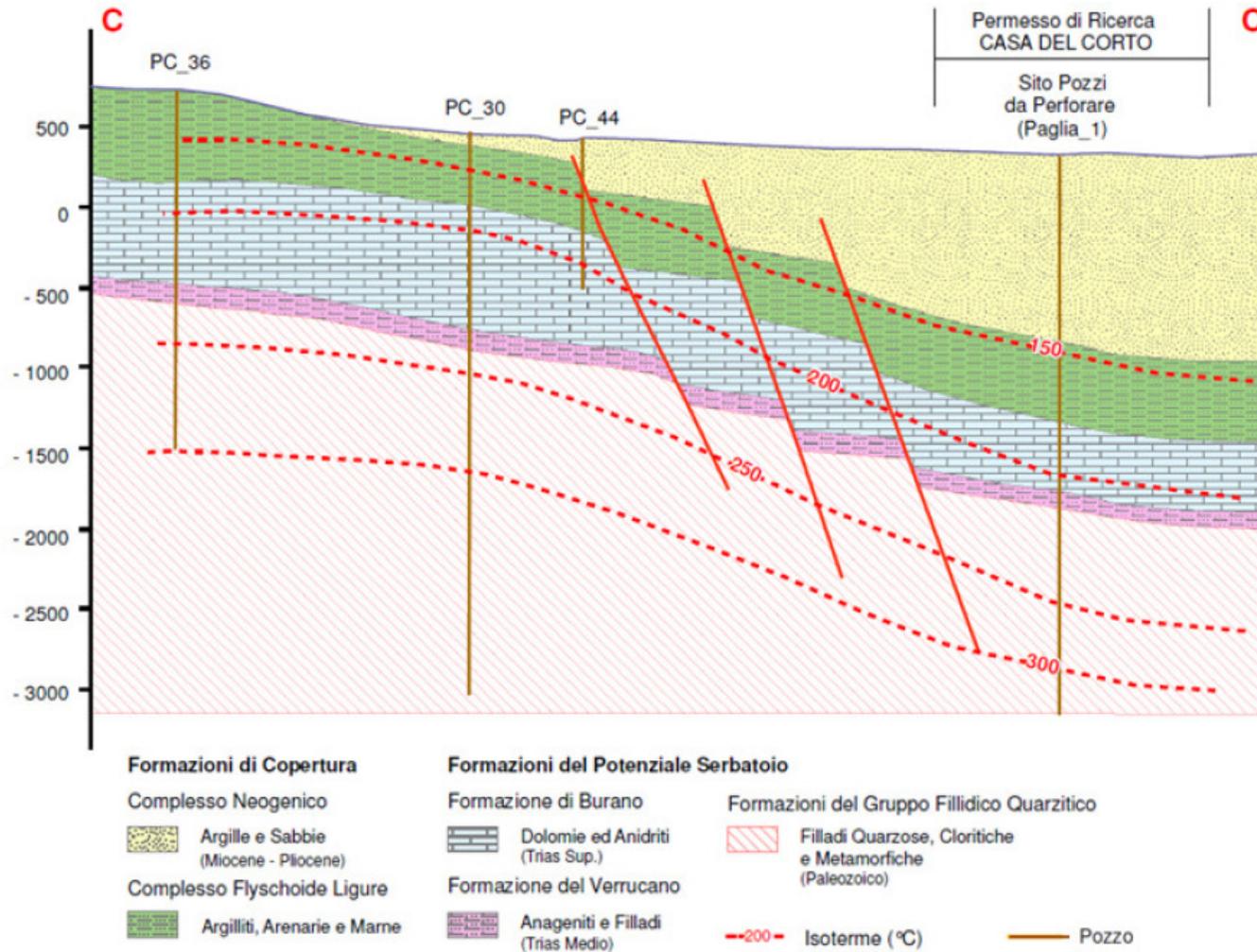


Figura 2.2b Sezione Geologica C – C'



L'unica linea sismica più vicina esistente è quella pubblicata (n. 13) in *Bonini & Sani (2002)* che, essendo più distante del vicino Pozzo Paglia 1, non fornisce migliori ed utili indicazioni estrapolabili verso l'area di interesse.

La sezione C - C' perciò ben descrive la situazione dell'area dei pozzi da perforare, in quanto permette di estendere le informazioni profonde dei pozzi di Piancastagnaio per una correlazione con quelle del pozzo Paglia 1.

La zona perforata del campo di Piancastagnaio è caratterizzata dalla continua presenza dei calcari e delle anidriti della Formazione di Burano; un sistema di faglie dirette ribassa verso Est tale formazione per più di 1.000 m, come risulta dalla stratigrafia del pozzo Paglia 1 (rispettando gli spessori del Complesso Neogenico e delle Unità Liguri, le faglie distensive ad alto angolo semplificano per comodità di rappresentazione il ribassamento verso Est, in quanto questo è anche dovuto ad un accomodamento sulle precedenti faglie a basso angolo che hanno determinato il bacino di Radicofani; *Broggi & Fabbrini, 2009*).

La Formazione di Burano nell'area costituisce un primo serbatoio geotermico, localmente permeabile e produttivo (175 - 200 °C, pozzi superficiali di Piancastagnaio). La sua temperatura rimane circa costante 175 - 180 °C anche ad Est del campo di Piancastagnaio (Baldi et al., 1993); da notare che, seguendo la geometria del tetto del serbatoio nella zona di Casa del Corto (Paglia 1) anche le isoterme sono ribassate più di 1.000 m (*Figura 2.2b*).

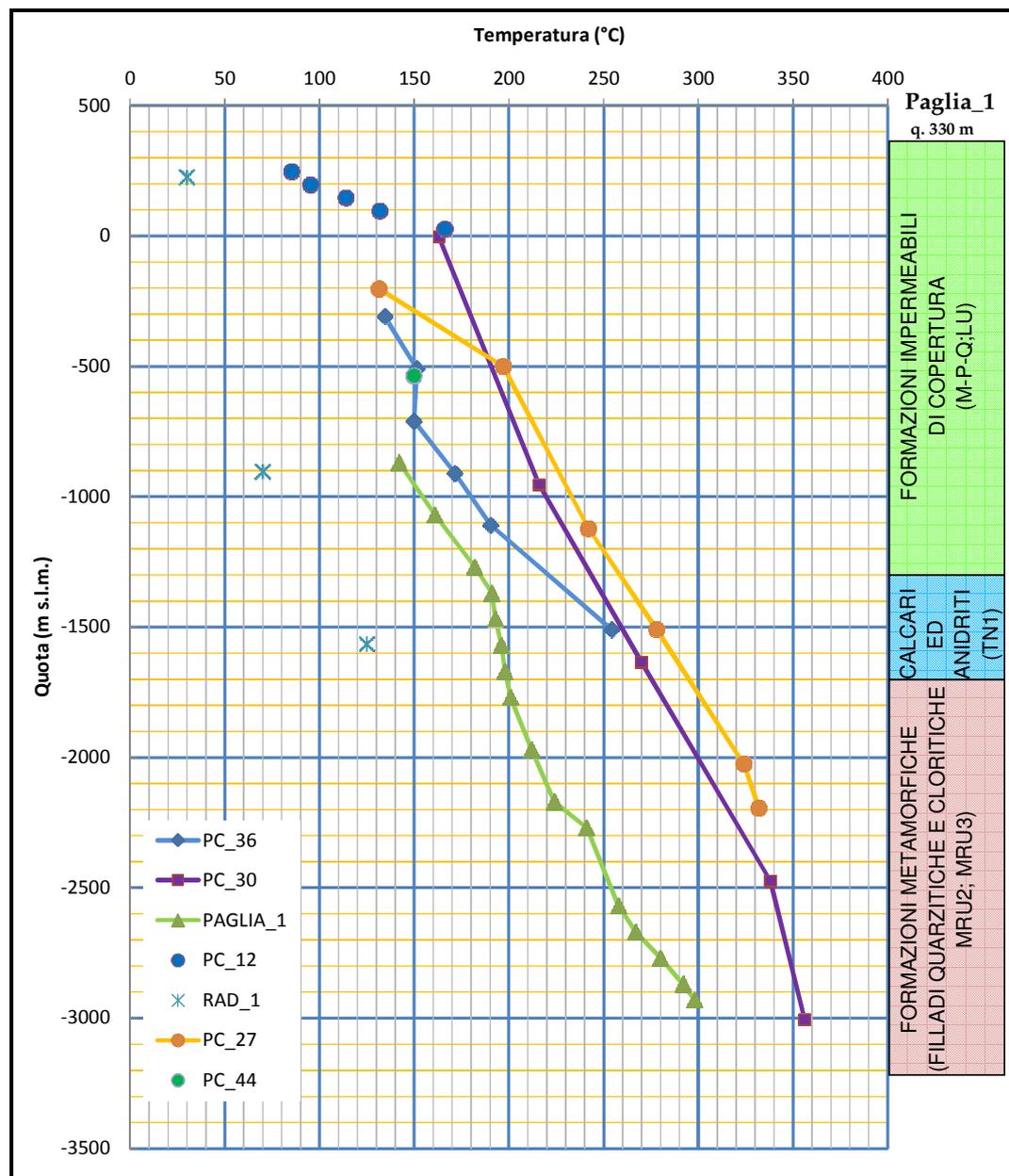
L'assetto termico profondo è meglio illustrato nella *Figura 2.2c*, dove sono state riportate le temperature misurate nei pozzi vicini tratte dalla Banca Dati del Inventario delle Risorse Geotermiche della Toscana (1987).

Nella zona di Piancastagnaio (ma anche in quella di Bagnore) è stato intercettato un secondo serbatoio più profondo (con profondità di poco maggiori di 2.000 m), all'interno delle formazioni metamorfiche, con temperature maggiori di 300 °C. Tale secondo serbatoio dovrebbe essere presente anche nell'area di interesse. I due serbatoi, quello più superficiale e quello profondo, seppur separati da un intervallo a permeabilità ridotta, risultano essere in equilibrio piezometrico (*Figura 2.2d - Barelli et al., 2010*).

I serbatoi geotermici menzionati sono tali se le rocce che li caratterizzano sono sufficientemente fratturate e quindi permeabili. Il pozzo Paglia 1, invece, purtroppo non ha attraversato localmente alcun orizzonte fratturato nelle rocce metamorfiche profonde ed è stato definito sterile; nelle schede dell'Inventario delle Risorse Geotermiche (*Enel, 1987*), infatti, non sono riportate informazioni relative ad intervalli produttivi nell'attraversamento delle rocce calcareo anidritiche triassiche del primo potenziale serbatoio geotermico (TN1).



Figura 2.2c Assetto Termico Profondo dei Pozzi Vicini all'Area d'Interesse. I dati di temperatura sono stati tratti dall'Inventario delle Risorse Geotermiche (Enel 1987) ed adeguati con informazioni di altre pubblicazioni (v. bibliografia). La colonna stratigrafica del pozzo Paglia 1 deriva dalla lettura delle schede dell'Inventario sopra menzionato.



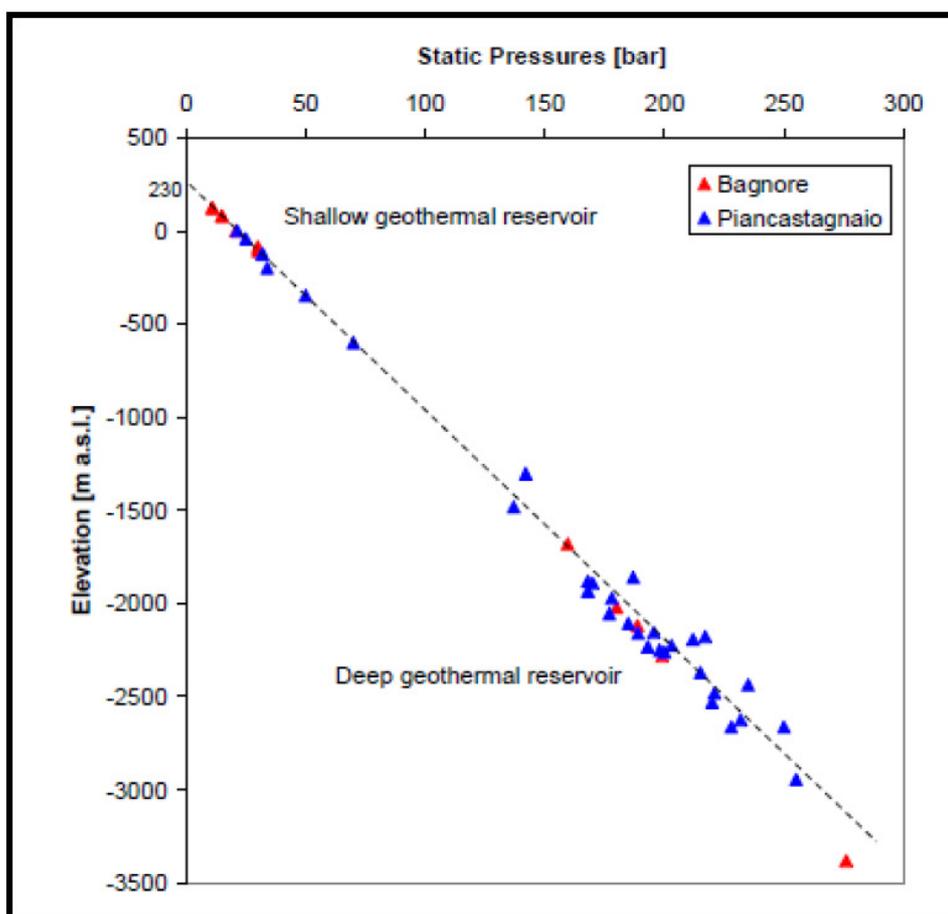
Il profilo termico del pozzo Paglia 1, illustrato nella Figura 2.2c, mostra nell'intervallo di profondità di tali rocce un minore aumento della temperatura (gradiente geotermico) possibilmente determinato da una omogenizzazione per circolazione convettiva.

Per concludere, le rocce del primo serbatoio geotermico nell'area del Permesso di Ricerca "Casa del Corto", sulla base delle valutazioni effettuate in considerazione del pozzo Paglia 1, sono prevedibili ad una profondità di circa

1.600 m dal piano campagna (p.c.); tale serbatoio presenterebbe al tetto una temperatura di almeno 170 - 180 °C.

Per quanto riguarda le pressioni di serbatoio il grafico di *Figura 2.2d* mostra una correlazione generale di tutti i pozzi geotermici del Monte Amiata (Bagnore e Piancastagnaio) che presentano tutti una pressione idrostatica con livello piezometrico a circa +230 m sul livello del mare; tale pressione appare rimanere costante nel corso degli anni, in presenza della coltivazione geotermica nei campi di Bagnore e Piancastagnaio (*Barelli et al., 2010*).

Figura 2.2d Distribuzione della Pressione Statica con la Profondità nei Pozzi dei Campi Geotermici di Bagnore e PianCastagnaio (**Barelli et al., 2010**)



Inoltre sono stati reperiti dati di portata di alcuni pozzi, dove disponibili, del vicino Campo Geotermico di Piancastagnaio (visibili in *Figura 2.1a*), i quali sono riportati nella seguente tabella.

Tabella 2.2b Portate pozzi del Campo Geotermico di Piancastagnaio (ENEL, 1987)

Pozzi	Portate (t/h)
PC_4	201,0
PC_11	63,6
PC_25	101,0
PC_25bis	95,0
PC_27	23,7
PC_29	77,0
PC_30	23,8
PC_35	67,1
PC_35A	100,0
PC_36	61,3

In analogia con il campo geotermico di Piancastagnaio, il primo serbatoio geotermico, testimoniato dalla presenza dei calcari ed anidriti, dovrebbe avere uno spessore di circa 400 m, al di sotto del quale potrebbe essere presente un intervallo a bassa permeabilità. Tale intervallo, con un gradiente geotermico simile a quello superficiale e dello spessore di almeno 1.500 m, potrebbe permettere un incremento della temperatura (> 300 °C) nel possibile serbatoio profondo (Tabella 2.2c).

Tabella 2.2c Descrizione dell'Assetto Tettonico Stratigrafico e Termico dell'Area del Permesso di Ricerca "Casa del Corto" (con riferimento al Pozzo Paglia 1)

da – a (dal p.c.)	Stratigrafia	Spessore (m)	T (°C)
0 – 1.100	Argille Complesso Neogenico	1.100	
1.100 – 1.600	Flysch Liguri	500	130 °C al tetto
1.600 – 2.000	Unità Toscana	400	170 – 200 °C (tetto - base)
da 2.000	Basamento Metamorfico		300 °C a circa 3.500 m (possibile 2° serbatoio)

2.3

STIMA CARATTERISTICHE PRODUTTIVE DEL CAMPO GEOTERMICO

Sulla base di quanto sopra, in assenza di specifiche prospezioni superficiali di conferma all'interno del Permesso, il serbatoio geotermico può essere ipotizzato alla profondità di circa 1.500 m (1.400 - 1.600 m) dal piano campagna, considerando la possibile variabilità laterale dell'andamento geologico strutturale. L'insieme del serbatoio, come risulta dall'esame dei profili di temperatura del pozzo Paglia 1 che mostra una circolazione convettiva tra 1.600 e 2.000 m di

profondità, potrà presentare una temperatura media di circa 180 °C e una pressione di serbatoio in equilibrio con la quota del livello piezometrico di 230 m s.l.m.

Poiché, la quota della postazione individuata per i pozzi di produzione è di 320 m s.l.m., il livello statico dei pozzi si attesterà intorno alla profondità di 90 m dal p.c.

Indipendentemente dalla effettiva profondità del serbatoio (1.400 – 1.600 m), la sua temperatura dovrebbe rimanere più o meno costante nell'ordine dei 180 °C, come evidenziato in *Figura 2.2b*.

In presenza di fratture produttive nelle rocce del serbatoio, in condizioni di flash controllato in superficie, è possibile prevedere una portata fino a circa 150 - 200 t/h per pozzo in dipendenza del profilo tecnico e delle caratteristiche produttive del singolo pozzo.

2.4

STIMA CARATTERISTICHE CHIMICHE DEL FLUIDO E TENDENZA ALL'INCROSTAZIONE

Dalle considerazioni esposte al paragrafo precedente si può desumere che le caratteristiche chimiche del fluido saranno paragonabili alle caratteristiche del fluido riscontrato nel serbatoio di Piancastagnaio e, quindi, caratterizzate dalla presenza di ammoniaca ed elevate quantità di acido borico (*Università di Siena, 2008*) e contenuti rilevanti di incondensabili (principalmente anidride carbonica).

In Cappetti et al., 1995 sono riportate le caratteristiche chimiche del pozzo Piancastagnaio 26, posto a circa 2,7 km a Nord-Ovest del Permesso di Ricerca, che produce fluido dal serbatoio profondo a 330 °C. Le analisi eseguite sul liquido separato a pressione atmosferica mostrano una chimica caratterizzata da contenuti di cloruro di sodio attorno a 5 gr/l, di acido borico oltre 10 gr/l, e dalla presenza di elevate quantità di silice (attorno a 700 mg/l) in condizioni di serbatoio.

Poco si conosce sull'eventuale arricchimento in carbonato di calcio e diminuzione nel contenuto di silice e acido borico che le minori temperature (rispetto al serbatoio profondo) che caratterizzano la porzione di serbatoio interessata dal presente progetto, indubbiamente favorirebbero. Si può pertanto ragionevolmente assumere una scarsa tendenza all'incrostazione da silice (ipotizzandone il contenuto pari a quello corrispondente alla solubilità del quarzo alla temperatura di 180 °C cioè circa 210 mg/l) ed una potenziale da carbonato di calcio che verrebbe favorito dalle basse temperature e dall'elevato contenuto di anidride carbonica.

L'eventuale tendenza alla precipitazione di carbonato di calcio potrebbe tuttavia essere combattuta con l'utilizzo di pompe immerse in grado di mantenere la pressione in tutto il circuito di sfruttamento superiore alla pressione di bolla del gas (si veda il *paragrafo 2.4.1*). Altra soluzione è l'iniezione di inibitori di



incrostazione in pozzo, pratica ad oggi usata in molti campi geotermici, il cui approfondimento verrà eventualmente valutato nello sviluppo del progetto definitivo.

Anche la quantità di gas incondensabili presenti nel liquido del serbatoio dei pozzi di “Casa del Corto” potrebbe riferirsi o al primo serbatoio superficiale di Piancastagnaio (sfruttato fino agli anni 2.000) o al serbatoio profondo.

E' molto probabile che, considerando la maggiore profondità del primo serbatoio nei pozzi del Permesso di Ricerca “Casa del Corto”, l'interazione tra i due serbatoi e la minor temperatura (rispetto al serbatoio profondo), il contenuto di incondensabili risulti compreso tra i valori del sistema profondo e di quello superficiale.

Il contenuto di incondensabili nel liquido del serbatoio profondo può essere dedotto dalle misure di percentuale di gas nel vapore geotermico che alimenta le centrali di PC3, PC4 e PC5 riportandolo alle condizioni di serbatoio (liquido a circa 330 °C di temperatura). Le misure eseguite da ARPAT sulle Centrali indicano un contenuto medio di gas nel vapore di alimentazione alle centrali di circa l'8% in peso che, riportato alle condizioni di serbatoio, vale circa 1,8 % sul fluido totale.

Il contenuto di incondensabili presenti nel serbatoio superficiale può essere dedotto dai valori di pressione di anidride carbonica presenti all'inizio dello sfruttamento del primo serbatoio di Piancastagnaio e che aveva circa 20 bar alla temperatura di 220 - 230 °C (*Barelli et al., 2010; Cappetti et al., 2010*).

Considerando i valori di costante di Henry, riportati in Corsi 1987, per una soluzione 1 molare in NaCl si può valutare la percentuale di gas in circa 0,7%.

Il contenuto di gas che ci si attende sarà pertanto compreso tra questi due valori (0,7 e 1,8%).

In sede progettuale si assume conservativamente il valore di 1,8%, che sarebbe da attribuire più ad un secondo e più profondo serbatoio che non al primo serbatoio; nell'area del permesso Casa del Corto, il primo serbatoio (oggetto del progetto) si colloca ad una profondità intermedia, se riferita a quelle dei serbatoi del campo geotermico di Piancastagnaio.

2.4.1

Considerazioni sulla Possibilità di Incrostazioni

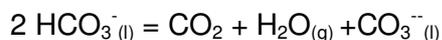
Come sopra riportato, in considerazione della temperatura e delle caratteristiche del serbatoio, si potrebbe verificare la possibilità di incrostazioni in pozzo e negli impianti di superficie per la precipitazione di carbonato di calcio.

Il fenomeno di scaling da carbonato di calcio si origina, infatti, dal fatto che la soluzione nel serbatoio è satura in ioni Ca^{++} , HCO_3^- e CO_3^{--} essendo in equilibrio con un gas (prevalentemente anidride carbonica).



La produzione di fluido con flash in pozzo provoca la diminuzione della pressione che passa da valori dell'ordine di 140 bar, presenti nel serbatoio, a valori di circa 8-9 bar dell'erogazione spontanea in superficie.

Tale abbassamento di pressione provoca lo spostamento sulla destra del seguente equilibrio:



Quindi, l'aumento di concentrazione degli ioni CO_3^{--} , che fa superare il prodotto di solubilità della calcite provocandone la deposizione.

Una discussione più dettagliata degli equilibri chimici è riportata in bibliografia (*Corsi, 1986 e 1987 e Michels, 1981*).

Tali incrostazioni possono essere prevenute mantenendo la pressione, in tutto il circuito utilizzatore, a valori tali per cui gli incondensabili presenti nel fluido geotermico rimangano disciolti nel liquido (circa 60 bar), impedendo l'evoluzione dell'anidride carbonica dalla soluzione e mantenendo liquido il fluido uscente dai pozzi produttivi.

Un'altra possibile soluzione impiegata per controllare i fenomeni di incrostazione è l'iniezione di inibitori in pozzo (*Corsi, Culivicchi, Sabatelli, 1985*). Tale sistema presuppone, tuttavia, la ricompressione e la reiniezione del gas incondensabile per mantenere la caratteristica di progetto di emissione nulla.

Per i diversi metodi di trattamento delle incrostazioni si rimanda a *R. Corsi 1986, 1987*.

Nel presente progetto si propone, salvo ulteriori verifiche da effettuare per la reiniezione dei gas incondensabili, l'utilizzazione di una pompa immersa, che mantenga in tutto il circuito di sfruttamento del calore una pressione sempre maggiore della pressione alla quale l'anidride carbonica, disciolta nella soluzione geotermica, si libera. In questo modo, sarà possibile impedire in ogni punto del circuito la deposizione di incrostazioni e la liberazione del gas fino alla reiniezione finale.

Un potenziale problema connesso allo sfruttamento dell'energia geotermica è, inoltre, dato dalla possibilità di formazione di incrostazioni derivanti dalla precipitazione di silice amorfa a seguito della diminuzione di temperatura connessa allo sfruttamento (*Corsi R. 1986, 1987*). I problemi di incrostazione da silice sono soprattutto presenti in campi ad alta temperatura i cui fluidi contengono quantità rilevanti di silice, generalmente saturi in quarzo alla temperatura di serbatoio.

Poiché la cinetica di deposizione della silice amorfa è lenta, in quasi tutti i campi geotermici ad alta temperatura è tollerabile una leggera sovra saturazione, in



quanto, la lentezza della deposizione non permette la formazione di incrostazioni rilevanti.

Nel caso particolare del sistema geotermico di “Casa del Corto” la temperatura del serbatoio prevista (circa 180 °C) permette la dissoluzione di una quantità di silice piuttosto modesta: la concentrazione di silice di equilibrio a 180 °C, è di circa 210 ppm (*Revised Quartz Solubility Temperature Dependence Equation along the water-vapor saturation curve* Mahendra P. Verma Geotermia, Proceedings WGC 2000 Kyushu Japan).

Tale valore di 210 mg/l deve essere confrontato con la concentrazione di saturazione ricavata dalle pubblicazioni di *Gunnarson and Arnorsson, 2000* e *Fournier and Rowe, 1973*, riportata nella seguente *Tabella 2.4.1a*.

Tabella 2.4.1a Concentrazioni di Equilibrio di Silice Amorfa in Soluzioni Acquose (Gunnarson and Arnorsson 2001 and Fournier and Rowe 1973)

Temperatura °C	Solubilità secondo Gunnarson and Arnorsson 2000 mg/l	Solubilità secondo Fournier & Rowe 1977 mg/l
40	122,8	152,9
50	146,1	180,7
60	172,0	211,3
70	200,4	244,8
80	231,5	281,3
90	265,1	320,8
100	301,2	363,3
110	339,5	408,7
120	380,0	457,0
130	422,6	508,3
140	466,9	562,4
150	512,7	619,3
160	559,9	678,9
170	608,1	741,1
180	657,0	806,0
190	706,4	873,3

Come si può notare a 80 °C la concentrazione di saturazione è superiore a 220mg/l con entrambe le correlazioni. Se ne deduce che anche a temperature dell'ordine di 70 °C non si verificheranno incrostazioni da silice e che le temperature di reiniezione potranno essere di 70 – 80 °C.

2.5 *MODELLO DEL SERBATOIO - CRITERI DI PRODUZIONE E OBIETTIVI DELL'IMPIANTO PILOTA*

2.5.1 *Scelta del Numero e dell'Ubicazione dei Pozzi*

Considerate le caratteristiche geotermiche sopra delineate, in particolare la temperatura e pressione dei fluidi di serbatoio e l'estensione del Permesso di Ricerca, ci si è posti l'obiettivo di verificare in prima approssimazione la possibilità di poter eseguire la sperimentazione su un impianto pilota da 5 MW medi annui immessi in rete.

Considerando le condizioni di pressione e temperatura del serbatoio e il contenuto di gas incondensabili, si sono calcolate le curve caratteristiche dei pozzi per diversi valori di produttività utilizzando il simulatore descritto in *Barelli et al. 1981*. Si è potuto verificare che i pozzi naturalmente sono in grado di produrre tra 150 e 250 t/h con flash in pozzo (60 bar) a circa 900 m di profondità.

Al fine di mantenere il fluido geotermico liquido ad una pressione superiore rispetto alla pressione di bolla del gas incondensabile sarà necessario posizionare le pompe immerse alla profondità di circa 900 m con una prevalenza di circa 90 bar e quindi con una potenza specifica di circa 400kW/100T/h.

La portata di fluido geotermico necessaria per alimentare un gruppo ORC in grado di produrre 5 MW medi netti sarà quindi pari a circa 460 t/h.

Si prevede pertanto la necessità di utilizzare 3 pozzi produttivi e 3 reiniettivi.

Si è perciò ipotizzato di utilizzare due sole postazioni su cui perforare tre pozzi produttivi e tre iniettivi (*Figura 1.1a*).

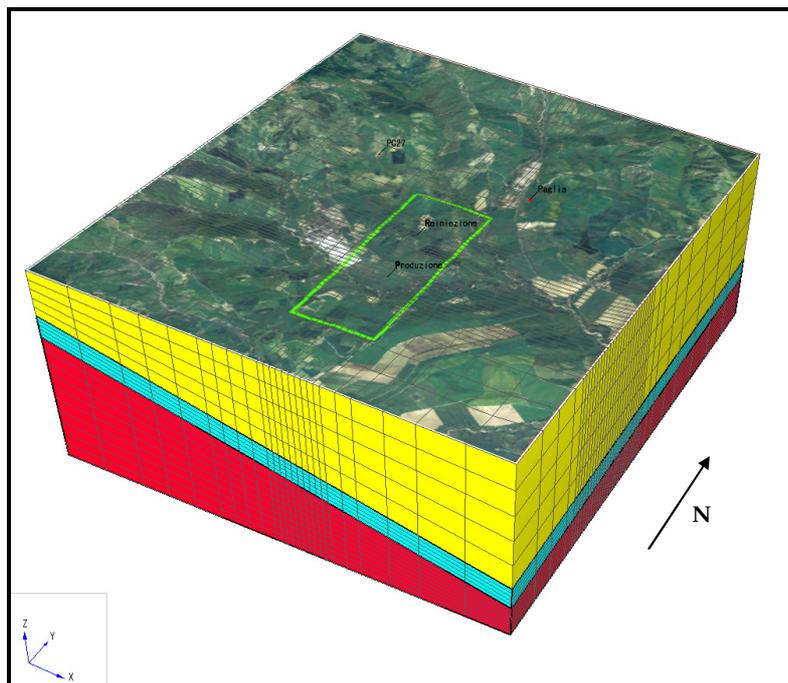
2.5.2 *Modellazione Numerica del Serbatoio Geotermico - Previsione degli effetti della produzione/reiniezione sul comportamento del sistema geotermico*

Per determinare le risposte del serbatoio geotermico, derivanti dall'attività di produzione e reiniezione del fluido, è stata effettuata una modellazione numerica del serbatoio geotermico mediante l'utilizzo del codice di calcolo TOUGH 2 (*Pruess, 1991*) inserendo come dati di input i dati geologici, idrogeologici e geotermici riportati nel presente capitolo.

Al fine di ricomprendere i pozzi già perforati e imporre condizioni al contorno non influenzate dalle eventuali produzioni si è modellato il volume di serbatoio geotermico sottostante un'area 72 km² (9 X 8 km), all'interno della quale è compresa l'area di 5 km² del Permesso Casa del Corto. Il volume è stato suddiviso in 18.500 celle infittendo la griglia in prossimità della zona interessata dalla coltivazione geotermica.

In altre parole è stato ricostruito il Modello Geologico Tridimensionale schematico (*Figura 2.5.2a*) dell'intero spessore del serbatoio (Formazione di Burano in celeste in figura), in accordo con quanto descritto nei precedenti paragrafi.

Figura 2.5.2a Modello Geologico Tridimensionale di Riferimento (in verde il perimetro del Permesso di Ricerca "Casa del Corto").



In particolare, i principali parametri considerati per la modellazione del serbatoio sono: la permeabilità pari a 5 E-14 m^2 , porosità 2%, conducibilità termica $6 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.

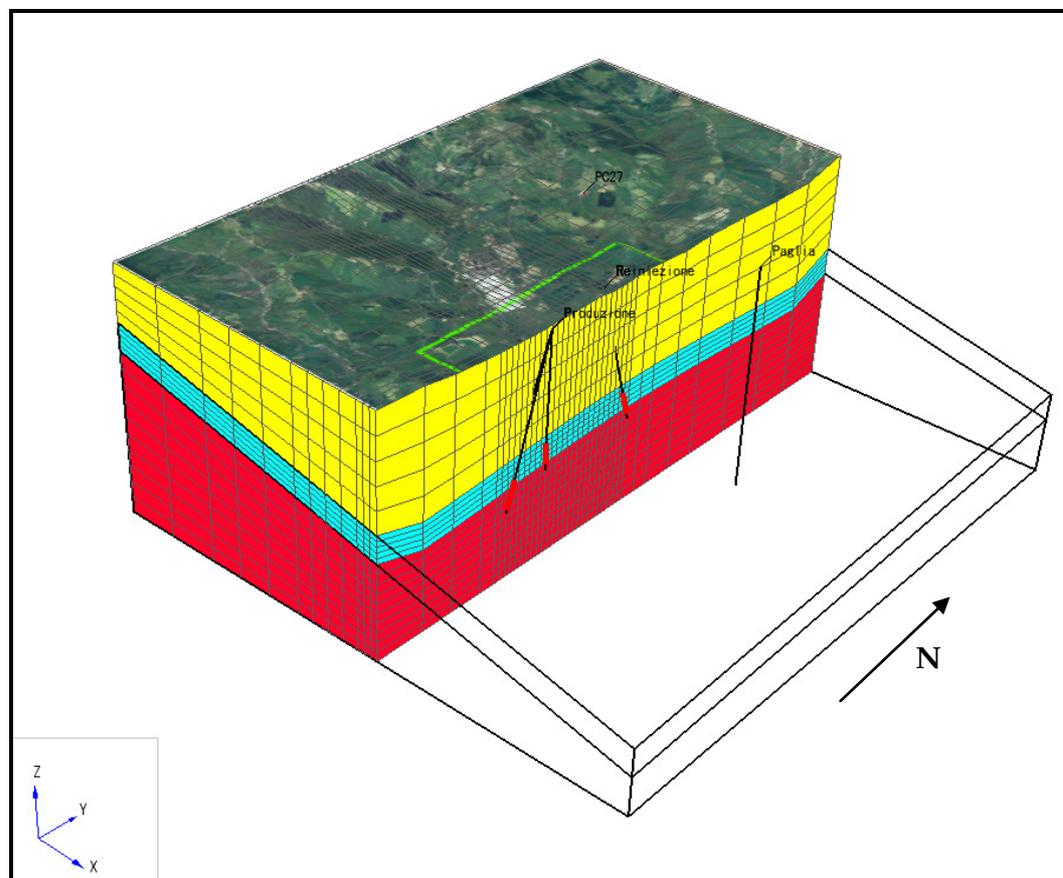
E' stata attribuita una temperatura di $180 \text{ }^\circ\text{C}$ al layer immediatamente sovrastante il tetto del serbatoio ed una temperatura pari a $300 \text{ }^\circ\text{C}$ alla base dell'intero volume modellato.

Per la definizione della pressione iniziale è stata definita una funzione che ricalcola il valore con la profondità a partire da un livello idrostatico pari a $+ 230 \text{ m s.l.m.}$.

I valori di temperatura e pressione restituiti dal modello, dopo un tempo di simulazione di 1.000.000 di anni, sono stati confrontati con quelli misurati nel vicino pozzo Paglia 1 e nel pozzo PC 27 (considerato questo come rappresentativo delle caratteristiche del limitrofo campo geotermico di Piancastagnaio).

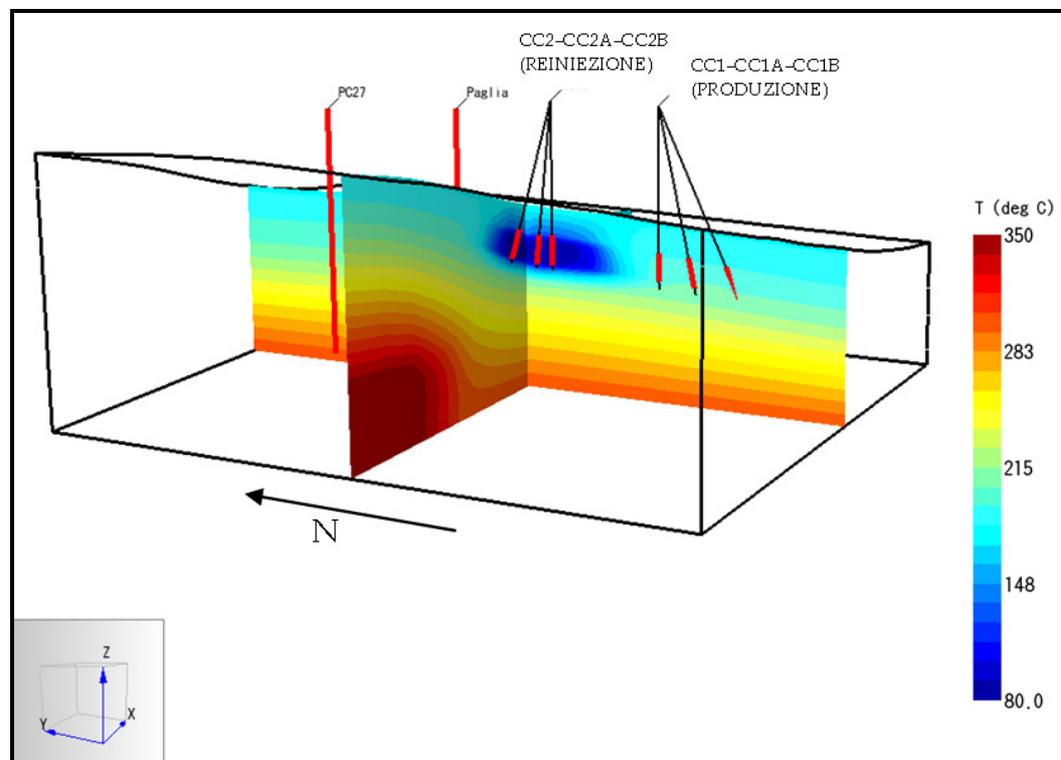
Una volta ottenuto il modello numerico più rappresentativo delle condizioni naturali, questo è stato perturbato mediante l'aggiunta dei tre pozzi di produzione e dei tre pozzi di reiniezione di progetto (Figura 2.5.2b), considerando una portata di ogni pozzo di produzione pari a 150 t/h , una portata di reiniezione per ogni pozzo pari a 150 t/h ed una temperatura di reiniezione pari a $80 \text{ }^\circ\text{C}$.

Figura 2.5.2b Sezione Rappresentativa del Modello Geologico Tridimensionale di Riferimento Passante per le Postazioni di Produzione e di Reiniezione in Progetto (le parti in rosso delle traiettorie dei pozzi rappresentano l'attraversamento dello spessore del serbatoio geotermico).



La modellazione numerica mostra che la temperatura del fluido geotermico nella parte produttiva del serbatoio rimane sostanzialmente la stessa per un periodo superiore a 50 anni, nonostante la reiniezione di fluido raffreddato nei pozzi del polo reiniettivo. A titolo illustrativo la *Figura 2.5.2c* mostra che dopo 100 anni la propagazione del disturbo termico, non ha ancora raggiunto la zona del serbatoio interessata dai pozzi di produzione.

Figura 2.5.2c Distribuzione delle Temperature dopo 100 anni dall'inizio della coltivazione, con produzione e reiniezione, rappresentate su due sezioni passanti in prossimità dei pozzi di processo (in blu il disturbo termico indotto dalla reiniezione, 80 °C).



In particolare, i pozzi di produzione mostrano una temperatura di emungimento di circa 198 °C (restituita dal modello in accordo con le temperature misurate nel vicino pozzo Paglia 1), che rimane costante nel lungo periodo, con una diminuzione trascurabile minore di 1 °C in 50 anni. In *Figura 2.5.2d* è rappresentato l'andamento della temperatura nel pozzo verticale CC1.

La reiniezione crea una perturbazione termica nell'intorno dei pozzi reiniettivi, infatti, la porzione di serbatoio interessata perde circa 100 °C in 5 anni e si stabilizza sugli 80 °C in 10 anni (*Figura 2.5.2e*).

Figura 2.5.2d Andamento nel Tempo della Temperatura in corrispondenza della cella centrale del serbatoio intercettato dal pozzo Produzione Verticale CC1.

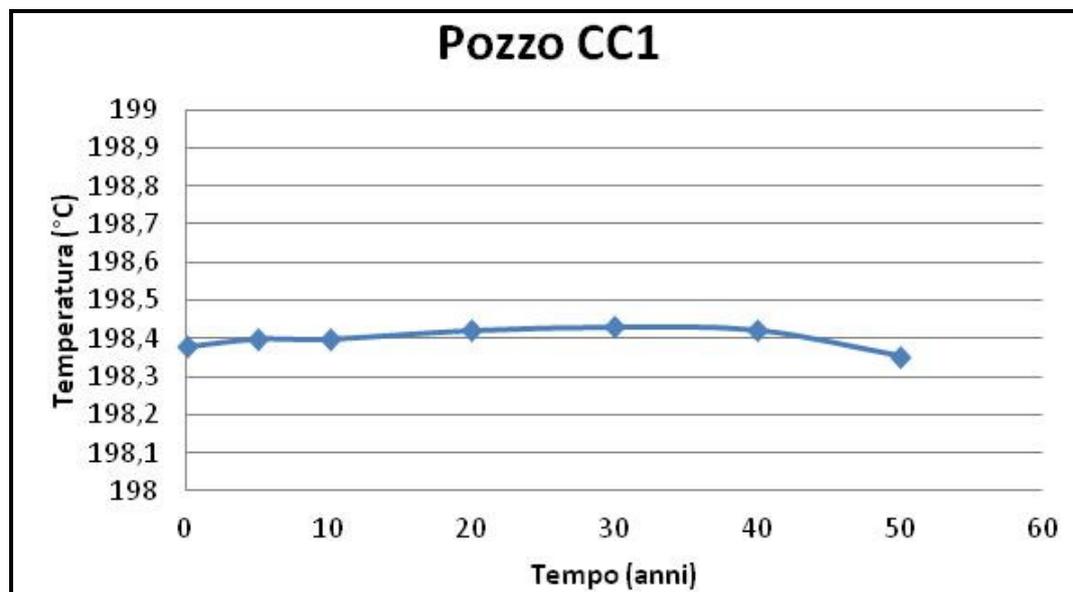
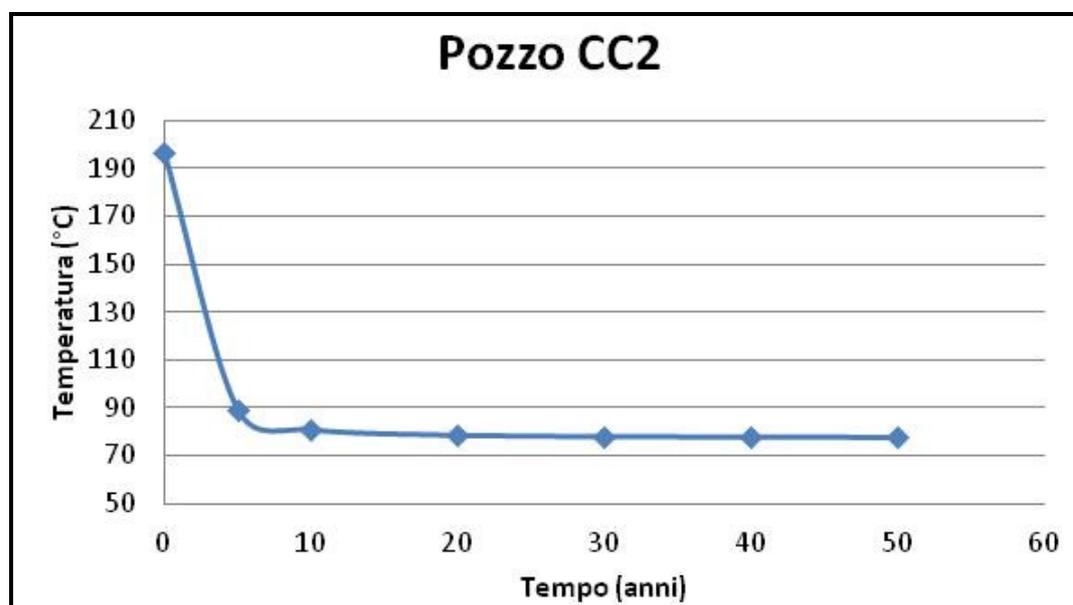


Figura 2.5.2e Andamento nel Tempo della Temperatura in corrispondenza della cella centrale del serbatoio intercettato dal pozzo Reiniettivo Verticale CC2.



La totale movimentazione di fluido genera nelle porzioni di serbatoio interessate modeste variazioni di pressioni nel tempo.

Infatti, nella zona di reiniezione si riscontrano incrementi di pressione di circa 3 bar a 10 anni e 4.5 bar a 25 anni (Figura 2.5.2f).

Nella zona di produzione si rileva una analoga diminuzione di pressione, pari a circa 4 bar in 5 anni; successivamente la pressione rimane stabilizzata nel tempo (Figura 2.5.2g).

La modellazione effettuata in buona approssimazione conferma la sostenibilità temporale della produzione e reiniezione del fluido per il tempo di progetto (25 - 30 anni), con circa 150 t/h di fluido per ogni pozzo ad una temperatura di emungimento che rimane costante a circa 190 °C, senza risentire del disturbo termico della stessa portata di reiniezione fredda a 80 °C. La coltivazione del serbatoio geotermico descritta comporta in produzione e reiniezione disturbi di pressione modesti di soli 4 -5 bar.

Figura 2.5.2f Andamento nel Tempo della variazione di Pressione in corrispondenza delle celle del serbatoio intercettate dal pozzo Reiniettivo Verticale CC2

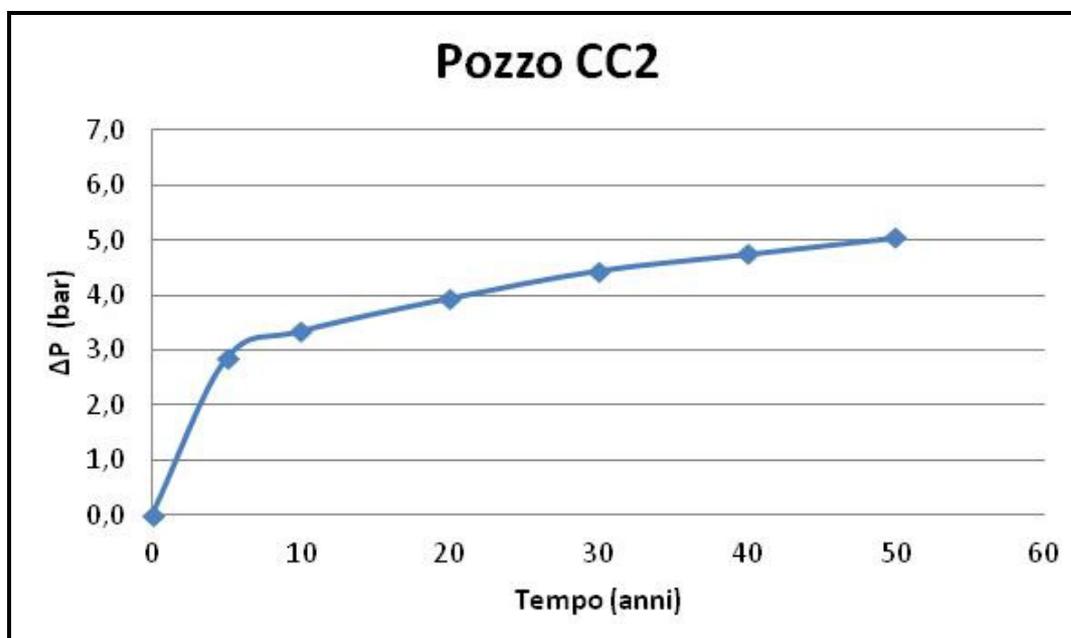
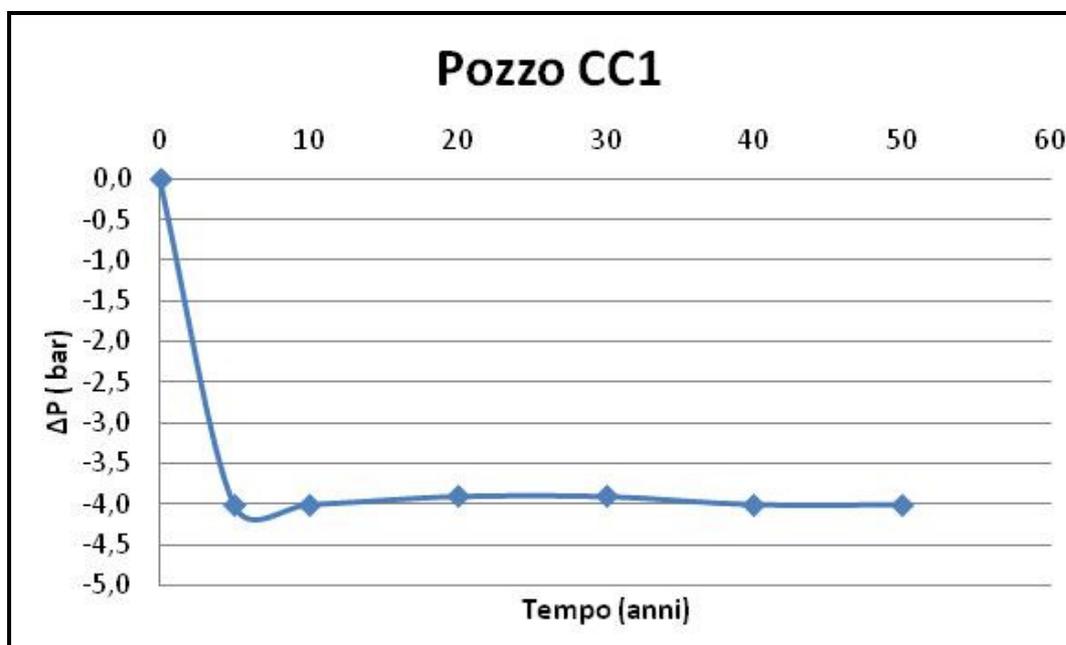


Figura 2.5.2g Andamento nel Tempo della variazione di Pressione in corrispondenza delle celle del serbatoio intercettate dal pozzo Produttivo Verticale CC1



2.5.3

Sismicità Indotta e Subsidenza

Sismicità Indotta

Le attività geotermiche possono essere generalmente associate a variazioni del campo di sforzi locali che agisce nella crosta superficiale (generalmente nello strato di interesse dei pozzi di produzione e reiniezione, tra 1 e 4 km di profondità), con modesta influenza sull'attività microsismica nelle aree di sfruttamento. Gli eventi microsismici associati a queste attività sono generalmente di bassa magnitudo (inferiore a 2.0) e, tranne in casi particolari, difficilmente avvertiti dalla popolazione. L'effetto principale riguarda la variazione dello stress nelle rocce intorno al reservoir e la variazione di pressione di poro nelle rocce, in particolare a seguito dei processi di reiniezione dei fluidi utilizzati per la produzione di energia.

La modellazione numerica del serbatoio geotermico di "Casa del Corto" mostra che nella zona di reiniezione, dopo 22 anni di sfruttamento, l'incremento di pressione di 0,3 MPa è contenuto all'interno di un volume pari a $2.67 \cdot 10^7 \text{ m}^3$, mentre dopo 50 anni, la stessa sovra-pressione è contenuta all'interno di un volume pari a $1.01 \cdot 10^8 \text{ m}^3$.

La magnitudo massima stimata, per terremoti indotti dall'attività di reiniezione dell'impianto geotermico di "Casa del Corto", per valori di stress drop pari a 5 bar è pari a 2.4 dopo 22 anni.

La valutazione sulla magnitudo massima dei terremoti indotti dall'attività di reiniezione dei condensati in pozzo, è estremamente cautelativa in quanto la soglia di pressione assunta, tuttavia, potrebbe essere inferiore a quella effettiva, così come evidenziato in molti casi reali di reiniezione dei fluidi. In questo caso i volumi sismogenetici perturbati dal campo di pressione potrebbero essere inferiori e di conseguenza anche le magnitudo massime attese.

Inoltre, è da tener presente che si è assunto il caso peggiore, e meno probabile, in cui la superficie di una faglia attraversa la sezione massima del volume in cui si oltrepassa la soglia minima d'incremento di pressione.

Subsidenza

In superficie, l'effetto di rimozione dei fluidi si può tradurre nel fenomeno della "subsidenza" del suolo, ovvero nell'abbassamento della superficie topografica; mentre l'effetto della reiniezione di fluidi all'interno del serbatoio geotermico, al contrario, può provocare un innalzamento della superficie topografica.

A seguito della modellazione numerica effettuata, la subsidenza massima stimata per il caso esaminato è dell'ordine dei 2 cm, dopo 22 e 50 anni di tempo simulato, in corrispondenza dell'area posta al disopra del fondo pozzo dei pozzi produttivi. Il sollevamento, che può verificarsi in corrispondenza dell'area posta al disopra del fondo pozzo reiniettivo, risulta essere pari a circa 2 cm per lo stesso tempo simulato.

2.5.4 *Pressione di Reiniezione e di Produzione*

Aspetti tecnici preliminari

Dal punto di vista tecnico, per sovrappressione di reiniezione si intende il maggior valore di pressione, rispetto alla condizione statica, che si determina in prossimità delle fratture assorbenti a seguito dell'immissione della portata di reiniezione. Analogamente per abbassamento di pressione in produzione si indica il minor valore di pressione, rispetto alla condizione statica, che si verifica a seguito della produzione della portata dai pozzi produttori.

In gergo tecnico la portata assorbita per unità di pressione in condizione stabilizzate sulla frattura è chiamata *iniettività del pozzo* (t/h/bar) e, analogamente, la portata prodotta per un abbassamento di un bar della pressione di serbatoio è detta *indice di produttività* (t/h/bar).

Le caratteristiche iniettive del pozzo permettono di determinare univocamente per ogni valore di portata, la maggior pressione necessaria a smaltire il flusso.

Valori di Pressione di Re-Iniezione e Produzione

Il valore di produttività/iniettività dei pozzi, ricavata dalla modellazione numerica è dell'ordine di 35 ton/h/bar in condizioni stabilizzate. Questo comporta che, alla

portata di progetto (circa 150 t/h per pozzo), la sovrappressione che si stabilirà alla frattura per consentire l'iniezione del fluido geotermico sarà di circa 4,5 bar.

In condizioni di esercizio, il livello dinamico in pozzo presenterà un innalzamento in reiniezione ed un abbassamento in produzione di circa 40-50 m come precedentemente mostrato dalla modellazione numerica.



PROGETTO

P15_CAE_010

TITOLO

SVOLTA GEOTERMICA SRL:
PERMESSO DI RICERCA PER IMPIANTO PILOTA
GEOTERMICO "CASA DEL CORTO".DOCUMENTAZIONE TECNICA PER IL RICONOSCIMENTO DEL
CARATTERE NAZIONALE DELLA RISORSA GEOTERMICA

REV.

0

Pagina

31

Autori Vari, (1971). La Toscana Meridionale. Fondamenti Geologico Minerari per una Prospettiva di Valorizzazione delle Risorse Naturali - Rend. Soc. Ital. Min. e Petr., v. XXVII - Fascicolo Speciale;

Accaino F., Nicolich R., Tinivella U., (2006). Highlighting the Crustal Structures of Southern Tuscany: Contribution of the CROP18 Project. Boll. Geof. Teor. Appl. 47, pp.425-446;

Acocella, V., 2000. Space Accomodation by Roof Lifting During Pluton Emplacement ad Amiata Monte (Italy). Terra Nova 12, pp. 149-155;

Baldi P., Buonasorte G., Cameli G.M., Ceccarelli A., Ridolfi A., Grassi S., Squarci P., Taffi L., (1988). Tuscany - Latium Geothermal Province in "Atlas of "Geothermal Resources" in the European Community, Austria and Switzerland - Publication n. EUR 11026 of the Commission of the European Communities;

Baldi P., Bellani S., Ceccarelli A., Fiordelisi A., Rocchi G., Squarci P., Taffi L. (1995). Geothermal Anomalies and Structural Features of Southern Tuscany (Italy). - Proceedings World Geothermal Congress, Firenze, 18-31 Maggio 1995;

Baldi P., Buonasorte G., Ceccarelli A., Ridolfi A., D'offizi S., D'amore F., Grassi S., Squarci P., Taffi L., Boni C., Bono P., Di Filippo M., Martelli M.C., Lombardi M.C. & Toro B., (1982). Contributo alla Conoscenza delle Potenzialità Geotermiche della Toscana e del Lazio - Consiglio Nazionale delle Ricerche, PFE RF15;

Baldi P., Bertini G., Ceccarelli A., 1993. Geothermal Field of Central Italy – Resource Geology Special Issue, N. 16, pp. 69-81;

Baldi P., Bellani S., Ceccarelli A., Fiordelisi A., Squarci P., Taffi L., (1994). Correlazioni tra le Anomalie Termiche ed altri Elementi Geofisici e Strutturali della Toscana Meridionale. Studi Geologici Camerti, 1994, Vol. speciale 1, pp. 139-149;

Baldi P., Bellani, S., Buonasorte, G., Fiordelisi, A., and Manzella, A., (1998). Geothermal Exploration in Tuscany (Italy) for High Temperature Resources - World Renewable Energy Congress V (Florence, Italy), Part IV, pp.2733-2736;

Barelli A., Ceccarelli A., Dini I., Fiordelisi A., Giorgi N., Lovari F., Romagnoli P., (2010). A Review of the Mt. Amiata Geothermal System (Italy). Proceedings World Geothermal Congress 2010. Bali, Indonesia, 25-29 Aprile 2010;



Barelli A., Corsi R., Del Pizzo G., Scali C., 1982. A Two-Flow Model for Geothermal Wells in the Presence of Non-Condensable Gas. Geothermics, Vol. 11 N. 3, pp. 175 – 191.

Batini F., Bertini G., Gianelli G., Nicolich R., Pandeli E., Puxeddu M., (1986). Deep structure of the Geothermal Region of the Monte Amiata Volcano (Tuscany, Italy). Mem. Soc. Geol. It. 35, pp.755-759;

Batini F., Brogi A., Lazzarotto A., Liotta D., Pandeli E., (2003). Geological Features of Larderello-Travale and Mt Amiata Geothermal Areas (Southern Tuscany Italy) - Episodes 26, pp. 239-244;

Benelli M., Benelli M., Franci T., (2008). La Risorsa Geotermica per Usi Elettrici in Italia: Energia, Ambiente e Accessibilità Sociale. Amici della Terra, Firenze – Onlus, 2008;

Bernabini M., Bertini G., Cameli G.M., Dini I., Orlando L., (1995). Gravity Interpretation of the Mt Amiata Geothermal Area (Central Italy) - Proceedings of the World Geothermal Congress, Florence, Italy, pp. 859.862;

Bertini G., Cappetti G., Dini I., Lovari F., (1995). Deep Drilling Results and Updating of Geothermal Knowledge of the Monte Amiata Area Proceedings of the World Geothermal Congress 1995, Florence, Italy, pp. 1283-1286;

Bertini G., Buonasorte G., Cappetti G., Dini I., Ridolfi A., Stefani G., (2002). Tuscan Geothermal Fields. In "Atlas of "Geothermal Resources in Europe" - Publication N. Eur 17811 of The European Commission L. 2985. S. Hurter and R. Haenel Editors, Luxemburg;

Bertini G., Pandeli E., Principe C., Manzella A., (2008). Tettonica Gravitativa nell'Area del Monte Amiata: analisi e commenti. Rapporto intero IGG – CNR n. 10477;

Bonini M., Sani F., 2002. Extension and compression in the Northern Apennines (Italy) hinterland: Evidence from the late Miocene-Pliocene Siena – Radicofani Basin and Relations with Basement Structures. TECTONICS, Vol. 21, N. 3, 1010;

Brogi A., (2004b). Seismic Reflection and Borehole Logs as Tools for Tectonic and Stratigraphic Investigations: New Geological Data for the Tuscan Nappe exposed in the Northeastern Monte Amiata (Northern Apennines Italy) . Boll. Soc. Geol. It. 123, pp.189-199;

Brogi A., (2004c). Miocene Low-Angle Normal Detachments and Upper Crust Megaboudinage in the Mt Amiata Geothermal Area (Northern Apennines Italy) - Geodinamica Acta 17, pp.375-387;



Brogi A., (2008). The Structure of the Mt. Amiata Volcano-Geothermal Area (Northern Apennines, Italy): Neogene-Quaternary Compression Versus Extension. Int. J. Sci. (Geol Rundsch) 2008, doi 10.1007/s00531-007-0191;

Brogi A., Lazzarotto A., (2002). Deformazioni Sin-Collisionali nella Falda Toscana a Sud-Ovest del Monte Amiata (Toscana Meridionale): il sovrascorrimento di Monte Aquilaia. Boll. Soc. Geol. It. 121, pp.299-312;

Brogi A., Liotta D., (2008). Highly Extended Terrains, Lateral Segmentation of the Substratum, and Basin Development: the Middle - late Miocene Radicondoli Basin - Tectonics, vol. 27, TC5002, doi 10.1029/2007TC002188, 2008;

Brogi A., 2008. The Structure of the Monte Amiata Volcano-Geothermal Area: Neogene-Quaternary Compression Vs Extension. Earth Science 2008; 97; pp. 677-703;

Brogi A., Fabbrini L., 2009. Extensional and Strike-slip Tectonics Across the Monte Amiata-Monte Cetona Transect (Northern Apennines, Italy) and Seismotectonic Implication. TECTO – 124509; n. pag 15;

Calamai A., Cataldi R., Squarci P., Taffi L., (1970). Geology Geophysics and hydrogeology of the Monte Amiata Geothermal Field - Geothermics 1, pp.1.9;

Cappetti, G., D'Olimpio P., Sabatelli F., Tarquini, B. (1995). Inhibition of Antimony Sulphide Scale by Chemical Additives: Laboratory and Field Test Results. World Geothermal Congress, Florence, Italy, May 18-31, 1995. 2503-2507.

Cappetti G., Romagnoli P., Sabatelli F., (2010). Geothermal Power Generation in Italy 2005-2009 Update Report. Proceeding World Geothermal Congress 2010. Bali, Indonesia 25-29 Aprile 2010;

Corsi R., Culivicchi G., Sabatelli F., (1985). Laboratory and field testing of calcium carbonate scale inhibitors. Symposium on Geothermal Energy, Hawaii. 1985.

Corsi R., (1986). Scaling and Corrosion in geothermal equipment: problems and preventive measurements. Geothermics, 15/5.

Corsi R., (1987). Engineering aspects of CaCO₃ and SiO₂ scaling. NATO course on "Geothermal Reservoir Engineering", Antalya, Turkey, July 1987.

Decandia F.A., Lazzarotto A., Liotta D., (1993). La Serie Ridotta nel Quadro dell'Evoluzione Geologica della Toscana Meridionale. Mem. Soc. Geol. It. 49, pp.181-190;

Decandia F.A., Lazzarotto A., Liotta D., (2001). Structural Features of Southern Tuscany Italy - Ofioliti 26, pp.287-300;



PROGETTO

P15_CAE_010

TITOLO

SVOLTA GEOTERMICA SRL:
PERMESSO DI RICERCA PER IMPIANTO PILOTA
GEOTERMICO "CASA DEL CORTO".
DOCUMENTAZIONE TECNICA PER IL RICONOSCIMENTO DEL
CARATTERE NAZIONALE DELLA RISORSA GEOTERMICA

REV.

0

Pagina

34

Dini I., Ceccarelli A., Brogi A., Giorgi N., Galleni P., Rossi L., 2010. Geological reconstruction of the Base of the Mt. Amiata Volcanic Complex - Proceedings World Geothermal Congress 2010. Bali, Indonesia, 25-29 Aprile 2010;

Enel, (1995). L'Energia Geotermica in Toscana e nel Lazio Settentrionale. Gaidbooks feeldtreaps World Geothermal Congress 1995, Firenze;

Enel, (2009). Acquiferi del Monte Amiata e Coltivazione Geotermica. Integrazioni Riassetto di Piancastagnaio;

Enel, Eni, CNR, Enea (1988). "Indagine d'insieme sul Territorio Nazionale" in Inventario delle Risorse Geotermiche Nazionali - Rapporto Ministero dell'Industria, del Commercio e dell'Artigianato, Legge 9/12/1986 n. 896;

ENEL, Eni, CNR, Enea 1987. Inventario delle Risorse Geotermiche Nazionali – Regione Toscana – Rapporto ed Allegati;

Ferrari L., Conticelli S., Burlamacchi L., Manetti P., 1996. Vulcanological Evolution of the Monte Amiata, South Tuscany: New Geological and Petrochemical Data. *Vulcanologica* 8, pp. 41-56;

Ferrari L., Tonarini S., 1985. Radiometric Geochronology in Tuscany; Result and Problems – *Rend. S.I.M.P.*, 40, pp 111-123;

Finetti I.R., (2006). Basic Regional Crustal Setting and Superimposed Local Pluton-Intrusion Related Tectonics in the Larderello-Monte Amiata Geothermal Province, from integrated CROP Seismic Data - *Boll Soc Geol It* 125, pp.117-146

Fiordelisi A., Manzella A., Buonasorte G., Larsen J.C., Mackie R.L., (2000). Mt Methodology in the Detection of Deep Waterdominated Geothermal Systems - Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, May 28.June 10, 2000

Fournier R.O., (1973). The solubility of amorphous silica in water at high temperature and high pressures. *American Mineralogist*, vol 62, pp. 1052-1056, 1973;

Gianelli G., Manzella A., Puxeddu M., (1997). Crustal Models of the Geothermal Areas of Southern Tuscany - *Tectonophysics* 281, pp.221-239;

Gianelli G., Puxeddu M., Batini F., Bertini G., Dini I., Pandeli E., Nicolich R., (1988). Geological Model of a Young Volcanoplutonic System: the Geothermal Region of Monte Amiata (Tuscany Italy) - *Geothermics* 17, pp.719-734;

Gunnarson S., Arnosson A., (1987). Amorphous silica solubility and Thermodynamic Properties of H₄SiO₄ in the range of 0-350°at Psat. *Geochimica et Cosmochimica Acta* Vol 64,13, July 1987.



PROGETTO

P15_CAE_010

TITOLO

SVOLTA GEOTERMICA SRL:
PERMESSO DI RICERCA PER IMPIANTO PILOTA
GEOTERMICO "CASA DEL CORTO".
DOCUMENTAZIONE TECNICA PER IL RICONOSCIMENTO DEL
CARATTERE NAZIONALE DELLA RISORSA GEOTERMICA

REV.

0

Pagina

35

Lazzarotto A., (1993). Elementi di Geologia. La Storia Naturale della Toscana Meridionale, Giusti F. Pizzi Editore Edizione fuori commercio, riservata Monte dei Paschi di Siena, 1993;

Liotta D., (1994). Structural Features of the Radicofani Basin along the Piancastagnaio (Mt Amiata) - S. Casciano dei Bagni (Mt Cetona) Cross Section . Mem. Soc. Geol. It. 48, pp.401-408;

Marinelli G., Barberi F., Cioni R., (1993). Sollevamenti neogenici ed intrusioni acide della Toscana e del Lazio settentrionale. Mem. Soc. Geol. It. 49, pp.279-288;

Michels D. E., (1981), CO₂ and Carbonate Chemistry Applied to Geothermal Engineering, Geothermal Reservoir Engineering Management Program, Earth and Science Division, Lawrence Berkley Laboratory, Report LBL-11509, pp 27

Nirta G., Pandeli E., Principi G., Bertini G., Cipriani N., (2005). The Ligurian Units of Southern Tuscany . Boll. Soc. Geol. It. Spec. 3, pp.29-54;

Orlando L., Bernabini M., Cameli G.M., Dini I., Bertini G., (1994). Interpretazione Preliminare del Minimo Gravimetrico del Monte Amiata. Stud. Geol. Camert. Spec. 1, pp.175-182;

Pandeli E., Puxeddu M., Giannelli G., Bertini G., Castellucci P., 1988. Paleozoic Sequences Crossed by Deep Drillings in Monte Amiata Geothermal Region (Italy). Bollettino della Soc. Geol. Ita. 107, pp. 593-606;

Pandeli E., Bertini G., Castellucci P., Morelli M., Monechi S., (2005). The Ligurian Subligurian and Tuscan Units of the Monte Amiata Geothermal Region (South-Eastern Tuscany): New Stratigraphic and Tectonic Data. Boll. Soc. Geol. It. Spec. 3, pp.55-71;

Pruess K., 1991. TOUGH2 – A General Purpose Numerical Simulator for Multiphase Fluid and Heat Flow. Report LBL 20400, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA;

Tinivella U., Accaino F., Rossi G., Nicolich R., (2005). Petrophysical Analysis of CROP18 Crustal Seismic Data. Boll. Soc. Geol. It. Spec. 3, pp.205-211;

Università di Siena (2008), Studio geostrutturale, idrogeologico e geochemico ambientale dell'area amiatina.



PROGETTO

P15_CAE_010

TITOLO

SVOLTA GEOTERMICA SRL:
 PERMESSO DI RICERCA PER IMPIANTO PILOTA
 GEOTERMICO "CASA DEL CORTO".
 DOCUMENTAZIONE TECNICA PER IL RICONOSCIMENTO DEL
 CARATTERE NAZIONALE DELLA RISORSA GEOTERMICA

REV.

0

Pagina

36