

PERMESSO DI RICERCA DI RISORSE GEOTERMICHE FINALIZZATO ALLA SPERIMENTAZIONE DI UN IMPIANTO PILOTA DENOMINATO "LUCIGNANO"

COMUNE DI RADICONDOLI - PROVINCIA DI SIENA

PROPONENTE:

Lucignano Pilot Project S.r.l



PROGETTO DEFINITIVO

NUMERO ELABORATO:

LCG-DC01-V00

TITOLO:

CHIARIMENTI SUI DOCUMENTI INTEGRATIVI

DATA:

Febbraio 2018

PROGETTISTI:

RENEWEM S.r.l

Via Norvegia n° 68 - 56021 Cascina (PI) - ITALIA

UFFICI:

Lucignano Pilot Project srl
Via Norvegia n° 68 - 56021 Cascina (PI) - ITALIA
tel. 0039 050 6205317 fax. 0039 050 0987814

REVISIONE

DATA		NOTE
REV.1		
REV.2		
REV.3		



PERMESSO DI RICERCA DI RISORSE GEOTERMICHE FINALIZZATO ALLA SPERIMENTAZIONE DI UN IMPIANTO PILOTA DENOMINATO “LUCIGNANO”

COMUNE DI RADICONOLI – PROVINCIA DI SIENA

PROCEDURA DI VALUTAZIONE DI IMPATTO AMBIENTALE

CHIARIMENTI SUI DOCUMENTI INTEGRATIVI

LPP S.R.L.

Gruppo di lavoro:

Dott. W. Luperini

Dott. F. Martini

Dott. N. Sannino

SOMMARIO

PREMESSA	1
1 EFFETTI GEOMECCANICI (RAPPORTO ICHESE)	2
2 SISTEMA DI REINIEZIONE	5
3 SISMICITA' STORICA	8
4 MODELLAZIONE E VALUTAZIONI CONSEGUENTI	12
4.1 MODELLO GEOLOGICO-STRUTTURALE (RIF.RICHIESTA B2DELLE INTEGRAZIONI)	15
4.1.1 Dati Utilizzati	15
4.1.2 Carte di Sintesi	16
4.1.3 Processo di costruzione del Modello Geologico-Strutturale	20
4.2 MODELLO NUMERICO (RIF.RICHIESTA B3 DELLE INTEGRAZIONI)	25
4.2.1 Risultati della Simulazione	28
4.3 SISMICITÀ INNESCATA (RIF. RICHIESTA B6 DELLE INTEGRAZIONI)	31
4.4 SUBSIDENZA (RIF. RICHIESTA B8 DELLE INTEGRAZIONI)	33
APPENDICE N° 1	35
APPENDICE N° 2	43

PREMESSA

Il presente documento è stato redatto al fine di chiarire alcuni aspetti riguardanti le integrazioni di aprile 2017 prodotte dalla LPP Srl, nell'ambito del procedimento di VIA del progetto geotermico "Lucignano", a seguito delle richieste della Commissione VIA/VAS trasmesse con nota prot. 0025933.24-10-2016 del 24 ottobre 2016.

In particolare, l'iniziativa di LPP di produrre il presente documento trae origine da:

- l'opportunità di fornire alcuni chiarimenti in merito al processo di modellazione del serbatoio, così come già prodotti nell'ambito del procedimento di VIA di altro progetto geotermico sviluppato dal medesimo team;
- l'opportunità di esporre in modo più chiaro alcuni ulteriori passaggi che, nell'ambito dei chiarimenti di cui al punto precedente, sono emersi in conseguenza delle specificità del progetto "Lucignano".

Per quanto riguarda il primo punto, i chiarimenti si concretizzano essenzialmente in una più articolata esposizione della parte descrittiva del processo di costruzione dei modelli, nonché nella correzione di alcuni refusi – peraltro di tipo meramente testuale – riguardanti, in particolare, le dimensioni minime delle celle del modello numerico.

Per quanto riguarda invece il secondo punto, i temi oggetto di chiarimento sono sostanzialmente quelli relativi agli effetti della reiniezione del fluido, sia dal punto di vista tecnico, sia dal punto di vista delle perturbazioni indotte nel serbatoio e degli eventuali fenomeni di subsidenza, assumendo come riferimento le raccomandazioni della Commissione ICHESE.

Per comodità di esposizione i precedenti due gruppi di chiarimenti vengono sviluppati, nel documento, in ordine inverso rispetto a quello sopra riportato.

Infine, viene prodotto un chiarimento anche in merito alle serie storiche della sismicità nell'area e, più in generale, in Toscana, allo scopo di meglio evidenziare sia la scarsa rilevanza del rischio sismico nelle aree interessate, sia, in chiave statistica, la bassa correlazione con le attività geotermiche (in una regione in cui le stesse sono estremamente sviluppate).

A conclusione di questa premessa si intende precisare che **i contenuti del presente documento non implicano integrazioni ma solo meri chiarimenti relativi a documenti e informazioni già agli atti del procedimento di VIA.**

1 EFFETTI GEOMECCANICI (RAPPORTO ICHESE)

Nel panorama della legislazione italiana inerente il settore geotermico per produzione di energia elettrica non sono presenti ad oggi normative di riferimento sulle modalità operative riguardanti effetti o vincoli derivanti dall'estrazione e reiniezione dei fluidi geotermici. Pertanto, nella preparazione dei vari aspetti progettuali, in particolare quelli legati al processo di estrazione e reiniezione dei fluidi, **si è fatto riferimento sia al Rapporto ICHESE del 2014 che alle "Linee Guida del Mise del 2016"**, documenti di riferimento per l'utilizzo e la coltivazione delle risorse geotermiche a media e alta entalpia, pur non costituendo questi riferimento normativo. In particolare le raccomandazioni e le indicazioni riportate nelle conclusioni del Rapporto ICHESE sono state valutate e integrate nella stesura del progetto, così come gli studi ai quali il Rapporto stesso fa riferimento.

Nello specifico, il Rapporto ICHESE contiene, tra le altre, anche una conclusione relativa alle variazioni geo-meccaniche che si possono generare nel caso in cui il fluido reiniettato abbia una temperatura **di 80°C inferiore a quella della formazione in cui lo stesso viene iniettato**. In particolare il Rapporto cita lo studio di Hassanzadegan et alii (2011)¹ dichiarando, a seguito di un modelling di serbatoio effettuato per il campo di Groß Schönebeck (Germania), che

"The injection of cold water into hot rock has to be considered as a possible cause geomechanical changes. In fact Hassanzadegan et al [180] investigated temperature induced geomechanical effects in doublets. They concluded that re-injection of water with a temperature drop of 80 K in comparison to the formation temperature can induce a total subsidence in the order of mm after 30 years of operations, with variation due to different rock type but remaining of the same order . These values are very low and the damaging potential is very low"

2

Al riguardo va subito precisato che **il progetto Lucignano è molto lontano da questa condizione** in quanto **la differenza tra la temperatura del fluido reiniettato (80 °C) e quella presente in formazione nei pozzi di reiniezione (103 °C) è di 23 °C e pertanto di ben 57 °C inferiore agli 80 °C** a cui fa riferimento il Rapporto ICHESE.

Questa bassissima differenza di temperatura è dovuta alla conformazione geologica dell'area del progetto che è caratterizzata da un serbatoio geotermico che, muovendosi verso est (cioè verso la reiniezione), risulta sempre più superficiale, fino ad affiorare

¹ Hassanzadegan A., Blocher G., Zimmermann G., Milsch H., Moeck I. (2011). Induced stress in a geothermal doublet system. Proceedings thirty-sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 31 – February 2, 2011 SGP-TR-191.

circa 7 km ad est del pozzo di reiniezione (area di ricarica). Pertanto, rispetto all'area di produzione, **alla reiniezione il serbatoio risulta essere 865 m più superficiale e oltre 70 °C più freddo** (Figura 1-1). Questa è una situazione ottimale per un campo geotermico in quanto le caratteristiche del fluido reiniettato sono molto simili a quelle già presenti naturalmente e quindi tale fluido può seguire il suo naturale ciclo di riscaldamento in serbatoio.

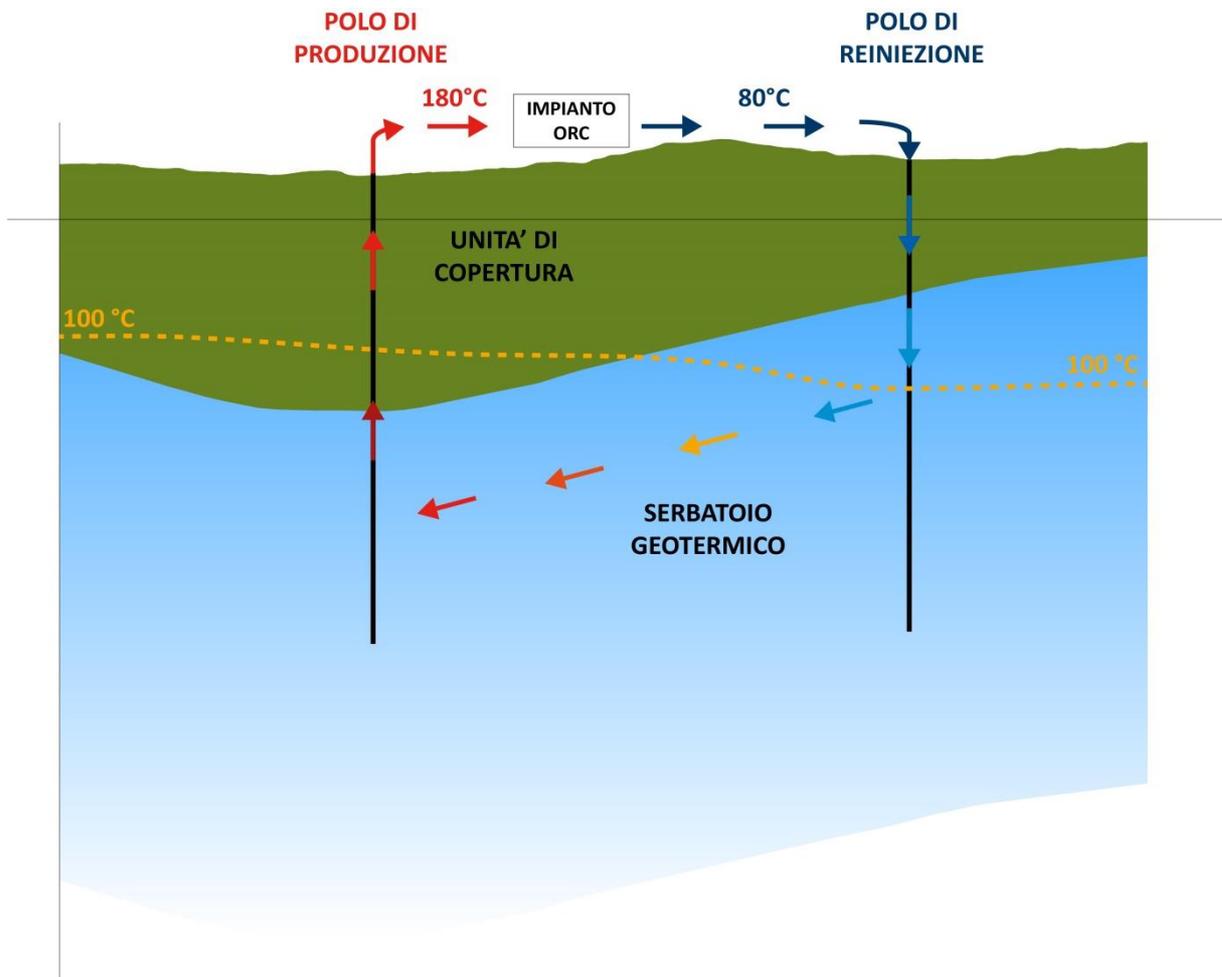


Figura 1-1. Sezione idrogeologica semplificata passante per i pozzi di progetto in cui è visibile la grossa differenza di quota del top del serbatoio geotermico e di temperature tra il polo di produzione e quello di reiniezione.

Si deve anche considerare che i dati di temperatura del serbatoio alla reiniezione sono estremamente affidabili in quanto misurati nel pozzo ENEL “Casalone” a suo tempo realizzato a pochi metri dal pozzo di reiniezione del progetto “Lucignano”. Ed anzi, va anche detto che il valore di 103°C sopra indicato corrisponde ad una scelta cautelativa, dato che il range di temperature misurate nel suddetto pozzo ENEL tra circa 800m e 1500m era compreso tra 90°C e, appunto, 103°C.

La situazione sopra descritta, ed in particolare l'effettivo instaurarsi del circuito di Figura 1-1 è dimostrato anche dalle simulazioni numeriche effettuate, ed in particolare dal grafico dell'andamento della temperatura al fondo dei pozzi di produzione e di reiniezione nell'arco dei 30 anni di concessione (Figura 4-9 del Paragrafo 4.2.1). Infatti alla reiniezione il calo di temperatura simulato è di soli 3,5 °C (circa 0,1 °C ogni anno).

Accertato, quindi, che il progetto “Lucignano” non presenta alcuna criticità (anzi) rispetto alle conclusioni del Rapporto ICHESE in merito al delta termico alla reiniezione, si possono svolgere alcune considerazioni aggiuntive riguardo l'entità dei possibili effetti geomeccanici che da tale delta termico possono eventualmente derivare (si osserva infatti che il Rapporto – o, meglio, lo studio in esso contenuto relativamente al campo geotermico di Casaglia – nell'evidenziare la possibilità che la reiniezione di fluidi, con una differenza di temperatura di 80°C alla reiniezione, possa provocare effetti geomeccanici, non ne specifica tuttavia la tipologia, la natura o l'entità).

Nel caso del campo geotermico di Ferrara (Sezione E-Geothermal activity analysis del Rapporto) si rileva che viene prima presentata una descrizione delle caratteristiche di produzione-reiniezione del campo (differenza di temperatura tra produzione e reiniezione pari a 30 °C, in condizioni bilanciate di volumi) e successivamente, in merito agli effetti geomeccanici, viene citato lo studio di Hassanzadegan et alii (2011)¹ riportato precedentemente.

4

Dalla analisi combinata di tali studi il Rapporto ICHESE conclude che l'iniezione di fluidi più “freddi” di 80 °C è **una causa ritenuta “possibile”, ma non certa, per la generazione di effetti geomeccanici, i quali sono oltretutto stimabili in una subsidenza di pochi millimetri nell'arco di tutti i 30 anni di attività.**

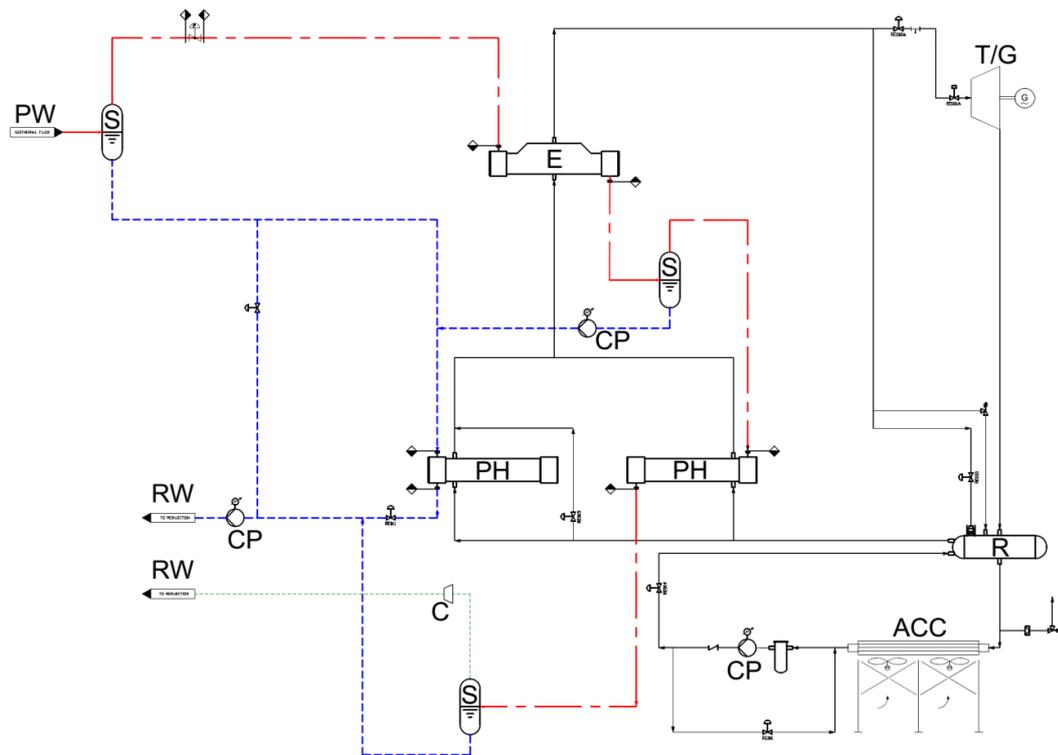
La Commissione ICHESE, pertanto, non fissa un valore limite, pari ad un $\Delta T=80^{\circ}\text{C}$, oltre il quale si possono avere effetti significativi, ma piuttosto stima gli effetti dovuti a questo ΔT , **giudicandoli “molto bassi” sotto ogni profilo, inclusa la capacità di indurre possibili danni.**

Si segnala quindi che **anche da questo punto di vista il progetto “Lucignano” non presenta criticità.** Infatti le simulazioni effettuate confermano (si vedano anche i chiarimenti delle sezioni successive) valori di subsidenza di pochissimi millimetri nei 30 anni, e che pertanto gli stessi, oltre che coerenti con quanto sin qui esposto, **non sono da considerarsi in alcun modo significativi.**

Si osserva infine che la Commissione ICHESE non cita alcun effetto del delta termico alla reiniezione in relazione alla micro sismicità, nè in termini di accadimento nè tantomeno di magnitudo.

2 SISTEMA DI REINIEZIONE

In merito al sistema di reiniezione totale il progetto Lucignano, a causa delle caratteristiche intrinseche del fluido geotermico, prevede la separazione tra gas incondensabili e *brine* (Acqua e Sali). Nel progetto Lucignano infatti si prevede di estrarre un fluido bifase (misto vapore-acqua) derivato dal *flash* (evaporazione) del fluido geotermico ad una profondità di oltre 1000 m. Per questo motivo non è possibile estrarre il fluido geotermico tramite una pompa di produzione, che infatti non è prevista. Queste caratteristiche del fluido geotermico non consentono pertanto di reiniettare i gas incondensabili semplicemente mantenendo in pressione il fluido geotermico, in quanto tale fluido, quando arriva a testa pozzo, ha già “liberato” tali gas. Questa situazione ha comportato la necessità, in fase di progettazione, di individuare un metodo di reiniezione totale alternativo, in quanto non è perseguibile, per ovvi motivi, la soluzione di mantenere il fluido in fase liquida ed in pressione per evitare l’essoluzione, già avvenuta. Pertanto è stato previsto di separare totalmente la fase liquida da quella gassosa (**fase 1**), di “trasportare” separatamente, tramite specifiche tubazioni, le due fasi fino al polo di reiniezione (**fase 2**) dove avviene la reiniezione totale di *brine* e gas (**fase 3**).



5

Figura 2-1. Schema di processo dell’impianto di produzione in cui sono evidenziati i percorsi del fluido geotermico generico (rosso), della brine (blu), dei gas incondensabili (verde) e del fluido di lavoro (nero). PW= Pozzo di Produzione; S= Separatore; E= Evaporatore; PH= Preheater; T/G= Turbogeneratore; R= Recuperatore di calore; ACC= Aircooler; CP= Pompa di circolazione; C= Compressore; RW= Pozzo di Reiniezione.

Fase 1 – Separazione dei Gas dalla Brine

Questa fase prevede un sistema di separazione del fluido geotermico in tre stadi. Come già evidenziato infatti il fluido geotermico arriva in superficie con parte dei gas incondensabili già essolti anche se va precisato che il sistema è comunque chiuso e che tale “liberazione” avviene all’interno delle tubazioni e non comporta alcuna interazione con l’atmosfera. Come visibile dal PFD dell’impianto (Figura 2-2 dell’elaborato LCG-RP01-V00-Relazione di progetto) a testa pozzo è previsto l’utilizzo di un separatore per separare il fluido bifase. In Figura 2-1 è riportato il PFD in cui sono stati evidenziati in vari colori i circuiti delle varie fasi del fluido geotermico e del fluido di lavoro.

In pratica nel **primo separatore** viene “estratta” la fase liquida, che prima della reiniezione entra in un preheater per preriscaldare il fluido di lavoro, mentre la fase vapore, comprensiva dei gas incondensabili, viene mandata nell’evaporatore per surriscaldare il fluido di lavoro. A valle dell’evaporatore il fluido geotermico ha perso gran parte del suo calore (trasferendolo al fluido di lavoro) e pertanto una parte del vapore si è condensato dando luogo ad un fluido bifase. Per questo motivo è necessario procedere ad un’altra fase di separazione. In uscita da questo **secondo separatore** si avrà quindi una fase liquida (*brine*) che contribuirà anch’essa a preriscaldare il fluido di lavoro, e una fase vapore, comprensiva dei gas incondensabili, che viene mandata nel secondo preheater per preriscaldare il fluido di lavoro. Anche in questo caso la perdita di calore dovuta allo scambio termico all’interno del secondo preheater provocherà la condensazione della parte non gassosa del fluido geotermico rimanente che, all’interno del **terzo separatore**, verrà separato in una *brine*, totalmente in fase liquida, e in una fase gassosa (gas incondensabili).

6

Fase 2 – Trasporto separato dei Gas e della Brine

In questa fase, in uscita dalla centrale, è previsto il trasporto separato di gas e *brine*. Per il trasporto della fase liquida, in una apposita tubazione, è previsto l’utilizzo di una pompa di rilancio (CP) mentre i gas circolano attraverso una tubazione di piccolo diametro grazie all’ausilio di un compressore (C).

Fase 3 – Reiniezione di gas e brine nel pozzo di reiniezione

Nel pozzo di reiniezione la fase liquida viene quindi reiniettata senza alcuna sovrappressione a bocca pozzo mentre la fase gassosa verrà reiniettata con un tubo di piccolo diametro (concentrico al tubo di reiniezione dell’acqua) ad una data profondità sotto al livello statico tale per cui la pressione dell’acqua in pozzo, e la velocità di flusso, sia tale da consentire il miscelamento dei gas reiniettati all’interno della *brine*.

La pressione necessaria al miscelamento dipende ovviamente da molteplici fattori quali temperatura e salinità del fluido reiniettato e quantità del gas incondensabile del fluido geotermico estratto. Sulla base dei dati attesi è stata calcolata, considerando il dovuto

grado di cautela, una pressione minima di miscelamento pari a 60 bar corrispondente ad una colonna di acqua in pozzo pari a 600m (Figura 2-2). Pertanto è stato calcolato sulla base della pressione e dell'iniettività del serbatoio, nonché delle portate di progetto, il livello statico dell'acqua in fase di esercizio. Tale calcolo ha fornito una profondità dal piano campagna del livello statico in esercizio pari a 599 m e conseguentemente una profondità di reiniezione dei gas di 1199 m p.c. Tale profondità di reiniezione dei gas consente pertanto di reiniettare completamente tutto il fluido geotermico estratto annullando completamente le emissioni in atmosfera dell'impianto.

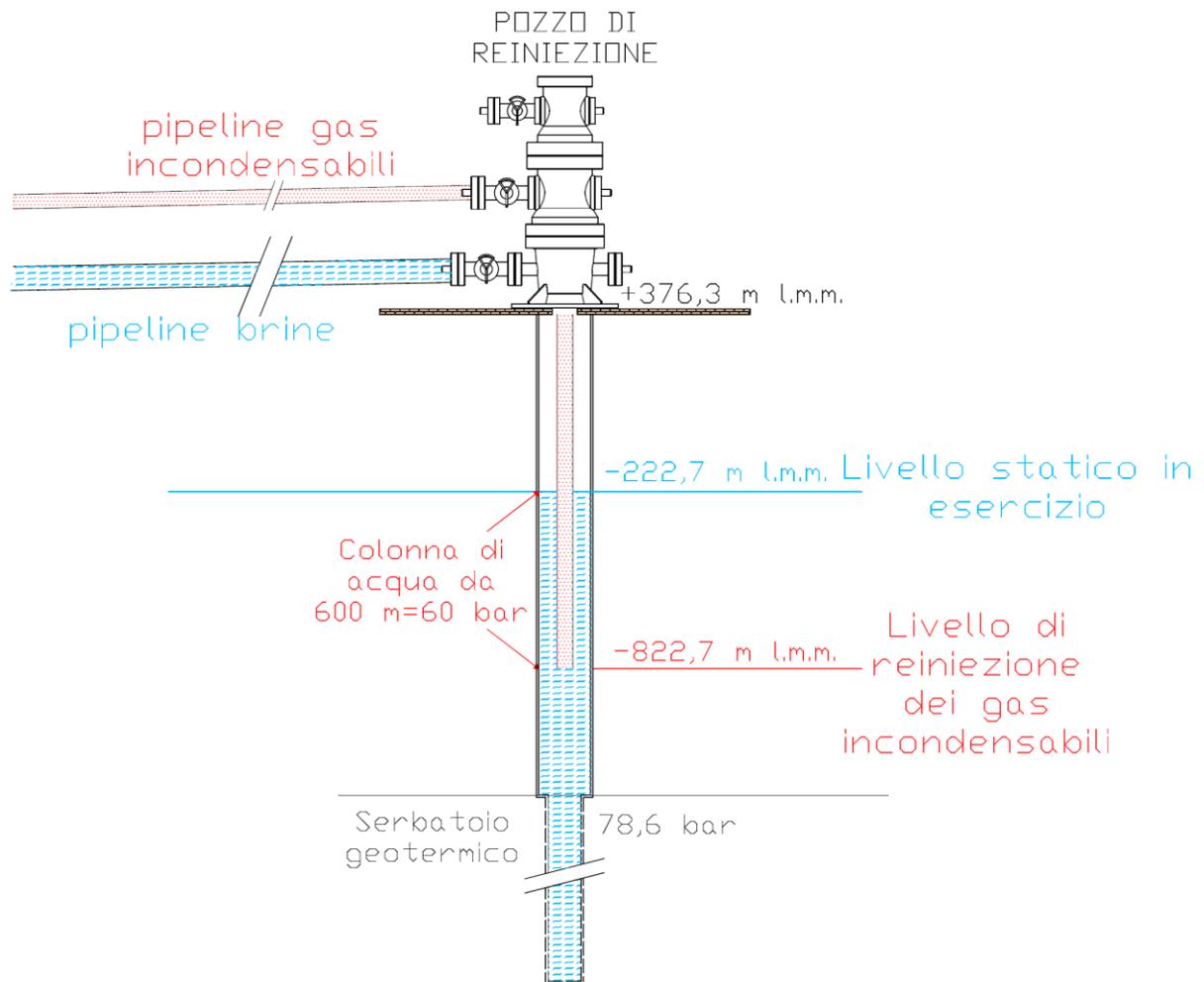


Figura 2-2. Sistema di reiniezione dei gas all'interno del pozzo di reiniezione. In rosso sono riportati gli elementi relativi al gas e in azzurro quelli riferiti alla brine.

3 SISMICITA' STORICA

Durante la procedura di Valutazione di Impatto Ambientale la CTVA ha chiesto integrazioni in merito alla sismicità storica. In particolare la richiesta era quella di *“integrare quanto riportato nel piano di monitoraggio con una rassegna della sismicità storica nell'area risalendo alle epoche più lontane riportate dai cataloghi esistenti. Elencare i maggiori sismi avvenuti in passato con epicentro in Toscana, quelli con epicentro in un area di 30 km dall'impianto e quelli con epicentro in un area di 5 km dall'impianto”*.

Pertanto, al fine di ottemperare a tale richiesta della commissione, era stato eseguito uno studio approfondito andando a consultare i cataloghi sismici più aggiornati oggi disponibili quali:

- portale ISIDE (Italian Seismological Instrumental and parametric Data-basE);
- portale INGV (<http://cnt.rm.ingv.it/>);
- catalogo CPTI15 (*Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani 2015*);
- catalogo CSI (Catalogo della Sismicità Italiana dal 1981-2002).

Tale approfondimento ha portato alla realizzazione di una analisi della sismicità naturale in tutta la Toscana e in un intorno di 5 e 30 km dall'area di progetto al fine di avere un quadro di riferimento completo e aggiornato al 2016 sulla sismicità naturale. **Tale analisi di dettaglio, per la quale si rimanda all'elaborato LCG-RP01-A15-V00, ha quindi considerato sia gli eventi sismici storici compresi tra il 1320 ed il 1900 sia quelli più recenti compresi tra il 1900 ed il 2016 avvenuti in tali aree.**

Dai dati è emerso che in Toscana si sono verificati, in tutto questo lungo periodo di tempo, quasi 13.000 eventi di cui solo 68 in un raggio di 5 km dall'area di impianto. Come visibile in *Figura 3-1* (ripresa dalla risposta alle richieste di integrazione di aprile 2017, mentre gli elaborati in formato più grande sono contenute nell'elaborato LCG-RP01-A15-V00) l'analisi ha portato, tra le altre cose, alla realizzazione di alcune mappe di sismicità dalla cui analisi è risultato che circa **il 96% degli eventi ha avuto magnitudo inferiore a 3.**

Ad ulteriore chiarimento delle precedenti considerazioni ed elaborati si è ritenuto opportuno, con il presente capitolo, fornire anche l'elenco dei singoli eventi sismici presenti nelle mappe sopra riportate, in modo da consentire di disporre non soltanto del numero e della localizzazione degli eventi stessi **ma anche della loro data e della profondità** (quindi, dell'ipocentro). Inoltre, con riferimento a posizioni assunte anche dalla Commissione in altri casi analoghi, si sono riportati in tali tabelle tutti gli eventi sismici **di magnitudo superiore a 2** (si tratta ovviamente di una soglia molto bassa e quindi cautelativa, dato che in tal modo gran parte degli eventi riportati nelle tabelle sono del tutto irrilevanti).

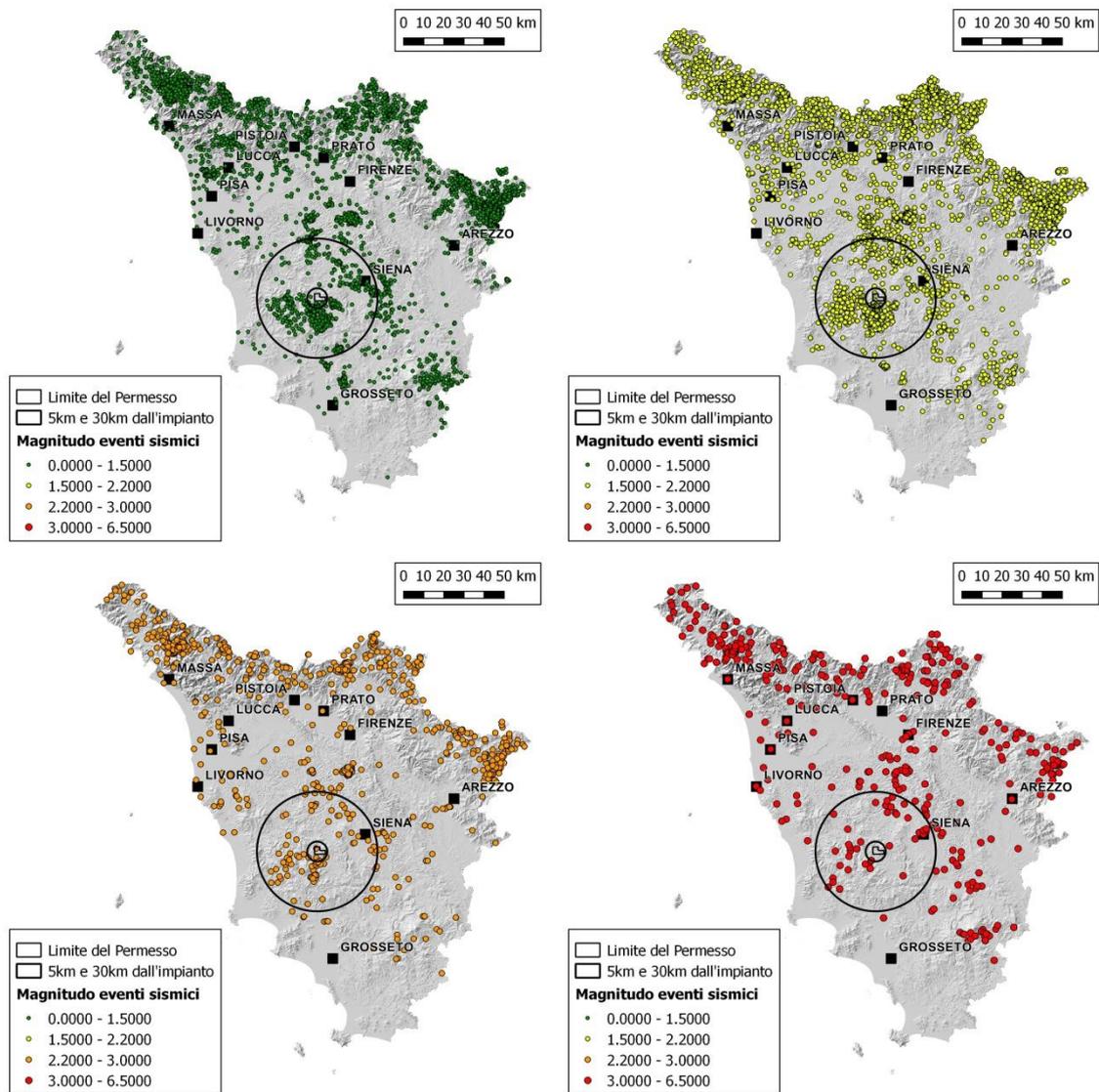


Figura 3-1. Epicentri dei terremoti divisi per range di magnitudo relativamente alla Toscana. Sono riportati anche i raggi rappresentanti 5 km e 30 km di distanza dall'impianto.

Nello spirito della richiesta di integrazioni originaria della Commissione, e tenuto conto che gli eventi sismici di magnitudo >2 sono ovviamente molto numerosi, le tabelle si riferiscono soltanto ai terremoti verificatisi entro un raggio rispettivamente di 5 e 30 km, trattandosi, del resto, degli interni realmente significativi (soprattutto il primo) ai fini del progetto. Tuttavia, allo scopo di fornire anche un quadro più generale per ciò che riguarda gli eventi di magnitudo più rilevante, si è prodotta una ulteriore mappa, con relativo elenco, per l'intera Toscana (Figura 3-2), in cui gli eventi sismici di intensità maggiore (>4) sono stati identificati graficamente in modo via via sempre più evidente al crescere della magnitudo (in questo caso la tabella è ordinata per intensità decrescenti).

Da tutti questi dati ed elaborati emerge che:

- gli eventi recenti sono in gran numero (148 su 313 successivi al 2000 e 230 su 313 successivi al 1980), e ciò anche in conseguenza dei sempre migliori e numerosi sistemi di registrazione;
- al tempo stesso, però, **il numero di terremoti con magnitudo di una certa rilevanza è basso (bassissimo, per ciò che riguarda gli eventi recenti)**. In particolare:
 - entro i 5 km dall'impianto l'unico evento di elevata intensità (5.1) risale al **1724**, mentre successivamente **ci sono stati solo altri 10 eventi, il più intenso dei quali con M pari solo a 2.6;**
 - entro i 30 km gli eventi più intensi ($M > 4$) sono stati 50, **di cui 10 nel secolo scorso** e gli altri in epoca precedente, anche remota, e quindi pressoché tutti misurati con strumentazione piuttosto "datata", tanto che in periodi più recenti talune misure effettuate in contemporanea con strumenti più aggiornati **hanno fornito valori sensibilmente più bassi;**
 - si osserva anche che entro i 30 km (comprensivi quindi anche del raggio da 5 km) gli eventi con $M > 2$ sono stati 313 su un totale di 1359 eventi complessivi);
- Infine, **nell'intera Toscana** gli eventi sismici di maggiore rilevanza ($M > 4,5$) sono stati in tutto 154, dei quali 7 con $M \geq 6$ e, di questi ultimi, **due nel secolo scorso**. Da segnalare 10 eventi con $M > 4,5$ negli anni dal 1995 ad oggi, **ma nessuno dei quali all'interno del raggio di 30 km dall'impianto;**

Infine, si ritiene utile evidenziare come, dall'esame delle mappe di questo paragrafo, emerga che, al crescere dell'intensità dei fenomeni sismici, gli stessi tendano a localizzarsi in zone **diverse da quelle geotermiche** (in particolare, nelle zone appenniniche e sui rilievi, dove la densità di eventi si riduce in modo abbastanza proporzionale al crescere della magnitudo), il che **appare indicare l'esistenza di una eventuale correlazione della sismicità con le attività geotermiche solo per basse magnitudo.**

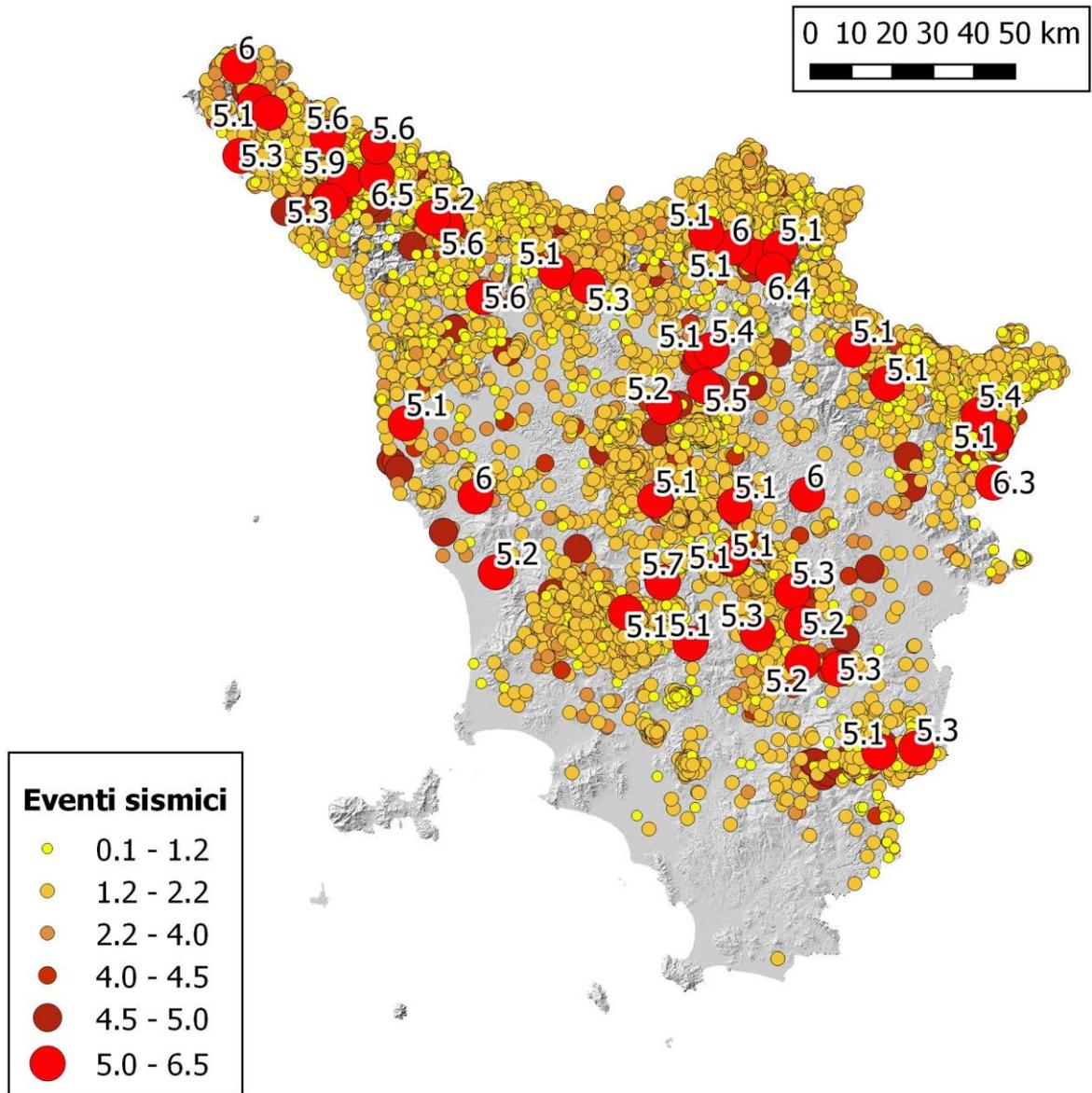


Figura 3-2. Carta dei terremoti in Toscana fino al 2016 (è riportato il dato dei singoli eventi per i terremoti con $M > 5$).

4 MODELLAZIONE E VALUTAZIONI CONSEGUENTI

Nell'ambito delle integrazioni di aprile 2017, e con riferimento al tema sopra indicato, LPP ha seguito un percorso (coerentemente anche con quanto indicato dalla commissione VIA nella relativa richiesta) finalizzato ad identificare e quantificare eventuali problematiche come ad es. la sismicità indotta/innescata o la subsidenza, a partire dai dati geologici, geofisici e di pozzo disponibili, utilizzando strumenti di modellazione e metodologie empiriche consolidate. In conseguenza di quanto indicato in premessa, tale procedimento (riportato per maggior chiarezza in Figura 4-1, e costituito dai tre blocchi A)-C) di seguito riportati) viene ripercorso nel presente capitolo e, dove necessario, meglio chiarito ed aggiornato.

A) MODELLAZIONE GEOLOGICO-STRUTTURALE

1. **Raccolta di tutti i dati** geologici, geofisici, geochimici e di pozzo presenti per l'area vasta, inclusi i dati di campagna realizzati da LPP;
2. **Rilievi geologici** in sito per verificare ed eventualmente migliorare la conoscenza geologica dell'area;
3. Realizzazione di un **modello geologico-strutturale** di dettaglio sulla base dei dati di cui ai precedenti punti 1 e 2;

B) MODELLAZIONE NUMERICA DEL SERBATOIO

4. Importazione del modello geologico-strutturale semplificato sulla base dei parametri caratteristici delle unità geologiche, con particolare riferimento a permeabilità e porosità, al fine di realizzare un **modello concettuale** di riferimento, coerente con i criteri della modellazione numerica;
5. **Realizzazione della mesh** (suddivisione in celle) del modello di cui al punto 4 con un maggior dettaglio nel serbatoio, ed in particolare in prossimità dei pozzi, in modo da ottenere il miglior dettaglio possibile nei risultati, compatibilmente con eventuali vincoli dettati dalla potenza di calcolo (Nota: La mesh viene realizzata in questa fase in quanto i risultati della simulazione del modello stazionario vengono "registrati" nelle celle. Tuttavia il dettaglio delle celle stesse acquista importanza solo nella successiva simulazione dello stato perturbato);
6. **Fitting dei parametri** del modello di cui sopra in condizioni di stazionarietà (**modello statico**), cioè nello stato in cui attualmente si trova, allo scopo di effettuarne **la taratura**. In questa fase il modello viene fatto "girare" in modo iterativo fino a convergere sui valori dei parametri fisici che descrivono correttamente **la situazione attuale**, in cui successivamente si introducono le perturbazioni dovute al progetto, per valutarne gli effetti, v.sotto;

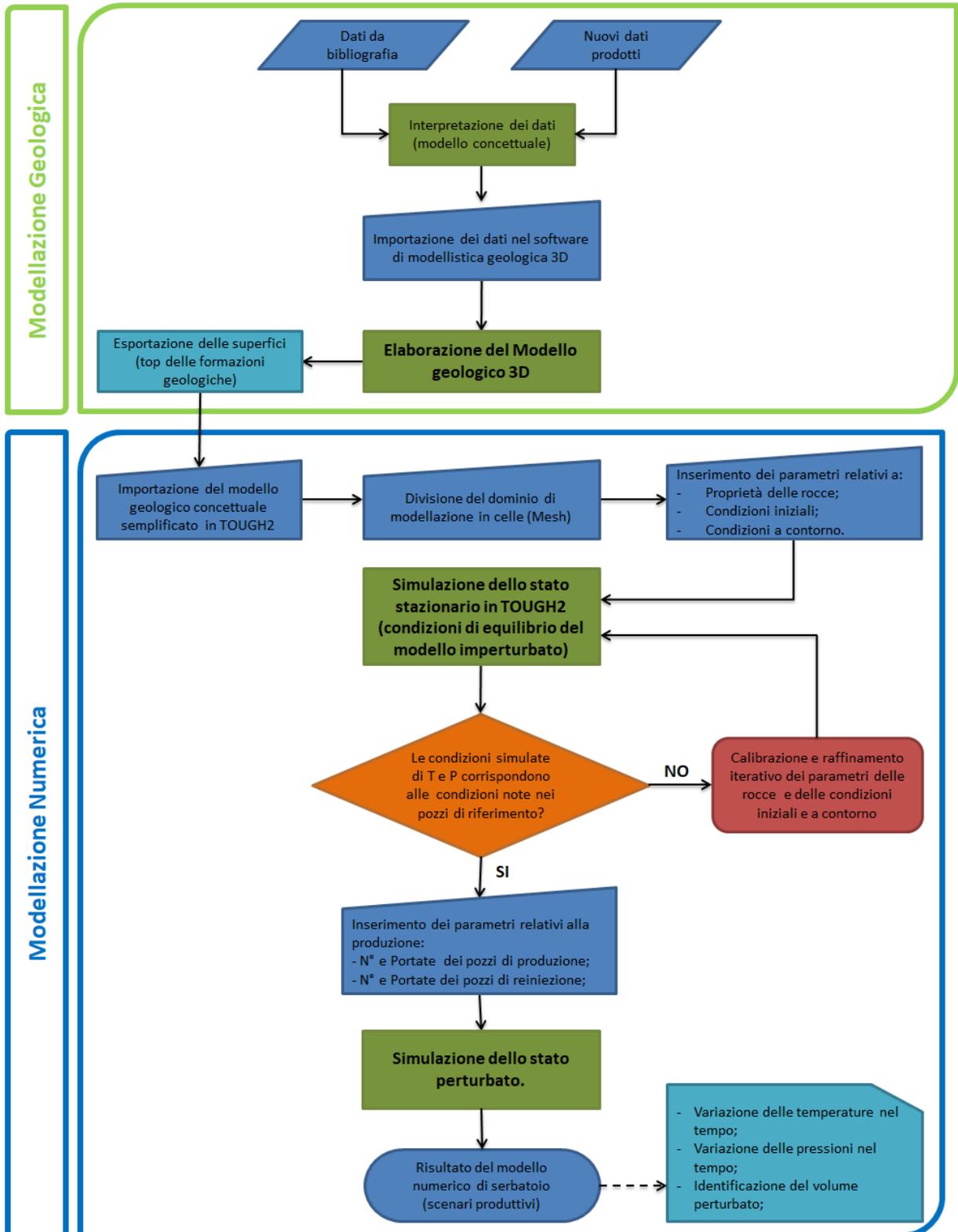


Figura 4-1. Diagramma di flusso esemplificativo del processo di realizzazione di un modello numerico di serbatoio.

C) SIMULAZIONE IN FASE DI ESERCIZIO E CALCOLO DEGLI EFFETTI INDOTTI

7. Simulazione finalizzata a calcolare gli effetti indotti dalla realizzazione del progetto in termini di **evoluzione nel tempo di pressione e temperatura**, attraverso il modello statico precedentemente derivato (p.to 6), al quale vengono applicate le perturbazioni legate ai pozzi di produzione/reiniezione;
8. Utilizzazione dei **dati risultanti** dalla precedente simulazione per i calcoli del massimo terremoto e della massima subsidenza attesi (stimati, come per prassi, attraverso metodi di calcolo **distinti da quelli utilizzati per la modellistica**).

Ciascuno degli step sopra elencati presenta una sua specificità e complessità, sebbene alcuni di essi possano essere riguardati come parte di un unico macro-step, ed è per questo che essi sono stati raggruppati nelle tre parti sopra indicate, che pertanto vengono utilizzate anche per definire la struttura del presente capitolo.

In sede di stesura dei documenti integrativi tale impostazione **ha dato luogo, da parte di LPP, ad alcune semplificazioni**, e ciò, sulla base di una revisione critica dei documenti stessi, si ritiene possa avere generato alcune difficoltà interpretative per la valutazione del lavoro.

4.1 MODELLO GEOLOGICO-STRUTTURALE (RIF. RICHIESTA B2 DELLE INTEGRAZIONI)

4.1.1 Dati Utilizzati

La realizzazione del modello geologico-strutturale è stata fatta attraverso l'analisi e l'integrazione di tutti i dati geologici, geofisici, geochimici e di pozzo presenti per l'area vasta, a loro volta integrati con rilievi geologici di campagna. I dati disponibili sono:

a) Dati Bibliografici

1. **Cartografie Geologiche:** CARG 1:50.000 (Foglio Siena e Pomarance) con 1 Sezione geologica (Foglio Siena); CARG 1:10.000; 1:100.000 del Servizio Geologico Italiano (Foglio 120); 1:10.000 del PS del Comune di Radicondoli; Schema delle unità stratigrafiche e strutturali all'interno della Carta geologica della Toscana dell'Università di Siena (2004) in scala 1:250.000; Carta geologica di Luriano in Sani et alii (2016)¹; Carta geologica di Brogi & Liotta (2008)¹ e sezioni geologiche correlate;
2. **Dati di pozzo:** Banca Dati Nazionale Geotermica, Pozzi Scapernata, Casalone, Radicondoli 19, Radicondoli 15, Radicondoli 30, 30A, 30B; 30Bis, Radicondoli 24, Radicondoli 18, Radicondoli 21, Radicondoli 22, Radicondoli 14;
3. **Dati Geofisici:**
 - Profili sismici: LAR 7 (Batini e Nicolich, 1984)¹; LAR 37 (Fiordelisi et alii, 2005)¹; TR 2 (Batini e Nicolich, 1985)¹;
 - Cartografie della profondità dell'orizzonte K (Fiordelisi et alii, 2005; Romagnoli et alii, 2010; Batini et alii, 2003);
 - Carte Magnetometriche: AGIP (Progetto VIDEPI); Carta Magnetometrica d'Italia;
 - Carta Gravimetrica d'Italia ISPRA, ENI OGS;
4. **Dati di Gradiente da Bibliografia** (Baldi, 1994; Bellani e Gherardi, 2013) con pozzetti e carte tematiche derivate (gradiente e flusso di calore);
5. **Dati Geochimici derivati da Bibliografia** (Minissale 1997 e 2004)
6. **Carte tematiche:** Banca Nazionale Dati Geotermici (profondità del tetto del serbatoio, Temperature al tetto del serbatoio, a 1000m, 2000m e 3000m di profondità, Flusso di Calore.);
7. **Studi progressi**² sull'interpretazione dei dati esistenti e sulla geologia dell'area;

²Batini F. e Nicolich R. (1984) - The application of seismic reflection methods to geothermal exploration. Sem. On the utilization of geothermal energy for electric power and space heat. Florence (Italy), 14-17 May 1984. Bellani, S., & Gherardi, F. Thermal Overview of an Area NW of the Larderello Geothermal Field, Italy.

Batini F, Nicolich R. (1985). P and S reflection seismic profiling and well logging in the Travale geothermal field. *Geothermics*, Vol. 14, No. 5/6, pp. 731-747

Brogi, A., & Liotta, D. (2008). Highly extended terrains, lateral segmentation of the substratum, and basin development: The middle-late Miocene Radicondoli Basin (inner northern Apennines, Italy). *Tectonics*, 27(5).

Fiordelisi, A., Moffat, J., Oglioni, F., Casini, M., Ciuffi, S., Romi, A. (2005): Revised processing and interpretation of reflection seismic data in the Travale geothermal area (Italy), *Proceedings World Geothermal Congress*, (2005).

b) **Dati di campagna** (approfondimenti, realizzati precedentemente alla presentazione della VIA, sebbene non consegnati in sede di integrazione in quanto non richiesti):

1. **Rilievo Gravimetrico di dettaglio:** Questo rilievo è stato eseguito nell'ambito di un permesso di ricerca geotermica, contiguo ad est con il progetto Lucignano, di cui la società è stata titolare tra il 2013 e il 2015. In questo ambito è stata eseguita una campagna di misura che ha compreso 346 misure gravimetriche di cui 76 ricadono all'interno del dominio del modello geologico strutturale. Questo rilievo, oltre all'evidente vantaggio di ottenere un dettaglio estremamente maggiore nei dati, ha consentito alla società di avere a disposizione i dati grezzi sui quali è stato possibile realizzare numerose carte di anomalia atte a evidenziare le situazioni locali e regionali, nonché altre cartografie specifiche.
2. **Rilevamento Geologico-Strutturale:** All'incirca nello stesso arco di tempo nel quale è stato realizzato il rilievo gravimetrico sono state eseguite numerose campagne di rilievo geologico strutturale, inizialmente finalizzate anch'esse all'attività di ricerca dei Permessi di Ricerca geotermica contigui, e successivamente, invece, in modo specifico alla ricostruzione del modello geologico strutturale del progetto Lucignano. Più recentemente, nell'ambito delle ultime integrazioni presentate, questo rilievo è stato nuovamente ripreso e verificato al fine di mettere in evidenza l'interpretazione geologico-strutturale dell'area.

16

4.1.2 Carte di Sintesi

Tutti i dati indicati in precedenza sono stati riportati in alcune carte di sintesi, il cui scopo è fornire un quadro complessivo della base informativa a disposizione, **e che nelle integrazioni non sono state presentate.**

Poiché molti dei dati sopra riportati non sono disponibili in forma vettoriale (carte, mappe, immagini etc), si è deciso, per evidenti motivi di leggibilità delle immagini, di suddividere tali carte di sintesi in due parti:

- 1) Carta dei dati relativi alla geometria del sottosuolo (Figura 4-2);
- 2) Carta dei dati geotermici e idrogeologici (Temperature, Pressioni, etc) (Figura 4-3).

Pascucci, V., Merlini, S., & Martini, I. P. (1999). *Seismic stratigraphy of the Miocene-Pleistocene sedimentary basins of the Northern Tyrrhenian Sea and western Tuscany (Italy)*. *Basin Research*, 11(4), 337-356.

Pascucci, V., Fontanesi, G., Merlini, S., & Martini, I. P. (2007). *Neogene Tuscan shelf-western Tuscany extension evidences of the early post-compressional deposits (Tyrrhenian Sea-Northern Apennines, Italy)*. *Ofioliti*, 26(2a), 187-196.

Sani, F., Bonini, M., Montanari, D., Moratti, G., Corti, G., & Del Ventisette, C. (2016). *The structural evolution of the Radicondoli-Volterra Basin (southern Tuscany, Italy): Relationships with magmatism and geothermal implications*. *Geothermics*, 59, 38-55.

Tali carte sono qui riportate, come detto, al fine di avere un quadro complessivo, fermo restando che per l'analisi dei singoli dati si rimanda alla Relazione Tecnico-Mineraria (LCG-RP01-A01-V00) e a quanto esposto più avanti.

Nella predisposizione di queste due figure di sintesi è stato inoltre necessario scegliere una sola carta geologica, tra le molte disponibili, così come una sola carta di anomalia gravimetrica. Per quanto riguarda la cartografia geologica si è deciso di rappresentare la Carta del Substrato derivata dalla cartografia 1:10.000 del CARG e rivista in seguito al rilevamento geologico, effettuato dalla LPP, e all'analisi della altre cartografie disponibili. Per quanto riguarda la gravimetria invece si è deciso per la rappresentazione della carta dell'anomalia di Bouguer (tuttavia nel seguito vengono mostrate anche altre carte di anomalia di particolare interesse). Anche per quanto riguarda i dati termici del sottosuolo sono disponibili molte carte e studi sulle relative temperature e sul flusso di calore. In Figura 4-3 sono stati riportati i dati derivati dalla Banca Dati Nazionale (BNDG).

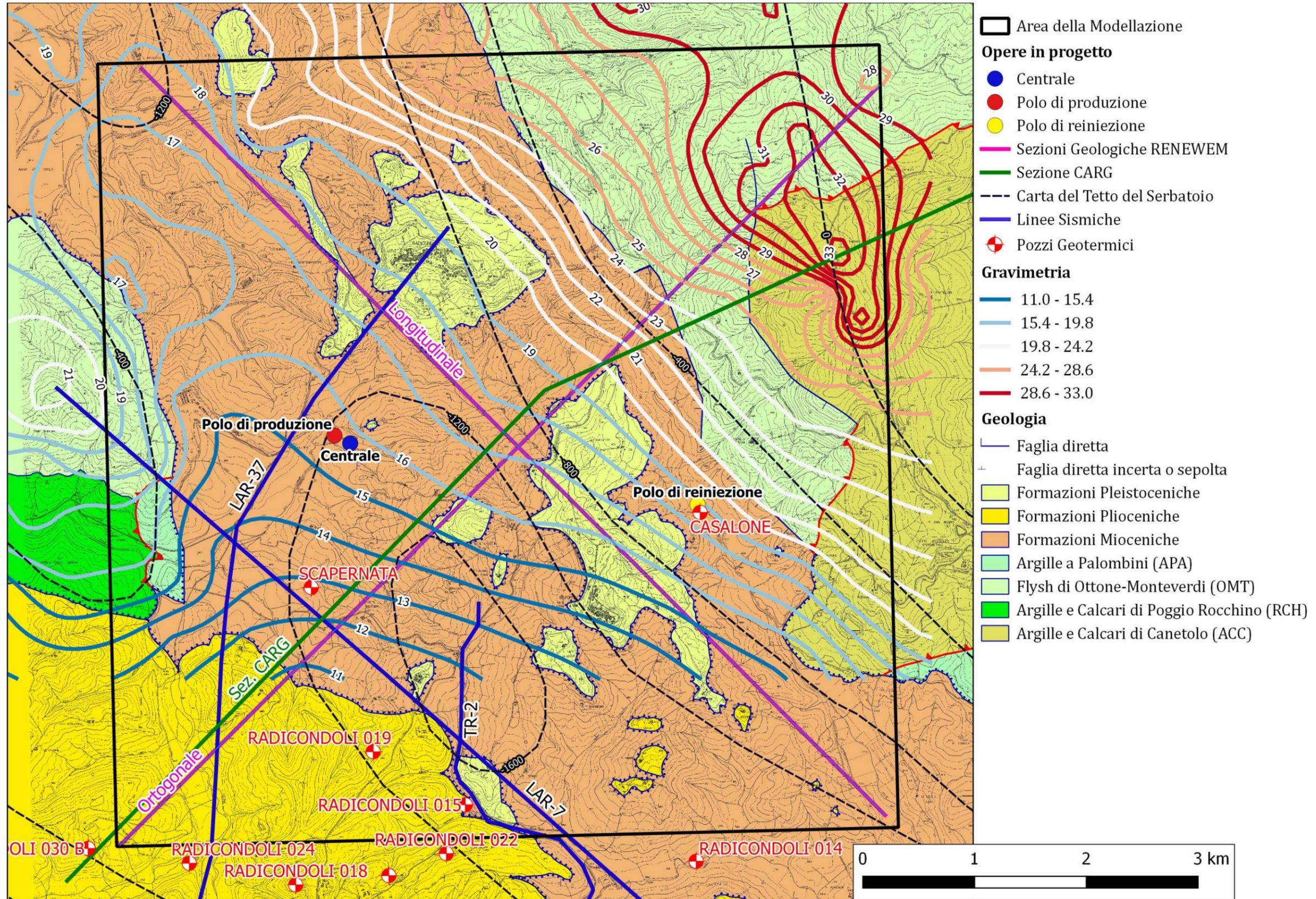


Figura 4-2. Carta di sintesi dei dati a disposizione relativi alla geometria del sottosuolo.

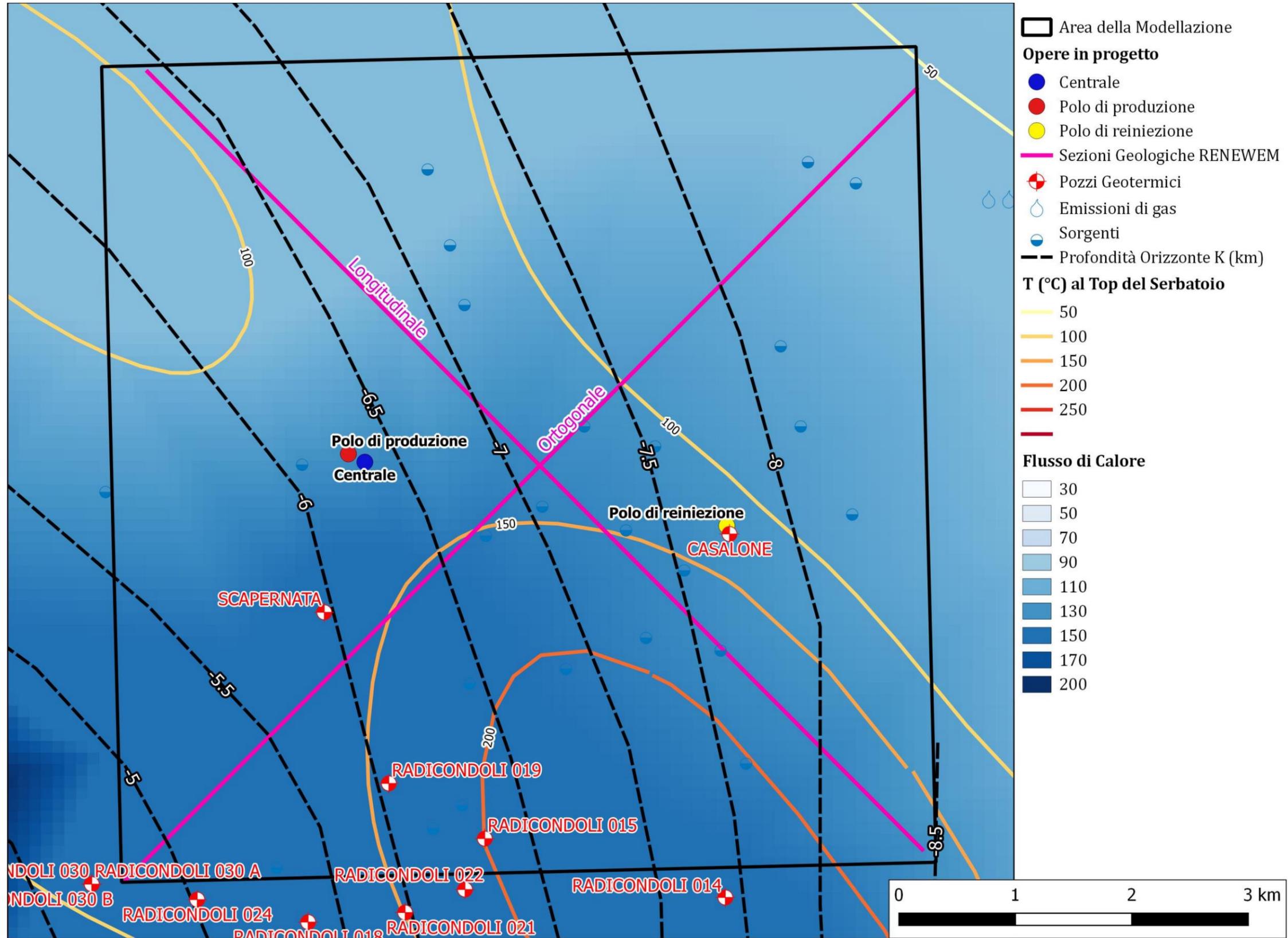


Figura 4-3. Carta di sintesi dei dati a disposizione relativi alle informazioni termiche e parametriche.

4.1.3 Processo di costruzione del Modello Geologico-Strutturale

Il processo logico-operativo di costruzione del modello geologico-strutturale è stato svolto attraverso i seguenti passaggi:

1. Interpretazione dei dati sismici attraverso i dati di pozzo;
2. Realizzazione di una carta geologica di dettaglio;
3. Correlazione dei dati sismici con la carta geologica;
4. Realizzazione di due sezioni geologiche (Ortagonale e Longitudinale alle strutture come da Linee Guida per l'utilizzazione della risorsa geotermica a media e alta entalpia – ottobre 2016 - par. 3.1) integrando dati di pozzo, linee sismiche interpretate, geologia di superficie, carte gravimetriche, carta magnetica, cartografie tematiche e bibliografia scientifica sull'area;
5. Realizzazione del modello geologico-strutturale 3D grazie ai dati gravimetrici di dettaglio e alle carte tematiche.

Questo percorso si intende specifico della fase di interpretazione dei dati e quindi non comprende tutta la fase di acquisizione e trattamento dati di cui si è già parlato. Riguardo ai punti 1) e 2) il percorso è stato sostanzialmente complementare, in quanto l'interpretazione della sismica è stata fatta utilizzando, oltre ai dati di pozzo, anche la conoscenza geologica dell'area, mentre a sua volta la carta geologica, derivata dai rilievi di campagna e dalle numerose altre cartografie disponibili, ha utilizzato i risultati dell'interpretazione sismica, soprattutto in merito alle faglie e all'andamento delle unità nel sottosuolo. Questo lavoro di interpretazione **ha portato, tra gli altri, alla realizzazione (punto 4) di due sezioni geologiche di riferimento (LCG-DC01-A02-V00 e LCG-DC01-A03-V00)** opportunamente verificate con il dato gravimetrico.

20

La combinazione dei dati gravimetrici con il rilevamento geologico ha pertanto consentito di estrapolare tridimensionalmente i dati puntuali e lineari a disposizione **per realizzare un modello geologico 3D**. Di seguito si riportano alcune immagini della realizzazione di tale modello e del modello stesso al solo fine di illustrare graficamente il processo realizzativo **nel modo visivamente più intuitivo e comprensibile possibile** e non per dare contenuto scientifico alle conclusioni. Sono pertanto riportati prima i dati inseriti nel modello 3D (prima quelli geofisici (Figura 4-4) e successivamente quelli geologici realizzati dalla LPP (Figura 4-5)) e in seconda battuta i risultati della modellazione, rappresentando le superfici delle formazioni geologiche (Figura 4-6) e i volumi in stile fence-diagram (Figura 4-7).

NOTA: La modellazione geologica non viene realizzata "a celle" ma anzi il modello geologico è intrinsecamente "continuo", senza alcuna semplificazione geometrica. Infatti in questo tipo di modellazione, non andando a simulare ma piuttosto a ricostruire una geometria, non vengono assegnati, come invece avviene nella modellazione numerica, parametri alle varie unità geologiche.

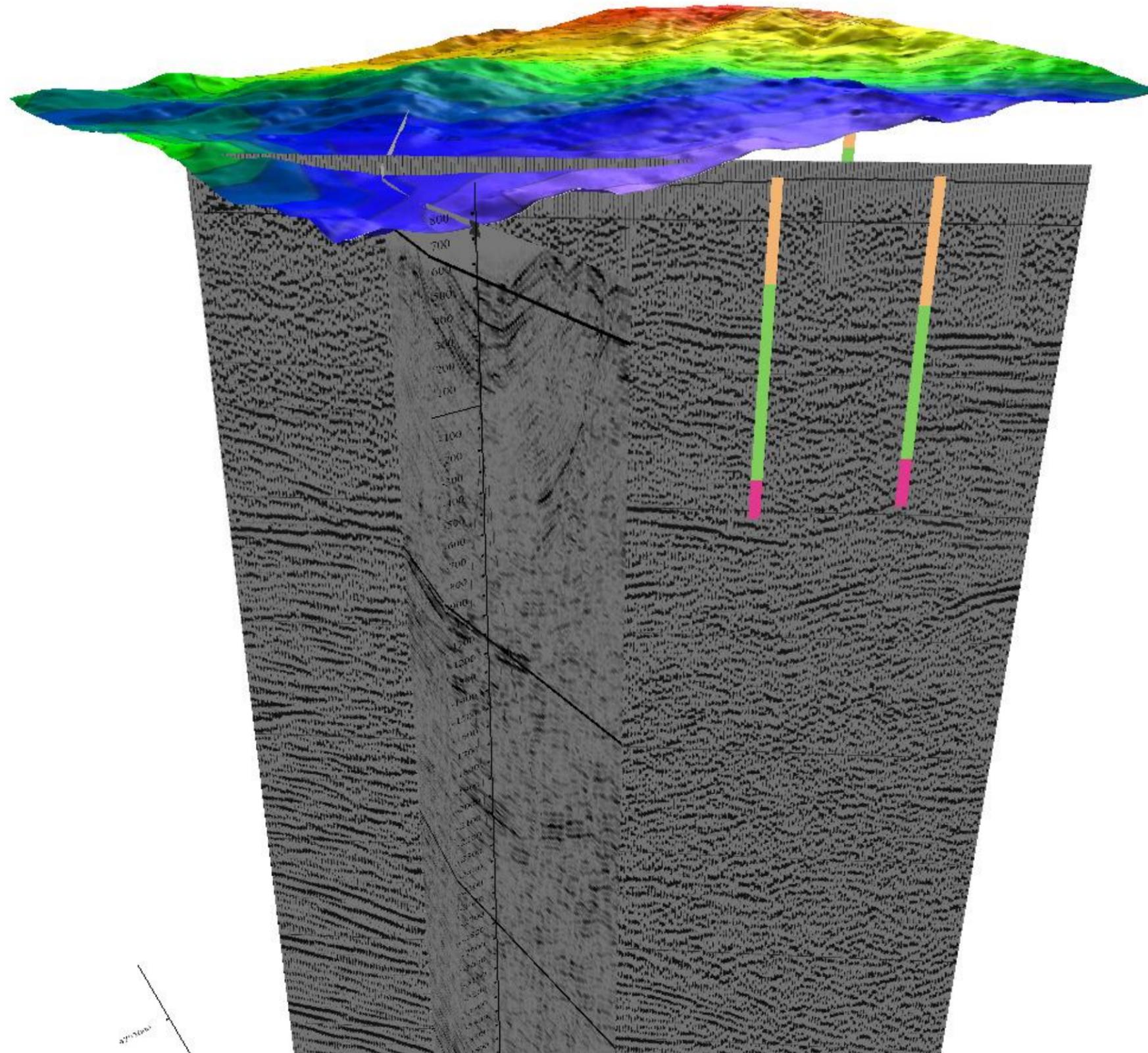


Figura 4-4. Rappresentazione tridimensionale di alcuni dati geofisici utilizzati per realizzare o validare il modello geologico 3D del progetto LUCIGNANO. Nel dettaglio sono riportate: 2 linee sismiche; La carta dell'anomalia gravimetrica di Bouguer e i pozzi di riferimento.

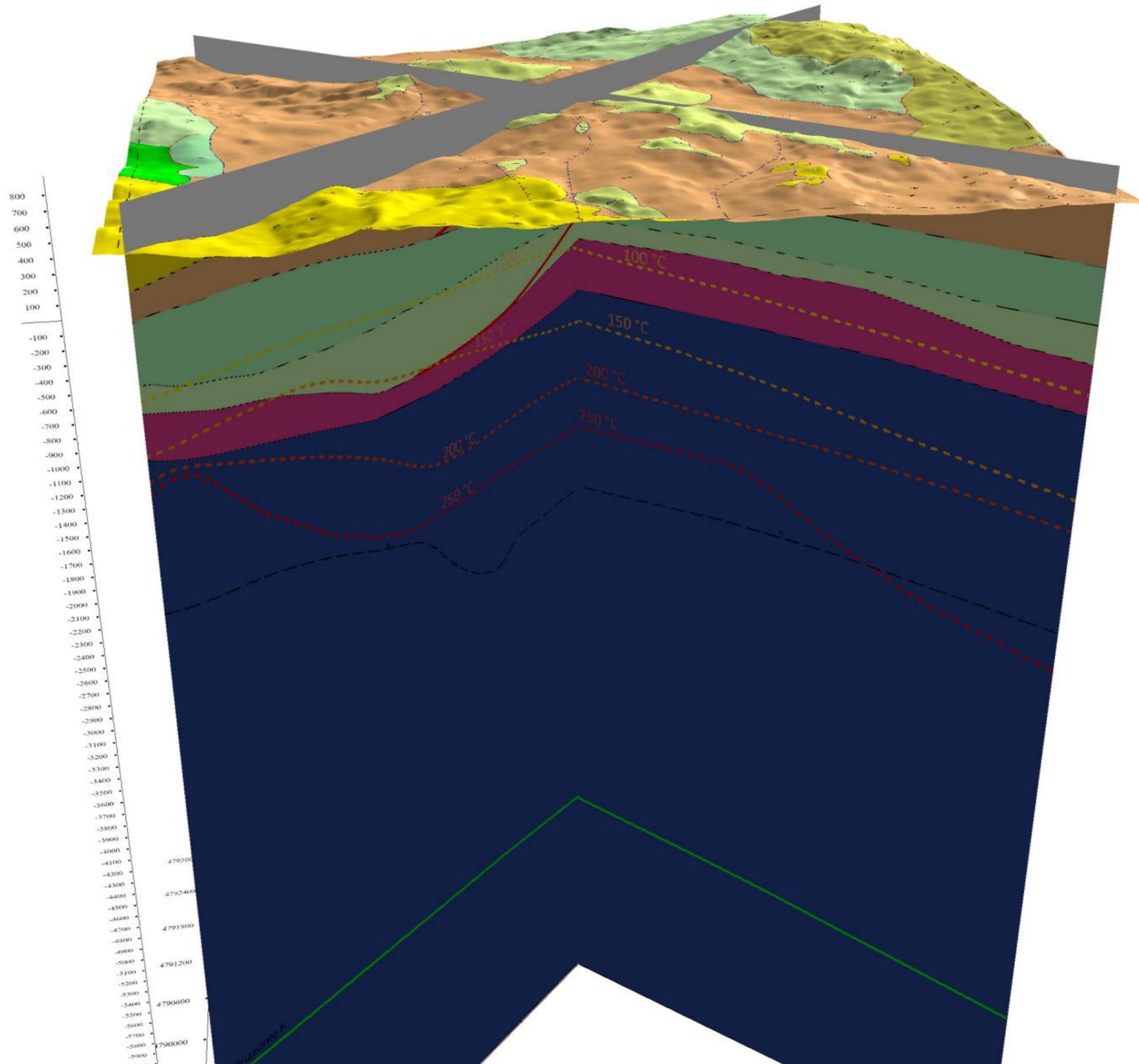


Figura 4-5. Rappresentazione tridimensionale dei dati geologici realizzati dalla LPP utilizzati per realizzare il modello geologico 3D del progetto LUCIGNANO. Nel dettaglio sono riportate: La carta del substrato geologico; Due Sezioni geologiche, Ortogonale e Longitudinale alle strutture.

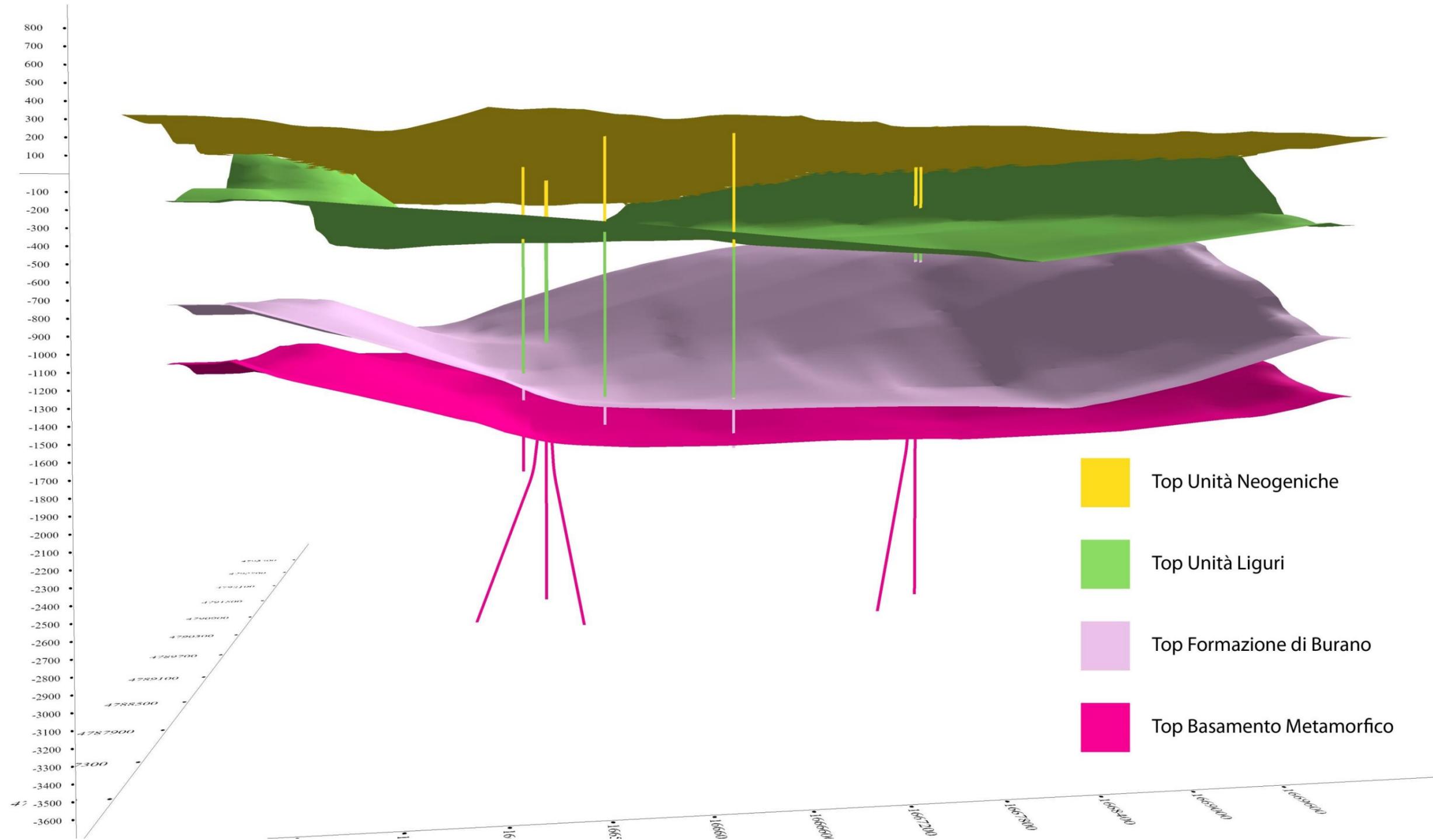


Figura 4-6. Rappresentazione tridimensionale delle superfici, derivate dalla modellazione geologica, dei top delle unità geologiche. Queste superfici sono state utilizzate per realizzare il modello numerico.

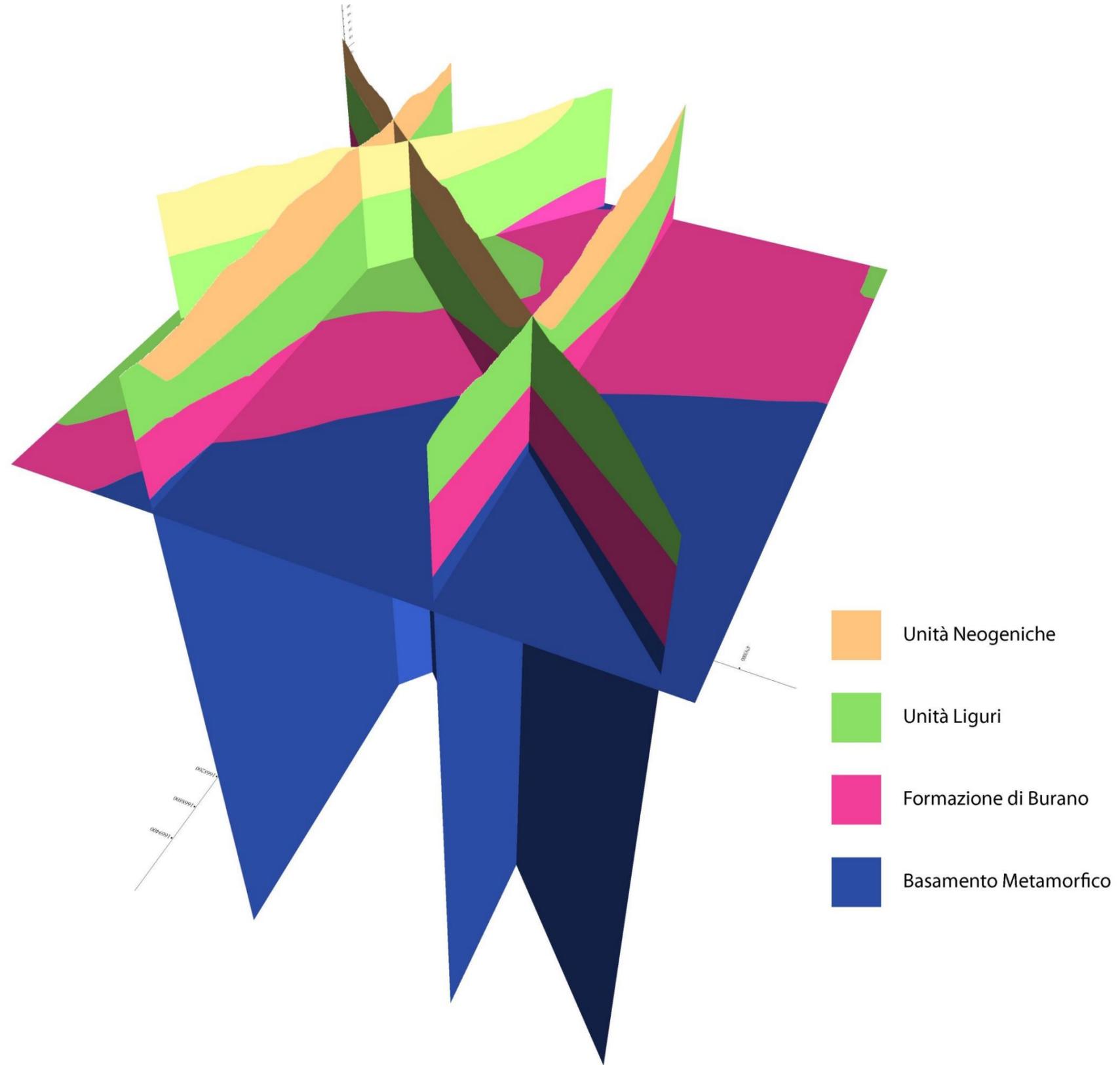


Figura 4-7. Rappresentazione in fence diagram delle unità derivate dalla modellazione geologica.

4.2 MODELLO NUMERICO (RIF. RICHIESTA B3 DELLE INTEGRAZIONI)

Una volta realizzato il modello geologico-strutturale è stato possibile procedere, come già visto nelle integrazioni, alla realizzazione del modello numerico. Tale modello è finalizzato allo studio dei fluidi profondi (andamenti di temperatura, pressione, ecc.) in condizioni attuali (**Modello Statico o Stazionario**) e in condizioni di progetto (**Modello, o Stato, Perturbato**).

Come noto, il Modello Statico, che rappresenta la situazione attuale (ipotizzata in equilibrio), viene derivato **anche** dal modello geologico-strutturale, ma è altresì evidente che si tratta di due modelli concettualmente e tecnicamente diversi, essendo quest'ultimo **soltanto una delle basi di dati** (sia pure tra le più importanti) necessarie per costruire il modello numerico, che viene calcolato attraverso un processo di "fitting" (o "matching") dei diversi dati disponibili.

In pratica, poiché il modello numerico necessita ovviamente, ai fini della simulazione dei fluidi, della caratterizzazione numerica del dominio geologico su cui opera (e quindi non solo delle geometrie ma anche dei valori dei parametri fisici di tutte le entità che fanno parte di tale dominio), è necessario ricostruire tali valori in modo tale che, **simulando il processo reale che ha condotto, in un tempo lunghissimo, e a partire da una "forzante termica" profonda (cd. "piastra scaldante"), ad ottenere la situazione attuale**, i valori di temperatura calcolati in corrispondenza dei pozzi di riferimento coincidano in modo ragionevole con quelli **effettivamente misurati** in tali pozzi (e lo stesso per la temperatura in superficie). Questo processo, che si svolge reiterando il "run" di un opportuno software di simulazione (**Tough2**), conduce alla determinazione **dei parametri fisici** (permeabilità, densità, porosità e conducibilità termica) **per tutte le unità geologiche che costituiscono la base del modello numerico**.

25

Per meglio chiarire questo processo si riportano di seguito i passaggi di cui esso si compone, dividendo – in conformità con quanto esposto all'inizio di questo documento – la prima fase (quella, cioè, di calcolo di tutti i parametri fisici del modello) dalla seconda (quella, cioè, **di utilizzo del modello per simulare gli effetti delle perturbazioni introdotte dal progetto**).

FASE 1: Costruzione del modello e stima dei suoi parametri fisici

1. Importazione delle **superfici** dei top delle formazioni geologiche, realizzate con il modello geologico;
2. Realizzazione in Tough2 della **geometria del modello**. Attraverso le superfici realizzate al punto 1 vengono costruiti i volumi delle varie unità;

3. Realizzazione della **Mesh** (cioè, generazione delle celle elementari per il calcolo) tramite il modulo MESHMaker di Tough2. Questo modulo permette l'utilizzazione dei poligoni di Voronoi, grazie ai quali si riescono a descrivere geometrie complesse **consentendo di aumentare il dettaglio dove necessario** e diminuirlo dove superfluo e/o dannoso. Quindi le celle sono state realizzate per tenere già conto della necessità, nella successiva Fase 2, di **analizzare in maggior dettaglio la situazione in vicinanza dei pozzi del progetto Lucignano. Pertanto le celle sono state infittite proprio in tali zone, oltre che nel serbatoio geotermico.**

Da tutto questo si evince anche che la discretizzazione delle celle è esclusivamente legata al dettaglio che si desidera per i risultati delle simulazioni e non dipende dalla risoluzione in sé del modello geometrico in ingresso o, meno ancora, dalla localizzazione dei dati originari. È quindi compito dello specialista individuare il livello di discretizzazione più opportuno

NOTA: Purtroppo, come accennato in precedenza, nell'elaborato LCG-RP01-A12-V00 sono stati riportati alcuni dati errati.

Nello specifico, nel suddetto elaborato si parlava di una cella minima con volume equivalente ad un cubo con lato equivalente **pari a 500 m**. Dato, questo, **chiaramente sbagliato, tenuto conto che la radice cubica del volume riportato nel testo, e cioè $5 \times 10^6 \text{ m}^3$, fornisce un valore di circa 171 m di lato equivalente.**

Tuttavia il lato equivalente corrispondente alle celle minime utilizzate nel modello **non è neppure quest'ultimo**, dato che le celle hanno altezza pari a 6,6 m e area di base pari a $5,0 \times 10^3 \text{ m}^2$, per un volume pari a $3,36 \times 10^4 \text{ m}^3$ **e dunque un lato equivalente pari a 32 m, che è ancor più piccolo.**

In pratica, dunque, le celle di calcolo realmente utilizzate per le simulazioni **del precedente documento avevano un volume oltre 148 volte inferiore a quello derivabile dal testo utilizzando il dato (errato) del lato equivalente e non quello (corretto) del volume stesso.**

4. Assegnazione dei parametri fisici alle celle attraverso la simulazione reiterata di un periodo molto lungo (in genere, **dell'ordine di 100 milioni di anni**), ottenendo lo stato attuale (**Modello Stazionario**). Mentre infatti la geometria del modello, attraverso il modello geologico, ed i parametri petrofisici, attraverso i dati bibliografici e la verifica iterativa, sono definiti inizialmente come input del modello numerico, i dati di temperatura e pressione, pur essendo noti, non possono concettualmente essere "imposti". È infatti necessario che il modello statico, **prima della "perturbazione" dovuta al progetto**, sia in equilibrio. Pertanto si procede ricostruendo il contesto termico all'interno del dominio impostando una cosiddetta "piastra scaldante", a temperatura costante, alla base dello stesso e simulando la propagazione termica all'interno del modello per una durata sufficientemente lunga (nel caso specifico per 100 milioni di anni) tale da poter considerare questo stato come "in equilibrio" (da notare che la piastra scaldante corrisponde all'orizzonte K che, come già visto anche nelle integrazioni, è un dato molto affidabile).

FASE 2: Utilizzo del modello di Fase 1 per il calcolo delle perturbazioni di progetto

5. Importazione in Tough2 dei 5 profili di pozzo previsti in progetto;
6. Inserimento dei dati (portata e temperatura) di esercizio dei pozzi di produzione e reiniezione;
7. Simulazione dello **stato "perturbato"** (cioè, di esercizio del progetto), ipotizzando un funzionamento dei pozzi con i parametri inseriti come da punti 6 e 7 e **per un periodo di 30 anni**, corrispondente alla vita attesa dell'impianto, ovvero della concessione mineraria.

27

Si fa presente che **tale procedimento è quello utilizzato abitualmente in questo tipo di simulazioni**, e che per tale motivo esso coincide, sostanzialmente, anche con quanto sviluppato nell'ambito degli altri progetti geotermici pilota, coevi del progetto "Lucignano", che hanno già avuto parere favorevole di compatibilità ambientale da parte del Ministero.

4.2.1 Risultati della Simulazione

Al termine della simulazione dello stato perturbato dal progetto, calcolato per una durata pari a 30 anni (durata della concessione di coltivazione), è pertanto possibile ottenere come risultato numerose informazioni quali:

- a. Sovra-pressioni e sotto-pressioni massime indotte dal progetto;
- b. Volumi interessati da variazioni di pressione ($>1\text{bar}$ o $<-1\text{bar}$) (Figura 4-10);
- c. Andamento delle variazioni di pressione indotte nell'arco dei 30 anni (Figura 4-11);
- d. Volumi interessati dalla variazione di temperatura alla reiniezione (-1°C) (Figura 4-8);
- e. Andamento delle variazioni di temperatura indotte nell'arco dei 30 anni (Figura 4-9);
- f. Andamento delle linee di flusso all'interno del serbatoio (Figura 4-12);

Di seguito si riportano alcuni risultati ottenuti dalla simulazione.

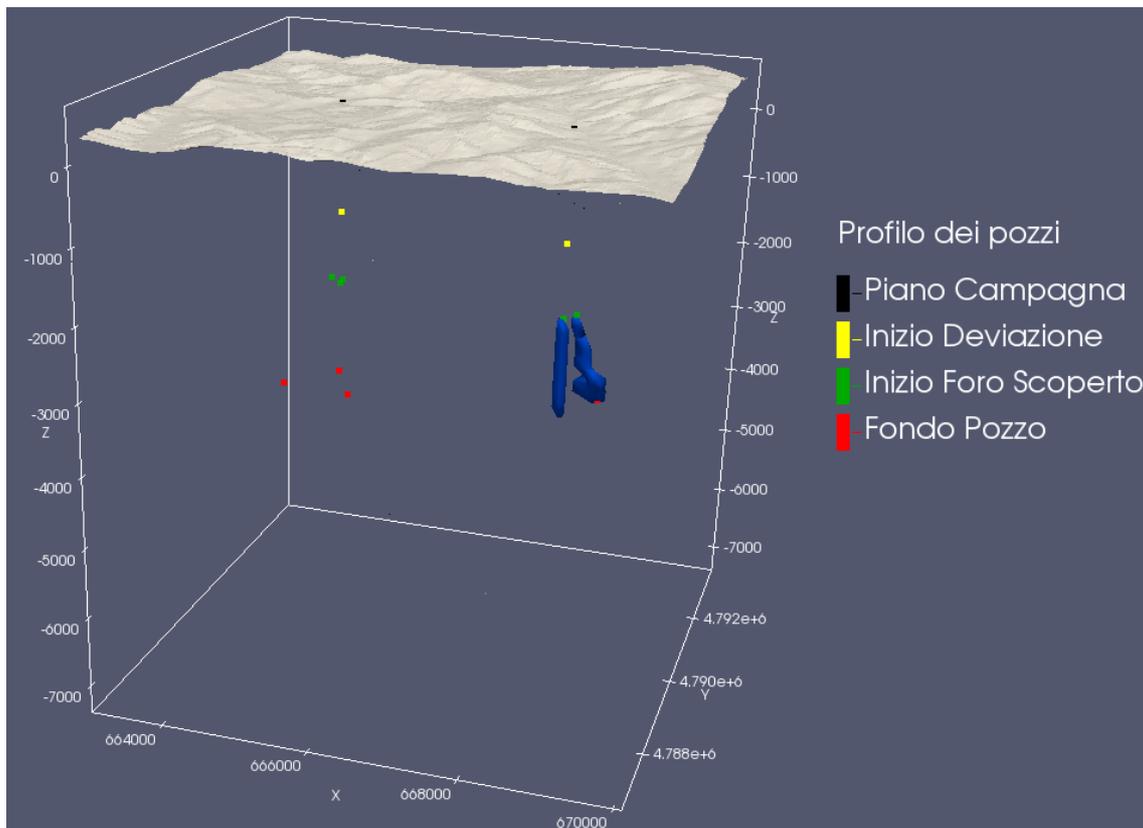


Figura 4-8. Isosuperfici di $\Delta T = -1^\circ\text{C}$ nella zona di reiniezione (distanze sugli assi espresse in metri).

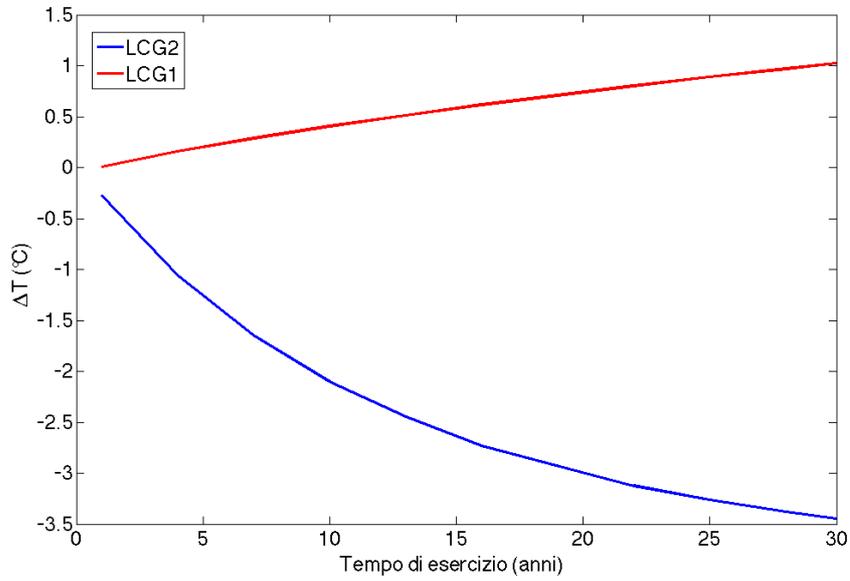


Figura 4-9. Andamento nel tempo della temperatura alla base dei pozzi di emungimento (in rosso) e di reiniezione (in blu)

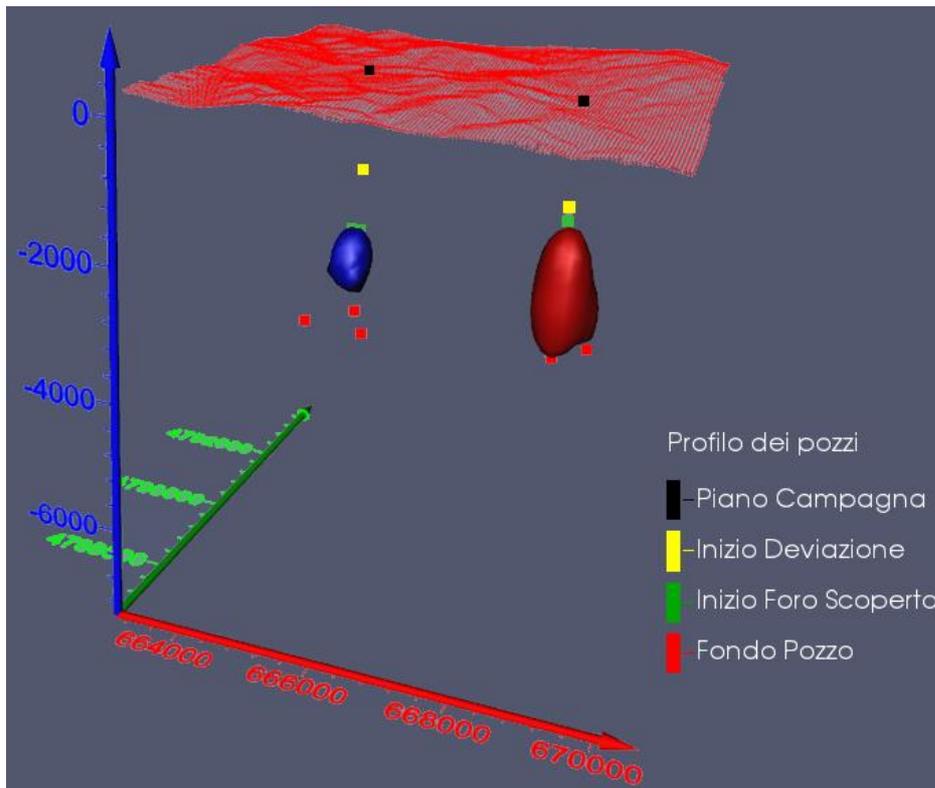


Figura 4-10. Isosuperfici di $\Delta P = \pm 1 \text{ bar}$. Il volume in blu rappresenta la variazione negativa di pressione nella zona di emungimento, quello in rosso la variazione positiva di pressione nella zona di reiniezione (distanze sugli assi espresse in metri).

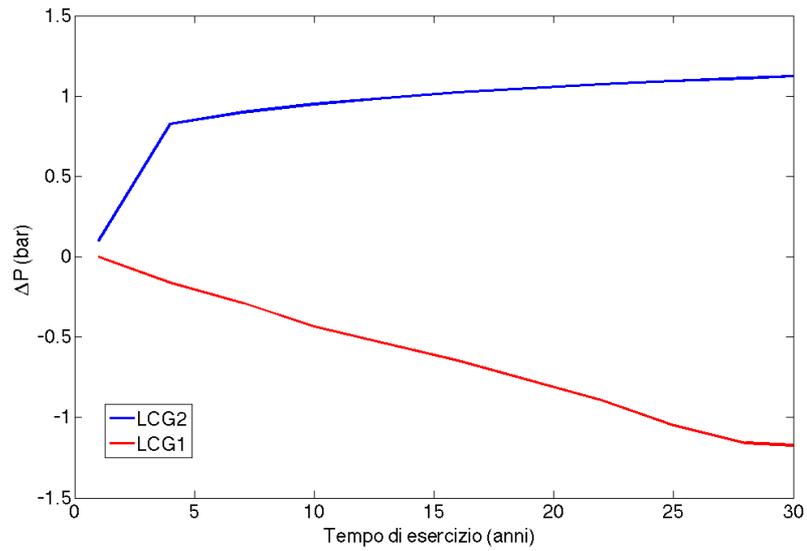


Figura 4-11. Andamento nel tempo della pressione alla base dei pozzi di emungimento (in rosso) e di reiniezione (in blu).

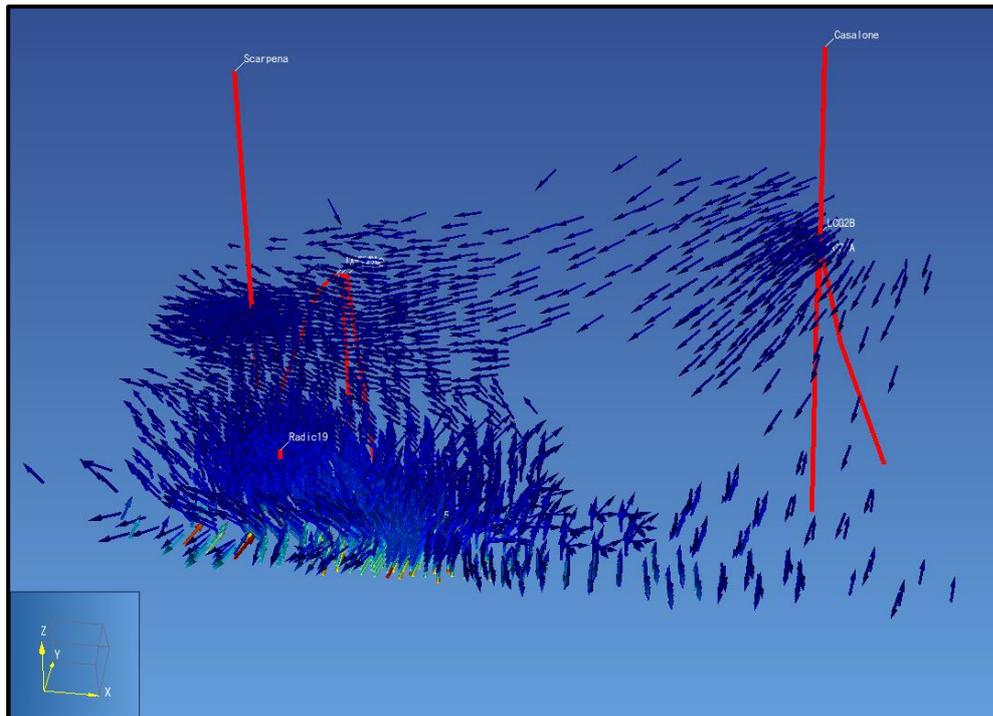


Figura 4-12. Andamento Indicativo delle linee di Flusso all'interno del Serbatoio, restituite dalla modellazione, tra Polo Reiniettivo e Polo Produttivo.

I valori di pressione di +/- 1 bar rappresentano all'incirca le variazioni massime osservate dopo 30 anni di simulazione (Figura 4-11) e, nella zona di reiniezione (+1 bar), **si esauriscono rapidamente interessando un volume piuttosto piccolo equiparabile, in pianta, ad un cerchio di raggio pari a circa 400m.** Anche le variazioni di pressione nella zona di produzione (-1 bar) si esauriscono ancora più rapidamente, interessando un volume di circa la metà del precedente ($7 \cdot 10^8 \text{ m}^3$), equiparabile, in pianta, ad un cerchio di raggio **pari a circa 150m.**

Per quanto riguarda le variazioni di temperatura, dopo 30 anni si calcola una diminuzione **massima di circa $3,5^\circ\text{C}$** nelle celle direttamente interessate dalle traiettorie dei pozzi di reiniezione e un incremento di circa 1°C nelle celle intercettate dai pozzi di emungimento (Figura 4-9). **L'influenza della reiniezione si esaurisce rapidamente a circa 150-200m dall'asse dei pozzi** come visibile dalla Figura 4-8, che mostra i volumi perturbati riferiti ad una variazione di -1°C . Il volume perturbato complessivo è pari a circa $2,4 \cdot 10^8 \text{ m}^3$.

Dalle simulazioni risulta pertanto che i valori di ΔP (+/- 1 bar) e ΔT (-1°C) **sono talmente piccoli da rientrare, in confronto ai valori assoluti presenti in serbatoio, nel margine di errore** e quindi i volumi perturbati potrebbero realisticamente essere anche inferiori a quelli ottenuti.

4.3 SISMICITÀ INNESCATA (RIF. RICHIESTA B6 DELLE INTEGRAZIONI)

31

La valutazione della potenziale sismicità indotta e innescata riportata all'interno dell'elaborato LCG-RP01-A15-V00 è stata eseguita tenendo in considerazione diversi aspetti:

1. Studio della bibliografia riguardante la correlazione tra sismicità indotta, sismicità innescata e attività geotermica;
2. Presenza e tipologia delle eventuali faglie presenti nell'area di studio;
3. Metodi empirici di calcolo;
4. **Risultati della modellazione geologica e numerica** (v. paragrafi 0 e 4.2).

In merito al **punto 1** l'analisi bibliografica effettuata ha riguardato la correlazione tra sismicità indotta, sismicità innescata e attività geotermica.

Tuttavia tale analisi, riportata in modo più esteso all'interno dell'elaborato LCG-RP01-A15-V00, ha messo in evidenza come sia estremamente raro riuscire a distinguere sismicità indotta, innescata e naturale. Questa difficoltà è legata al fatto che i sistemi geotermici **sono generalmente caratterizzati da una elevata sismicità naturale di fondo** e le attività di estrazione e reiniezione dei fluidi geotermici idrotermali (**non EGS**), come quelle previste per il progetto Lucignano, generano statisticamente, per i

campi geotermici toscani, **un aumento del numero di eventi di bassa magnitudo ($ML \leq 2$) ma non in quello degli eventi con $ML > 2$** . Ciò si evince chiaramente dalle immagini riportate all'interno dell'elaborato LCG-RP01-A15-V00 nonché in *Figura 3-1* (Capitolo 3).

Quello che risulta invece dall'ampia analisi bibliografica effettuata è che ad oggi **non è ancora stato individuato un metodo per distinguere se un terremoto sia stato indotto o innescato**, e inoltre che alte pressioni di iniezione **non aumentano il rischio di generare eventi sismici avvertibili**, che comunque possono accadere **solo se altri fattori, come stato di stress e presenza di fratture orientate o zone di faglia, sono presenti**.

Per questo motivo è stato effettuato un rilievo geologico di campagna finalizzato, tra le altre cose, a verificare l'assetto strutturale dell'area (v. paragrafo 0) con l'obiettivo finale di identificare e caratterizzare, quando possibile, le eventuali faglie presenti (**punto 2**). Il rilievo di campagna effettuato, che ha tenuto conto di tutte le cartografie geologiche disponibili per l'area, **non ha tuttavia evidenziato la presenza di strutture tettoniche**, anche a causa dei depositi di copertura. Dal rilevamento è risultata comunque evidente la presenza delle faglie bordiere del Bacino di Radicondoli la cui presenza è stata confermata anche dall'analisi della morfologia, delle ortofoto e dei profili sismici. Oltre a questa struttura tale analisi morfologica ha inoltre consentito di individuare altre possibili faglie minori **all'interno dei depositi neogenici**.

32

Nella cartografia esistente sono inoltre riportate ulteriori faglie, della cui presenza però non è stato riscontrato alcun indizio. Molte di queste faglie risultano infatti incerte e soprattutto **molto distanti dal volume perturbato individuato con la simulazione numerica**.

A giudizio di LPP, anche considerando queste faglie come presenti, dalle cartografie esistenti queste risultano poco profonde (poche centinaia di metri), non raggiungendo quindi il serbatoio geotermico, e con rigetti minimi (poche decine di metri). Questo aspetto è **confermato anche dalla scarsissima presenza, in quest'area, di manifestazioni idrotermali (vapore o gas) che sarebbe lecito aspettarsi per faglie collegate al serbatoio**.

Dal punto di vista della mobilitazione e della sismicità delle faglie non vi sono elementi diretti di superficie che possano fornire indicazioni in merito. Pertanto l'unico indizio in merito è derivabile dalla sismicità dell'area. Come evidenziato dallo studio sulla sismicità (LCG-RP01-A15-V00), nell'area di progetto dal 1900 ad oggi gli eventi sismici registrati sono stati piuttosto diffusi senza possibilità di identificare allineamenti particolari lungo le strutture presenti. Ciò fa ritenere che **non sono presenti nell'area o**

nelle sue immediate vicinanze strutture attive, ciò è confermato anche consultando il Database Europeo delle faglie sismogenetiche e la banca dati ITACHA a cura dell'INGV. **Dunque, in nessuna delle banche dati sono presenti faglie attive nelle vicinanze dell'area di progetto.**

Ciò che emerge dallo studio effettuato, bibliografico e di campagna, risulta pertanto che l'area del progetto Lucignano, comprensiva dei volumi perturbati derivati dalla modellazione numerica, risulta pressoché omogenea lateralmente, soprattutto per quanto riguarda il serbatoio geotermico.

Ciononostante, al fine di evitare di sottostimare il valore finale, nel calcolo del massimo terremoto atteso sono state effettuate scelte estremamente cautelative quali:

- La scelta del metodo di calcolo (**punto 3**) è ricaduta sulla relazione empirica di Lay e Wallace (1995) che considera come superficie di faglia, **indipendentemente dalla sua presenza o meno, la massima superficie che attraversa il volume di roccia perturbato;**
- Il valore dello stress drop (differenza lungo una faglia tra lo stato di stress prima e dopo un terremoto), dal quale deriva il valore della massima magnitudo attesa, **è circa 30 volte superiore a quello effettivamente derivato dalle simulazioni numeriche;**

33

Le simulazioni effettuate infatti hanno messo in evidenza come le scelte progettuali effettuate, e le caratteristiche intrinseche della risorsa, **abbiano effettivamente minimizzato problemi di sismicità legati alla reiniezione**. Nel caso del progetto Lucignano infatti verrà estratto un fluido bifase che, una volta uscito dalla centrale, viene reiniettato in fase acquosa, pertanto con un volume molto minore.

NOTA: Il valore del massimo terremoto atteso risulta così basso, in proporzione ai valori misurati storicamente, **per via delle scelte progettuali effettuate e delle caratteristiche intrinseche della risorsa**. Il numero dei pozzi di reiniezione (2 invece che 1) ha infatti consentito di programmare la reiniezione senza dover imporre sovrappressioni a testa pozzo, con un impegno economico maggiore ma con un evidente vantaggio ambientale.

4.4 SUBSIDENZA (RIF. RICHIESTA B8 DELLE INTEGRAZIONI)

Il calcolo della massima subsidenza attesa è stato effettuato utilizzando il metodo di Geertsma, metodo che **oggi è universalmente impiegato per questo tipo di**

situazioni. I valori di input di tale metodo sono invece derivati dalla modellazione numerica che, come meglio esposto nei paragrafi precedenti, ed analogamente a quanto realizzato per il massimo terremoto atteso, **risulta estremamente attendibile.**

Tale metodologia ha fornito valori di massima subsidenza attesa, con parametri estremamente cautelativi, pari a circa **-2,4 mm** che risultano pertanto molto inferiori a quelli riscontrati nei campi attualmente in esercizio a Larderello e all'Amiata. Questa differenza, che potrebbe apparire come incongruente, e quindi potrebbe essere interpretata come un segnale di allerta sul metodo utilizzato, **è invece totalmente spiegabile con le scelte di progetto previste.** Infatti il progetto Lucignano prevede l'utilizzo di impianti a ciclo chiuso con **totale reimmissione** dei fluidi estratti nelle stesse formazioni di provenienza, condizioni che non sono presenti in nessun impianto attualmente in esercizio in Italia. Inoltre la reiniezione totale anche dei gas incondensabili è una condizione che non è presente in gran parte degli impianti a ciclo binario installati nella varie parti del mondo.

Questi aspetti basterebbero già di per se a giustificare i valori bassissimi di subsidenza ma comunque possono essere considerati anche altri fattori. Le portate estratte per il progetto infatti **sono molto basse in confronto a quelle estratte nel campo di Larderello** e inoltre l'estrazione dei fluidi è stata prevista con 3 pozzi di produzione. Queste scelte fanno in modo che le sottopressioni calcolate siano estremamente basse e delocalizzate.

34

Tutte queste considerazioni **fanno pertanto ritenere che i valori di massima subsidenza attesa risultanti siano da considerarsi più che attendibili ai fini di una valutazione previsionale di impatto.**

APPENDICE N° 1

**TABELLA EVENTI SISMICI
entro i 30 km dall'Impianto
(incluso il raggio da 5km)**

35

n°	Raggio	Anno	Latitudine	Longitudine	Profondità	Magnitudo
1	30 km	2016	43.41	11.17	8.40	3.5
2	30 km	2016	43.42	10.78	15.50	3.3
3	30 km	2016	43.19	11.05	5.80	3.0
4	30 km	2016	43.41	11.18	9.50	2.9
5	30 km	2016	43.40	11.17	12.40	2.8
6	30 km	2016	43.12	11.00	10.00	2.7
7	30 km	2016	43.20	11.03	9.10	2.7
8	30 km	2016	43.25	11.36	5.00	2.6
9	30 km	2016	43.24	10.95	7.80	2.5
10	30 km	2016	43.20	11.04	8.40	2.3
11	30 km	2016	43.42	11.18	8.40	2.2
12	30 km	2016	43.12	11.03	9.30	2.2
13	30 km	2016	43.18	10.89	6.80	2.1
14	30 km	2016	43.18	10.86	6.70	2.1
15	30 km	2016	43.21	11.14	9.20	2.1
16	30 km	2016	43.13	11.05	9.40	2.1
17	30 km	2016	43.41	11.16	7.50	2.1
18	30 km	2016	43.41	11.17	9.30	2.0
19	30 km	2016	43.21	11.14	5.30	2.0
20	30 km	2016	43.13	11.00	8.10	2.0
21	30 km	2016	43.41	11.17	7.60	2.0
22	5 km	2016	43.21	11.04	6.60	2.2
23	5 km	2016	43.20	11.05	8.00	2.0
24	5 km	2016	43.21	11.04	8.80	2.0
25	30 km	2015	43.26	11.38	7.20	2.4
26	30 km	2015	43.24	10.95	5.10	2.2
27	30 km	2015	43.14	11.00	9.40	2.1
28	30 km	2015	43.14	11.02	8.50	2.0
29	30 km	2015	43.27	11.38	6.80	2.0
30	5 km	2015	43.20	11.05	5.90	2.3
31	30 km	2014	43.21	10.86	7.10	2.6
32	30 km	2014	43.45	11.03	7.90	2.6
33	30 km	2014	43.24	11.40	5.00	2.5
34	30 km	2014	43.14	10.80	5.90	2.5
35	30 km	2014	43.45	11.03	4.90	2.5
36	30 km	2014	43.16	10.94	6.10	2.4
37	30 km	2014	43.28	11.27	6.40	2.4
38	30 km	2014	43.46	11.00	5.70	2.3
39	30 km	2014	43.28	11.26	8.50	2.3
40	30 km	2014	43.46	11.03	9.20	2.3
41	30 km	2014	43.29	11.26	5.90	2.2
42	30 km	2014	43.28	11.26	6.80	2.2
43	30 km	2014	43.16	11.00	9.50	2.2
44	30 km	2014	43.24	10.94	4.60	2.1
45	30 km	2014	43.19	10.96	7.20	2.1
46	30 km	2014	43.22	10.95	7.50	2.1

n°	Raggio	Anno	Latitudine	Longitudine	Profondità	Magnitudo
47	30 km	2014	43.19	10.99	7.00	2.1
48	30 km	2014	43.28	11.27	6.10	2.1
49	30 km	2014	43.13	11.04	9.80	2.1
50	30 km	2014	43.24	10.86	9.40	2.0
51	30 km	2014	43.25	10.95	5.40	2.0
52	30 km	2014	43.28	11.28	5.80	2.0
53	30 km	2014	43.25	11.38	9.40	2.0
54	30 km	2013	43.22	10.98	6.10	3.0
55	30 km	2013	43.17	10.78	3.60	2.6
56	30 km	2013	43.13	11.00	8.70	2.4
57	30 km	2013	43.14	11.03	8.90	2.4
58	30 km	2013	43.14	11.01	8.70	2.3
59	30 km	2013	43.14	11.02	8.90	2.3
60	30 km	2013	43.14	11.02	8.50	2.3
61	30 km	2013	43.15	10.80	4.30	2.2
62	30 km	2013	43.14	11.02	7.70	2.1
63	30 km	2013	43.37	11.02	5.00	2.1
64	30 km	2013	43.15	10.99	8.80	2.1
65	30 km	2013	43.14	11.03	8.50	2.1
66	30 km	2013	43.20	10.88	7.40	2.1
67	30 km	2013	43.14	11.01	8.80	2.1
68	30 km	2013	43.13	11.03	7.40	2.0
69	30 km	2013	43.12	11.04	5.20	2.0
70	30 km	2013	43.13	11.02	9.20	2.0
71	30 km	2013	43.26	10.86	9.40	2.0
72	30 km	2013	43.14	11.04	9.20	2.0
73	30 km	2013	43.14	10.85	8.30	2.0
74	30 km	2013	43.23	10.89	6.90	2.0
75	30 km	2012	43.13	11.02	8.10	2.4
76	30 km	2012	43.13	11.01	7.20	2.2
77	30 km	2012	43.12	11.02	6.60	2.1
78	30 km	2012	43.22	11.37	10.80	2.1
79	30 km	2012	43.20	10.98	10.00	2.0
80	30 km	2012	43.16	11.01	9.70	2.0
81	30 km	2012	43.17	10.79	8.00	2.0
82	30 km	2012	43.16	11.00	9.40	2.0
83	30 km	2012	43.14	11.03	9.60	2.0
84	30 km	2012	43.16	11.02	9.70	2.0
85	30 km	2011	43.51	10.97	11.40	2.4
86	30 km	2011	43.41	11.23	6.90	2.3
87	30 km	2011	43.19	10.88	4.20	2.3
88	30 km	2011	43.41	11.24	7.40	2.2
89	30 km	2011	43.21	10.84	7.40	2.2
90	30 km	2011	43.19	10.98	8.70	2.1
91	30 km	2011	43.41	11.24	7.70	2.1
92	30 km	2011	43.18	11.02	7.10	2.1

n°	Raggio	Anno	Latitudine	Longitudine	Profondità	Magnitudo
93	30 km	2011	43.10	11.02	8.00	2.0
94	30 km	2011	43.51	10.98	9.60	2.0
95	30 km	2011	43.13	11.01	6.60	2.0
96	5 km	2011	43.22	11.03	2.00	2.3
97	30 km	2010	43.22	10.92	11.70	2.9
98	30 km	2010	43.13	11.02	9.80	2.2
99	30 km	2010	43.19	10.77	9.30	2.2
100	30 km	2010	43.14	11.01	11.00	2.2
101	30 km	2010	43.11	11.01	7.30	2.1
102	30 km	2010	43.25	10.79	8.30	2.1
103	30 km	2010	43.14	11.04	7.00	2.0
104	30 km	2010	43.10	11.06	5.00	2.0
105	30 km	2010	43.12	11.01	9.70	2.0
106	30 km	2010	43.44	11.18	8.70	2.0
107	30 km	2010	43.13	11.03	10.40	2.0
108	30 km	2010	43.17	11.05	13.10	2.0
109	30 km	2010	43.14	11.02	9.50	2.0
110	30 km	2010	43.20	10.86	7.50	2.0
111	30 km	2009	43.45	11.20	12.70	2.3
112	30 km	2009	43.33	11.25	5.40	2.3
113	30 km	2009	43.16	11.00	9.70	2.2
114	30 km	2009	43.25	10.81	9.10	2.2
115	30 km	2009	43.13	11.06	2.00	2.1
116	30 km	2009	43.12	11.04	5.80	2.0
117	30 km	2008	43.11	10.77	16.20	3.3
118	30 km	2008	43.20	10.83	11.90	2.4
119	30 km	2008	43.10	10.77	8.30	2.2
120	30 km	2008	43.45	11.22	7.20	2.2
121	30 km	2008	43.12	11.03	8.90	2.1
122	30 km	2008	43.24	10.95	3.00	2.0
123	30 km	2008	43.42	11.23	5.80	2.0
124	30 km	2007	43.28	10.87	5.20	3.1
125	30 km	2007	43.42	10.85	11.40	2.7
126	30 km	2007	43.19	11.02	11.10	2.6
127	30 km	2007	43.13	10.81	10.00	2.4
128	30 km	2007	43.13	11.02	9.70	2.1
129	30 km	2007	43.19	11.04	2.10	2.1
130	30 km	2007	43.13	11.05	8.40	2.0
131	30 km	2007	43.12	11.01	8.00	2.0
132	30 km	2007	43.13	11.03	7.00	2.0
133	30 km	2006	43.43	11.01	2.00	2.4
134	30 km	2006	43.30	10.91	4.00	2.3
135	30 km	2006	43.21	10.93	9.50	2.1
136	30 km	2005	43.19	11.08	4.20	2.6
137	30 km	2005	43.23	11.39	6.30	2.6
138	30 km	2005	43.14	11.02	10.00	2.4

n°	Raggio	Anno	Latitudine	Longitudine	Profondità	Magnitudo
139	30 km	2005	43.28	10.85	5.00	2.4
140	30 km	2005	43.03	10.89	5.00	2.3
141	30 km	2005	43.30	10.86	5.00	2.2
142	30 km	2005	43.27	11.37	3.40	2.2
143	30 km	2005	43.09	11.01	9.30	2.2
144	30 km	2005	43.15	10.89	8.80	2.0
145	30 km	2005	43.12	11.06	5.00	2.0
146	30 km	2005	43.18	11.10	9.40	2.0
147	30 km	2005	43.28	10.90	9.90	2.0
148	5 km	2005	43.22	11.07	15.90	2.2
149	30 km	1999	43.24	10.80	18.25	2.7
150	30 km	1999	43.14	11.02	5.94	2.4
151	30 km	1999	43.27	10.94	6.01	2.1
152	30 km	1999	43.25	10.81	14.42	2.0
153	5 km	1999	43.22	11.05	0.04	2.0
154	30 km	1998	43.08	10.81	7.60	4.2
155	30 km	1998	43.08	10.81	7.56	3.5
156	30 km	1998	43.17	10.84	0.00	2.8
157	30 km	1998	43.19	10.84	4.24	2.4
158	30 km	1998	43.22	11.09	0.04	2.3
159	30 km	1998	43.41	10.83	9.04	2.3
160	30 km	1998	43.11	11.01	6.22	2.3
161	30 km	1998	43.16	10.84	4.65	2.2
162	30 km	1998	43.17	11.13	2.94	2.0
163	30 km	1998	43.18	11.12	2.78	2.0
164	30 km	1998	43.30	11.35	0.02	2.0
165	30 km	1997	43.32	10.86	0.01	2.7
166	30 km	1997	43.43	11.13	17.74	2.7
167	30 km	1997	43.14	10.85	5.93	2.6
168	30 km	1997	43.16	11.01	0.03	2.4
169	30 km	1997	43.49	11.12	8.62	2.3
170	30 km	1997	43.51	11.08	0.04	2.3
171	30 km	1997	43.37	11.01	19.67	2.2
172	30 km	1997	43.20	10.86	6.19	2.2
173	30 km	1997	43.47	10.91	0.01	2.1
174	30 km	1997	43.44	11.13	19.97	2.1
175	30 km	1997	43.45	11.06	0.05	2.1
176	30 km	1997	43.47	11.14	28.16	2.0
177	30 km	1997	43.44	11.13	20.50	2.0
178	30 km	1997	43.51	11.10	3.58	2.0
179	30 km	1997	43.49	11.13	14.70	2.0
180	30 km	1996	43.39	11.24	5.92	2.6
181	30 km	1996	43.41	11.26	5.98	2.4
182	30 km	1996	43.13	10.99	6.02	2.2
183	30 km	1995	43.09	10.74	6.77	3.3
184	30 km	1995	43.19	10.97	6.94	3.3

n°	Raggio	Anno	Latitudine	Longitudine	Profondità	Magnitudo
185	30 km	1995	43.01	10.97	15.64	2.4
186	30 km	1995	43.32	11.17	6.33	2.3
187	30 km	1995	43.01	10.95	6.14	2.2
188	30 km	1995	43.20	11.06	7.51	2.2
189	30 km	1995	43.22	11.11	7.99	2.2
190	30 km	1995	43.22	10.73	2.92	2.2
191	30 km	1995	43.11	11.00	6.05	2.0
192	5 km	1995	43.22	11.03	21.20	2.0
193	30 km	1994	43.23	10.91	6.76	2.8
194	30 km	1994	43.18	11.00	6.03	2.4
195	30 km	1994	43.16	11.05	5.78	2.0
196	30 km	1993	43.29	10.94	2.40	4.0
197	30 km	1993	43.26	10.92	18.36	3.4
198	30 km	1993	43.25	10.88	8.49	3.3
199	30 km	1993	43.22	10.86	6.85	2.6
200	30 km	1993	43.22	10.85	8.46	2.4
201	30 km	1993	43.24	10.87	14.30	2.3
202	30 km	1993	43.25	10.92	0.01	2.2
203	30 km	1993	43.47	11.23	5.00	2.2
204	30 km	1993	43.00	10.96	18.18	2.0
205	30 km	1993	43.18	10.81	13.12	2.0
206	30 km	1992	43.22	10.80	6.10	2.0
207	30 km	1991	43.17	11.00	14.40	3.2
208	30 km	1991	43.16	10.76	8.40	2.1
209	30 km	1991	43.15	10.85	6.34	2.0
210	30 km	1991	43.14	10.98	6.34	2.0
211	30 km	1990	43.19	10.82	0.60	3.6
212	30 km	1990	43.13	10.77	8.94	3.2
213	30 km	1990	43.13	10.99	23.17	2.7
214	30 km	1990	43.23	11.29	6.00	2.0
215	30 km	1989	43.16	10.75	26.28	2.9
216	30 km	1989	43.18	11.03	21.30	2.4
217	30 km	1989	43.31	11.29	6.01	2.3
218	30 km	1989	43.33	11.23	3.91	2.2
219	30 km	1989	43.37	11.31	4.57	2.2
220	30 km	1989	43.15	10.80	5.99	2.2
221	30 km	1989	43.30	10.82	6.29	2.0
222	5 km	1989	43.22	11.02	17.79	2.0
223	PdR	1989	43.26	11.03	21.84	2.6
224	30 km	1988	43.29	11.35	14.29	2.6
225	30 km	1988	43.44	11.21	0.02	2.3
226	30 km	1987	43.11	10.75	24.41	2.5
227	30 km	1986	43.33	11.36	5.99	2.1
228	30 km	1986	43.12	10.97	28.12	2.0
229	30 km	1985	43.30	11.25	13.55	2.2
230	30 km	1983	43.38	11.11	0.00	2.6

n°	Raggio	Anno	Latitudine	Longitudine	Profondità	Magnitudo
231	30 km	1970	43.25	10.79	33.00	4.7
232	30 km	1968	43.30	11.28		4.2
233	30 km	1956	43.30	11.28		4.0
234	30 km	1946	43.27	10.88		4.6
235	30 km	1934	43.29	10.95	17.57	2.0
236	30 km	1933	43.17	10.86		3.9
237	30 km	1926	43.20	10.85	4.28	2.3
238	30 km	1926	43.21	10.87	0.14	2.0
239	30 km	1925	43.23	10.87		4.3
240	30 km	1923	43.19	10.82	3.05	2.2
241	30 km	1922	43.20	11.14	6.57	2.2
242	30 km	1922	43.18	10.74	4.97	2.0
243	30 km	1922	43.46	11.06	7.19	2.0
244	30 km	1921	43.51	11.03	2.84	2.3
245	30 km	1920	43.25	10.88	3.59	2.0
246	30 km	1916	43.47	11.04		3.9
247	30 km	1916	43.08	11.00	7.00	2.2
248	30 km	1916	43.20	10.89	3.08	2.0
249	30 km	1916	43.16	11.06	0.00	2.0
250	30 km	1916	43.24	10.91	0.08	2.0
251	30 km	1915	42.99	11.02	6.46	2.2
252	30 km	1915	43.26	10.89	6.21	2.1
253	30 km	1915	43.16	10.83	0.03	2.0
254	30 km	1915	43.24	10.87	4.58	2.0
255	30 km	1914	43.03	11.06	0.01	2.7
256	30 km	1914	43.37	11.36	0.05	2.0
257	30 km	1912	43.11	10.79	0.49	2.7
258	30 km	1912	43.34	11.35	7.60	2.1
259	30 km	1911	43.39	11.24		4.4
260	30 km	1911	43.19	10.99	10.27	3.5
261	30 km	1911	43.20	10.85	3.08	2.1
262	30 km	1911	43.20	10.89	5.79	2.1
263	30 km	1911	43.23	10.83	7.08	2.0
264	30 km	1911	43.36	11.14	0.00	2.0
265	30 km	1909	43.13	11.20		5.1
266	30 km	1906	43.45	11.14		4.3
267	30 km	1906	43.46	11.22		4.0
268	30 km	1897	43.47	11.11		4.3
269	30 km	1869	43.45	11.11		5.0
270	30 km	1869	43.34	11.35		4.8
271	30 km	1869	43.34	11.33		4.4
272	30 km	1867	43.32	11.33		4.2
273	30 km	1859	43.33	11.35		4.8
274	30 km	1859	43.33	11.31		4.5
275	30 km	1854	43.32	11.33		3.7
276	30 km	1853	43.35	10.87		4.7

n°	Raggio	Anno	Latitudine	Longitudine	Profondità	Magnitudo
277	30 km	1853	43.32	11.33		3.9
278	30 km	1848	43.32	11.33		5.1
279	30 km	1804	43.45	11.11		5.1
280	30 km	1804	43.42	11.16		4.8
281	30 km	1804	43.49	11.15		4.2
282	30 km	1804	43.32	11.33		3.7
283	30 km	1795	43.32	11.33		3.7
284	30 km	1787	43.32	11.33		4.2
285	30 km	1787	43.32	11.33		4.2
286	30 km	1787	43.32	11.33		4.2
287	30 km	1787	43.32	11.33		3.7
288	30 km	1779	43.32	11.33		4.2
289	30 km	1741	43.32	11.33		5.1
290	5 km	1724	43.21	11.01		5.1
291	30 km	1705	43.32	11.33		3.7
292	30 km	1697	43.32	11.33		4.9
293	30 km	1697	43.32	11.33		4.9
294	30 km	1697	43.32	11.33		4.6
295	30 km	1697	43.32	11.33		4.6
296	30 km	1697	43.32	11.33		4.6
297	30 km	1697	43.32	11.33		4.4
298	30 km	1638	43.32	11.33		4.4
299	30 km	1609	43.42	11.11		4.4
300	30 km	1603	43.32	11.33		4.4
301	30 km	1575	43.32	11.33		4.9
302	30 km	1496	43.32	11.33		5.1
303	30 km	1496	43.32	11.33		4.2
304	30 km	1486	43.32	11.33		4.4
305	30 km	1467	43.32	11.33		4.9
306	30 km	1467	43.32	11.33		4.4
307	30 km	1436	43.32	11.33		4.9
308	30 km	1430	43.32	11.33		4.2
309	30 km	1429	43.32	11.33		4.2
310	30 km	1420	43.32	11.33		4.4
311	30 km	1414	43.27	11.12		5.7
312	30 km	1361	43.32	11.33		4.9
313	30 km	1320	43.32	11.33		5.1

APPENDICE N° 2
TABELLA EVENTI SISMICI
con Magnitudo >4,5 in
Toscana

n°	Anno	Latitudine	Longitudine	Profondità	Magnitudo
1	1920	44.19	10.28		6.5
2	1919	43.96	11.48		6.4
3	1352	43.47	12.13		6.3
4	1834	44.43	9.86		6
5	1846	43.47	10.56		6
6	1542	44.01	11.39		6
7	1558	43.46	11.56		6
8	1837	44.18	10.18		5.9
9	1414	43.27	11.12		5.7
10	1740	44.07	10.49		5.6
11	1914	43.91	10.6		5.6
12	1920	44.25	10.28		5.6
13	1293	43.93	10.92		5.6
14	1481	44.27	10.13		5.6
15	1895	43.7	11.26		5.5
16	1694	43.62	12.09		5.4
17	1453	43.78	11.29		5.4
18	1726	43.24	11.51		5.3
19	1767	44.14	10.13		5.3
20	1873	44.23	9.86		5.3
21	1909	43.15	11.4		5.3
22	1940	42.89	11.87		5.3
23	1527	43.93	10.92		5.3
24	1545	43.07	11.64		5.3
25	1597	43.99	11.43		5.3
26	1746	44.09	10.45		5.2
27	1781	43.17	11.54		5.2
28	1802	43.09	11.54		5.2
29	1812	43.66	11.14		5.2
30	1871	43.3	10.62		5.2
31	1903	44.33	9.95		5.2
32	1920	44.25	10.28		5.2
33	1724	43.21	11.01		5.1
34	1741	43.32	11.33		5.1
35	1762	44	11.51		5.1
36	1777	42.88	11.76		5.1
37	1790	44.35	9.91		5.1
38	1804	43.45	11.11		5.1
39	1814	43.64	10.36		5.1
40	1848	43.32	11.33		5.1
41	1864	44.04	11.28		5.1
42	1904	43.97	10.82		5.1
43	1909	43.13	11.2		5.1
44	1911	43.44	11.34		5.1
45	1920	44.25	10.28		5.1
46	2013	44.13	10.14	7	5.1

n°	Anno	Latitudine	Longitudine	Profondità	Magnitudo
47	1148	43.77	11.26		5.1
48	1320	43.32	11.33		5.1
49	1484	43.57	12.14		5.1
50	1489	43.57	12.14		5.1
51	1496	43.32	11.33		5.1
52	1504	43.7	11.82		5.1
53	1599	43.77	11.72		5.1
54	1611	44.01	11.36		5.1
55	1796	43.53	11.87		5
56	1843	44	11.26		5
57	1869	43.45	11.11		5
58	1878	44.22	10.04		5
59	1899	43.96	11.12		5
60	1902	44.09	10.46		5
61	1919	43.57	12.13		5
62	1929	43.99	11.51		5
63	1939	44	11.43		5
64	1939	44.13	10.26		5
65	1948	43.6	12.13		5
66	1950	43.39	10.46		5
67	2013	44.16	10.45	19.8	5
68	1679	43.14	11.67		4.9
69	1697	43.32	11.33		4.9
70	1697	43.32	11.33		4.9
71	1700	42.87	11.67		4.9
72	1727	44.06	11.37		4.9
73	1742	43.55	10.31		4.9
74	1770	43.7	11.41		4.9
75	1781	43.29	11.75		4.9
76	1798	43.34	11.42		4.9
77	1798	43.08	11.65		4.9
78	1804	43.61	11.11		4.9
79	1815	42.87	11.68		4.9
80	1926	42.85	11.63		4.9
81	1930	44.14	10.72		4.9
82	1931	44.06	11.37		4.9
83	1939	44.11	10.07		4.9
84	1959	43.7	11.3		4.9
85	1005	43.46	11.88		4.9
86	1960	44	11.39		4.9
87	1287	42.88	11.68		4.9
88	1358	43.57	12.14		4.9
89	1361	43.32	11.33		4.9
90	1436	43.32	11.33		4.9
91	1467	43.32	11.33		4.9
92	1995	43.66	11.18	10	4.9

n°	Anno	Latitudine	Longitudine	Profondità	Magnitudo
93	1520	43.54	12.05		4.9
94	1549	43.55	10.31		4.9
95	1554	43.77	11.26		4.9
96	1559	43.62	12.09		4.9
97	1575	43.32	11.33		4.9
98	1731	43.67	12.04		4.8
99	1804	43.42	11.16		4.8
100	2013	44.16	10.45	19.8	4.8
101	1859	43.33	11.35		4.8
102	1869	43.34	11.35		4.8
103	1902	44.11	10.28		4.8
104	1902	42.84	11.6		4.8
105	1948	42.86	11.56		4.8
106	1995	44.11	10	4.8	4.8
107	2013	44.16	10.19	6.1	4.8
108	1845	43.84	10.51		4.7
109	1853	43.35	10.87		4.7
110	1895	43.97	10.82		4.7
111	1901	43.56	10.95		4.7
112	1950	43.53	10.33		4.7
113	1969	44.05	10.73	33	4.7
114	1970	43.25	10.79	33	4.7
115	2008	44.06	11.25	3.8	4.7
116	1641	44.38	9.88		4.6
117	1646	43.55	10.31		4.6
118	1697	43.32	11.33		4.6
119	1697	43.32	11.33		4.6
120	1697	43.32	11.33		4.6
121	1729	43.77	11.49		4.6
122	1767	44.24	10.12		4.6
123	1772	43.57	12.14		4.6
124	1774	43.61	12.13		4.6
125	1774	42.83	11.59		4.6
126	1775	44.24	10.12		4.6
127	1778	43.57	12.14		4.6
128	1779	44.06	10.86		4.6
129	1808	43.55	10.31		4.6
130	1815	43.93	10.92		4.6
131	1835	43.96	11.42		4.6
132	1871	43.42	11.35		4.6
133	1895	43.76	11.24		4.6
134	1897	43.79	10.67		4.6
135	1905	42.86	11.56		4.6
136	1916	44.07	10.47		4.6
137	1921	44.38	9.88		4.6
138	1995	44.13	10.02	8.23	4.6

n°	Anno	Latitudine	Longitudine	Profondità	Magnitudo
139	1931	44.11	11.53		4.6
140	1940	42.85	11.72		4.6
141	1946	43.27	10.88		4.6
142	1951	44.03	10.38		4.6
143	1196	43.93	10.92		4.6
144	1306	43.84	10.51		4.6
145	1345	43.77	11.26		4.6
146	1969	44.06	11.37		4.6
147	1345	43.77	11.26		4.6
148	1980	44.07	10.56		4.6
149	1449	43.23	11.56		4.6
150	1985	44.09	10.45	9	4.6
151	1509	42.9	11.77		4.6
152	2001	43.6	12.11	5.5	4.6
153	2013	44.17	10.2	9.2	4.6
154	1600	43.77	11.26		4.6