



**TOTAL E&P ITALIA**  
**PROGETTO INTERREGIONALE**  
**TEMPA ROSSA**

**Pozzo Gorgoglione 3**  
**Valutazione geomeccanica**

Rev.	Date	Revision memo
0	15/03/2019	Prima stesura <i>L. DE RIZ</i>

This document has been generated by an Electronic Document Management System. When printed it is considered as a for information only copy. The controlled copy is the screen version and it is the holder's responsibility that he/she holds the latest valid version

<b>1.0</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>3</b>
<b>2.0</b>	<b>CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI</b>	<b>3</b>
<b>3.0</b>	<b>GIACIMENTO DI TEMP A ROSSA</b>	<b>4</b>
<b>4.0</b>	<b>SIMULATORI DINAMICO-GEOMECCANICO ACCOPPIATI</b>	<b>6</b>
4.1	PRINCIPIO	6
4.2	CASO APPLICATIVO: TEMP A ROSSA	8
4.2.1	Dati disponibili	8
4.2.2	Costruzione del modello	10
4.2.2.1	Geometria e griglia	10
4.2.2.2	Proprietà meccaniche	12
4.2.2.3	Pressione di poro	16
4.2.2.4	Stato tensionale in situ	17
4.2.3	Simulazioni	18
4.2.3.1	Inizializzazione del sistema	18
4.2.3.2	Modellizzazione del “natural depletion”	20
<b>5.0</b>	<b>RESULTATI</b>	<b>20</b>
5.1	SUBSIDENZA	20
5.2	RISCHIO DI ATTIVAZIONE DELLE FAGLIE	21
5.2.1	All’interno del giacimento	21
5.2.2	Zone esterne al giacimento	23
<b>6.0</b>	<b>DISCUSSIONE</b>	<b>26</b>

## FIGURE

Figura 1.	Mappa della Concessione Gorgoglione	4
Figura 2.	Colonna litologica incontrata nel pozzo GG-2	5
Figura 3.	Sezione strutturale del campo di Temp a Rossa	6
Figura 4.	Principi costruttivi del modello geomeccanico	7
Figura 5.	Sezione sismica interpretata NW-SE del campo di Temp a Rossa	8
Figura 6.	Evoluzione della pressione media di giacimento calcolata dal simulatore: caso a sei pozzi e caso a 7 pozzi	9
Figura 7.	Esempio di distribuzione delle pressioni per unità stratigrafiche	9
Figura 8.	Rappresentazione delle faglie integrate nel modello	10

Figura 9. Rappresentazione strutturale del modello, incluse le faglie .....	11
Figura 10. Rappresentazione globale del modello geomeccanico .....	12
Figura 11. Esempio di calibrazione della porosità/densità su un set parziale di dati provenienti da log .....	14
Figura 12. Esempio di risultato del modello 1D (modulo di Young e coefficiente di Poisson per GG-2 – pozzo esistente – e GG-3 pozzo pianificato) .....	15
Figura 13. Distribuzione del modulo di Young (GPa).....	15
Figura 14. Zone in sovrappressione nel campo di Tempa Rossa (esempio di GG-2) .....	16
Figura 15. Profilo delle tensioni in Tempa Rossa (GG-3) .....	17
Figura 16. Orientazione dello stress principale a partire dall'analisi dei break-outs.....	18
Figura 17. Tempa Rossa, modello di deformazione (Pleistocene→presente) .....	19
Figura 18. Mappa mondiale degli stress (World Stress Map): Regione Basilicata.....	19
Figura 19. Valori finali calcolati di subsidenza (m) – caso di riferimento a sei pozzi.....	20
Figura 20. Valori finali calcolati di subsidenza (m) – caso a sette pozzi (incluso GG-3).....	21
Figura 21. Valori di massimo sforzo di taglio plastico lungo le faglie - caso di riferimento a sei pozzi .....	22
Figura 22. Valori di massimo sforzo di taglio plastico lungo le faglie – caso a sette pozzi (incluso GG-3) .....	22
Figura 23. Variazioni dello sforzo di taglio legate all'abbassamento della pressione di giacimento (direzione xy) – caso di riferimento a sei pozzi.....	23
Figura 24. Variazioni dello sforzo di taglio legate all'abbassamento della pressione di giacimento (direzione yz) – caso di riferimento a sei pozzi.....	24
Figura 25. Variazioni dello sforzo di taglio legate all'abbassamento della pressione di giacimento (direzione zx) – caso di riferimento a sei pozzi.....	24
Figura 26. Variazioni dello sforzo di taglio legate all'abbassamento della pressione di giacimento (direzione xy) – caso a sette pozzi .....	25
Figura 27. Variazioni dello sforzo di taglio legate all'abbassamento della pressione di giacimento (direzione yz) – caso a sette pozzi .....	25
Figura 28. Variazioni dello sforzo di taglio legate all'abbassamento della pressione di giacimento (direzione zx) – caso a sette pozzi .....	26

## 1.0 INTRODUZIONE

Il giacimento di Tempa Rossa sarà prodotto in “natural depletion”, con progressivo abbassamento della pressione di formazione. Non saranno utilizzate tecniche di iniezione di fluidi al fine di mantenere o ridurre il declino di pressione.

Il cambiamento della pressione di giacimento indurrà delle deformazioni a livello della formazione che potranno comportare dei movimenti degli orizzonti geologici sovrastanti il giacimento fino alla superficie (i.e. subsidenza). Inoltre si risconterà un'evoluzione dello stato tensionale in situ, sia all'interno del giacimento che nelle sue vicinanze. Conseguentemente è possibile che, a causa di quest'evoluzione tensoriale, delle faglie possano essere attivate, generando potenziali fenomeni di sismicità indotta.

Data la localizzazione del giacimento di Tempa Rossa, su terraferma e in una regione con infrastrutture ed attività antropiche, è importante poter predire l'impatto dell'eventuale subsidenza e sismicità indotte dalla produzione di idrocarburi.

Questo rapporto descrive gli strumenti e le metodologie applicate al campo di Tempa Rossa per la valutazione della subsidenza e del rischio di sismicità indotta come conseguenza della variazione della pressione di formazione. Vengono qui confrontati due scenari: quello con i sei pozzi già perforati sulla struttura – caso di riferimento – e quello con sette pozzi che, oltre ai pozzi esistenti, integra l'effetto del pozzo Gorgoglione 3 (GG-3).

## 2.0 CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI

Il campo petrolifero onshore di Tempa Rossa sarà sviluppato in “natural depletion”. È importante che le potenziali conseguenze geomeccaniche legate alla produzione siano considerate in termini di subsidenza e di sismicità indotta causata dalla potenziale attivazione di faglie esistenti.

Il miglior modo per fare questo è di simulare, in 3 dimensioni, il comportamento geomeccanico del giacimento in funzione della produzione (abbassamento della pressione). A questo fine, sono stati utilizzati dei simulatori geomeccanici e di flusso dinamico accoppiati (nel caso specifico Visage®-Eclipse®).

Il modello rappresenta la geometrie, la geologia e le proprietà delle varie litologie incontrate all'interno e nei dintorni del giacimento. Questo è costruito a partire dal modello geologico del giacimento ed esteso nelle 3 direzioni al fine di includere le formazioni rocciose circostanti, facendo in modo che i limiti modellizzati, laterali e sottostanti, siano sufficientemente distanti da non far risentire effetti sulle simulazioni di calcolo. Inoltre si è portata attenzione a rappresentare tutti gli elementi strutturali (ad esempio, le faglie) che potrebbero entrare in gioco nel comportamento meccanico della zona.

Nel caso di Tempa Rossa, i dati a disposizione sono il modello geologico e di flusso del giacimento e i log registrati sui pochi pozzi perforati sulla struttura. In fase di modellizzazione è stato necessario fare un certo numero di approssimazioni, per esempio la forma delle unità geologiche maggiori (in assenza di una sismica 3D sulla zona) o le proprietà della formazioni al di fuori del giacimento (in assenza di log). Comunque, l'esperienza acquisita in questo tipo di situazioni per studi simili, ci permette di dedurre il valore più appropriato dei parametri da utilizzare per questo modello e le conclusioni di questo studio sono solo marginalmente influenzate da queste ipotesi.

Sono stati analizzati due casi: quello con i sei pozzi già perforati sulla struttura – caso di riferimento – e quello con sette pozzi che, oltre ai pozzi esistenti, integra l'effetto del pozzo Gorgoglione 3 (GG-3).

Il risultato delle simulazione contiene, tra le altre cose, l'evoluzione dello stato tensionale in situ ed i movimenti risultanti dai cambiamenti di pressione di giacimento. A partire da questi si può determinare una carta della subsidenza finale attesa in superficie come il calcolo degli spostamenti lungo le faglie (all'interno ed al di fuori del giacimento).

L'analisi dettagliata dei risultati mostra che:

- La subsidenza massima attesa alla fine della vita del campo (50 anni) è di 26 cm. Questo valore si manifesta sulla verticale della zona dove sono presenti i pozzi e si attenua velocemente allontanandosi da essi.
- Sulla base dei dati disponibili si riconosce che all'interno del giacimento si registrano limitate occorrenze di deformazioni di taglio lungo le faglie, concentrate sulle faglie stesse, di entità marginale (<0.02%) che si originano solo verso la fine della vita del campo. Al di fuori del giacimento le variazioni degli sforzi di taglio ottenute sono trascurabili. Questi risultati indicano che il rischio di attivazione delle faglie legato alla produzione può essere considerato altamente improbabile sia all'interno che al di fuori del giacimento.
- I casi studiati, con sei pozzi e con sette pozzi includendo il pozzo Gorgoglione 3, forniscono risultati praticamente identici, indicando quindi che l'impatto specifico del pozzo GG-3 è trascurabile.

### 3.0 GIACIMENTO DI TEMPA ROSSA

Il campo petrolifero di Tempa Rossa è situato nella Concessione Gorgoglione, nella regione Basilicata (

Figura 1). Il giacimento, costituito dalle formazioni carbonatiche della piattaforma Apula (Cretaceo e Terziario), presenta una colonna di idrocarburi di più di 2000m.



Figura 1. Mappa della Concessione Gorgoglione

La colonna litologica dalla superficie alla base del giacimento è riportata in Figura 2 (colonna 'tipo' incontrata dal pozzo GG-2).

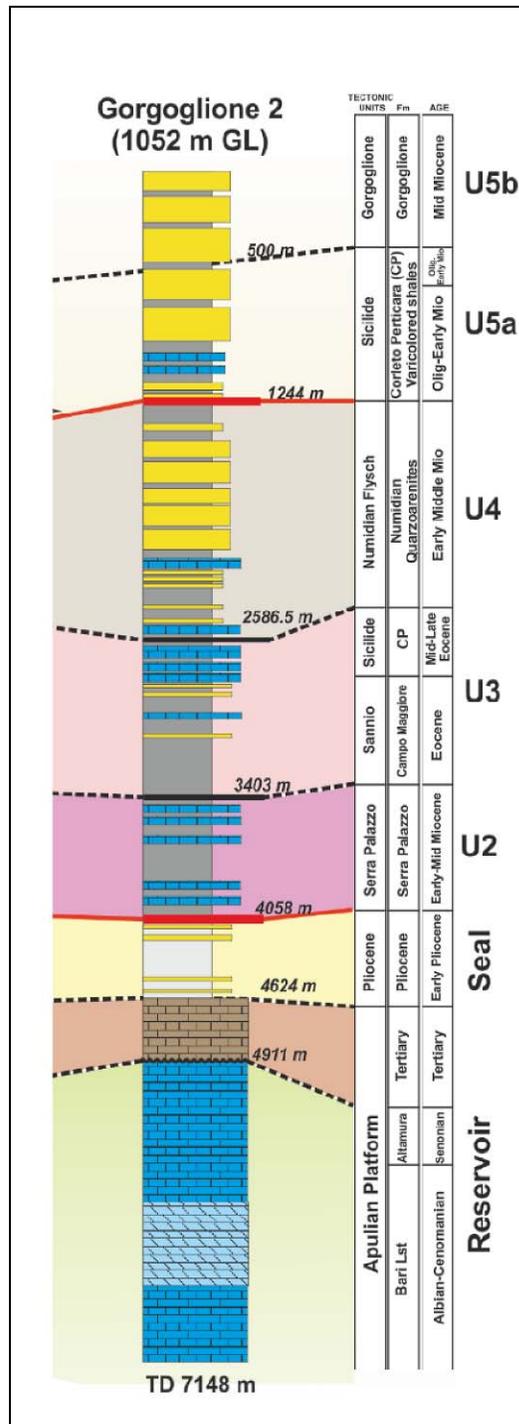


Figura 2. Colonna litologica incontrata nel pozzo GG-2

Il giacimento è posizionato all'interno di un ambiente tettonico complesso (Figura 3) interessato da un regime compressivo NE-SW che si esprime attraverso delle faglie a basso angolo (30-40°).

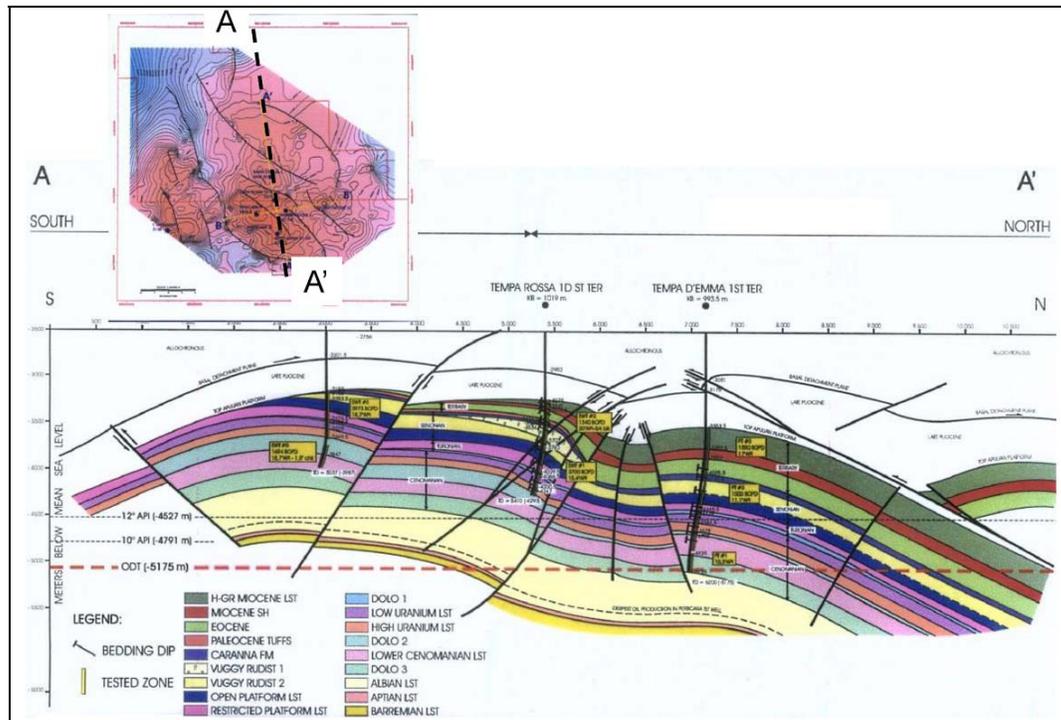


Figura 3. Sezione strutturale del campo di Tempa Rossa

## 4.0 SIMULATORI DINAMICO-GEOMECCANICO ACCOPPIATI

### 4.1 PRINCIPIO

Le variazioni della pressione di poro in un giacimento dovute alla produzione, inducono una deformazione del giacimento stesso e delle formazioni che lo circondano, fenomeno che è accompagnato dalla variazione dello stato tensionale in situ.

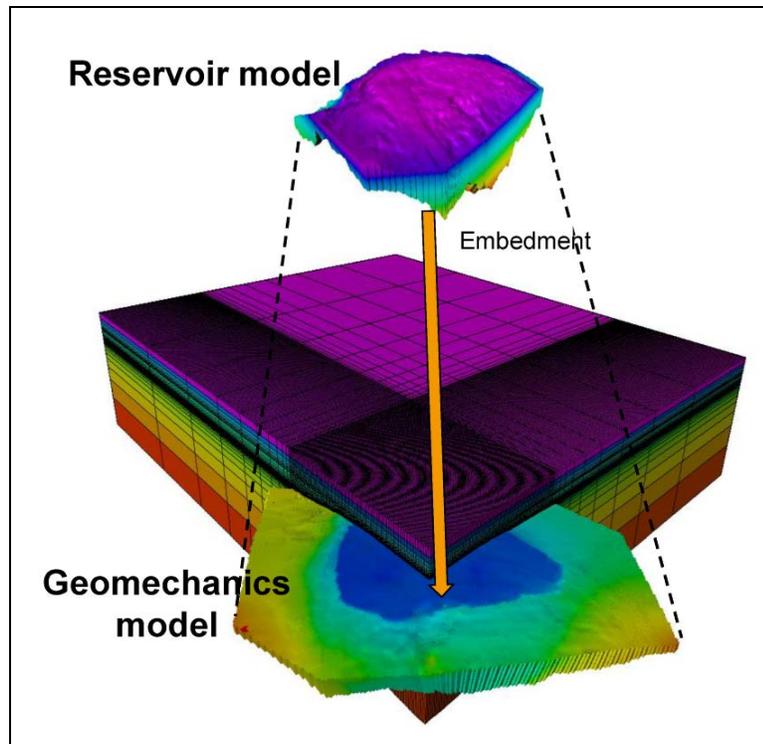
Il modo migliore per quantificare l'entità di tali variazioni e valutarne le potenziali conseguenze, è l'uso di un simulatore numerico nel quale la risposta meccanica delle formazioni interessate, che solitamente va al di là del giacimento stesso, può essere determinata a partire dalle variazioni di pressione legate alla produzione d'idrocarburi.

Come ogni modello meccanico, un modello accoppiato flussi-tensioni necessita la descrizione del problema in termini di geometria, di parametri meccanici e delle proprietà di flusso attraverso il modello. Inoltre devono essere definite le condizioni di carico e quelle al contorno.

La geometria complessiva del modello è costituita dalla griglia del simulatore di flusso integrata all'interno di una griglia più grande che si estende su un dominio più ampio che comprende le formazioni rocciose

circostanti il giacimento (Figura 4). Le principali caratteristiche geologiche (orizzonti geologici, faglie, ....) sono rappresentati nel modello sulla base delle conoscenze disponibili, generalmente ottenuta dai dati sismici.

Il modello si sviluppa dalla superficie, lateralmente ed in profondità in maniera tale che non siano identificabili effetti di contorno sulla zona di studio. La griglia globale sarà quindi ben più estesa di quella del modello di simulazione di flusso.



**Figura 4. Principi costruttivi del modello geomeccanico**

Per quanto riguarda i parametri legati alla dinamica dei fluidi nel sottosuolo (porosità, permeabilità, ....) i valori sono quelli descritti dal modello di giacimento. Le zone esterne, considerate non facenti parte del giacimento, restano quindi a pressione di poro costante. Infine, si attribuiscono le proprietà meccaniche sull'intero modello, operazione ardua, vista la tipica mancanza di caratterizzazione delle rocce esterne al giacimento (assenza di carote rocciose e log).

Un ulteriore elemento nella preparazione del modello è il carico meccanico legato alle variazioni di pressione nel giacimento, mentre le condizioni al contorno sono espresse come tensioni imposte (ad esempio, lo stato tensionale prevalente nella zone di studio) sui limiti del modello.

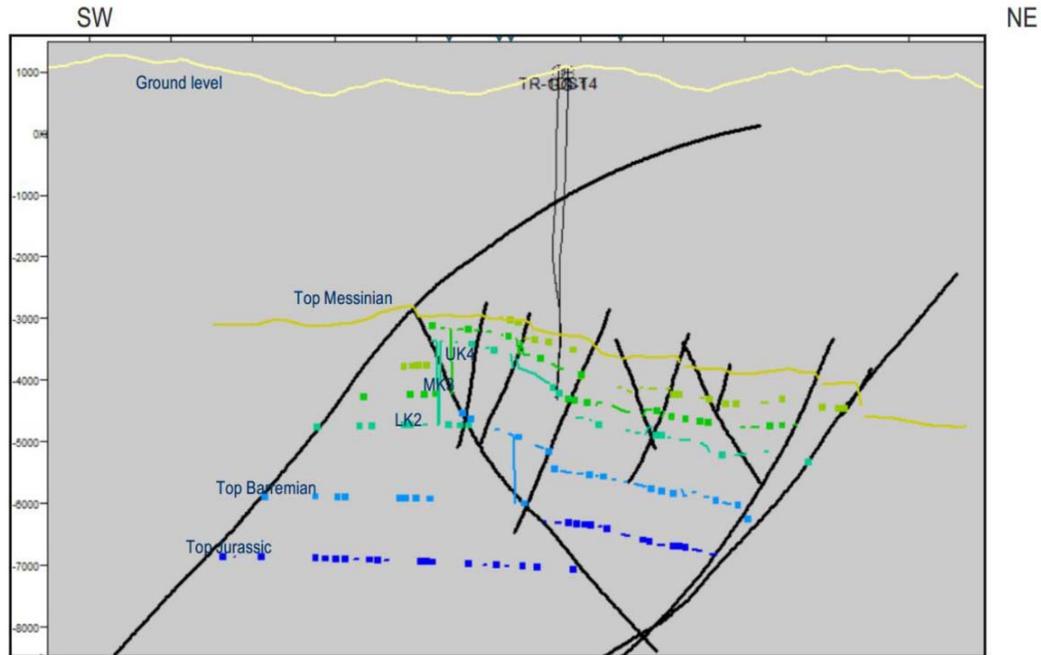
La prima fase della simulazione è quella di determinare lo stato iniziale di equilibrio del campo prima della messa in produzione. Le fasi successive vedranno le variazioni incrementali di carico dell'intero modello legate alle variazioni di distribuzione delle pressioni di poro.

Costruito il modello, è importante garantire che questo sia calibrato al fine di ottenere dei risultati robusti. La calibrazione dipende dai dati disponibili (misure di stress, registrazioni di subsidenza, ....) che sono fortemente dipendenti dalla fase di produzione in cui si trova il giacimento al momento della valutazione.

## 4.2 CASO APPLICATIVO: TEMPAL ROSSA

### 4.2.1 Dati disponibili

Per questo studio è stato messo a disposizione un modello geologico integrante le caratteristiche strutturali e sedimentologiche del campo (Figura 5).



**Figura 5. Sezione sismica interpretata NW-SE del campo di Tempa Rossa**

Un modello dinamico di giacimento è stato costruito sulla base del modello geologico sopra citato. Questo prende in considerazione le proprietà di flusso (permeabilità, contenuto in fluidi, pressione) dalle quali sono state ricavate le previsioni di distribuzione nel tempo della pressione in funzione del piano di sviluppo del campo e dello scenario di produzione (Figura 6).

L'evoluzione del valore medio della pressione per ogni singola unità stratigrafica (esempio, Figura 7) nel tempo è stata utilizzata per alimentare il modello geomeccanico.

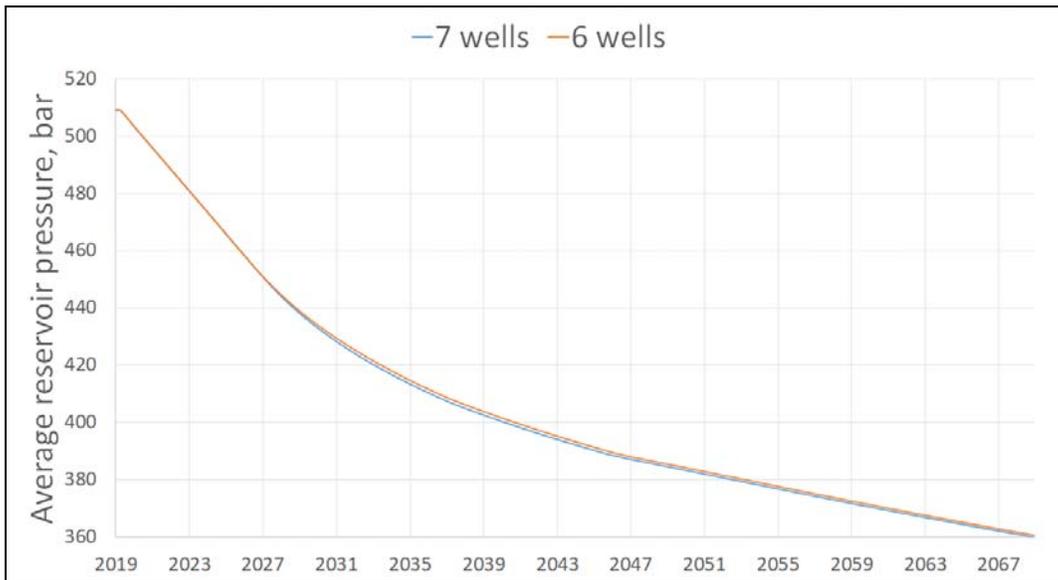


Figura 6. Evoluzione della pressione media di giacimento calcolata dal simulatore: caso a sei pozzi e caso a 7 pozzi

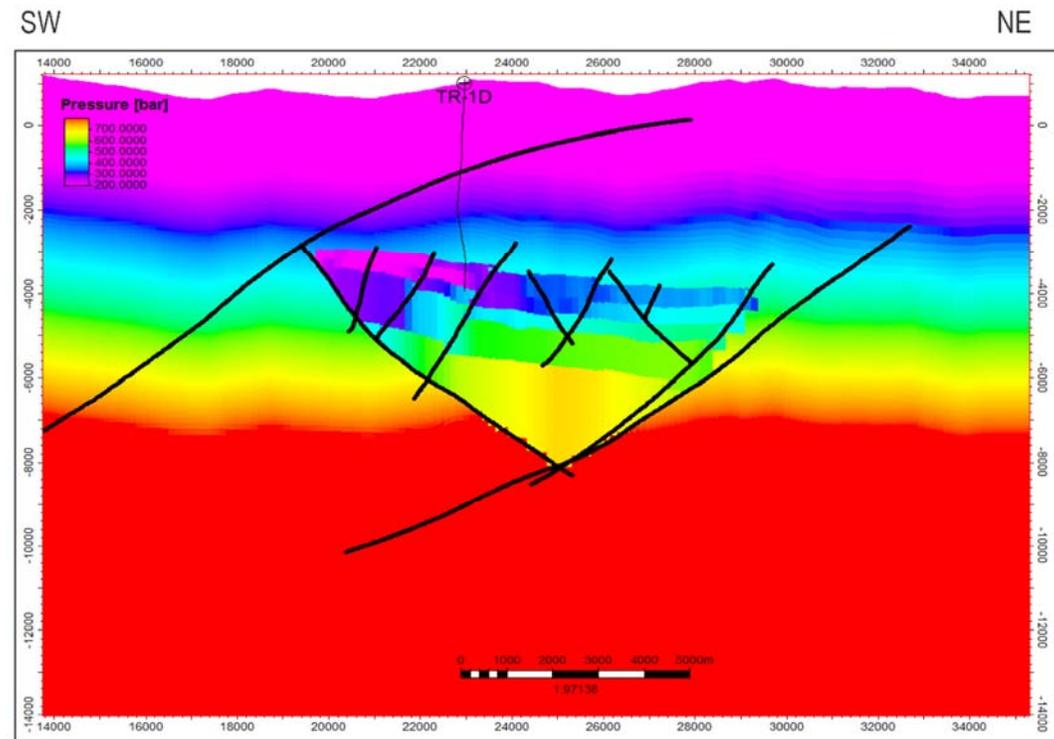


Figura 7. Esempio di distribuzione delle pressioni per unità stratigrafiche

## 4.2.2 Costruzione del modello

### 4.2.2.1 Geometria e griglia

Il modello per le simulazioni geomeccaniche ha un'estensione superiore a quelle del modello geologico/di flusso al fine di evitare eventuali effetti di contorno durante le simulazioni: tipicamente, il modello geomeccanico è 8-10 volte più grande di quello geologico in termini di superficie e si estende in profondità per 20-30 km.

Normalmente l'estensione geometrica si basa sui dati geofisici disponibili e, idealmente, un'acquisizione sismica 3D fornisce gli orizzonti geologici principali nel dominio d'interesse.

**Nel caso di Tempa Rossa, non avendo a disposizione una copertura sismica 3D sul campo, alcune ipotesi sono state fatte per le zone esterne al giacimento. Per quanto riguarda la descrizione geologica, gli orizzonti meglio definiti, in termini di estensione areale, sono la Base Messiniano e il Top Giurassico. La tipologia degli altri orizzonti è stata estrapolata facendo uso di questi orizzonti integrando, come ulteriore riferimento, le faglie identificate ed il piano di superficie. Il modello finale è presentato in**  
**Figura 8 (faglie) e**

Figura 9 (faglie e orizzonti principali).

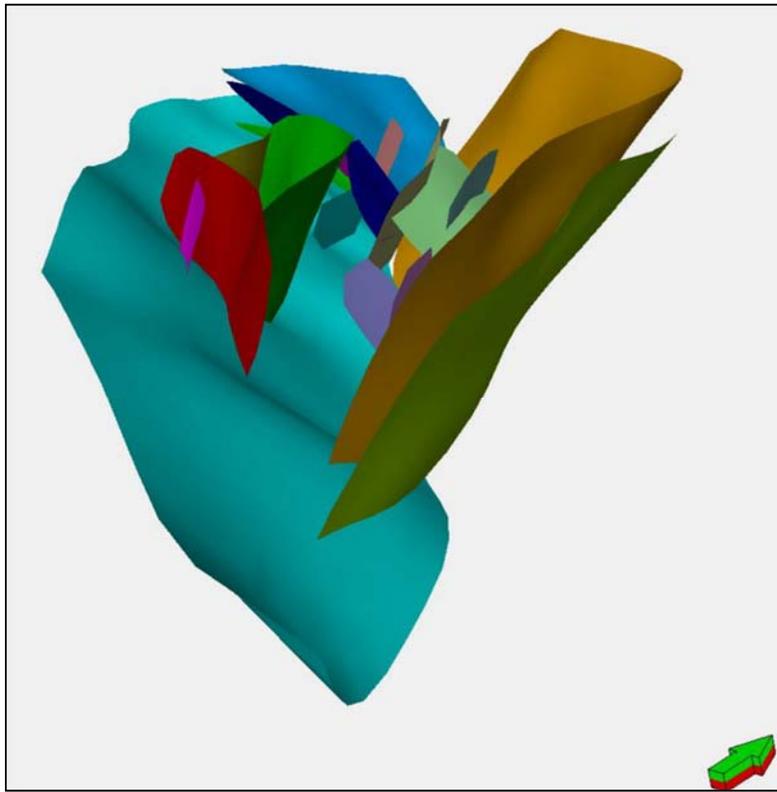
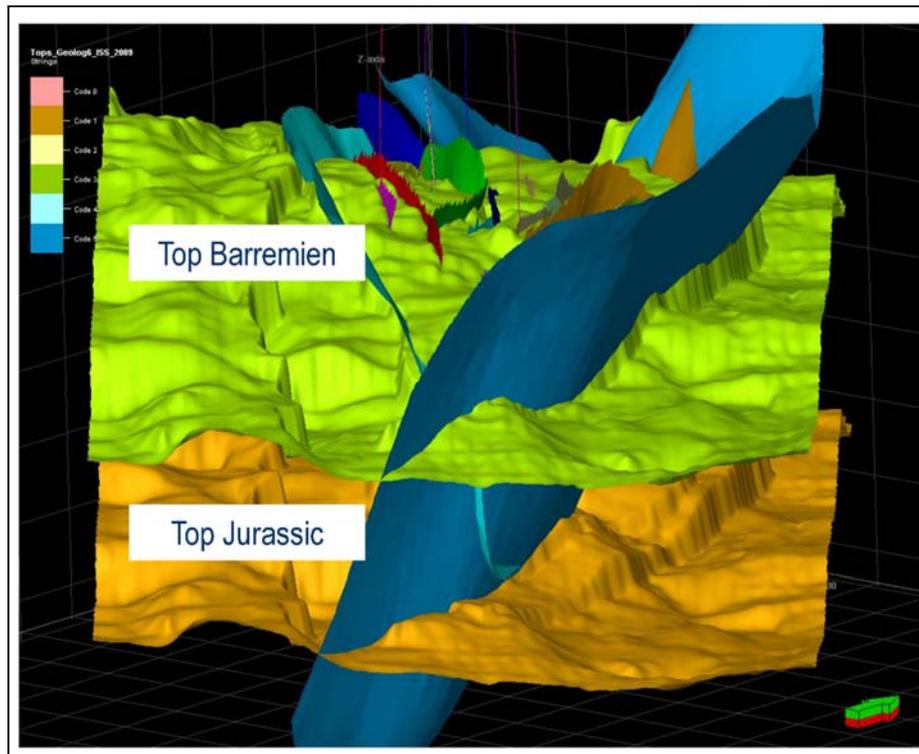


Figura 8. Rappresentazione delle faglie integrate nel modello



**Figura 9. Rappresentazione strutturale del modello, incluse le faglie**

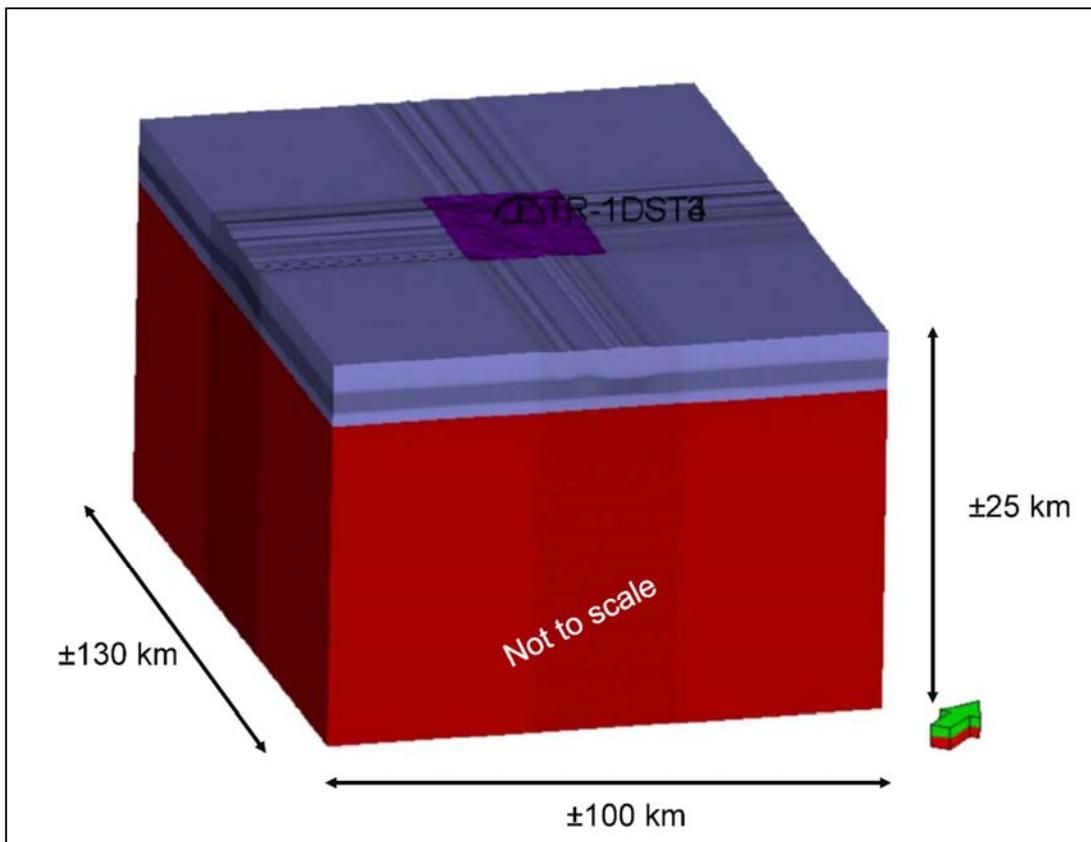
La mancanza di dati introduce inevitabilmente un grado di incertezza dal punto di vista strutturale nella parte di modello al di fuori della zona del giacimento. Tuttavia, a questo stadio, non ci sono metodi per meglio descrivere lo schema strutturale. Le implicazioni di questa incertezza saranno discusse nel seguito.

Il giacimento di Tempa Rossa è una struttura complessa intersecata da diverse faglie e sovrascorrimenti caratterizzati da ampi spostamenti relativi. L'utilizzo della griglia geologica così come concepita per la dinamica dei fluidi, avrebbe portato ad un alto livello di distorsione della griglia a detrimento delle simulazioni geomeccaniche. Conseguentemente, il modello geomeccanico è stato concepito sulla base della procedura seguente:

- costruzione di una griglia per la completa descrizione strutturale, incluse le faglie
- propagazione delle proprietà geomeccaniche a tutta la griglia
- costruzione di una griglia strutturale con superfici 'semplificate' su cui sono state ri-mappate le proprietà geomeccaniche precedentemente generate

Questo procedimento permette di ottenere una griglia non distorta e tuttavia in grado di rispettare la struttura del campo, la distribuzione delle proprietà geologiche e di quelle meccaniche delle formazioni rocciose.

Le dimensioni del modello globale sono riportate in Figura 10.



**Figura 10. Rappresentazione globale del modello geomeccanico**

Mentre il modello per gli studi dinamici comporta circa un milione di celle, il modello finale geomeccanico ne contiene oltre 11 milioni.

#### **4.2.2.2 Proprietà meccaniche**

Definita la geometria complessiva del modello, il passo successivo consiste nell'assegnare le proprietà meccaniche (densità, modulo di Young, coefficiente di Poisson) ad ogni singola cella.

Per questo studio, i dati provenienti dai log costituiscono l'unica fonte per le proprietà meccaniche che, in aggiunta, sono circoscritte alle sezioni del giacimento. Per aggirare questa limitazione si è proceduto ad una modellizzazione meccanica 1D sui pozzi. Questa modellizzazione comporta la definizione dei profili di alcune proprietà (parametri elastici e densità) lungo la traiettoria del pozzo utilizzando i dati disponibili ed integrati da valori di sintesi – ottenuti tramite correlazioni – per gli intervalli dove non ci sono informazioni disponibili (si veda ad esempio la

Figura 11).

Il principio base che supporta il modello è la simulazione della compattazione della colonna litostatica, legata al peso dei sedimenti corrispondenti alla regione di studio. La colonna litostatica (come definita dal geologo o ricostruita a partire dai log disponibili – generalmente il log gamma-ray -) è il punto di partenza. Un modello di compattazione semplificato è applicato all'insieme ed i parametri sono adattati in modo tale che i profili calcolati di porosità e densità coincidano con quelli misurati dai log. Questi log

generalmente non sono disponibili su tutta la sezione perforata e conseguentemente la calibrazione deve essere fatta sulla sezione dove questi sono disponibili (solitamente nel giacimento – ad esempio

**Figura 11). Una volta ottenuta la calibrazione si considera che i parametri del modello utilizzati sono corretti e che il modello è rappresentativo dell'intero intervallo, giacimento e sezione sovrastante (** Figura 12). In effetti, solo i dati di porosità combinati alla mineralogia attraverso un processo di omogeneizzazione, sono utilizzati per il calcolo dei profili delle proprietà elastiche. I dati di densità sono fondamentali per la determinazione dei profili di stress verticali e orizzontali.

A partire da questi profili, utilizzando classiche relazione della poro-elasticità, si può calcolare la distribuzione dello stato tensionale in situ lungo l'intera traiettoria del pozzo e la coerenza dei modelli ottenuti è quindi verificata con un'analisi di stabilità del foro sulla base dei dati registrati durante le operazioni di perforazione.

**Una volta ottenute i profili di distribuzione di questi parametri su diversi pozzi, è possibile farne un'estrapolazione laterale (esempio,**

Figura 13). Nuovamente, il processo di estrapolazione spaziale dei parametri eredita le incertezze legate al modello strutturale.

Per la zona sovrastante il giacimento, si applica una semplice estrapolazione delle varie proprietà utilizzando una regressione in profondità ancorata sui valori della sezione in giacimento.

Infine, rimane la descrizione dal punto di vista meccanico delle faglie, cioè definire il loro angolo di frizione e la coesione. Data l'abituale caratterizzazione lacunosa, spesso anzi inesistente, delle faglie, le loro proprietà meccaniche sono definite attraverso dei valori comunemente derivati dalla letteratura scientifica. Nel nostro caso, dei valori ragionevolmente bassi, seppur realistici, sono stati presi in considerazione (zero coesione e angolo di frizione di 22°) al fine di fornire una valutazione cautelativa del rischio di sismicità indotta.

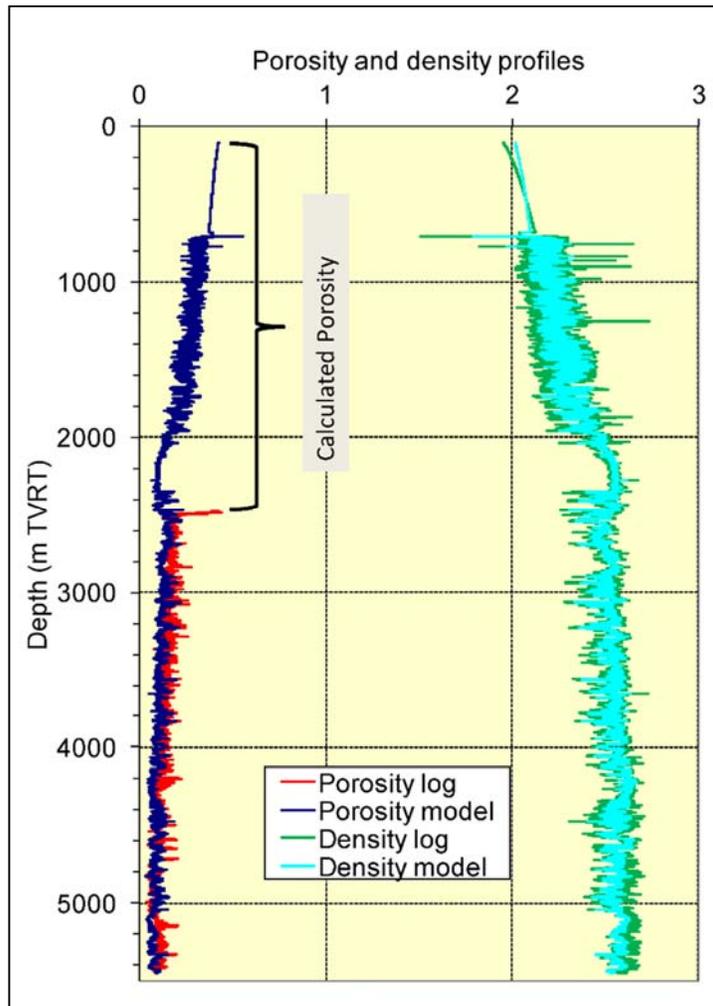


Figura 11. Esempio di calibrazione della porosità/densità su un set parziale di dati provenienti da log

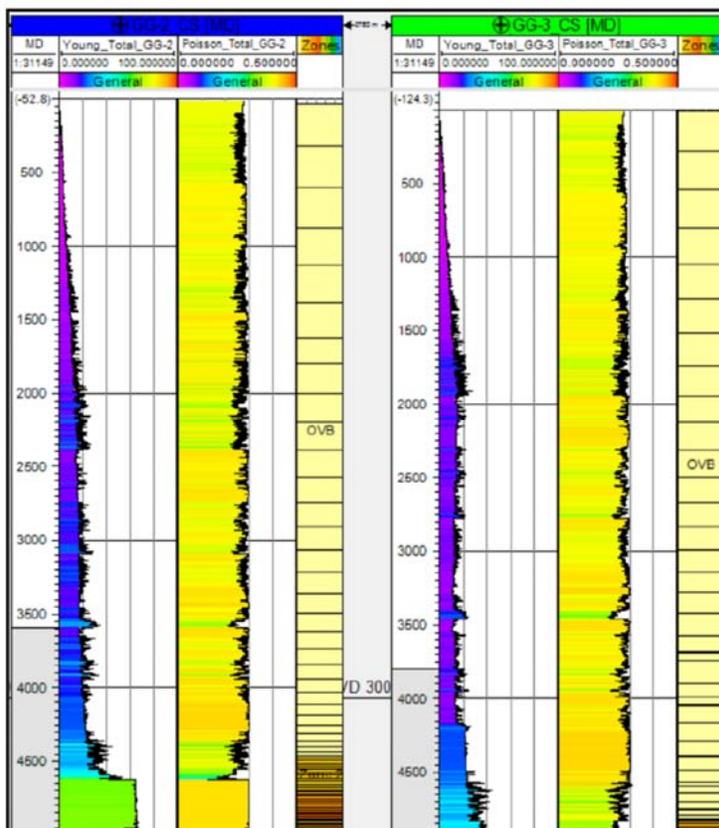


Figura 12. Esempio di risultato del modello 1D (modulo di Young e coefficiente di Poisson per GG-2 – pozzo esistente – e GG-3 pozzo pianificato)

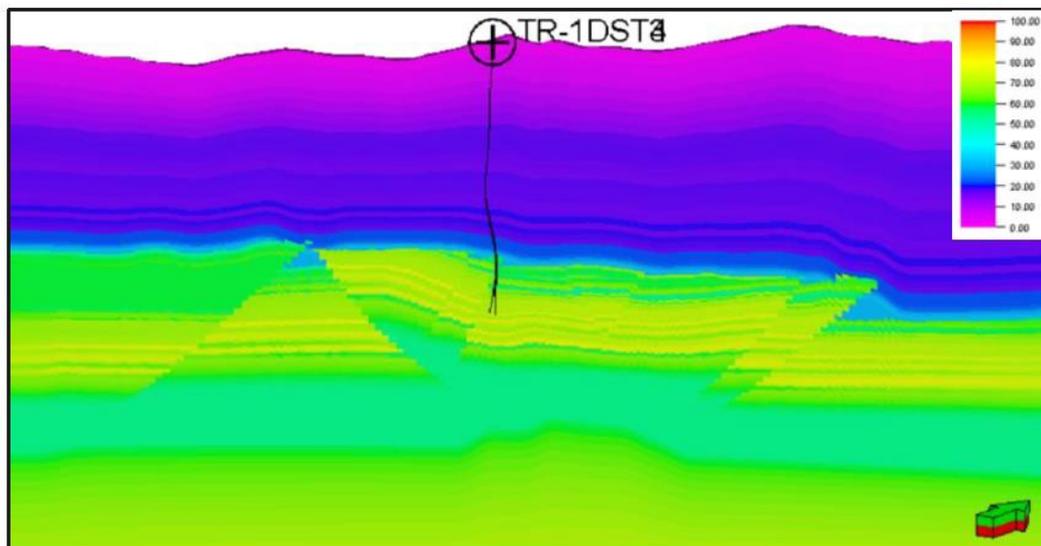


Figura 13. Distribuzione del modulo di Young (GPa)

### 4.2.2.3 Pressione di poro

La distribuzione iniziale della pressione di poro è stata definita sulla base dei dati di giacimento e si considera come idrostatica al difuori di esso, ad eccezione della sezione alloctona Sannio/Sicilide e Serra Palazzo dove delle sovrappressioni sono state identificate in fase di perforazione ( Figura 14). In realtà, visto che si ipotizza che queste formazioni rimarranno a pressione costante durante tutta la vita produttiva del campo, il valore attuale di pressione non ha effetto né sul calcolo della subsidenza né sulla valutazione del rischio sismico.

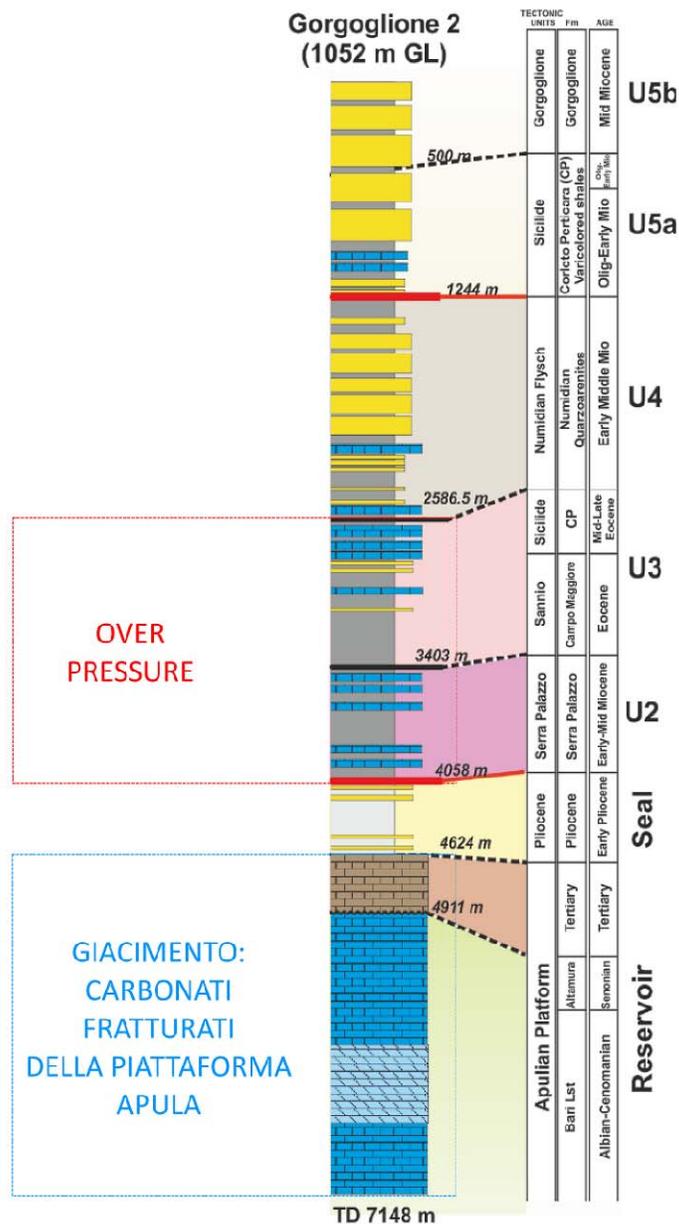


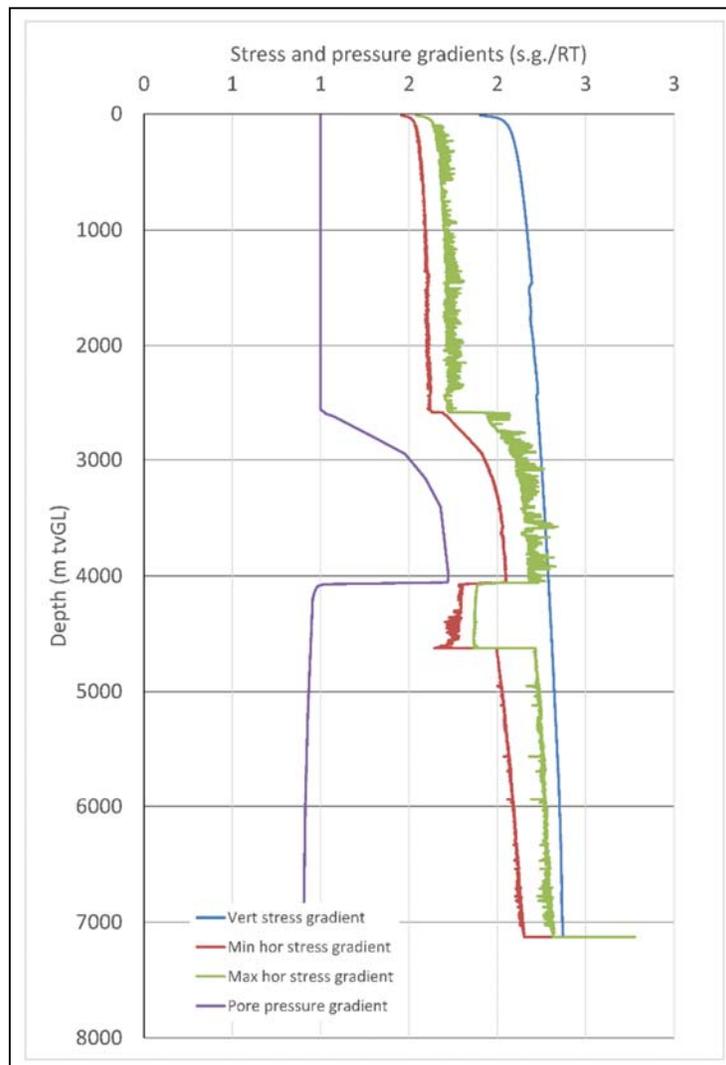
Figura 14. Zone in sovrappressione nel campo di Tempa Rossa (esempio di GG-2)

#### 4.2.2.4 Stato tensionale in situ

Sulla base delle proprietà meccaniche e della pressione di poro sopra definiti, è possibile costruire lo stato di stress in situ.

Il principio base sottostante il modello è la simulazione della compattazione della colonna litostatica sotto carico. Per questo, oltre la pressione di poro, sono utilizzati il log di densità, quello di porosità e le composizioni mineralogiche. Quindi lo stato tensionale è calcolato in due fasi: la componente verticale è ottenuta a partire dall'integrazione del log di densità; le componenti orizzontali sono poi calcolate a partire dallo stress verticale utilizzando i parametri elastici corretti per eventuali effetti tettonici (informazione ottenuta dalla geologia regionale o dai dati di pozzo quali i 'break-outs').

**Nel caso di Tempa Rossa, dati interessanti sono stati recuperati dall'analisi di stabilità di pozzo registrati in fase di perforazione i quali permettono di definire l'anisotropia degli stress orizzontali (Figura 15).**



**Figura 15. Profilo delle tensioni in Tempa Rossa (GG-3)**

Per quanto concerne la direzione dello stress orizzontale principale, l'analisi dei break-outs mostra una lieve evoluzione nel giacimento, N60° nella zone centrale verso N20° in prossimità di GG-2 ( Figura 16), probabilmente a causa dell'interferenza di una faglia.

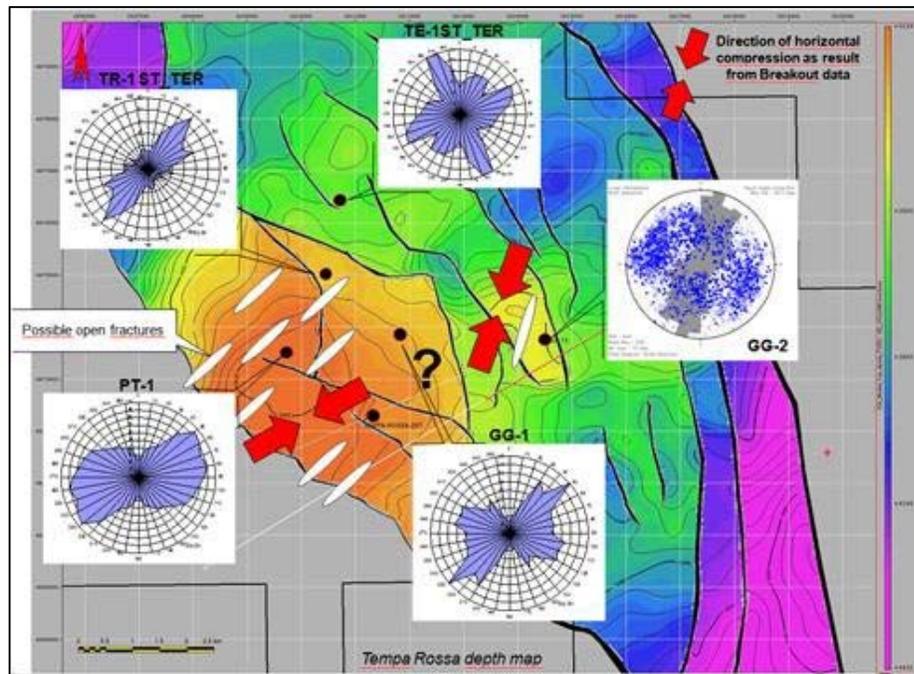


Figura 16. Orientazione dello stress principale a partire dall'analisi dei break-outs

## 4.2.3 Simulazioni

### 4.2.3.1 Inizializzazione del sistema

Una volta costruito il modello, si definisce la prima fase che permette d'inizializzare il sistema in termini di stato tensionale in situ. Questo si ottiene cercando lo stato di equilibrio del sistema dopo aver applicato il carico gravitazionale e gli sforzi tettonici laterali. Lo stato di stress risultante dalla fase iniziale è verificato in relazione ai valori ottenuti sui diversi pozzi durante la modellizzazione 1D (

Figura 16). Gli sforzi tettonici sono tali da rispettare l'orientazione degli stress orizzontali ottenuti dai dati strutturali regionali disponibili per Tempa Rossa<sup>1</sup> (

**Figura 17) e dalla base dati del World Stress Map<sup>2</sup> (**

<sup>1</sup> Spina, V., Tempa Rossa Subsurface Evaluation, Seismic & Structural Interpretations. Report GSR/00837/12, April 2012

<sup>2</sup> <http://www.world-stress-map.org/>

Figura 18).

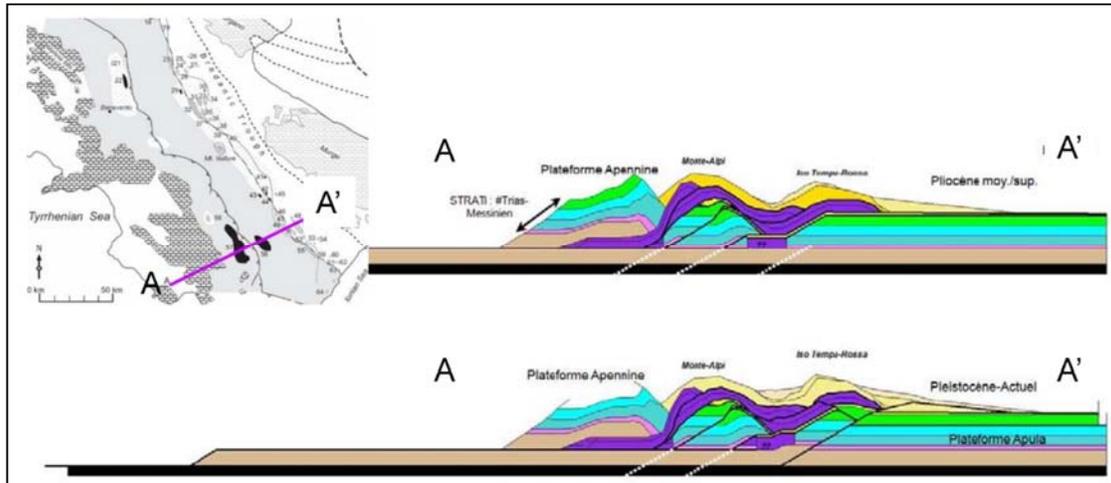


Figura 17. Tempa Rossa, modello di deformazione (Pleistocene→presente)

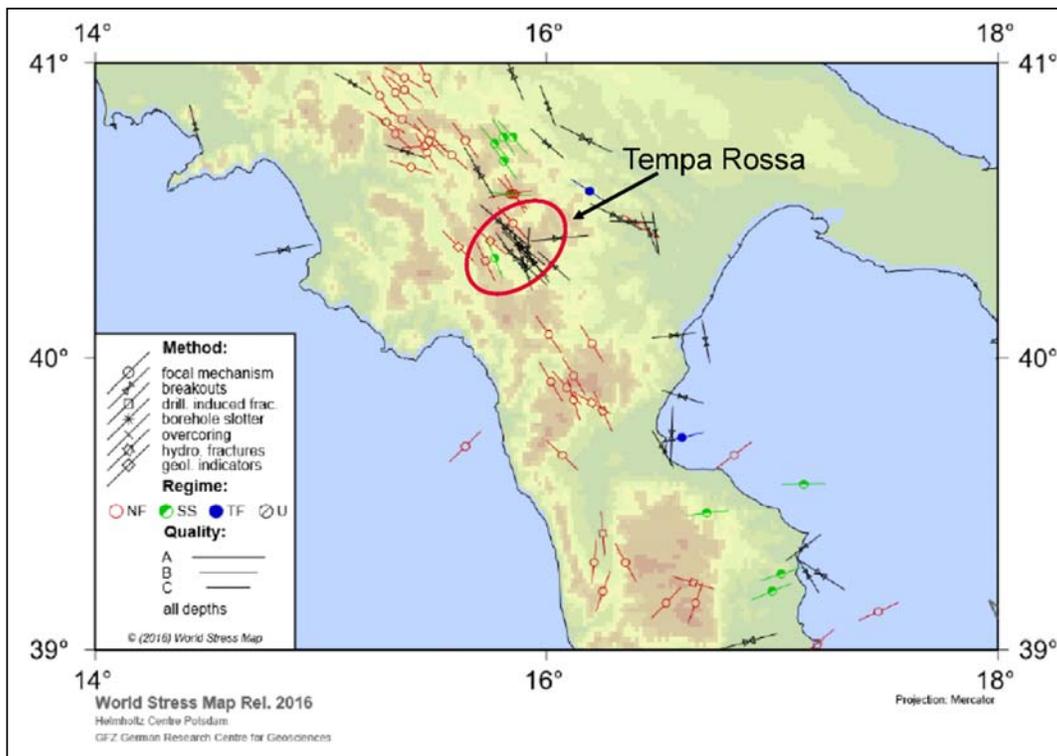


Figura 18. Mappa mondiale degli stress (World Stress Map): Regione Basilicata

### 4.2.3.2 Modellizzazione del “natural depletion”

Avendo definito lo stato iniziale di equilibrio coerente con i dati di pozzo e la geologia regionale, l'abbassamento progressivo della pressione di giacimento (natural depletion) è imposto, come descritto dal modello dinamico di flusso, e le deformazioni e variazioni di stress risultanti sono calcolati sull'intero dominio d'interesse.

In questo modo è possibile determinare lo spostamento verticale a livello del suolo (subsidenza) e l'evoluzione dello stato tensionale lungo le faglie al fine di valutare se le condizioni di attivazione sono raggiunte, cosa che indicherebbe l'insorgere di un evento sismico indotto.

## 5.0 RESULTATI

### 5.1 SUBSIDENZA

Con il modello e le ipotesi prese come descritto precedentemente, si ottengono le mappe di deformazione della superficie - subsidenza – per il caso di riferimento a sei pozzi ( Figura 19) e per quello a sette pozzi (incluso GG-3,

Figura 20). Si può notare che, in entrambi i casi, la massima subsidenza è di 26 cm. Il massimo si registra sulla verticale della zona pozzi e si attenua rapidamente, scendendo sotto i 10 cm a pochi chilometri di distanza.

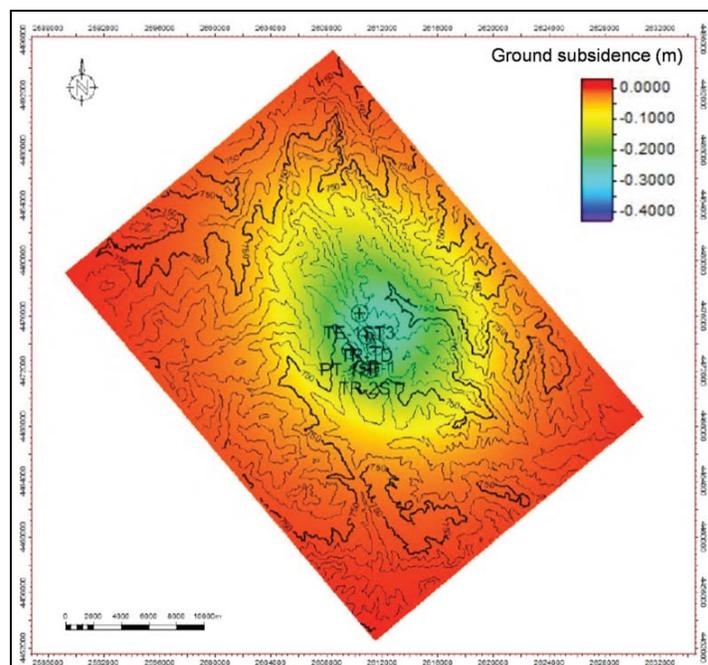


Figura 19. Valori finali calcolati di subsidenza (m) – caso di riferimento a sei pozzi

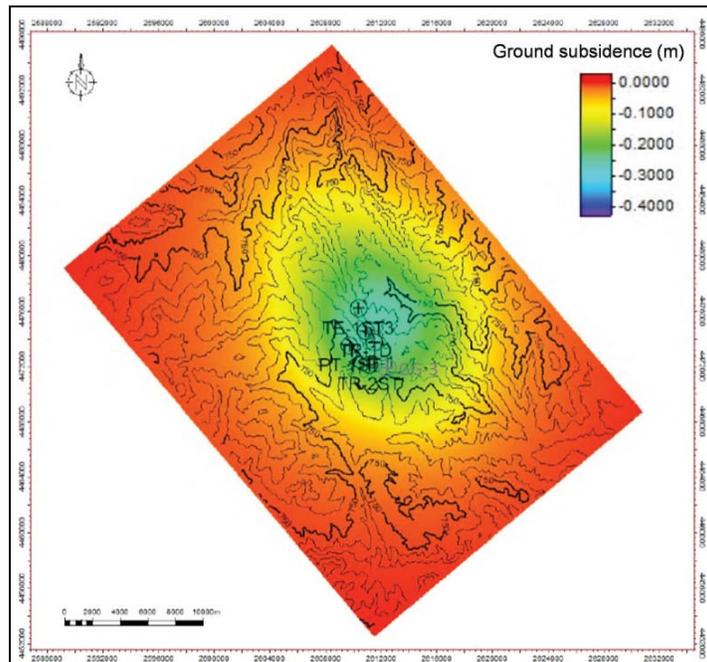


Figura 20. Valori finali calcolati di subsidenza (m) – caso a sette pozzi (incluso GG-3)

## 5.2 RISCHIO DI ATTIVAZIONE DELLE FAGLIE

### 5.2.1 All'interno del giacimento

Lo sforzo plastico lungo i vari piani di faglia all'interno del giacimento sono stati ottenuti dai risultati della modellizzazione. Entrambi i casi di studio non mostrano alcuna deformazione plastica, fatta eccezione per alcune zone circoscritte ad un numero limitato di faglie (Figura 21 e Figura 22), e comunque con valori marginali (<0.02%), cosa che indica che il rischio di attivazione di faglia (cioè di sismicità indotta) è molto remoto in entrambi i casi.

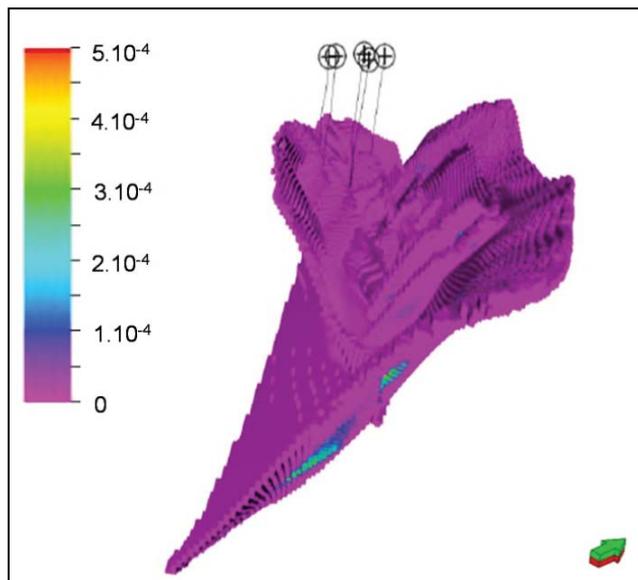


Figura 21. Valori di massimo sforzo di taglio plastico lungo le faglie - caso di riferimento a sei pozzi

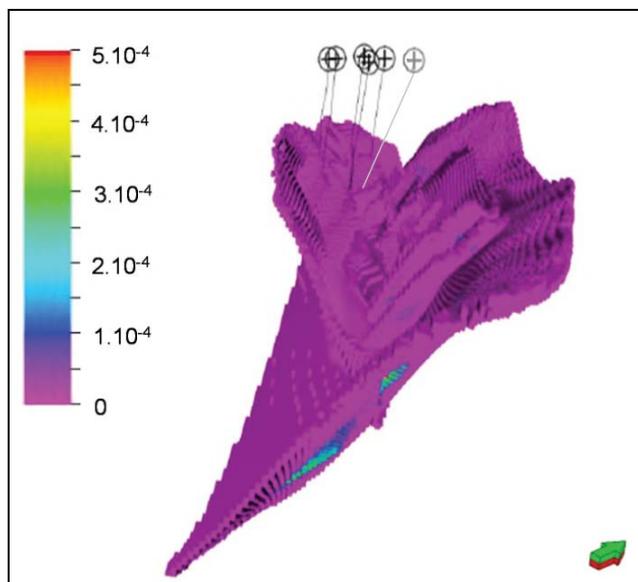


Figura 22. Valori di massimo sforzo di taglio plastico lungo le faglie – caso a sette pozzi (incluso GG-3)

## 5.2.2 Zone esterne al giacimento

Una faglia sarà attivata solo se lo stato di stress che agisce sulla faglia è tale che il criterio di rottura (Mohr-Coulomb) sia verificato. Ad esempio, una faglia per natura sismicamente attiva è periodicamente innescata poiché l'attività tettonica in profondità perturba lo stato locale di stress. Quando le condizioni sono tali che il criterio di stabilità di faglie sia superato, la faglia è attivata generando un evento sismico naturale. Il movimento relativo delle facce di faglia permette un rilascio dello stato di stress e la faglia torna nuovamente stabile fino all'evento naturale successivo.

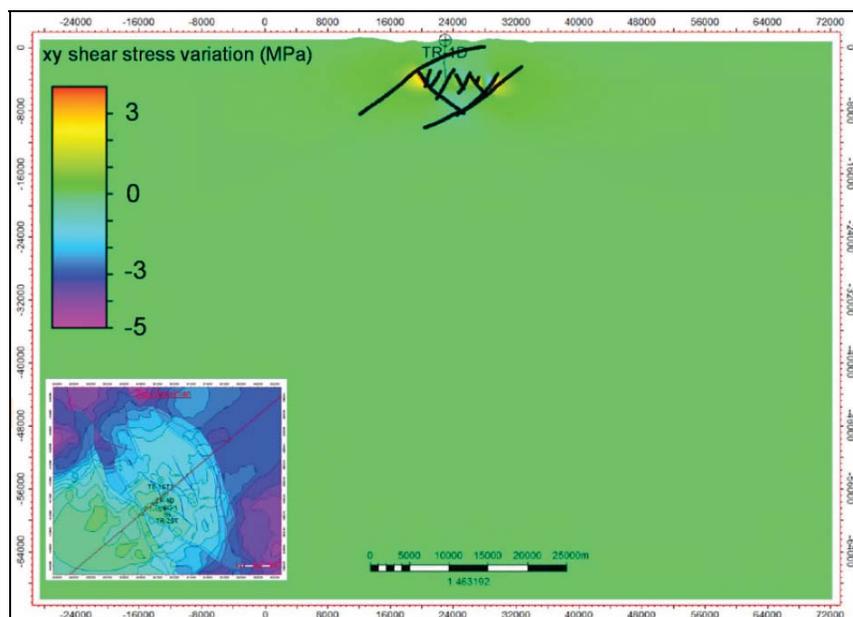
In questo caso, oltre all'attività tettonica, un cambiamento nello stato di stress può essere prodotto dalla produzione del giacimento. Si è quindi eseguita una valutazione specifica di stabilità per verificare se questo cambiamento può avere implicazioni sulla stabilità delle principali faglie regionali per natura attive.

Dato che di queste faglie sono conosciute solo posizione e azimuth, mentre per l'analisi di stabilità sono necessarie anche l'immersione e le proprietà meccaniche, alcune ipotesi sono state prese: sulla base del contesto strutturale regionale si è ipotizzata un'immersione a  $30^\circ$  e, in accordo con la letteratura scientifica, è stato assegnato alle faglie un angolo di frizione di  $22^\circ$ , valore considerato basso.

Con questi dati e applicando i cambiamenti di stress estratti dai calcoli, se la faglia è ipotizzata stabile – cioè non si trova in uno stato che possa indurre scorrimento – l'analisi di stabilità mostra che il cambiamento negli stress indotto dall'abbassamento di pressione nel giacimento non è d'entità sufficiente ad indurre alcuno scorrimento. Il grafici sottostanti mostrano il cambiamento nello sforzo di taglio indotto dalla produzione nelle 3 direzioni (xy, yz e zx) per il caso di riferimento a sei pozzi (

Figura 23, Figura 24 e Figura 25) e per il caso a sette pozzi (Figura 26, Figura 27 e Figura 28).

Come si può rilevare dai grafici, le variazioni di stress indotte hanno un effetto solo in prossimità del giacimento. Di conseguenza, anche ipotizzando che le faglie circostanti abbiano una loro sismicità naturale, la loro condizione e comportamento non saranno influenzate dall'abbassamento della pressione di giacimento.



**Figura 23. Variazioni dello sforzo di taglio legate all'abbassamento della pressione di giacimento (direzione xy) – caso di riferimento a sei pozzi**

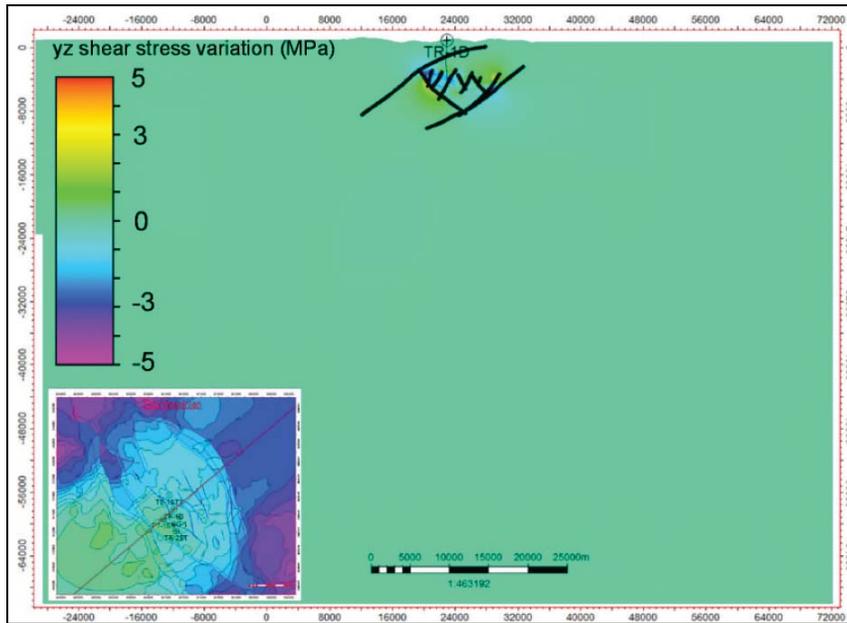


Figura 24. Variazioni dello sforzo di taglio legate all'abbassamento della pressione di giacimento (direzione yz) – caso di riferimento a sei pozzi

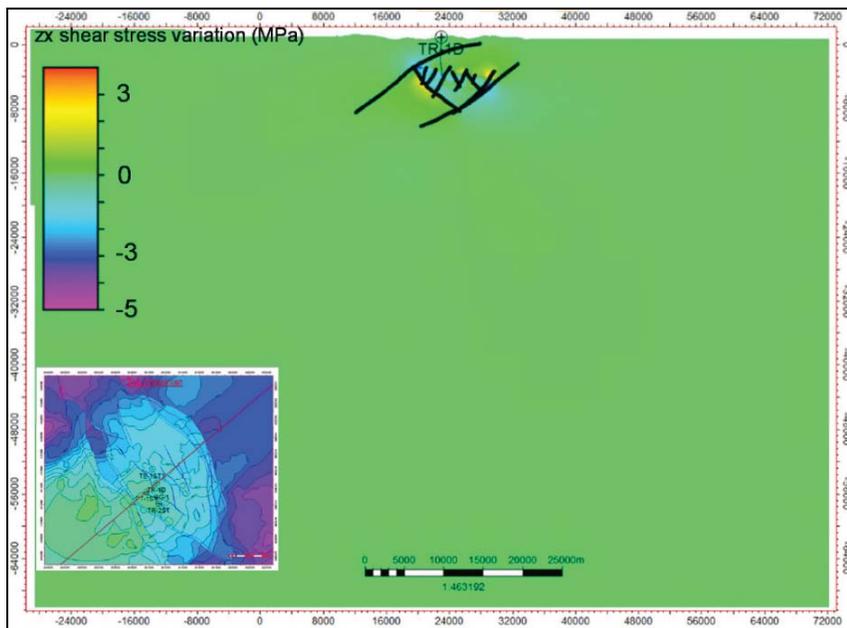


Figura 25. Variazioni dello sforzo di taglio legate all'abbassamento della pressione di giacimento (direzione zx) – caso di riferimento a sei pozzi

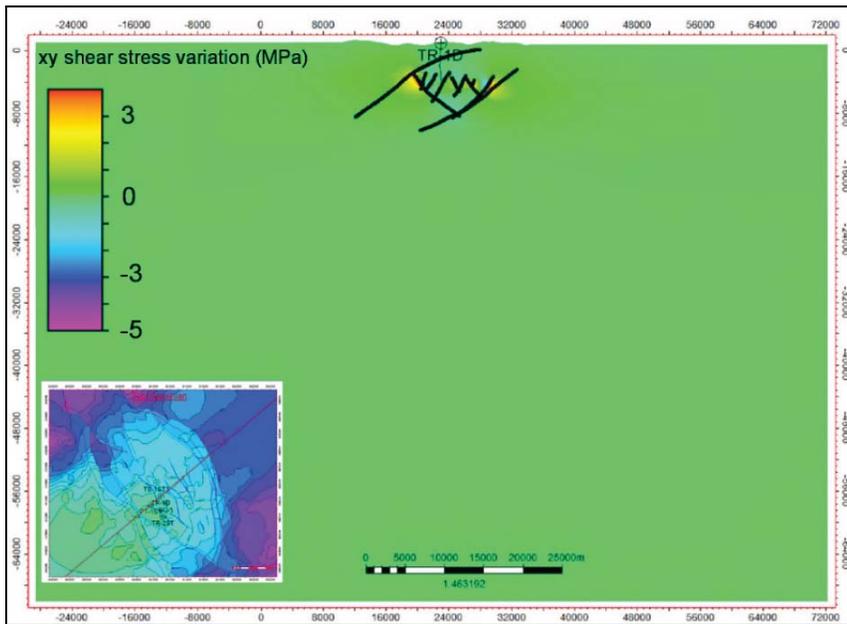


Figura 26. Variazioni dello sforzo di taglio legate all'abbassamento della pressione di giacimento (direzione xy) – caso a sette pozzi

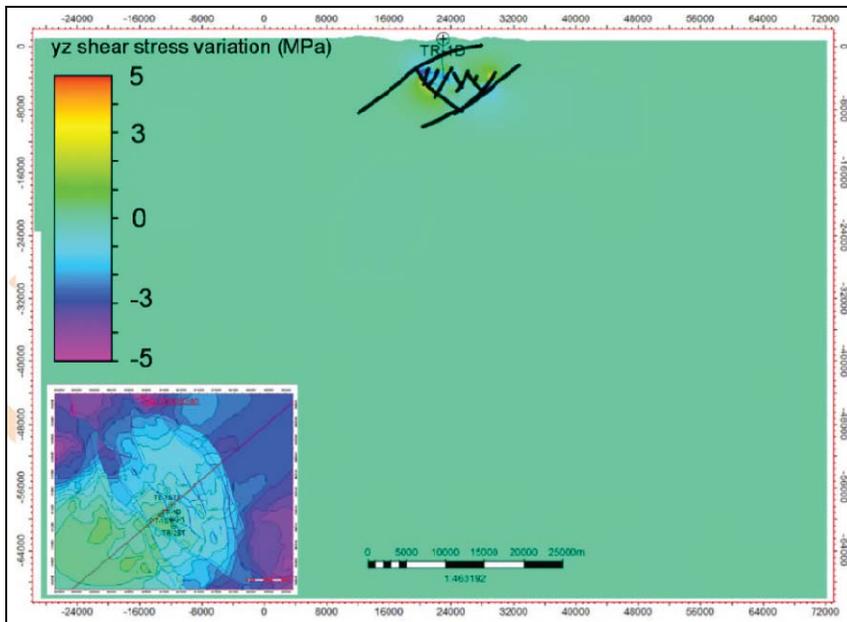
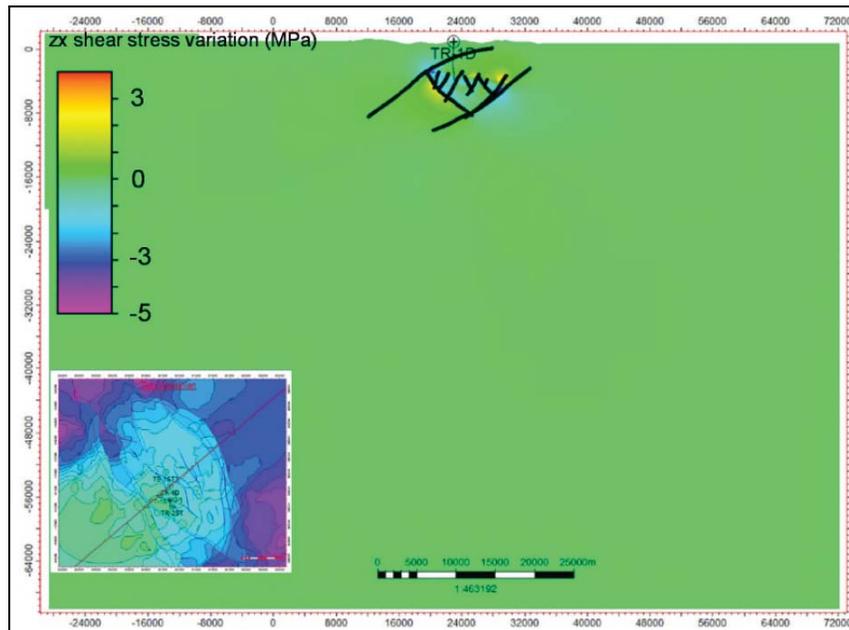


Figura 27. Variazioni dello sforzo di taglio legate all'abbassamento della pressione di giacimento (direzione yz) – caso a sette pozzi



**Figura 28. Variazioni dello sforzo di taglio legate all'abbassamento della pressione di giacimento (direzione zx) – caso a sette pozzi**

## 6.0 DISCUSSIONE

Per effettuare le valutazioni sopra riportate, si sono dovute fare un certo numero di ipotesi. Diverse ragioni hanno portato a ciò:

- Assenza di una sismica 3D. L'indisponibilità di una sismica 3D sulla zona di studio impone l'estrapolazione dei principali orizzonti geologici al di fuori del giacimento stesso. Questo è stato fatto attraverso modellizzazione geologica ed interpolazione degli orizzonti meglio definiti sulla sismica. Nel capitolo precedente si è visto che i cambiamenti di stress indotti dalla produzione del giacimento sono trascurabili. Quindi, sebbene la geometria esterna alla zona del giacimento possa essere inaccurata, non ci sono conseguenze sui risultati della valutazione meccanica, né in termini di subsidenza, né in quelli di attivazione di faglia.
- Incertezza sui dati. Diversi parametri meccanici utilizzati per questo studio sono stati derivati da esercizi di modellizzazione o correlazioni. La migliore valutazione ingegneristica ed il nostro know-how per questo tipo di analisi sono stati impiegati per assicurare l'utilizzo di valori cautelativi dei parametri incerti. Ancora una volta, considerate complessivamente le limitate conseguenze della produzione sia in termini di subsidenza che di rischio di sismicità indotta, si può concludere che valori differenti da quelli impiegati porterebbero a cambiamenti irrilevanti alle conclusioni di questo studio.