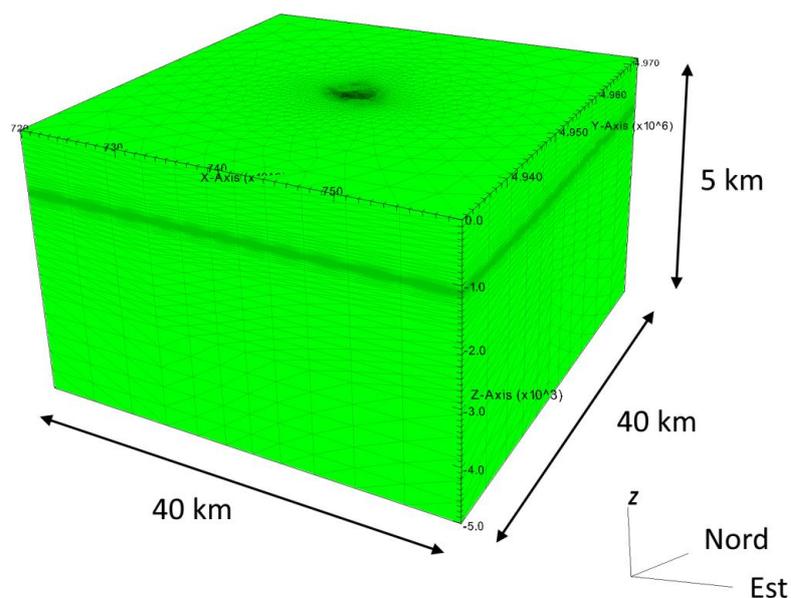


**Commessa: M3E I8/I6**

## Modellazione della subsidenza indotta dalla coltivazione del giacimento multi-layer Trava



**Committente:** Rina Consulting (per conto di Aleanna Resources LLC)

**Elaborato:** Relazione Tecnica

**Data:** Gennaio 2019



## INDICE

1	INTRODUZIONE.....	1
2	MODELLO DI PRODUZIONE .....	2
3	MODELLO GEOMECCANICO.....	8
<b>3.1</b>	<b>Griglia 3D.....</b>	<b>8</b>
<b>3.2</b>	<b>Caratterizzazione geomeccanica.....</b>	<b>11</b>
4	PREVISIONE MODELLISTICA DELLA SUBSIDENZA.....	16
<b>4.1</b>	<b>Spostamenti della superficie del terreno .....</b>	<b>16</b>
<b>4.2</b>	<b>Gradiente dello spostamento .....</b>	<b>20</b>
5	CONCLUSIONI.....	23
6	REFERENZE.....	25
	Allegato A: mappe isobate e isopache locali .....	27

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Ubicazione e limiti del permesso di ricerca “Corte dei Signori”.....	2
Figura 2: Ubicazione del giacimento Trava. In rosso è evidenziata la traccia del modello Eclipse.....	3
Figura 3: Andamento nel tempo della produzione di gas. ....	4
Figura 4: Andamento nel tempo della variazione di pressione media nei livelli produttivi.....	4
Figura 5: Modello ECLIPSE, livello PL2: (a) saturazione in acqua iniziale; (b) Variazione di pressione a fine produzione. ....	5
Figura 6: Modello ECLIPSE, livello PL2-F: (a) saturazione in acqua iniziale; (b) Variazione di pressione a fine produzione. ....	6
Figura 7: Modello ECLIPSE, livello PL2-G: (a) saturazione in acqua iniziale; (b) Variazione di pressione a fine produzione. ....	7
Figura 8: Triangolazione in pianta del modello geomeccanico. In rosso è evidenziata la traccia del modello ECLIPSE. In blu è segnata la sezione verticale A-A di Figura 10.....	8
Figura 9: Vista assonometrica della griglia tridimensionale FEM. La scala verticale è amplificata 5 volte rispetto a quella orizzontale.....	9
Figura 10: Sezione verticale A-A del modello geomeccanico (Figura 8). La scala verticale è amplificata di un fattore 10. ....	10
Figura 11: Mappa del bacino sedimentario padano con evidenziati i maggiori giacimenti di gas e le posizioni dei pozzi in cui sono effettuate le misure di compattazione profonde con la tecnica dei marker (anno 2000). ....	11
Figura 12: Grafico doppio logaritmico che riporta l’andamento medio della $c_M$ in l ciclo di carico in funzione della $\sigma_z$ efficace secondo la legge dell’Adriatico settentrionale [Baù <i>et al.</i> , 2002; Ferronato <i>et al.</i> , 2013].....	13
Figura 13: Rappresentazione grafica della variazione di $c_M$ con $\sigma_z$ .....	13
Figura 14: Andamento nel tempo dello spostamento verticale [cm] nel punto di massima subsidenza. ....	16
Figura 15: Mappa della subsidenza prevista [cm] nello scenario CM_MIN: (a) a fine produzione (8° anno); (b) 12 anni dopo il termine della produzione (20°). In rosso è evidenziata la traccia del modello ECLIPSE. Con il simbolo + è segnato il punto di massima subsidenza. ....	17

Figura 16: Mappa della subsidenza prevista [cm] nello scenario atteso CM\_MED: (a) a fine produzione (8° anno); (b) 12 anni dopo il termine della produzione (20°). In rosso è evidenziata la traccia del modello ECLIPSE. Con il simbolo + è segnato il punto di massima subsidenza..... 18

Figura 17: Mappa della subsidenza prevista [cm] nello scenario conservativo CM\_MAX: (a) a fine produzione (8° anno); (b) 12 anni dopo il termine della produzione (20°). In rosso è evidenziata la traccia del modello ECLIPSE. Con il simbolo + è segnato il punto di massima subsidenza..... 19

Figura 18: Mappa del gradiente dello spostamento verticale [mm/m] nello scenario ottimistico CM\_MIN. In rosso è evidenziata la traccia del modello ECLIPSE.....21

Figura 19: Mappa del gradiente dello spostamento verticale [mm/m] nello scenario atteso CM\_MED. In rosso è evidenziata la traccia del modello ECLIPSE.....21

Figura 20: Mappa del gradiente dello spostamento verticale [mm/m] nello scenario conservativo CM\_MAX. In rosso è evidenziata la traccia del modello ECLIPSE. ....22

## I INTRODUZIONE

Il presente rapporto tecnico ha come oggetto lo sviluppo di un modello geomeccanico FEM per la previsione della subsidenza antropica prodotta dalla coltivazione del giacimento di Trava.

Il rapporto è strutturato come segue. Nel capitolo 2 sono riportati i dati forniti da Rina Consulting (per conto di Aleanna Resources LLC) con riferimento alla geologia dell'area e al modello fluidodinamico di giacimento. Il capitolo 3 descrive la metodologia applicata per la generazione del modello geomeccanico statico a partire dagli orizzonti geologici e dalle mappe delle isobate e isopache dei pool mineralizzati. I risultati del modello geomeccanico ottenuti dalla simulazione con modello FEM per lo scenario di coltivazione previsto sono riportati nel capitolo 4. Nello specifico, sono stati analizzati tre scenari con diversa caratterizzazione geomeccanica: in mancanza di informazione connesse alla produzione del campo, si sono considerati in via cautelativa i valori estremi nell'intervallo di variabilità della compressibilità verticale della roccia serbatoio. Le considerazioni conclusive sono presentate nel capitolo 5.

## 2 MODELLO DI PRODUZIONE

Il giacimento di Trava è ubicato in Emilia Romagna, all'interno del permesso di ricerca "Corte dei Signori", a una profondità di circa 1000 m TVDss (Figura 1). Il giacimento non è ancora stato prodotto e si trova quindi alle condizioni di scoperta. I livelli oggetto dell'attività mineraria sono PL2, PL2-F e PL2-G: le mappe delle isobate e delle isopache sono riportate nell'Allegato A.

Per il giacimento di Trava è stato indagato un unico scenario di coltivazione. Rina Consulting (per conto di Aleanna Resources LLC) ha fornito il modello fluidodinamico di giacimento [Dream, 2017], sviluppato mediante il software Eclipse, utilizzato per la simulazione del comportamento futuro del giacimento durante la coltivazione. In particolare, il piano di coltivazione prevede la messa in produzione del pozzo esistente Trava 2dir dai livelli PL2 e PL2-F e la perforazione e messa in produzione del pozzo Trava 3dir con obiettivo minerario il livello PL2-G.

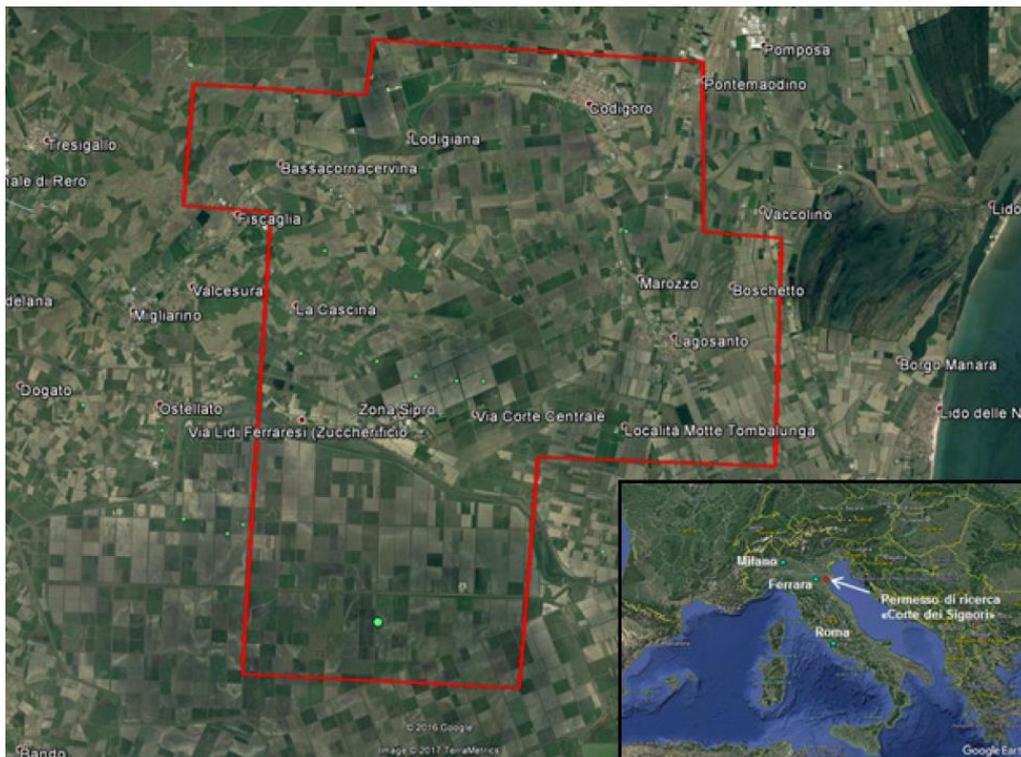


Figura 1: Ubicazione e limiti del permesso di ricerca "Corte dei Signori".

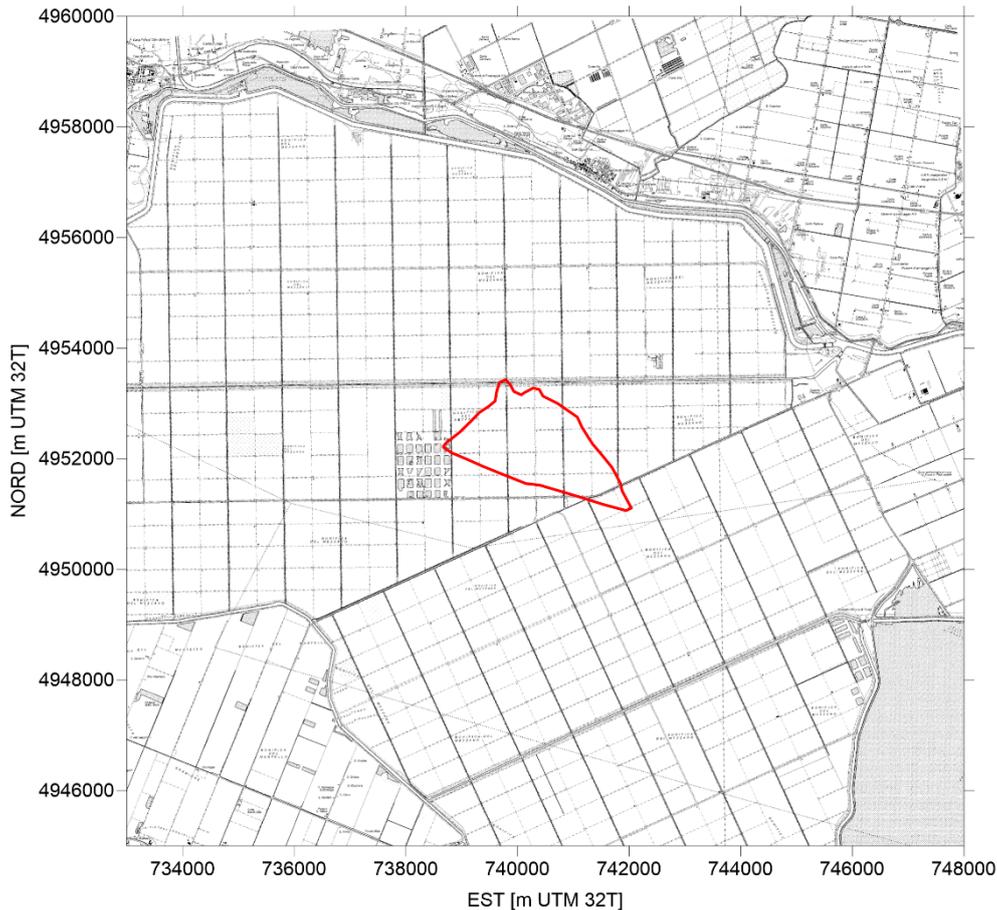


Figura 2: Ubicazione del giacimento Trava. In rosso è evidenziata la traccia del modello Eclipse.

Da modello Eclipse è stato estratto l'andamento spazio-temporale della variazione di pressione media nei pool mineralizzati e nell'acquifero connesso idraulicamente al campo per lo scenario forecast di coltivazione: oltre al ruolo esercitato dal giacimento, i processi geomeccanici connessi alla coltivazione di gas naturale sono attivati anche dalla variazione di pressione nell'acquifero connesso idraulicamente al campo [Baù *et al.*, 2000; Ferronato *et al.*, 2004]. In Figura 3 e Figura 4 sono riportati l'andamento nel tempo della produzione di gas e la variazione di pressione, rispettivamente. L'acquifero connesso al campo ha un'estensione limitata (Figura 5-a, Figura 6-a e Figura 7-a) e nella fase di post-produzione non contribuisce alla ripressurizzazione del campo: la variazione di pressione rimane costante a circa  $-70$  bar.

Per ogni livello, in Figura 5-b, Figura 6-b e Figura 7-b sono riportate le mappe di variazione di pressione a fine produzione: la variazione di pressione si propaga in modo uniforme in tutto l'acquifero.

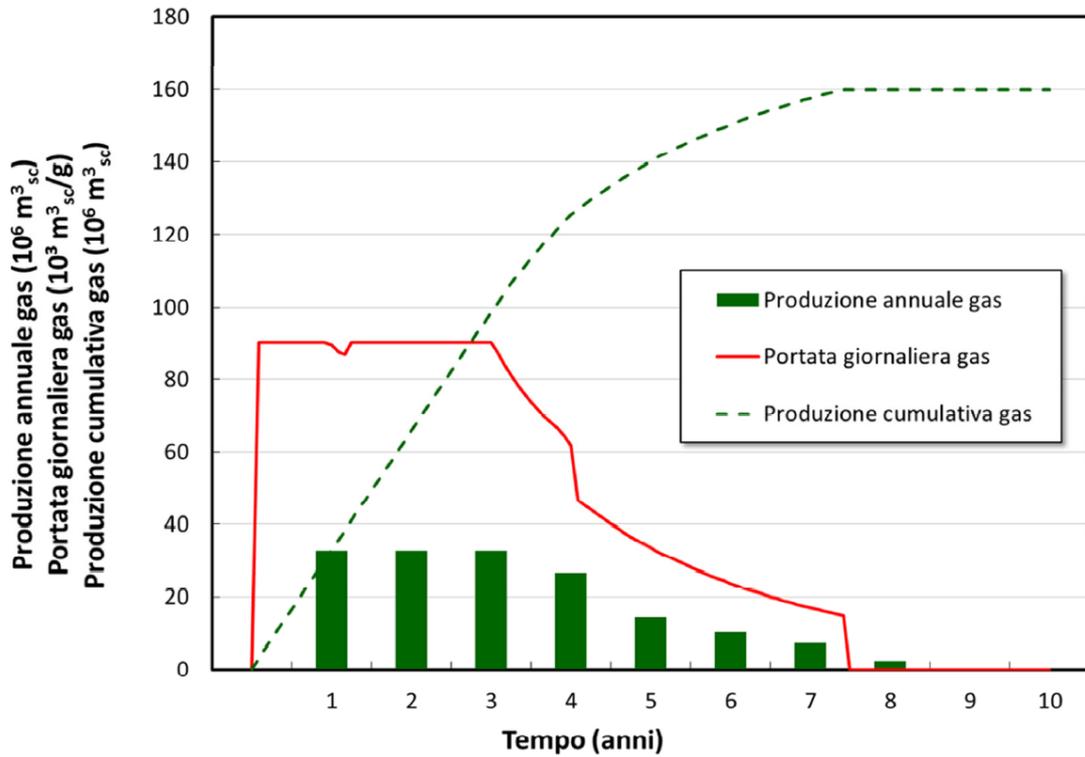


Figura 3: Andamento nel tempo della produzione di gas.

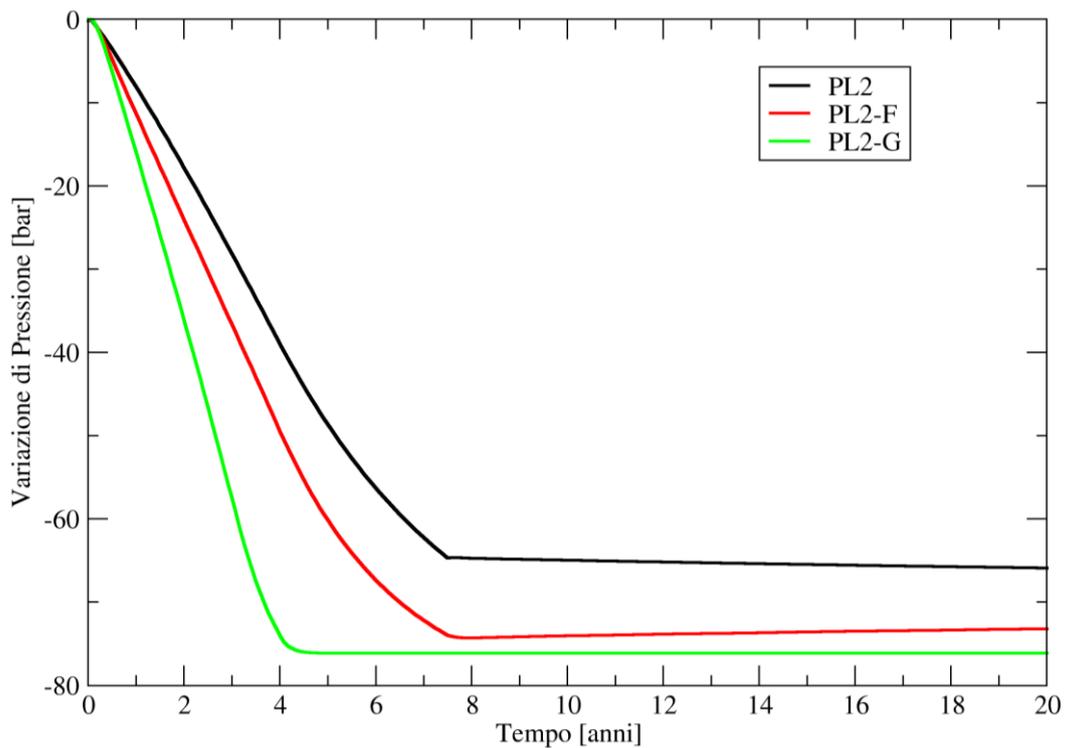


Figura 4: Andamento nel tempo della variazione di pressione media nei livelli produttivi.

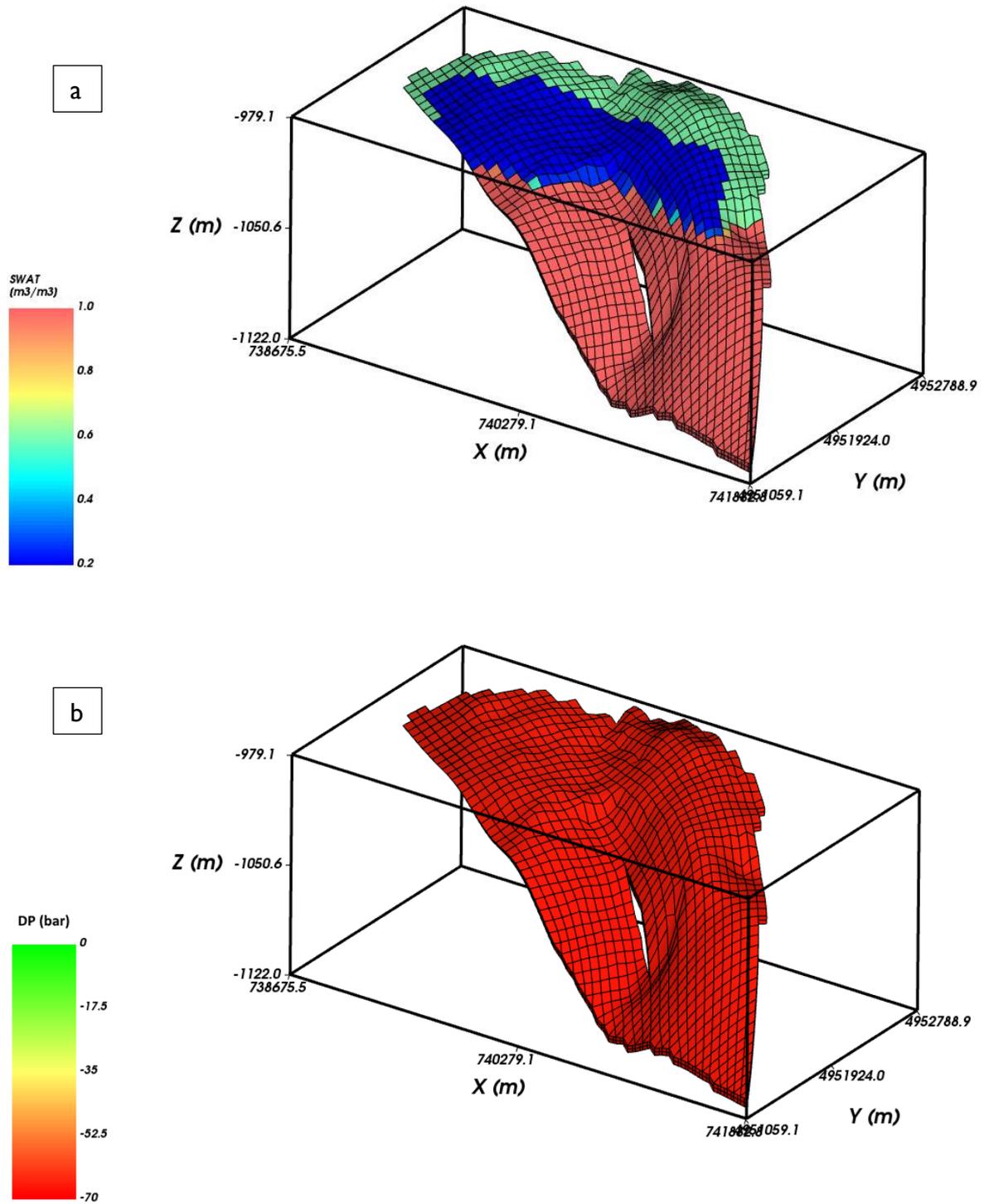


Figura 5: Modello ECLIPSE, livello PL2: (a) saturazione in acqua iniziale; (b) Variazione di pressione a fine produzione.

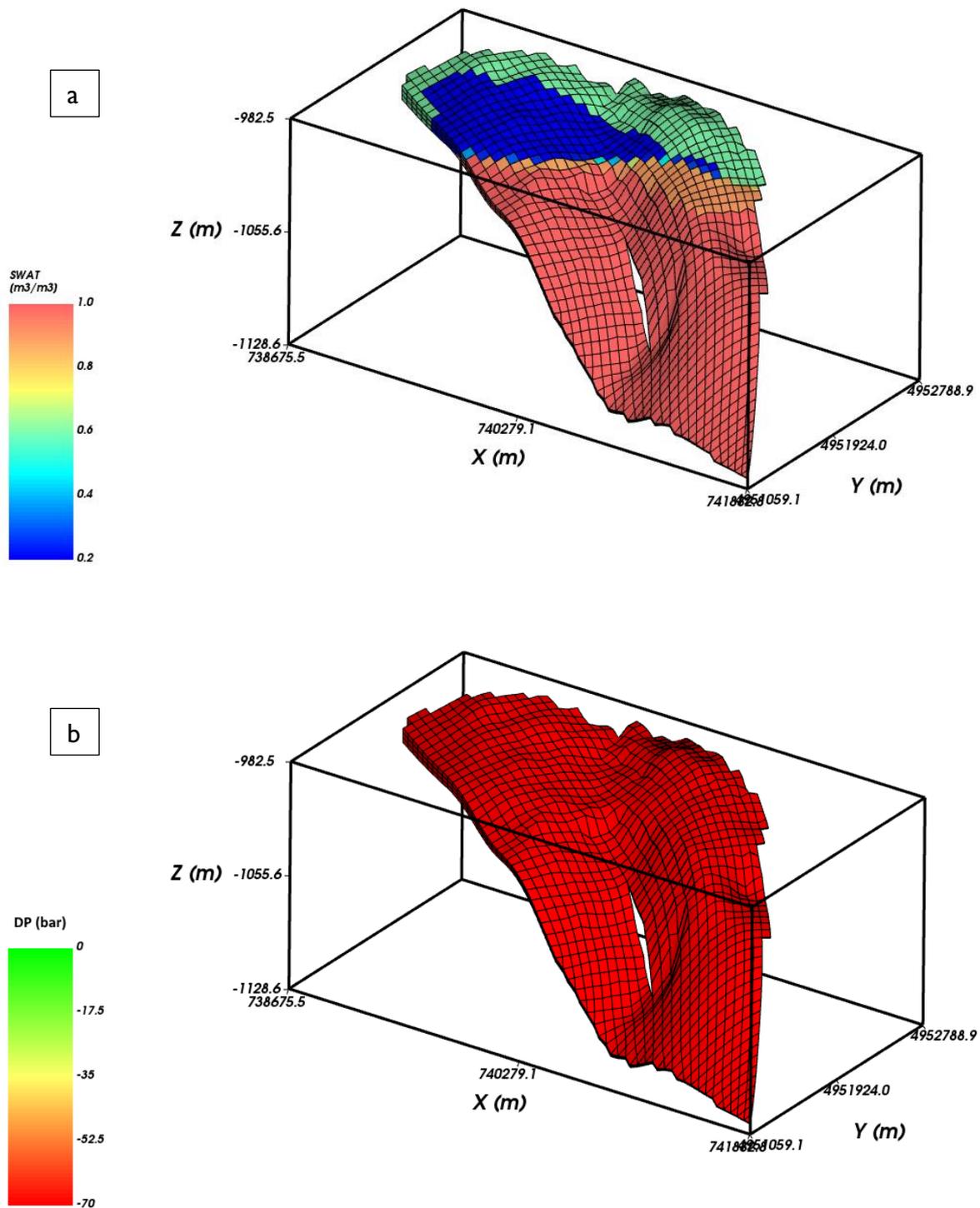


Figura 6: Modello ECLIPSE, livello PL2-F: (a) saturazione in acqua iniziale; (b) Variazione di pressione a fine produzione.

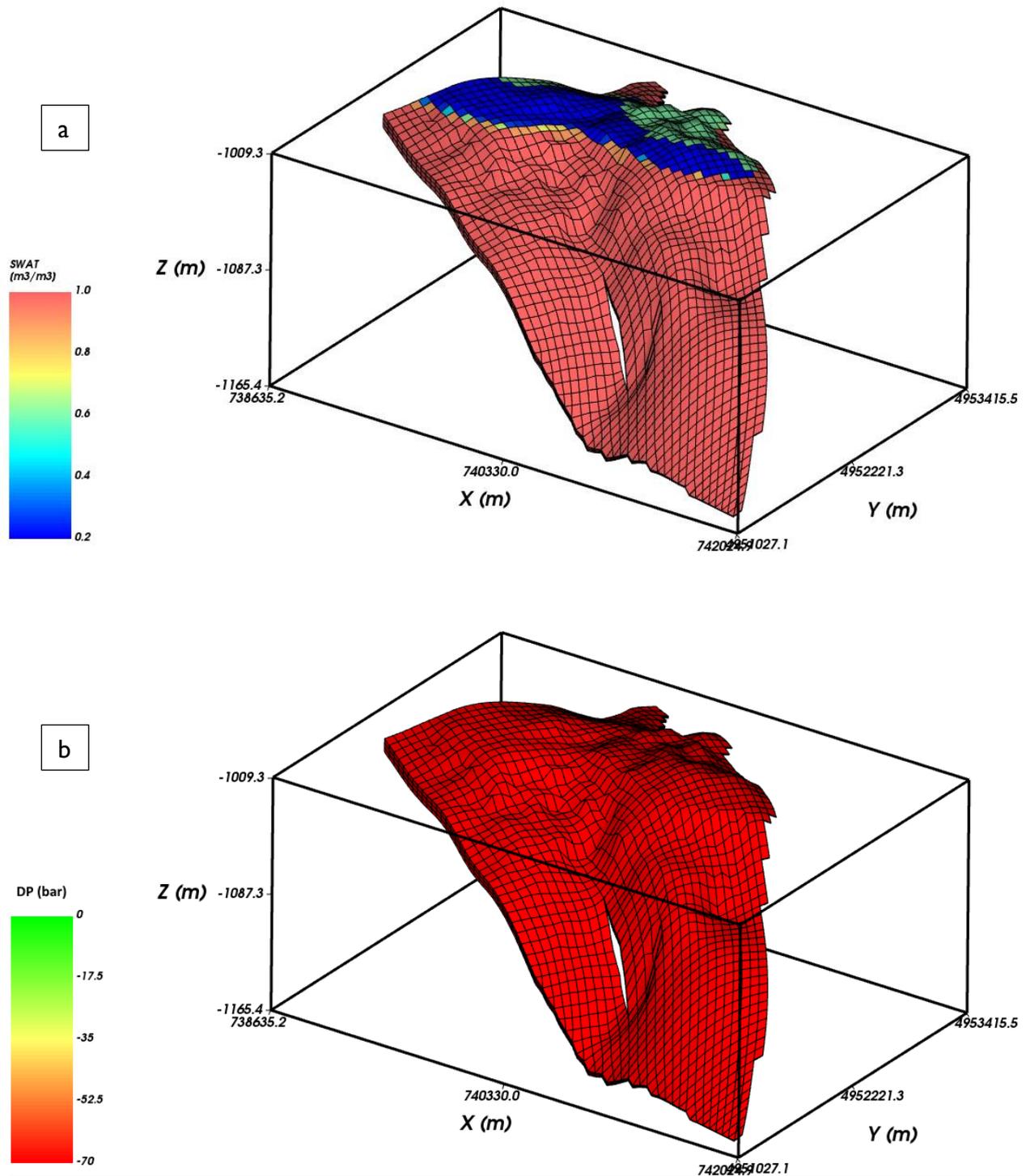


Figura 7: Modello ECLIPSE, livello PL2-G: (a) saturazione in acqua iniziale; (b) Variazione di pressione a fine produzione.

### 3 MODELLO GEOMECCANICO

#### 3.1 Griglia 3D

La generazione di una griglia di calcolo in grado di riprodurre accuratamente i volumi depletati costituisce un elemento di fondamentale importanza per garantire l'attendibilità delle previsioni modellistiche. Si è scelto di simulare un dominio di estensione areale 40 x 40 km, limitato superiormente dal DEM e inferiormente da un basamento posto a 5 km di profondità. La scelta dell'estensione areale del dominio è stata effettuata in modo da ubicare il campo in posizione baricentrica, collocando la frontiera del modello sufficientemente lontano dal volume che si depleta, così da poter ragionevolmente assumere spostamenti nulli su di essa.

In Figura 8 è riportata la vista in pianta della griglia di calcolo. Nella zona del giacimento la dimensione caratteristica degli elementi triangolari è pari a 50 m, coerentemente con il modello ECLIPSE di giacimento. Complessivamente, la triangolazione in pianta è costituita da 7'477 nodi e 14'908 elementi.

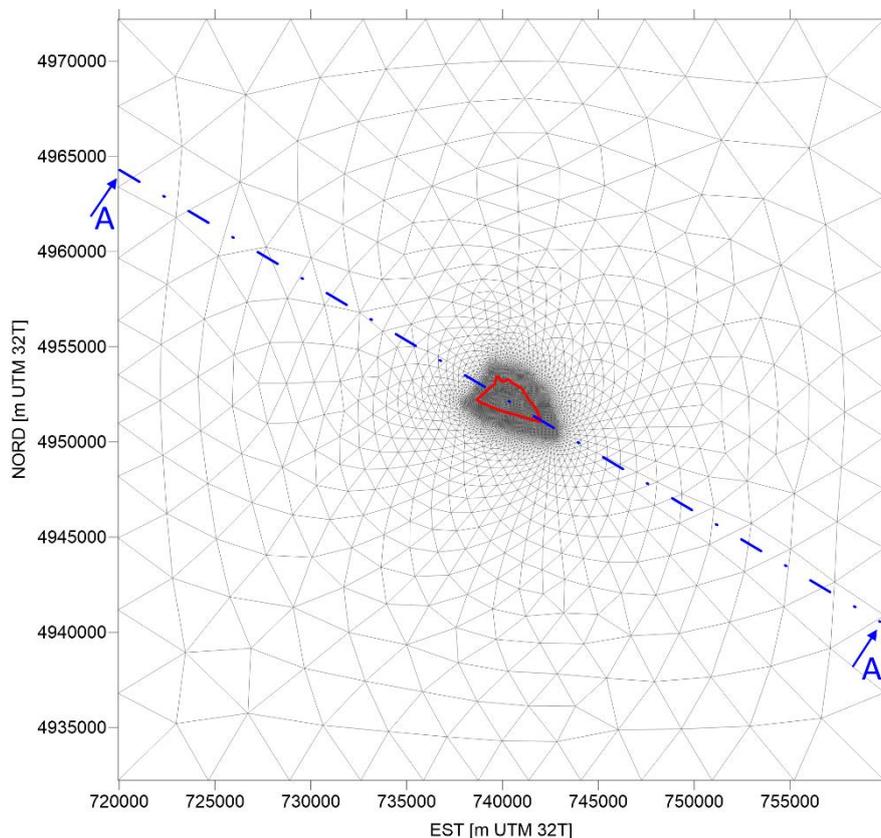


Figura 8: Triangolazione in pianta del modello geomeccanico. In rosso è evidenziata la traccia del modello ECLIPSE. In blu è segnata la sezione verticale A-A di Figura 10.

La griglia di calcolo tridimensionale è stata ottenuta utilizzando un generatore automatico di mesh sviluppato da M<sup>3</sup>E S.r.l. che proietta lungo la direzione verticale i nodi della griglia 2D e adatta la posizione dei vari layer di elementi finiti alla geometria degli orizzonti geologici. In questo modo è stato generato un dominio pressoché parallelepipedo discretizzato con elementi tetraedrici i cui vertici giacciono sul top e bottom dei livelli geologici in modo tale da riprodurre con accuratezza le chiusure a pinch-out, i volumi dei pool mineralizzati, e le geometrie dell'acquifero connesso idraulicamente al giacimento, nonché dei livelli argillosi che costituiscono gli interlayer, l'overburden e l'underburden. La proiezione della griglia 2D sulle superfici degli orizzonti geologici e la successiva eliminazione degli elementi degeneri o eccessivamente distorti ha condotto alla generazione di una discretizzazione FEM con 485'898 nodi e 2'8617'00 tetraedri.

In Figura 9 e Figura 10 sono riportate una vista assonometrica complessiva del volume poroso considerato nel modello geomeccanico e una sezione verticale, rispettivamente.

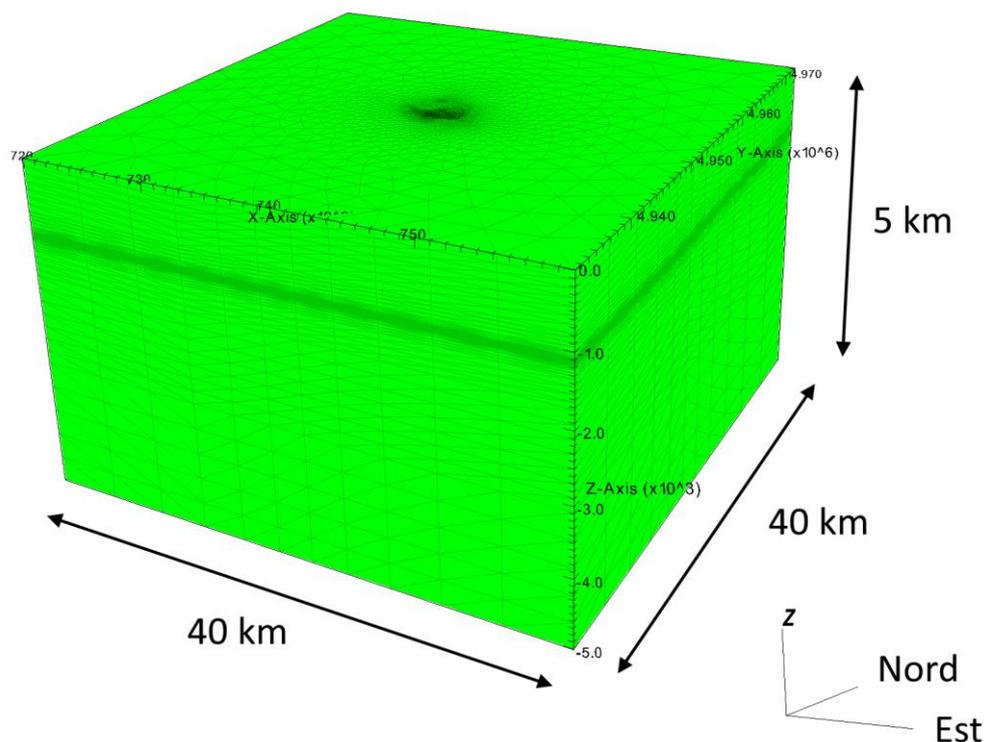


Figura 9: Vista assonometrica della griglia tridimensionale FEM. La scala verticale è amplificata 5 volte rispetto a quella orizzontale.

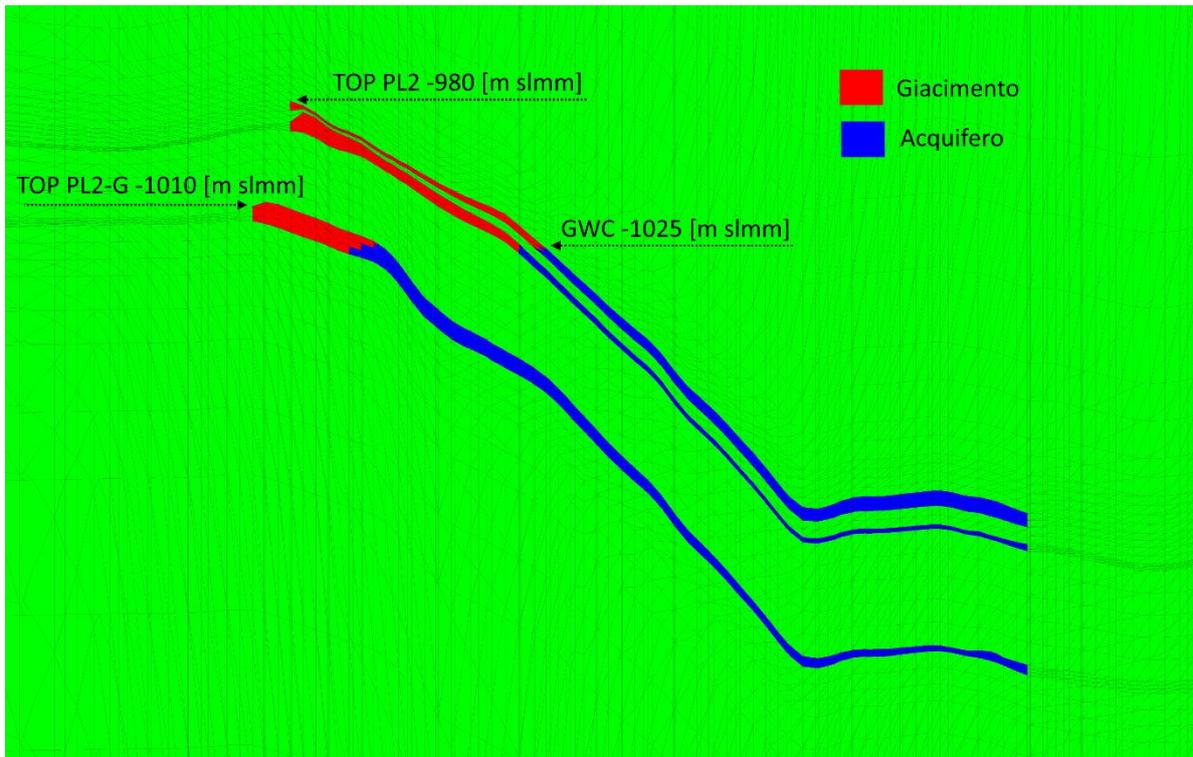


Figura 10: Sezione verticale A-A del modello geomeccanico (Figura 8). La scala verticale è amplificata di un fattore 10.

### 3.2 Caratterizzazione geomeccanica

Il modello geomeccanico utilizza una legge costitutiva della compressibilità verticale edometrica  $c_M$  del mezzo poroso in funzione della tensione verticale efficace  $\sigma_z$ . Nel caso in esame, in analogia a quanto già fatto per altri campi appartenenti al bacino sedimentario padano, si è utilizzata la legge costitutiva ricavata dall'analisi statistica delle misure di deformazione profonda ottenute con la tecnica dei marker radioattivi [Baù *et al.*, 2002]. ENI ha utilizzato questa tecnica dai primi anni '90 installando la strumentazione con marker radioattivi in diversi pozzi localizzati nell'Adriatico settentrionale (Figura 11): Amelia-21, Barbara-101 e Angela-14.

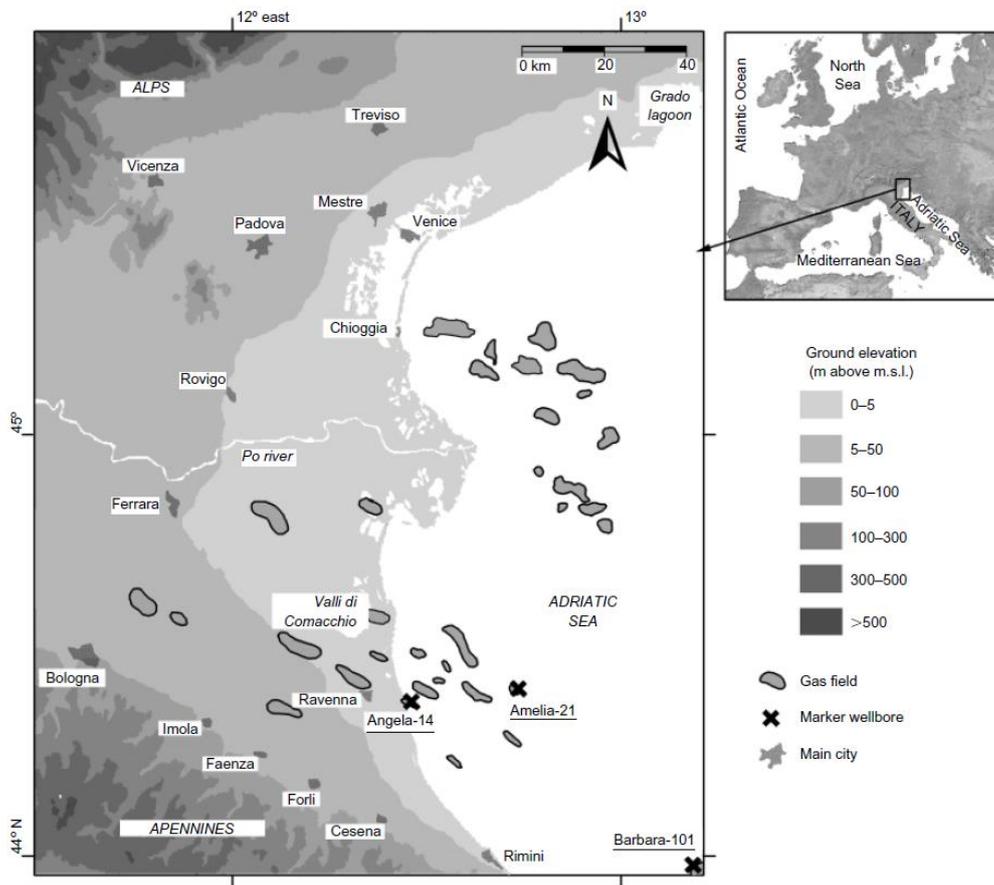


Figura 11: Mappa del bacino sedimentario padano con evidenziati i maggiori giacimenti di gas e le posizioni dei pozzi in cui sono effettuate le misure di compattazione profonda con la tecnica dei marker (anno 2000).

Per una corretta valutazione della relazione tra  $c_M$  e  $\sigma_z$  è necessaria una stima precisa della variazione di pressione nei pori  $\Delta P$  connessa alla compattazione misurata  $\Delta h$  e dello stato tensionale efficace. In particolare, la  $\Delta P$  è stata assunta uguale alla pressione statica di giacimento fornita da ENI. Lo stato tensionale efficace è stato dedotto per mezzo del principio di Terzaghi [Terzaghi & Peck, 1967]:

$$\sigma_z = z \times \text{obg}(z) - P_0 - \Delta P \quad (1)$$

dove  $P_0$  è la pressione iniziale del reservoir e  $\text{obg}$  è il gradiente di overburden ottenuto dal density log del pozzo Amelia-21:

$$\text{obg}(z) = 10^{-6} \times (3270.8771 + 2415.588 \times \ln z) \quad (2)$$

con  $\text{obg}$  espresso in MPa/m e la profondità  $z$  in m.

Tenuto conto che la compattazione ed espansione profonda è prevalentemente verticale con deformazioni laterali trascurabili [Martin & Serdengecti, 1984; van Hasselet, 1992; Gambolati et al., 1999], e quindi  $\Delta P \approx \Delta \sigma_z$ , la compressibilità verticale edometrica è stata calcolata come:

$$c_M = \Delta h / (h \times \Delta P) \quad (3)$$

dove  $h$  è la distanza iniziale tra due marker.

Dall'analisi statistica, la relazione tra  $c_M$  in I ciclo di carico (espressa in MPa<sup>-1</sup>) e  $\sigma_z$  (espressa in MPa) risulta in media:

$$c_M^I = 0.01004 \times \sigma_z^{-1.1347} \quad (4)$$

con andamento lineare in un grafico bi-logaritmico (Figura 12).

Durante la fase di post-produzione la deformazione del mezzo poroso è governata dalla compressibilità verticale  $c_M$  in II ciclo di carico. Per determinarne il valore, è necessario conoscere il rapporto  $s$  tra la compressibilità verticale in I e in II ciclo al momento dell'inversione del carico. La compressibilità media in II ciclo può ancora essere descritta da una funzione esponenziale di  $\sigma_z$  utilizzando la procedura riportata in Baù et al. [2000]:

$$c_M^{II} = 0.00029 \times \sigma_z^{-0.4315}$$

Per  $s$  si è utilizzato un valore pari a 3 come adottato per altri campi del bacino padano [Teatini et al., 2011; Janna et al., 2012; Ferronato et al., 2013]. Una rappresentazione grafica di  $c_M$  in primo e secondo ciclo è riportata in Figura 13.

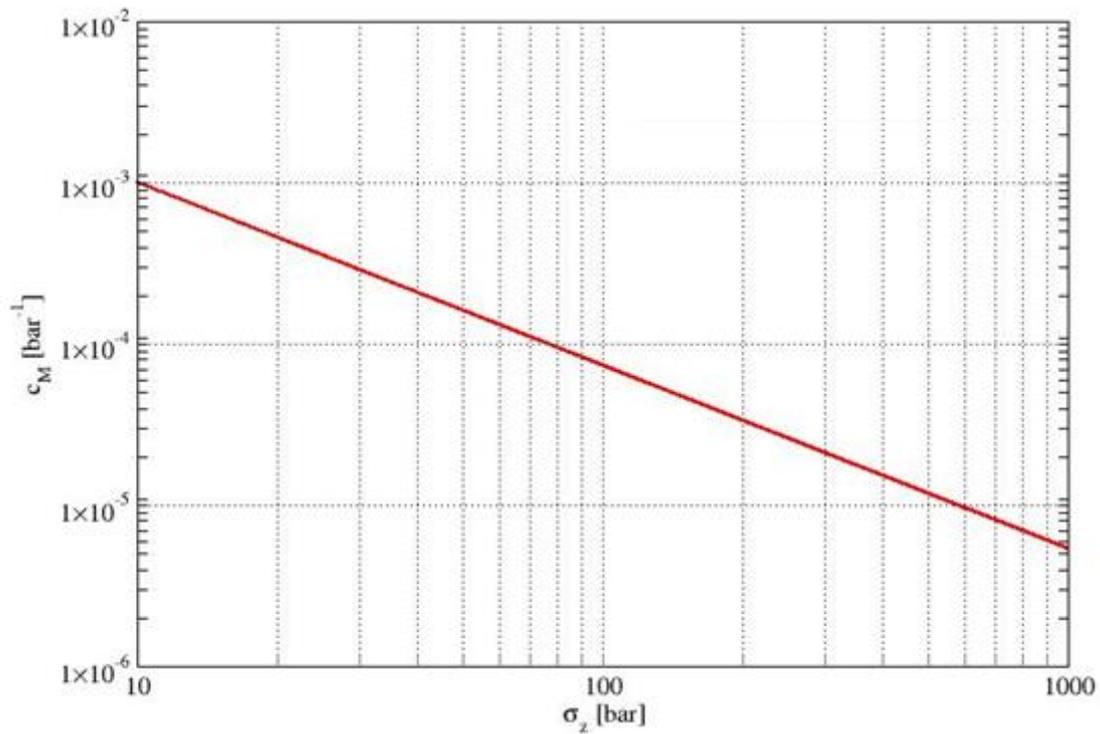


Figura 12: Grafico doppio logaritmico che riporta l'andamento medio della  $c_M$  in I ciclo di carico in funzione della  $\sigma_z$  efficace secondo la legge dell'Adriatico settentrionale [Baù et al., 2002; Ferronato et al., 2013].

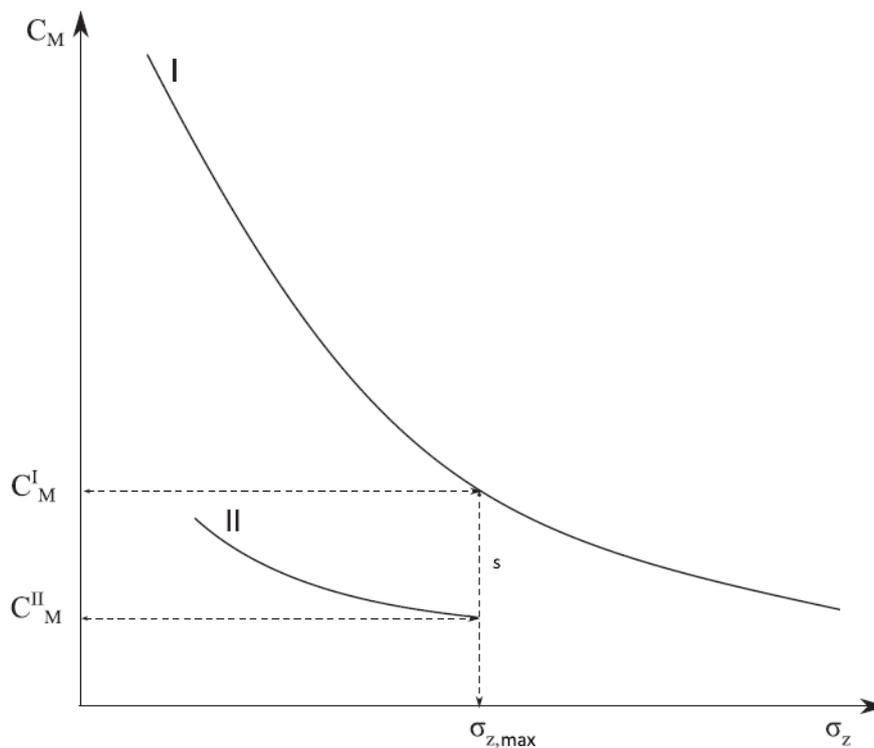


Figura 13: Rappresentazione grafica della variazione di  $c_M$  con  $\sigma_z$ .

In via cautelativa, si sono considerati anche i valori estremi nell'intervallo di variabilità della compressibilità verticale della roccia serbatoio [Baù *et al.*, 2002]. Nello specifico, sono stati indagati tre scenari (Tabella 1):

- CM\_MIN: scenario ottimistico con compressibilità verticale pari al limite inferiore dell'intervallo di confidenza al 95%.
- CM\_MED: scenario atteso con compressibilità verticale media;
- CM\_MAX: scenario conservativo con compressibilità verticale pari al limite superiore dell'intervallo di confidenza al 95%.

Una volta disponibili misure di spostamento correlabili alle attività minerarie, sarà possibile calibrare il modello e ridurre l'intervallo di incertezza.

Scenario	Nome	Compressibilità verticale [MPa <sup>-1</sup> ]
ottimistico	CM_MIN	$0.00516 \times \sigma_z^{-1.1347}$
atteso	CM_MED	$0.01004 \times \sigma_z^{-1.1347}$
conservativo	CM_MAX	$0.01955 \times \sigma_z^{-1.1347}$

Tabella 1: Compressibilità verticale adottata per ogni scenario investigato.

Il modello numerico implementato è di tipo ipo-plastico isotropo. Scrivendo i tensori di stress e di deformazione con la consueta notazione vettoriale, il collegamento tensioni-deformazioni  $\sigma = C\varepsilon$  per un modello isotropo è dato dalla matrice:

$$C = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix}$$

Escluso il modulo di taglio  $G$ , pari a  $E/[2(1+\nu)]$ , la matrice  $C$  dipende da 2 parametri indipendenti, ovvero  $E$  e  $\nu$ , rispettivamente modulo di elasticità normale o di Young e modulo di contrazione laterale o di Poisson. Per il modulo di Poisson è stato utilizzato il valore  $\nu = 0.3$  sulla base dei dati di bibliografia. La compressibilità verticale è legata ai parametri  $E$  e  $\nu$  dalla relazione:

$$c_M = \frac{1}{E} \left( 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \right) = \frac{1}{E} \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu}$$

Da un punto di vista operativo, lo stato tensionale efficace e la compressibilità edometrica verticale sono stati inizializzati a livello di elemento secondo la profondità  $z$ . Successivamente, gli spostamenti  $\mathbf{u}$  su tutti i nodi del dominio  $\Omega$  (Figura 9) sono calcolati ad ogni istante di calcolo  $t$  risolvendo il sistema di equazioni non lineari:

$$\mathbf{R}(\mathbf{u}, t) = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} d\Omega + \mathbf{f} = 0$$

Le forzanti esterne del sistema  $\mathbf{f}$  sono date dall'integrale:

$$\mathbf{f} = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \alpha p d\Omega$$

dove  $\mathbf{B}$  è la matrice delle derivate delle funzioni di forma,  $\alpha$  è il coefficiente di Biot assunto pari a 1 e  $p$  è la variazione di pressione media.

Applicando lo schema iterativo di Newton-Raphson, all' $i$ -esima iterazione lo spostamento all'istante  $t+\Delta t$  risulta:

$$\mathbf{u}_{t+\Delta t}^i = \mathbf{u}_{t+\Delta t}^{i-1} - \delta \mathbf{u}_{t+\Delta t}^i$$

con l'incremento di spostamento:

$$\delta \mathbf{u}_{t+\Delta t}^i = \left[ \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}} \Big|_{t+\Delta t}^{i-1} \mathbf{B} d\Omega \right]^{-1} \mathbf{R}_{t+\Delta t}^{i-1}$$

e l'operatore tangente:

$$\mathbf{K}_{t+\Delta t}^i = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}} \Big|_{t+\Delta t}^{i-1} \mathbf{B} d\Omega$$

Assumendo  $\frac{\partial \boldsymbol{\sigma}}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{C}$ , l'operatore tangente diventa simmetrico definito positivo e il sistema algebrico può essere risolto con tecniche iterative efficienti come il Gradiente Coniugato Precondizionato.

## 4 PREVISIONE MODELLISTICA DELLA SUBSIDENZA

Il modello geomeccanico FEM è stato quindi utilizzato per la previsione della subsidenza antropica dovuta alla produzione di gas dal giacimento di Trava.

### 4.1 Spostamenti della superficie del terreno

In Figura 14 è mostrato l'andamento nel tempo della subsidenza massima. In particolare, la subsidenza massima prevista risulta pari a 0.7 cm, 1.3 cm e 2.6 cm per lo scenario ottimistico, atteso e conservativo, rispettivamente.

Per tutti gli scenari investigati, in Figura 15, Figura 16 e Figura 17 sono riportati i risultati numerici in termini di subsidenza a fine produzione (8° anno della simulazione) e 12 anni dopo il termine della produzione (20° anno della simulazione). Il cono di subsidenza è leggermente allungato in direzione NO-SE secondo l'asse principale del giacimento. La subsidenza a fine produzione rimane costante nella fase di post-produzione perché non c'è recupero di pressione in giacimento (Figura 4). Anche nel caso più gravoso (Figura 17), l'estensione del fenomeno è limitata: l'isocinetica -0.5 cm dista a 1 km dalla traccia del campo.

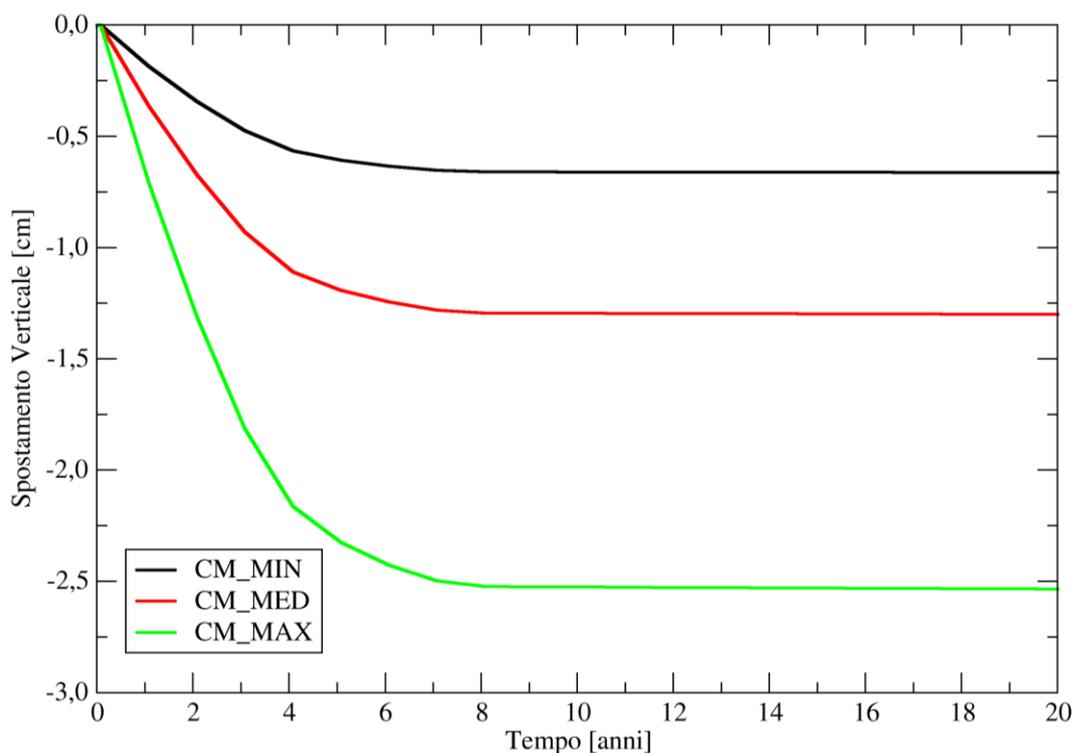


Figura 14: Andamento nel tempo dello spostamento verticale [cm] nel punto di massima subsidenza.

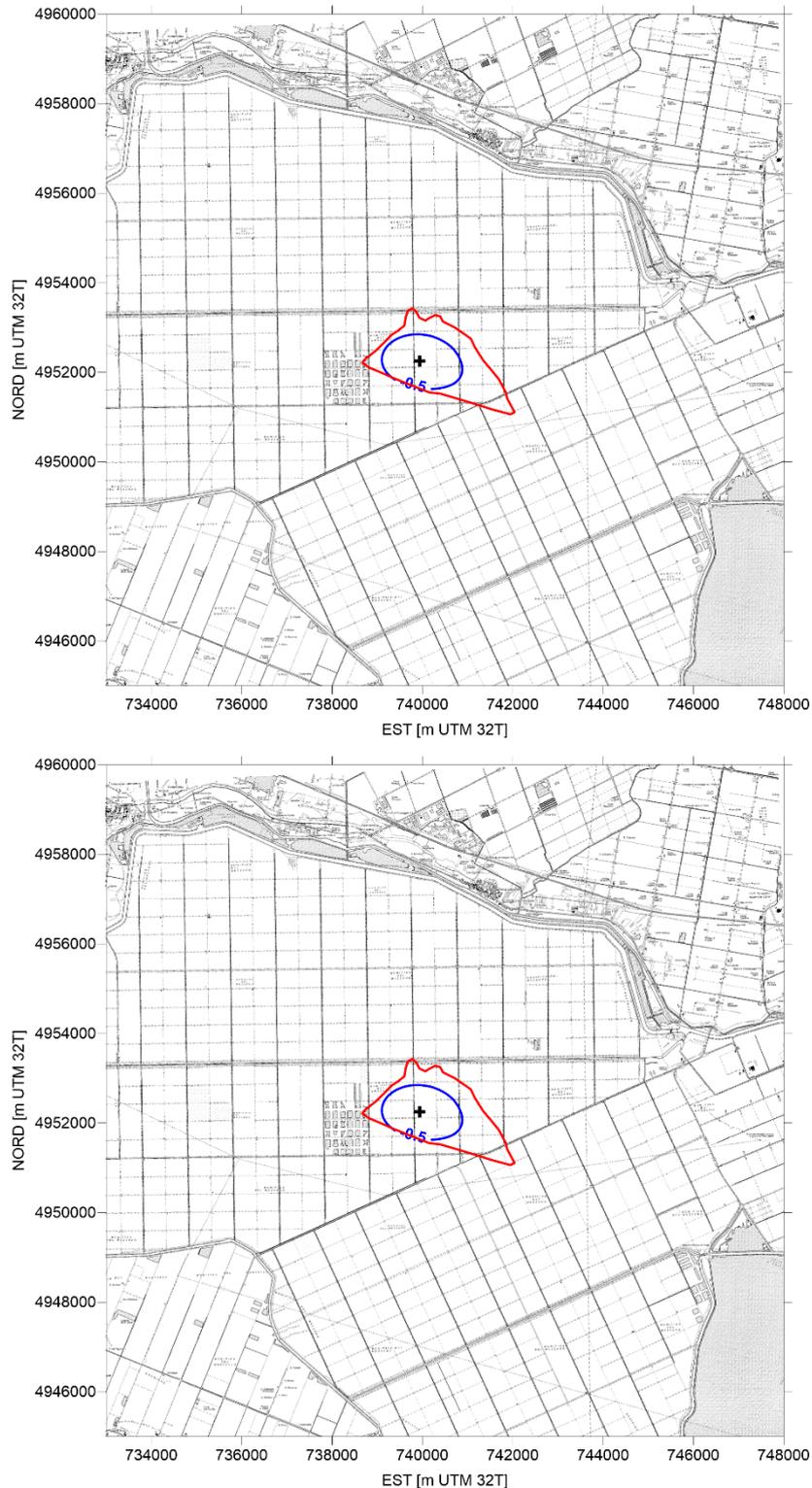


Figura 15: Mappa della subsidenza prevista [cm] nello scenario CM\_MIN: (a) a fine produzione (8° anno); (b) 12 anni dopo il termine della produzione (20°). In rosso è evidenziata la traccia del modello ECLIPSE. Con il simbolo + è segnato il punto di massima subsidenza.

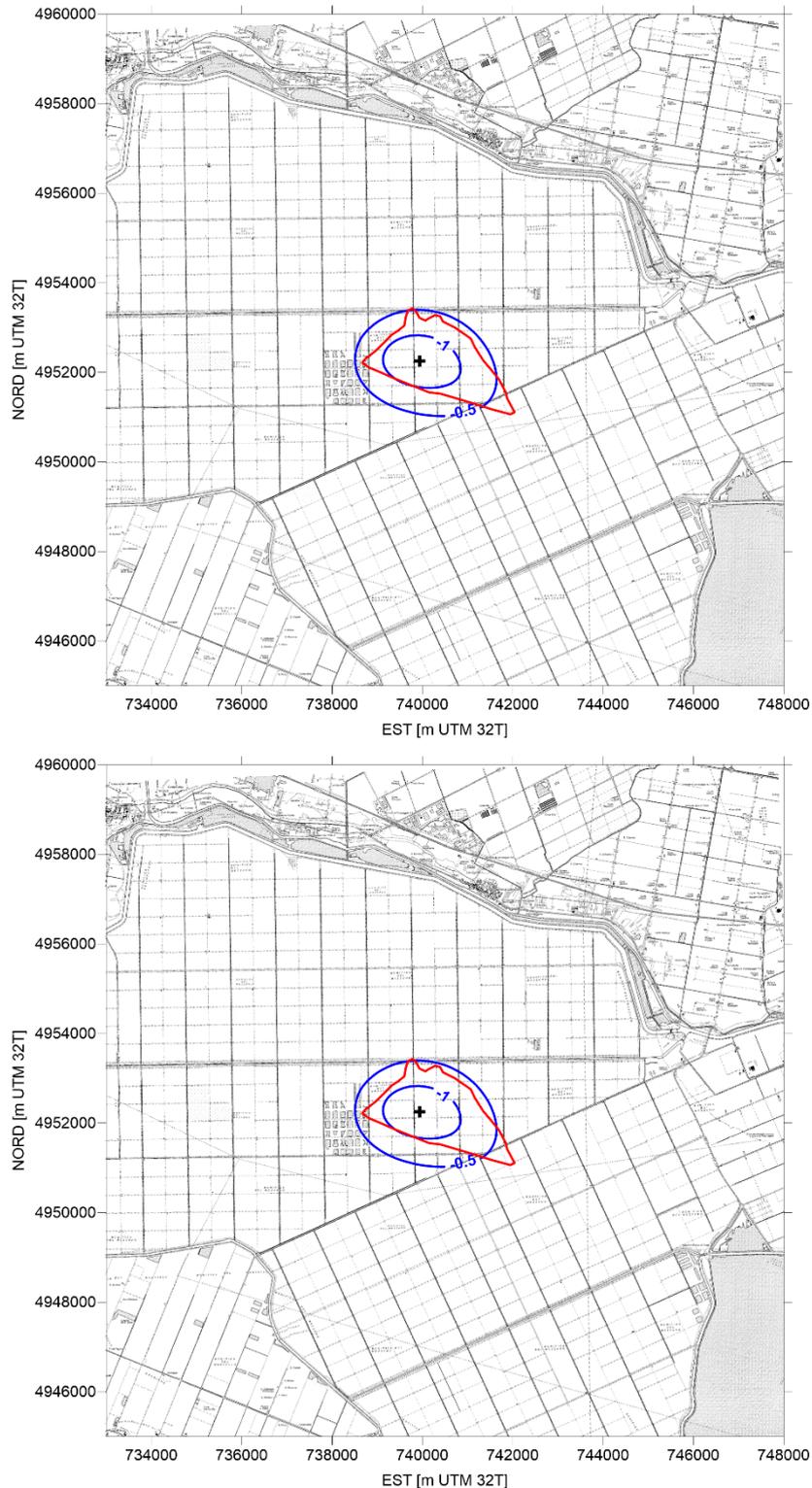


Figura 16: Mappa della subsidenza prevista [cm] nello scenario atteso CM\_MED: (a) a fine produzione (8° anno); (b) 12 anni dopo il termine della produzione (20°). In rosso è evidenziata la traccia del modello ECLIPSE. Con il simbolo + è segnato il punto di massima subsidenza.

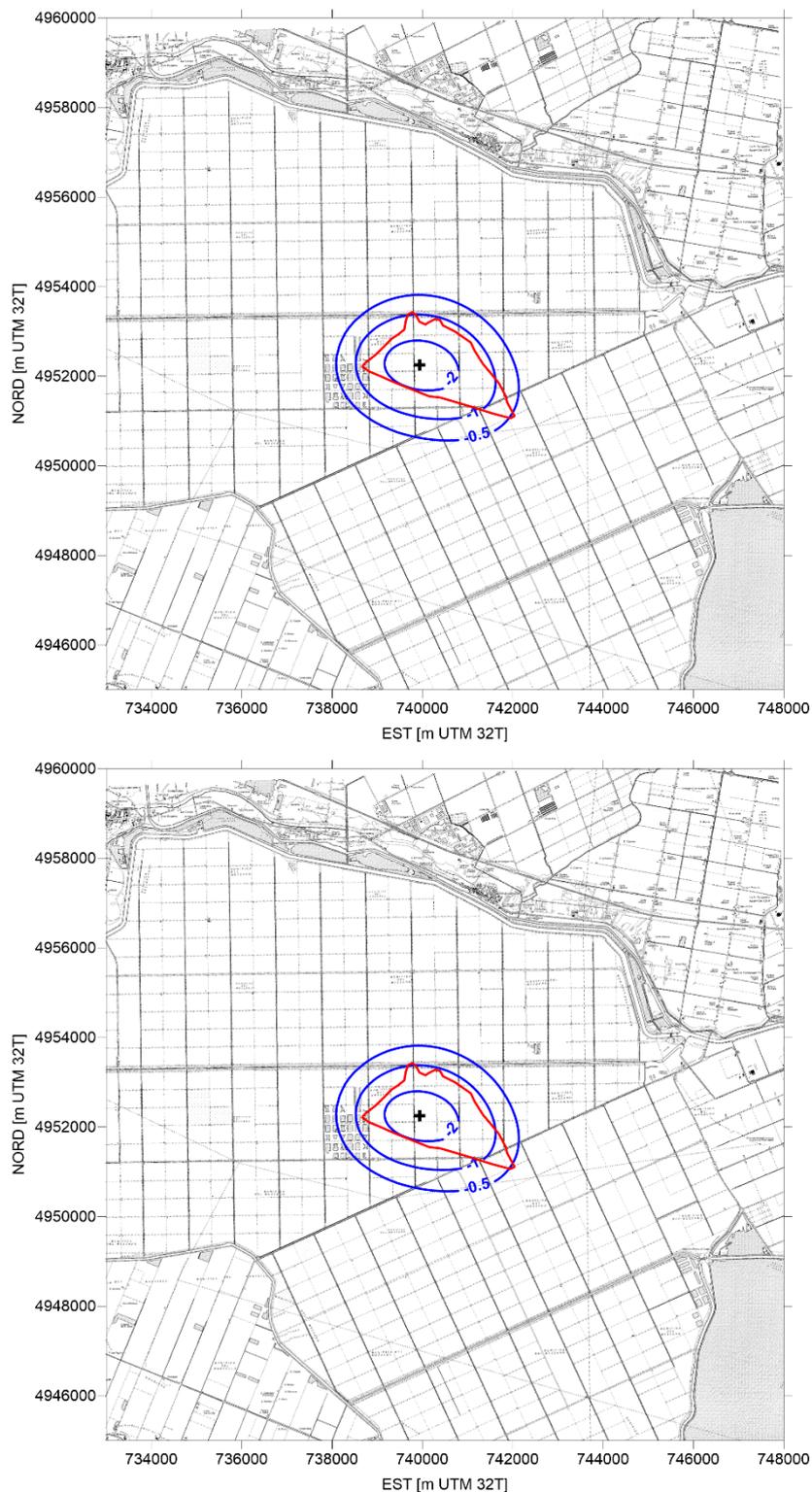


Figura 17: Mappa della subsidenza prevista [cm] nello scenario conservativo CM\_MAX: (a) a fine produzione (8° anno); (b) 12 anni dopo il termine della produzione (20°). In rosso è evidenziata la traccia del modello ECLIPSE. Con il simbolo + è segnato il punto di massima subsidenza.

## 4.2 Gradiente dello spostamento

L'impatto della subsidenza su un territorio, ovvero la sua sostenibilità in relazione alla coltivazione di un giacimento di idrocarburi, non può essere quantificato in termini assoluti, ma va valutato in rapporto alle specificità ambientali, sociali ed economiche della realtà territoriale coinvolta che ne definiscono la vulnerabilità rispetto al possibile abbassamento. L'area soggetta allo spostamento connesso con la coltivazione del campo di Trava non possiede caratteristiche tali da risultare vulnerabile a spostamenti inferiori a 3 cm (Figura 14).

Pertanto, risulta di maggiore interesse la valutazione delle possibili conseguenze dei cedimenti differenziali. In linea di principio la generazione di cedimenti e/o spostamenti differenziali può indebolire la capacità portante dei manufatti interessati, causando l'innescò di fessurazioni o deformazioni inaccettabili in relazione all'integrità della struttura. Tale eventualità va indagata con particolare attenzione nel caso in cui sul territorio siano presenti infrastrutture di elevata importanza sociale e/o storico-culturale per evitare un eventuale danneggiamento. I cedimenti differenziali si misurano come variazione dell'abbassamento per metro di lunghezza ed i manufatti più sensibili sotto questo aspetto sono gli edifici multipiano in laterizio. A partire dalle mappe di spostamento ottenute dal modello, il calcolo del degli spostamenti differenziali si esegue con una semplice operazione "gradiente". Per tutti gli scenari analizzati, in Figura 18, Figura 19 e Figura 20 sono riportati i risultati ottenuti a fine produzione (8° anno della simulazione). I risultati a fine simulazione coincidono con quelli a fine produzione, gli spostamenti verticali non identici (Figura 15, Figura 16 e Figura 17), e pertanto non sono riportati. Il massimo gradiente di spostamento verticale si registra nella zona esterna della traccia del giacimento, nel caso più gravoso è pari a 0.019 mm/m, cioè  $1.9 \times 10^{-5}$ . Le strutture multipiano in muratura sono le più sensibili agli spostamenti differenziali, con il limite più cautelativo per i gradienti di deformazione verticale fissato in  $50 \times 10^{-5}$ , vale a dire 5 cm su 100 m [Viggiani, 2003]. I limiti ammissibili consigliati per tutti gli altri tipi di struttura sono superiori a quest'ultimo [Simeoni et al., 2017], anche di 100 volte per fabbricati flessibili come quelli realizzati in acciaio. I risultati delle simulazioni indicano gli spostamenti differenziali previsti sono ampiamente al di sotto del limite di sicurezza.

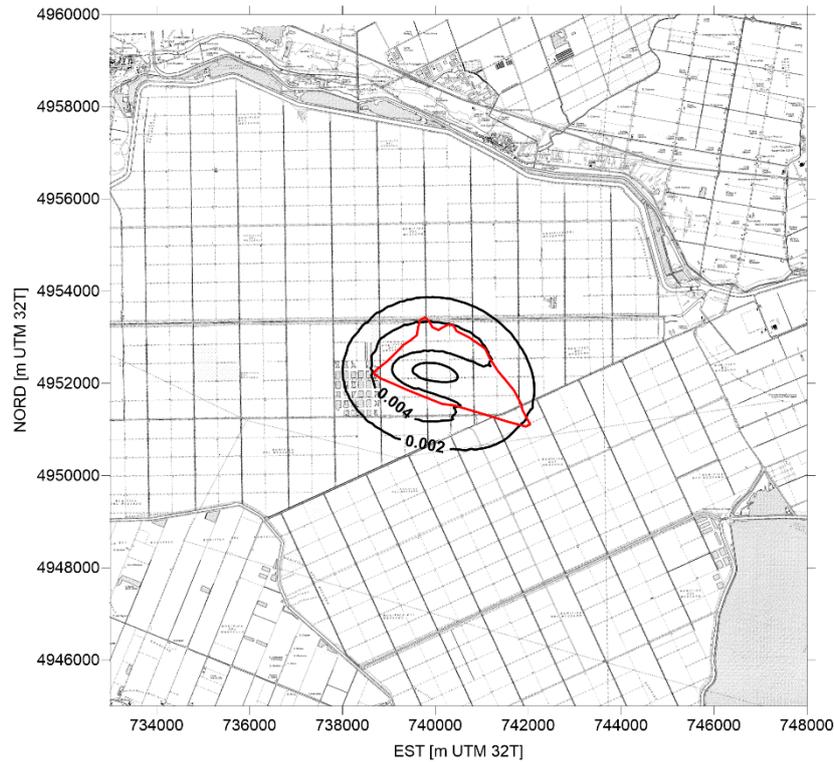


Figura 18: Mappa del gradiente dello spostamento verticale [mm/m] nello scenario ottimistico CM\_MIN. In rosso è evidenziata la traccia del modello ECLIPSE.

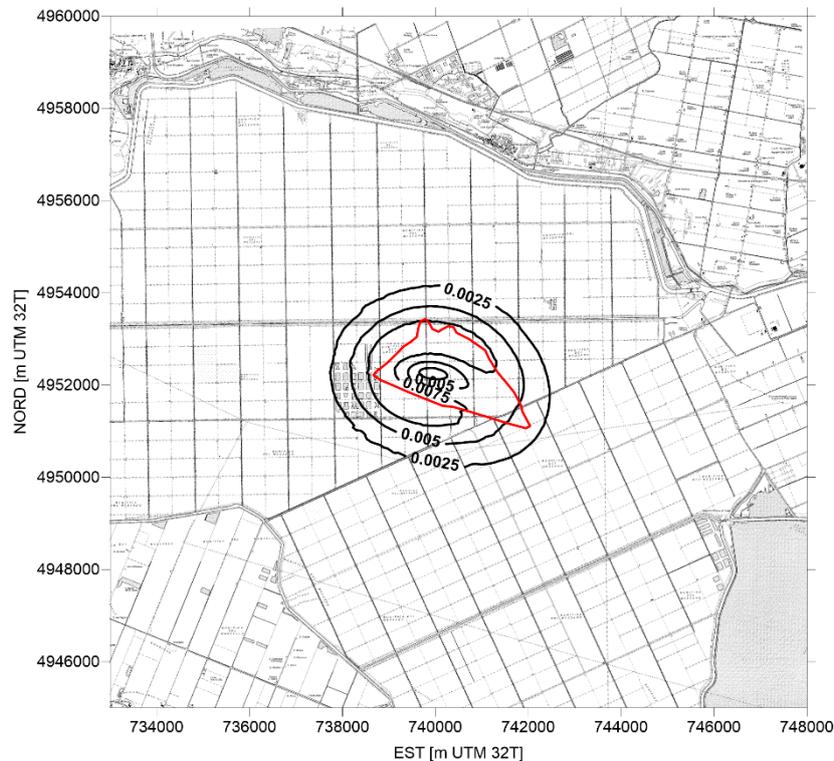


Figura 19: Mappa del gradiente dello spostamento verticale [mm/m] nello scenario atteso CM\_MED. In rosso è evidenziata la traccia del modello ECLIPSE.

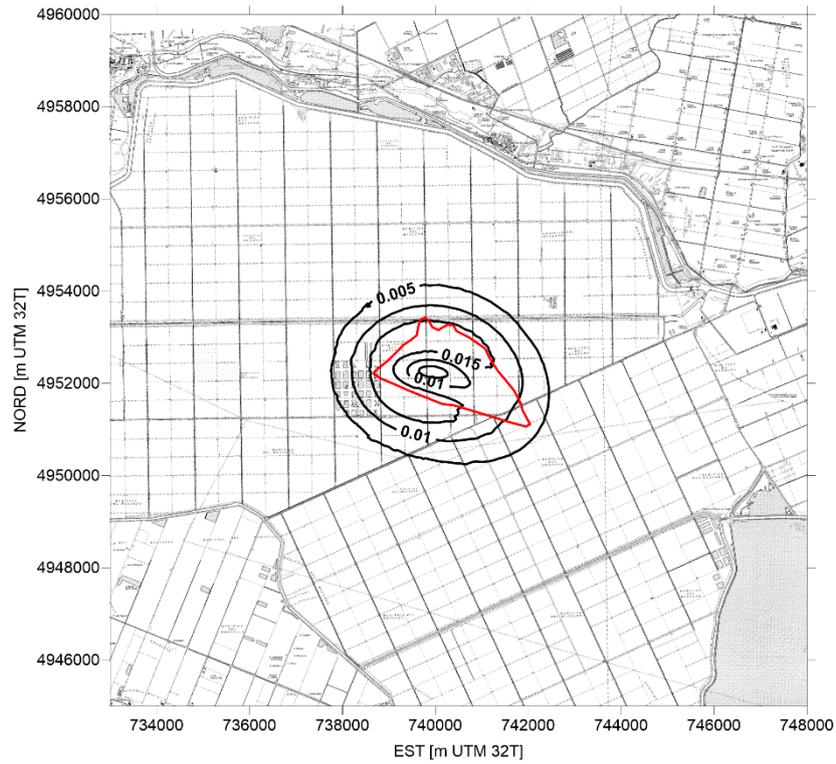


Figura 20: Mappa del gradiente dello spostamento verticale [mm/m] nello scenario conservativo CM\_MAX. In rosso è evidenziata la traccia del modello ECLIPSE.

## 5 CONCLUSIONI

Sono stati analizzati, elaborati e utilizzati i dati forniti da Rina consulting (per conto di Aleanna Resources LLC) per la simulazione previsionale della subsidenza antropica causata dalla coltivazione del giacimento di Trava.

Le informazioni utili per le simulazioni riguardano la geometria del giacimento e dell'acquifero ad esso idraulicamente connesso (waterdrive), le proprietà petrofisiche del giacimento e quelle geomeccaniche del giacimento, dell'overburden, dell'underburden e del sideburden e l'andamento spazio-temporale delle pressioni di strato. Poiché il giacimento non è stato ancora prodotto non è stato possibile calibrare le caratteristiche geomeccaniche: si sono considerati in via cautelativa i valori estremi nell'intervallo di variabilità della compressibilità verticale della roccia serbatoio. Nello specifico, si sono analizzati tre scenari:

- CM\_MIN: scenario ottimistico con compressibilità verticale pari al limite inferiore dell'intervallo di confidenza al 95%;
- CM\_MED: scenario atteso con compressibilità verticale media;
- CM\_MAX: scenario conservativo con compressibilità verticale pari al limite superiore dell'intervallo di confidenza al 95%.

È stato quindi implementato un modello FEM geomeccanico, con legge costitutiva ipo-plastica isotropa, per la previsione della subsidenza a partire dagli abbattimenti di pressione di strato previsti in giacimento e nel waterdrive.

Le simulazioni sono state condotte impiegando le conoscenze allo stato dell'arte.

I risultati ottenuti in fase previsionale sono sintetizzati Tabella 2 e Tabella 3 in termini di subsidenza massima e gradiente di spostamento verticale massimo, rispettivamente.

Nel caso più gravoso, la subsidenza massima è pari a 2.6 cm e il massimo gradiente dello spostamento verticale risulta pari a 1.9 mm/m, cioè  $1.9 \times 10^{-5}$ , circa 25 volte inferiore al limite più restrittivo raccomandato nella letteratura di settore con riferimento alla stabilità strutturale delle opere murarie multipiano

Tempo (anni)	Subsidenza Massima [cm]		
	ottimistico CM_MIN	atteso CM_MED	conservativo CM_MAX
8 (Fine produzione)	0.7	1.3	2.6
20 (Fine simulazione)	0.7	1.3	2.6

Tabella 2: Subsidenza massima[cm] prevista dal modello geomeccanico.

Tempo (anni)	Gradiente Massimo [mm/m]		
	ottimistico CM_MIN	atteso CM_MED	conservativo CM_MAX
8 (Fine produzione)	0.005	0.010	0.019
20 (Fine simulazione)	0.005	0.010	0.019

Tabella 3: Gradiente di spostamento verticale massimo [mm/m] previsto dal modello geomeccanico.

## 6 REFERENZE

- Baù, D., Gambolati, G., Teatini, P. (1999). Residual land subsidence over depleted gas fields in the Northern Adriatic basin. *Environmental & Engineering Geoscience*, V(4), 389-405.
- Baù, D., Gambolati, G., Teatini, P. (2000). Waterdrive dynamics and enhanced land subsidence over productive gas fields: application to Dosso degli Angeli reservoir, Ravenna, Italy. In: *Theory, Modeling and Field Investigation in Hydrology: A Special Volume in Honor of Shlomo P. Neuman's 60th Birthday*, D. Zhang and C. L. Winter eds., Geological Society of America, Special Paper 348, 129-149.
- Baù, D., Ferronato, M., Gambolati, G., Teatini, P. (2002). Basin-scale compressibility of the Northern Adriatic by the radioactive marker technique. *Geotechnique*, 52(8), 605-616.
- Dream (2017). Giacimento a Gas Trava “Corte dei Signori”: stima delle riserve recuperabili e delle produzioni annuali dei livelli PL2, PL2-F e PL2-G. Relazione tecnica.
- Ferronato, M., Gambolati, G., Teatini, P. (2004). On the role of reservoir geometry in waterdrive hydrodynamics. *J. Pet. Sci. Eng.*, 44(3-4), 205-221.
- Ferronato, M., Castelletto, N., Gambolati, G., Janna C., Teatini, P. (2013). Il cycle compressibility estimate from satellite measurements. *Geotechnique*, doi:10.1680/geot.11.P.149.
- Gambolati, G., Teatini, P., Tomasi, L. (1999). Stress-strain analysis in productive gas/oil reservoirs. *Int. J. Number. Anal. Methods Geomech.* 23, 1495-1519.
- Janna, C., N. Castelletto, M. Ferronato, G. Gambolati and P. Teatini (2012). A geomechanical transversely isotropic model of the Po River basin using PSInSAR derived horizontal displacement, *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.*, 51, 105-118.
- Martin, J. C. & Ser Martin, J. C. & Serdengecti, S. (1984). Subsidence over oil and gas fields. In *Man-induced land subsidence* (ed. T. L. Holzer) Rev. Engng Geol., vol. 6, pp. 23–34. Boulder, CO: Geological Society of America.
- Simeoni, U., U. Tessari, C. Corbau, O. Tosatto, P. Polo, P. Teatini (2017). Impact of land subsidence due to residual gas production on surficial infrastructures: the Dosso degli Angeli field study (Ravenna, Northern Italy), *Engineering Geology*, doi:10.1016/j.enggeo.2017.09.008.

- Teatini, P., Baù, D., Gambolati, G. (2000). Water-gas dynamics and coastal land subsidence over Chioggia Mare field, northern Adriatic Sea. *Hydrogeology Journal*, 8(5), 462-479.
- Teatini, P., N. Castelletto, M. Ferronato, G. Gambolati, C. Janna, E. Cairo, D. Marzorati, D. Colombo, A. Ferretti, A. Bagliani and F. Bottazzi (2011). Geomechanical response to seasonal gas storage in depleted reservoirs: A case study in the Po River basin, Italy, *J. Geophys. Res.*, 116, F02002, doi:10.1029/2010JF001793.
- Terzaghi, K. & Peck, R. B. (1967). *Soil mechanics in engineering practice*, 2nd edn. New York: J. Wiley.
- van Hasselt, J. P. (1992). Reservoir compaction and surface subsidence resulting from oil and gas production. *Geol. Mijnbouw*, 71, 107–118.
- Viggiani, C. (2003). *Fondazioni*. Helvelius Edizioni, Benevento, Italy.

## Allegato A: mappe isobate e isopache locali

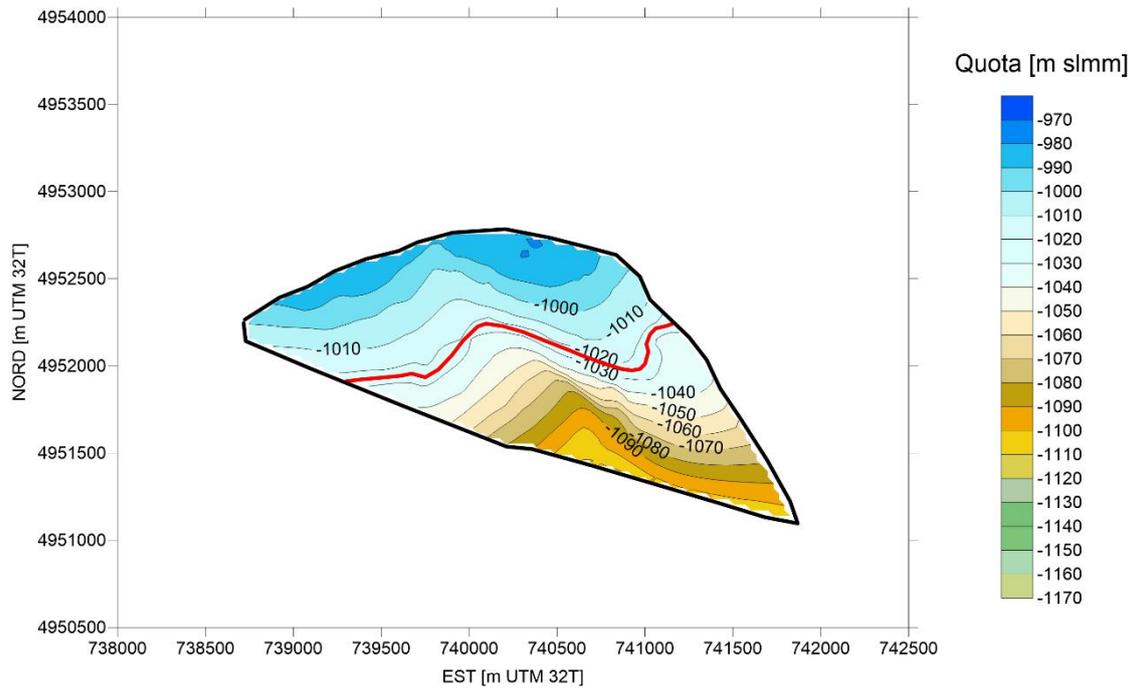


Figura A 1: Isobate [m slmm] del Top del livello PL2. In rosso è evidenziato il GWC.

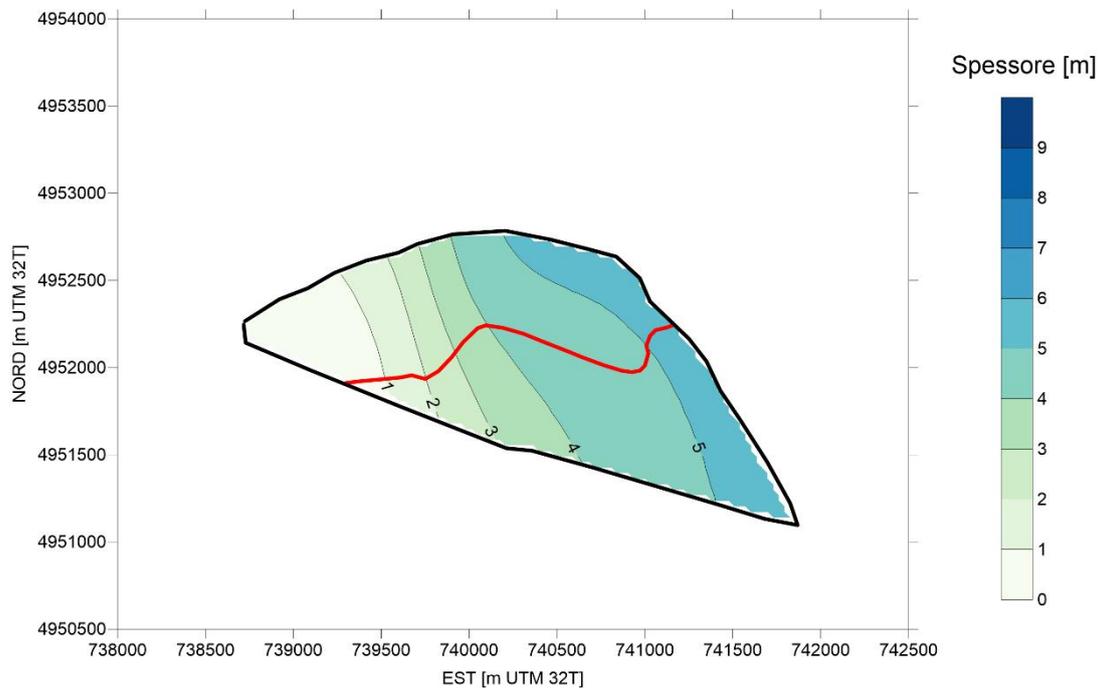


Figura A 2: Isopache [m] del livello PL2. In rosso è evidenziato il GWC.

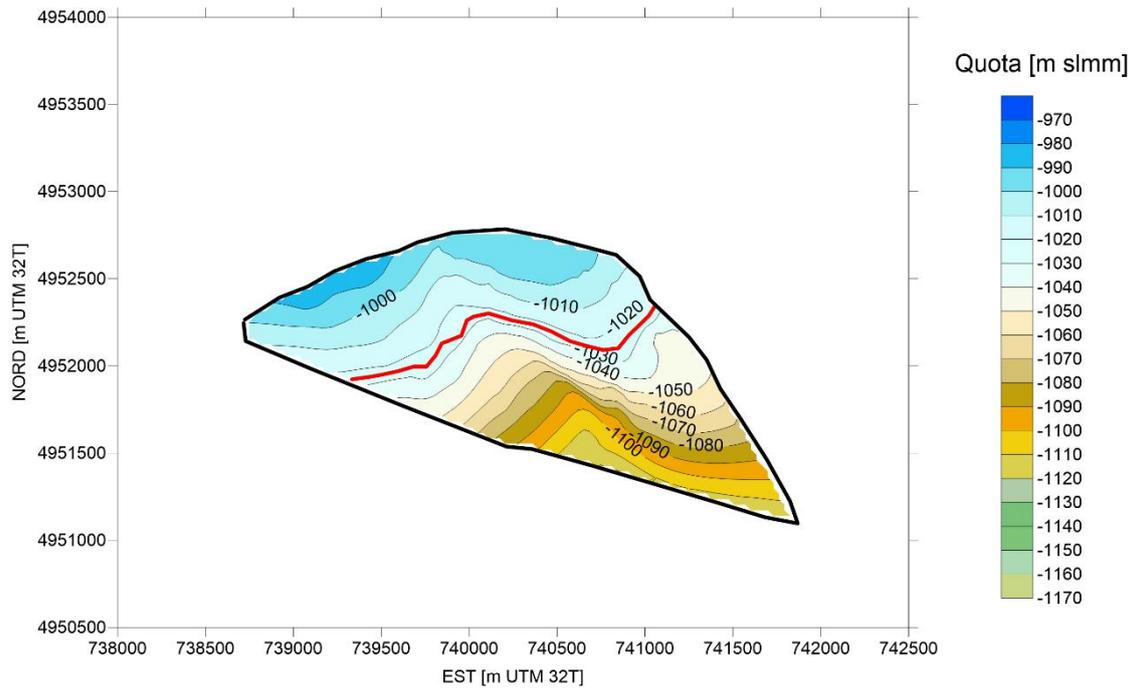


Figura A 3: Isobate [m slmm] del Top del livello PL2-F. In rosso è evidenziato il GWC.

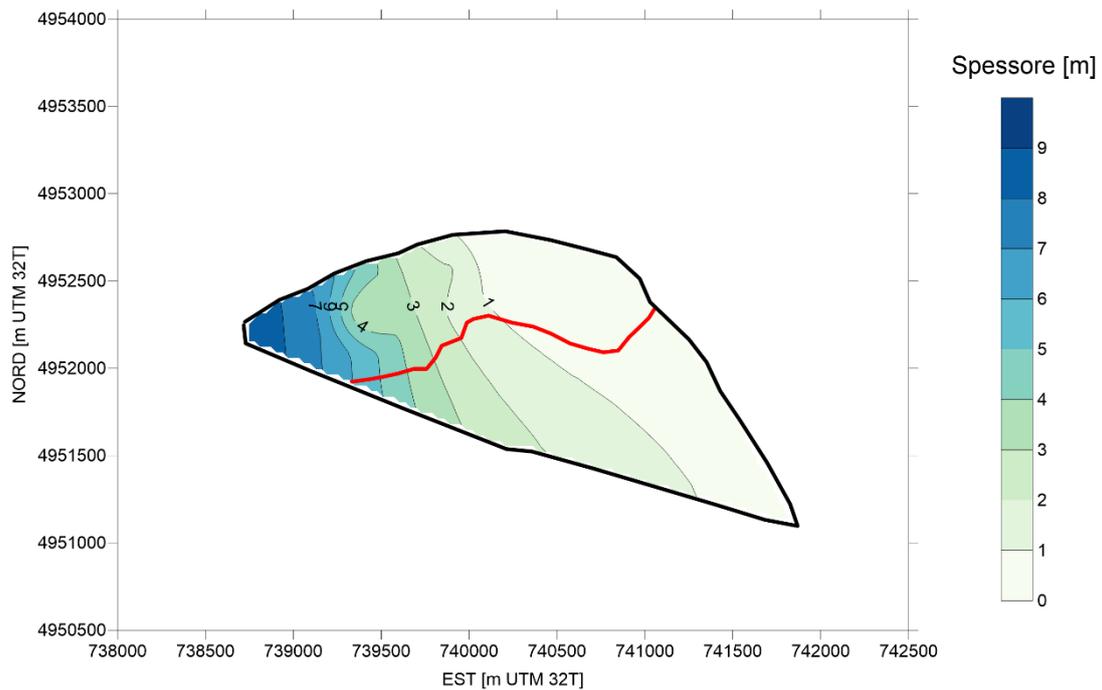


Figura A 4: Isopache [m] del livello PL2-F. In rosso è evidenziato il GWC.

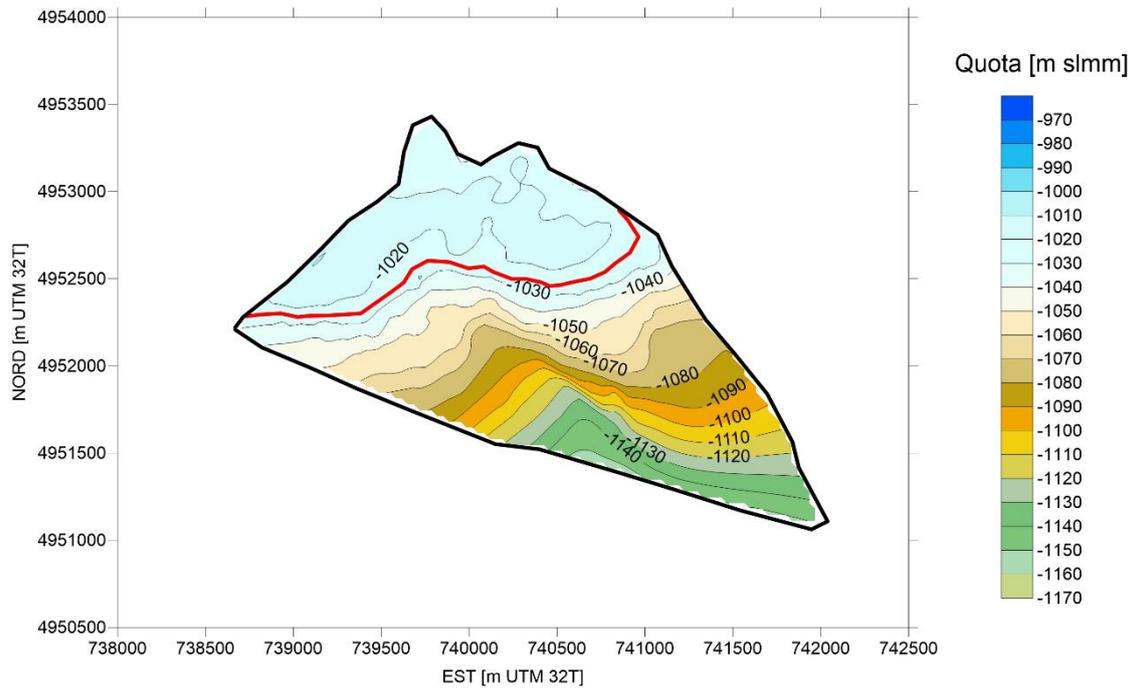


Figura A 5: Isobate [m slmm] del Top del livello PL2-G. In rosso è evidenziato il GWC.

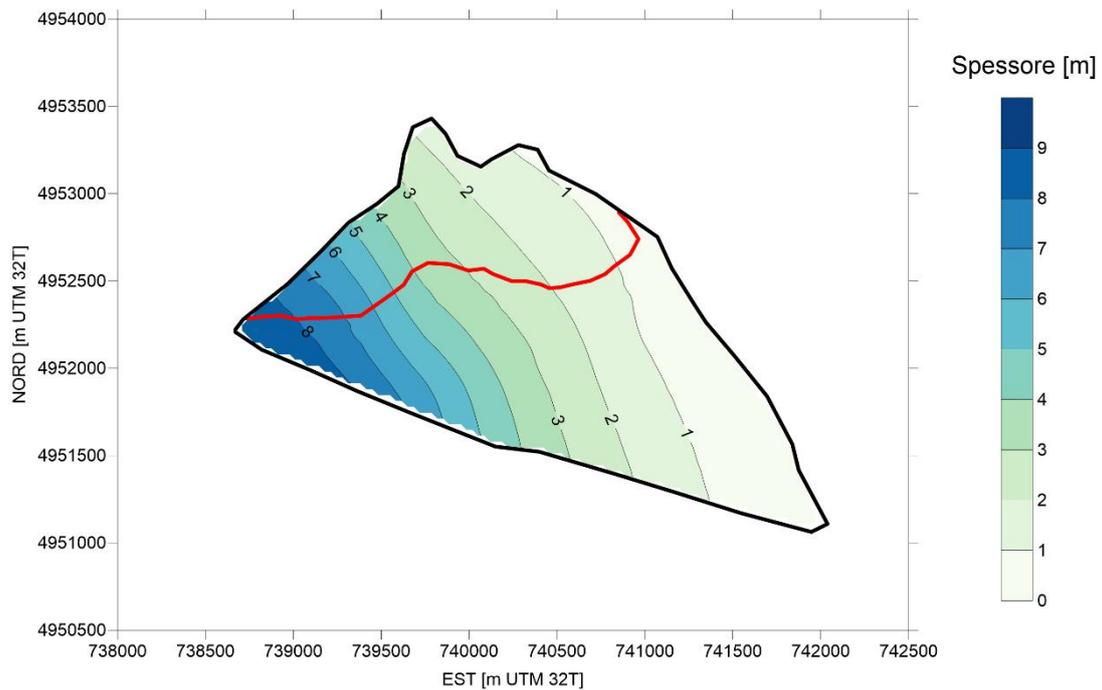


Figura A 6: Isopache [m] del livello PL2-G. In rosso è evidenziato il GWC.