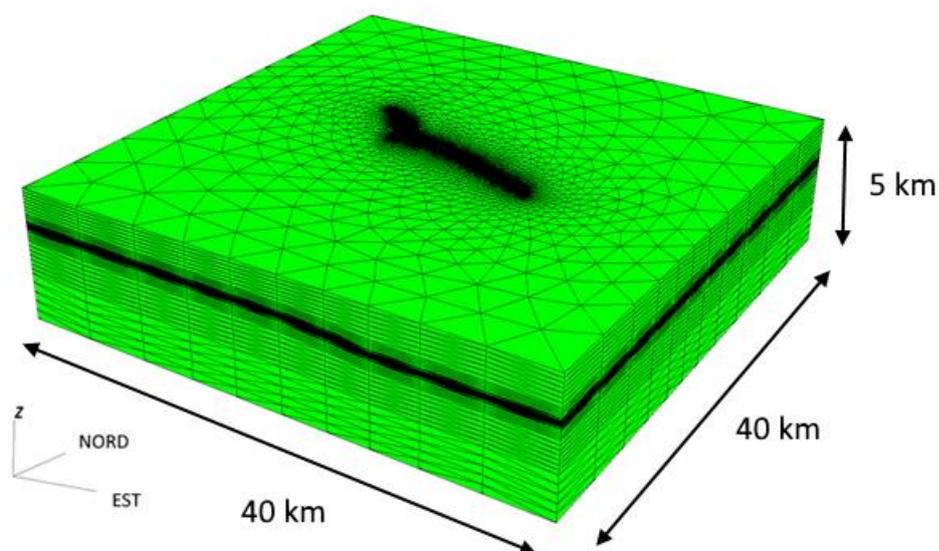


Commessa: M3E I8/29

**Modellazione della subsidenza indotta dalla coltivazione del giacimento multi-layer Selva
Concessione di Coltivazione Selva Malvezzi**



Committente: Po Valley Operations

Elaborato: Relazione Tecnica

Data: Febbraio 2019

INDICE

1	INTRODUZIONE.....	1
2	MODELLO DI PRODUZIONE	2
3	MODELLO STATICO.....	6
4	MODELLO GEOMECCANICO E MODELLO IDRODINAMICO	10
4.1	Caratterizzazione geomeccanica.....	10
4.2	Modello idrodinamico.....	16
5	PREVISIONE MODELLISTICA DELLA SUBSIDENZA.....	23
5.1	Subsidenza attuale nel 2019	23
5.2	Scenari di coltivazione forecast - spostamenti della superficie	26
5.3	Scenari di coltivazione forecast - gradiente dello spostamento.....	32
6	CONCLUSIONI.....	37
7	REFERENZE.....	38
	Allegato A: mappe isobate e isopache locali	40

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Ubicazione giacimento Selva.	2
Figura 2: Andamento nel tempo della pressione al pozzo [bar] durante la fase di produzione primaria tra il 1959 e il 1984 e la fase di post-produzione fino allo stato attuale (2019).....	3
Figura 3: Variazione di pressione media in giacimento [bar] durante la fase di produzione primaria tra il 1959 e il 1984 e la fase di post-produzione fino allo stato attuale (2019).....	3
Figura 4: Variazione di pressione ai pozzi [bar] prevista negli scenari di coltivazione forecast.....	4
Figura 5: Variazione di pressione media in giacimento [bar] prevista negli scenari di coltivazione forecast.	5
Figura 6: Discretizzazione bidimensionale del dominio di calcolo utilizzata per la generazione del modello tridimensionale FEM. In giallo è evidenziata la traccia dell'involuppo dei pool mineralizzati e in rosso la traccia della sezione verticale A-A riportata in Figura 8.	6
Figura 7: Vista assonometrica della griglia tridimensionale FEM. La scala verticale è amplificata 5 volte rispetto a quella orizzontale.....	7
Figura 8: Sezione verticale del modello geomeccanico lungo la traccia A-A di Figura 6 in cui è evidenziata la discretizzazione verticale in corrispondenza dei pool mineralizzati. In rosso è evidenziato il giacimento e in blu il waterdrive. La scala verticale è amplificata 10 volte rispetto a quella orizzontale.....	8
Figura 9: Vista in pianta del modello di flusso per il waterdrive associato al livello C1. In giallo è evidenziata la traccia del GWC, in nero il contorno del modello ELCIPSE e in viola le faglie regionali e locali.	9
Figura 10: Vista in pianta del modello di flusso per il waterdrive associato al livello C2. In giallo è evidenziata la traccia del GWC, in nero il contorno del modello ELCIPSE e in viola le faglie regionali e locali.	9
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).	10

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

Figura 13: Rappresentazione grafica qualitativa della variazione di c_M con σ_z 12

Figura 14: Variazione di pressione ΔP [bar] al termine della produzione primaria nel 1980: (a) livello C1; (b) livello C2. In rosso è evidenziata la traccia del GWC. 17

Figura 15: Variazione di pressione ΔP [bar] nello stato attuale nel 2019: (a) livello C1; (b) livello C2. In rosso è evidenziata la traccia del GWC. 18

Figura 16: Variazione di pressione ΔP [bar] nello scenario forecast RF70 a fine produzione: (a) livello C1 (11° anno); (b) livello C2 (6° anno). In rosso è evidenziata la traccia del GWC..... 19

Figura 17: Variazione di pressione ΔP [bar] nello scenario forecast RF70 a fine simulazione (20° anno): (a) livello C1; (b) livello C2. In rosso è evidenziata la traccia del GWC. 20

Figura 18: Variazione di pressione ΔP [bar] nello scenario forecast RF83 a fine produzione: (a) livello C1 (13° anno); (b) livello C2 (10° anno). In rosso è evidenziata la traccia del GWC..... 21

Figura 19: Variazione di pressione ΔP [bar] nello scenario forecast RF83 a fine simulazione (20° anno): (a) livello C1; (b) livello C2. In rosso è evidenziata la traccia del GWC. 22

Figura 20: Andamento temporale dello spostamento verticale [cm] nel punto di subsidenza massima tra il 1959 (inizio della produzione primaria) e il 2019 (stato attuale)..... 23

Figura 21: Subsidenza [cm] al culmine della produzione nel 1980: a) subsidenza in scala di colori; (b) subsidenza sovrapposta alla CTR25000. In rosso è evidenziata la traccia del giacimento; il simbolo + indica il punto di massima subsidenza. 24

Figura 22: Subsidenza [cm] allo stato attuale (2019): a) subsidenza in scala di colori; (b) subsidenza sovrapposta alla CTR25000. In rosso è evidenziata la traccia del giacimento; il simbolo + indica il punto di massima subsidenza. 25

Figura 23: Andamento temporale dello spostamento verticale [cm] nel punto di subsidenza massima in tutto il periodo coperto dalla simulazione numerica (1959-2039)..... 26

Figura 24: Andamento temporale dello spostamento verticale [cm] nel punto subsidenza massima negli scenari di coltivazione forecast..... 27

Figura 25: Subsidenza [cm] nello scenario RF70 a fine produzione (11° anno): a) subsidenza in scala di colori; (b) subsidenza sovrapposta alla CTR25000. In rosso è evidenziata la traccia del giacimento; il simbolo + indica il punto di massima subsidenza. 28

Figura 26: Subsidenza [cm] nello scenario RF83 a fine produzione (13° anno): a) subsidenza in scala di colori; (b) subsidenza sovrapposta alla CTR25000. In rosso è evidenziata la traccia del giacimento; il simbolo + indica il punto di massima subsidenza.29

Figura 27: Spostamento verticale [cm] nello scenario RF70 a fine simulazione (20° anno): a) subsidenza in scala di colori; (b) subsidenza sovrapposta alla CTR25000. In rosso è evidenziata la traccia del giacimento; il simbolo + indica il punto di massima subsidenza.....30

Figura 28: Subsidenza [cm] nello scenario RF83 a fine simulazione (20° anno): a) subsidenza in scala di colori; (b) subsidenza sovrapposta alla CTR25000. In rosso è evidenziata la traccia del giacimento; il simbolo + indica il punto di massima subsidenza.31

Figura 29: Gradiente dello spostamento verticale [mm/m] nello scenario RF70 a fine produzione (11° anno): a) gradiente in scala di colori; (b) gradiente sovrapposto alla CTR25000. In rosso è evidenziata la traccia del giacimento.33

Figura 30: Gradiente dello spostamento verticale [mm/m] nello scenario RF83 a fine produzione (13° anno): a) gradiente in scala di colori; (b) gradiente sovrapposto alla CTR25000. In rosso è evidenziata la traccia del giacimento.34

Figura 31: Gradiente dello spostamento verticale [mm/m] nello scenario RF70 a fine simulazione (20° anno): a) gradiente in scala di colori; (b) gradiente sovrapposto alla CTR25000. In rosso è evidenziata la traccia del giacimento.35

Figura 32: Gradiente dello spostamento verticale [mm/m] nello scenario RF83 a fine simulazione (20° anno): a) gradiente in scala di colori; (b) gradiente sovrapposto alla CTR25000. In rosso è evidenziata la traccia del giacimento.36

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 Selva tramite il pozzo Podere Maiar I dir, ricadente nella concessione di coltivazione denominata "Selva Malvezzi". Il rapporto è strutturato come segue. Nel capitolo 2 sono riportati i dati forniti da Po Valley Operations 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. La previsione degli spostamenti superficiali dovuti alla coltivazione del campo richiede anche la valutazione del contributo fornito dalla compattazione dell'acquifero connesso al giacimento ("waterdrive"). Poiché l'acquifero è stato incluso solo parzialmente nel modello fluidodinamico di produzione, l'andamento spazio-temporale della pressione di strato in acquifero è simulato con un modello FEM idrodinamico calibrato in modo da soddisfare il bilancio di massa in giacimento. Le pressioni in giacimento e in acquifero sono quindi utilizzate come dati di input nel modello geomeccanico. Per quanto riguarda la caratterizzazione geomeccanica, si è fatto riferimento agli studi eseguiti su altri campi appartenenti al bacino sedimentario padano [Janna *et al.*, 2012; Ferronato *et al.*, 2013]. La descrizione completa del modello geomeccanico e idrodinamico dell'acquifero è riportata nel capitolo 4. I risultati del modello geomeccanico ottenuti dalla simulazione con modello FEM per gli scenari di coltivazione previsti sono riportati nel capitolo 5. Nello specifico, sono stati considerati due scenari di coltivazione con diverso Recovery Factor, 70% e 83%, rispettivamente. Le considerazioni conclusive sono presentate nel capitolo 6.

2 MODELLO DI PRODUZIONE

Il giacimento di Selva è ubicato in Emilia Romagna nella concessione “Selva Malvezzi”, 25 km a Est di Bologna, a una profondità di circa 1200 m TVDss (Figura 1). I livelli oggetto di interesse minerario sono il C1 e C2, resi idraulicamente indipendenti da un interlayer di argilla: le mappe delle isobate e delle isopache sono riportate nell’Allegato A. Il valore di pressione di scoperta è 147 bar, la produzione è iniziata nel 1959 ed è terminata nel 1984 (Figura 2). La variazione di pressione media in giacimento (delta di pressione rispetto al valore di scoperta) ha raggiunto un minimo di circa -50 bar, per poi risalire nella fase di post-produzione a -15 bar (Figura 3). Per il giacimento di Selva sono stati indagati due scenari di coltivazione distinti per un diverso valore del Recovery Factor (RF) dovuto a diversi FTHP applicati:

- scenario RF70 con FTHP = 70 bar e RF = 70% (riserve certe) di cui Po Valley Operations ha fornito il modello fluidodinamico di giacimento [Dream, 2018] sviluppato mediante il software ECLIPSE;
- scenario RF83 con FTHP = 30 bar e RF = 83% (riserve certe + riserve probabili) di cui Po Valley Operations ha fornito il modello monocella.

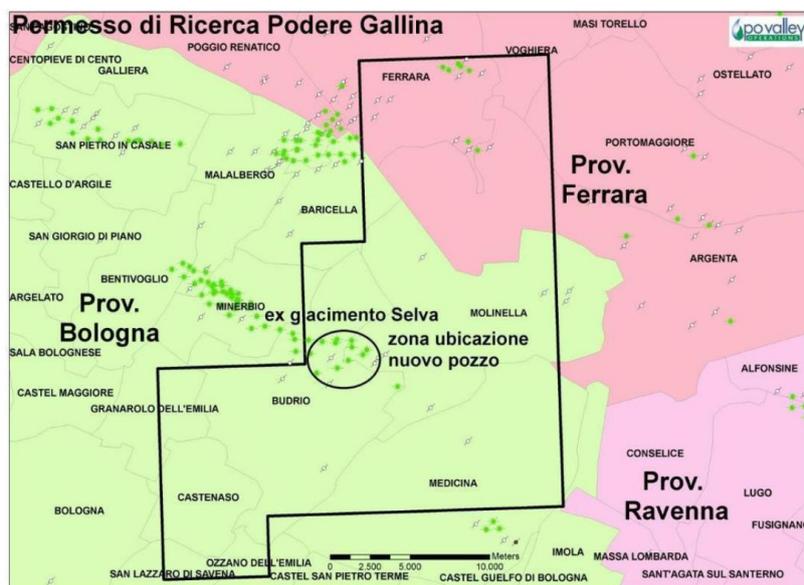


Figura 1: Ubicazione giacimento Selva.

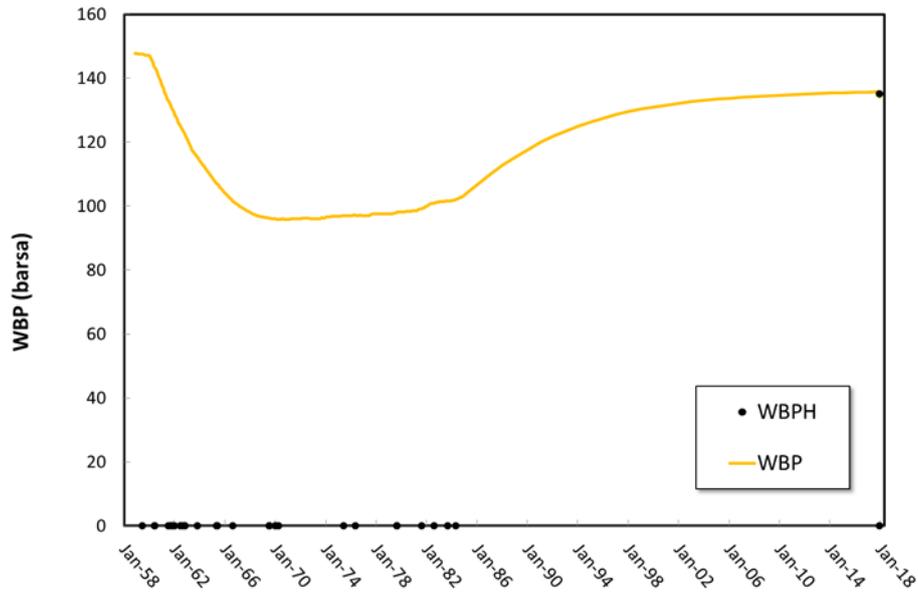


Figura 2: Andamento nel tempo della pressione al pozzo [bar] durante la fase di produzione primaria tra il 1959 e il 1984 e la fase di post-produzione fino allo stato attuale (2019).

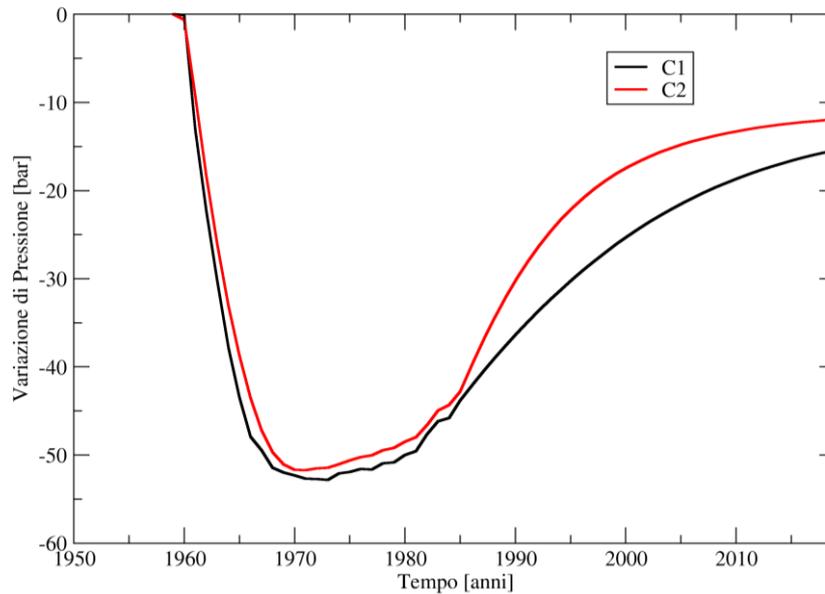


Figura 3: Variazione di pressione media in giacimento [bar] durante la fase di produzione primaria tra il 1959 e il 1984 e la fase di post-produzione fino allo stato attuale (2019).

Per quanto riguarda lo scenario RF83, la variazione di pressione è stata ricostruita in ogni cella del modello ELCIPSE eseguendo un'operazione di scalatura: la variazione di pressione dello scenario RF70 è stata scalata in modo da mantenere, mediamente, il rapporto esistente tra le pressioni al pozzo (Figura 4). In Figura 5 è riportato l'andamento nel tempo della variazione di pressione media in giacimento.

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]. Poiché l'acquifero è stato incluso solo parzialmente nel modello fluidodinamico di produzione ECLIPSE, l'andamento spazio-temporale della pressione di strato in acquifero è simulato con un modello FEM idrodinamico calibrato in modo da soddisfare il bilancio di massa in giacimento. La descrizione del modello idrodinamico dell'acquifero è riportata nel capitolo 4.

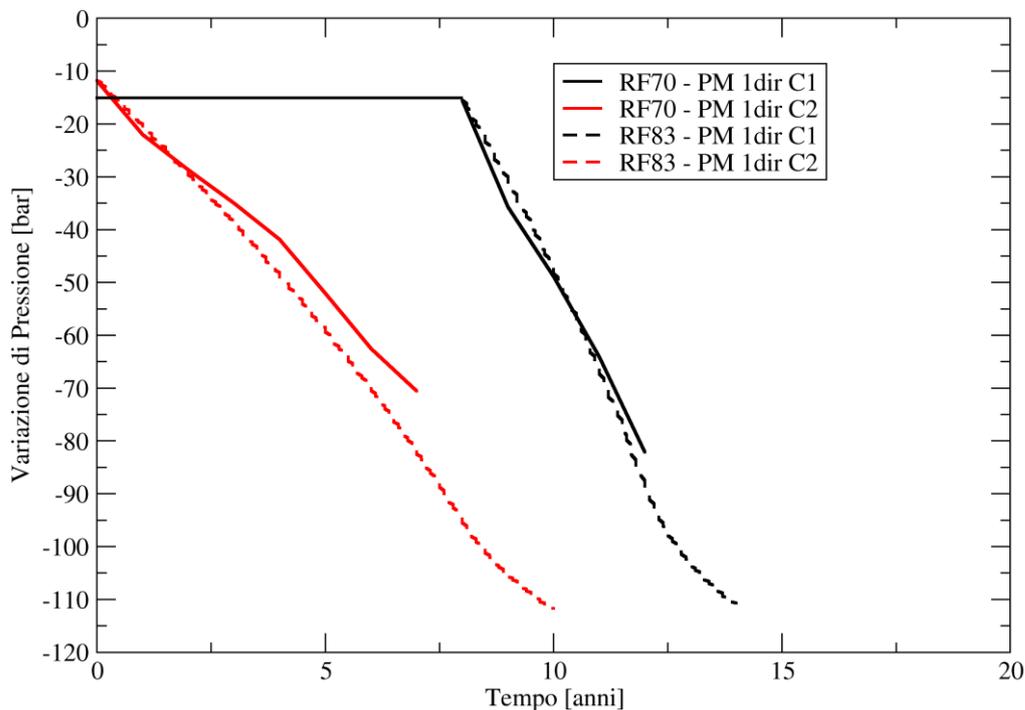


Figura 4: Variazione di pressione ai pozzi [bar] prevista negli scenari di coltivazione forecast.

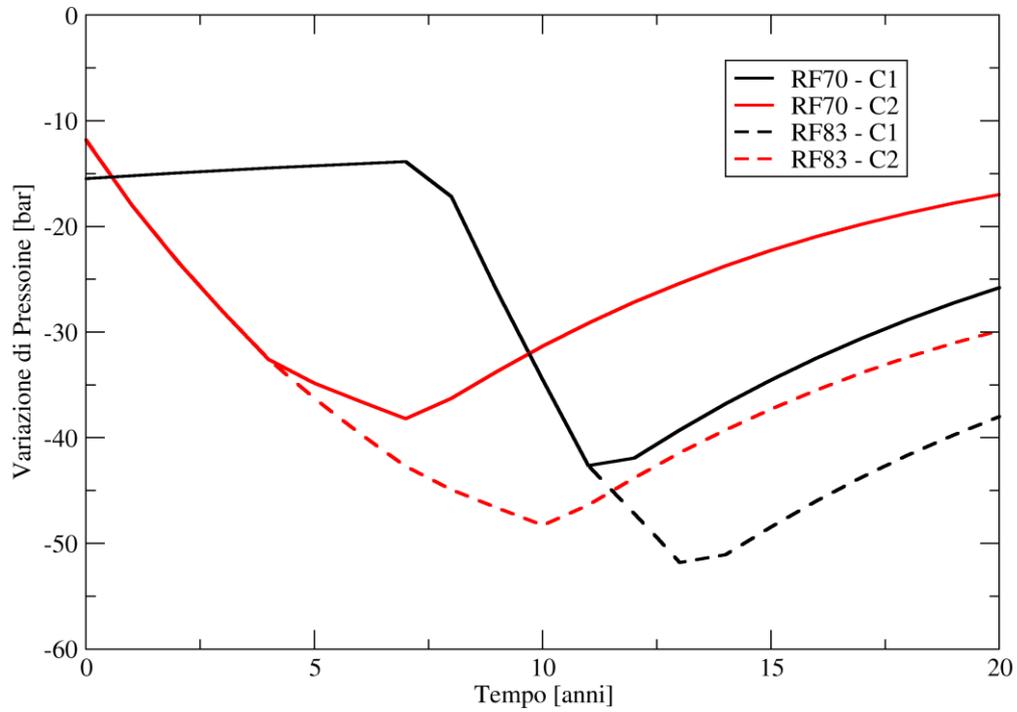


Figura 5: Variazione di pressione media in giacimento [bar] prevista negli scenari di coltivazione forecast.

3 MODELLO STATICO

M³E ha sviluppato e mantiene costantemente aggiornato allo stato dell'arte un modello geomeccanico FEM per la simulazione degli spostamenti superficiali indotti dallo sfruttamento di giacimenti di idrocarburi. Il modello risolve le equazioni dell'equilibrio elastico per mezzi porosi sollecitati da variazioni di pressione di strato variabili nello spazio e nel tempo, e caratterizzati da un comportamento elasto-plastico o ipo-plastico anche anisotropo mediante un approccio FEM che adotta elementi tetraedrici lineari a 4 nodi. Tale scelta consente di rappresentare con grande attendibilità le volumetrie e le complesse geometrie che spesso caratterizzano le strutture geologiche di interesse.

Per il modello geomeccanico è necessario generare una griglia di calcolo ad elevata risoluzione all'interno e nei pressi del giacimento che si estenda sufficientemente lontano da esso in modo da ridurre al minimo l'influenza delle condizioni al contorno sul risultato delle simulazioni sopra e nelle vicinanze del giacimento stesso.

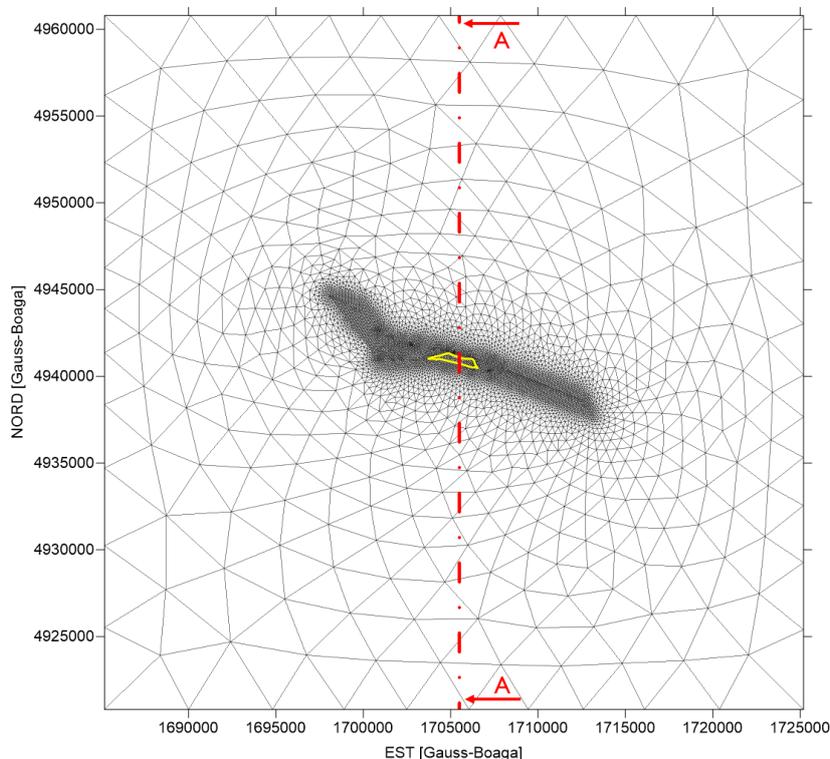


Figura 6: Discretizzazione bidimensionale del dominio di calcolo utilizzata per la generazione del modello tridimensionale FEM. In giallo è evidenziata la traccia dell'involuppo dei pool mineralizzati e in rosso la traccia della sezione verticale A-A riportata in Figura 8.

In questo studio è stato impiegato un dominio di calcolo avente un'estensione areale di 40×40 km con il campo di Selva collocato in posizione pressoché baricentrica. Il dominio 2D è stato triangolato mediante 5'308 nodi e 10'572 elementi con uno spacing medio di circa 50 m nella zona del campo (Figura 6), in coerenza con la discretizzazione utilizzata nel modello Eclipse. La griglia di calcolo 3D è stata ottenuta utilizzando un generatore automatico di griglia sviluppato da M³E 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. Viene così generato un dominio parallelepipedo che ha il basamento rigido posto a 5 km di profondità, è limitato superiormente dal DEM ed è discretizzato con elementi tetraedrici i cui vertici giacciono sul top e bottom dei livelli geologici in modo tale da riprodurre con accuratezza i volumi dei pool mineralizzati, le quote dei GWC e le geometrie dell'acquifero connesso idraulicamente al giacimento. La griglia così generata consiste complessivamente di 435'256 nodi e 2'568'996 tetraedri. La vista assometrica dell'intera griglia del modello geomeccanico è mostrata in Figura 7. In Figura 8 è riportato un particolare della sezione verticale A-A del modello geomeccanico (Figura 6) in corrispondenza dei livelli mineralizzati.

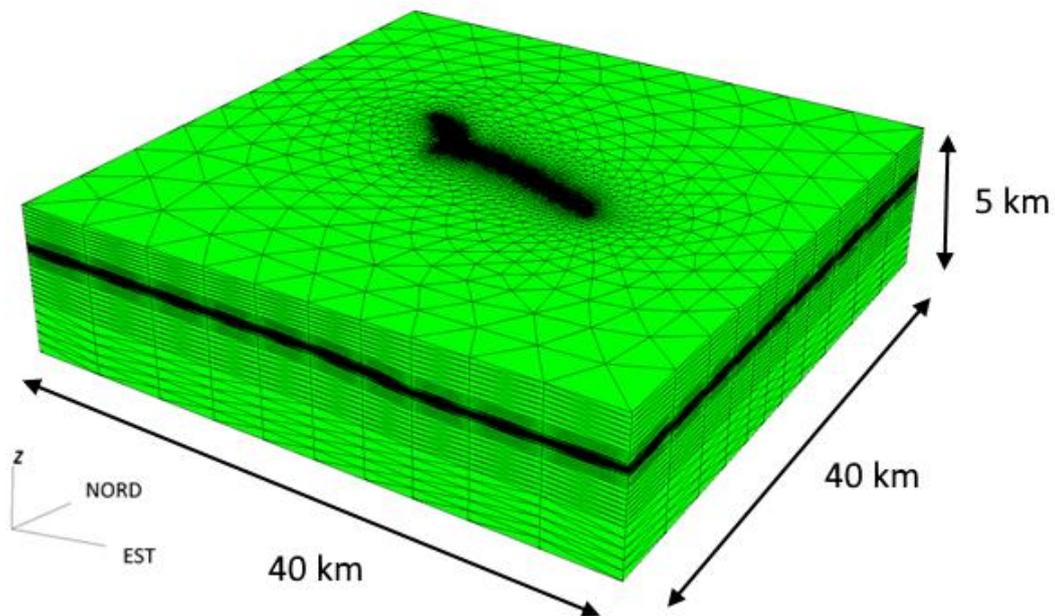


Figura 7: Vista assometrica della griglia tridimensionale FEM. La scala verticale è amplificata 5 volte rispetto a quella orizzontale.

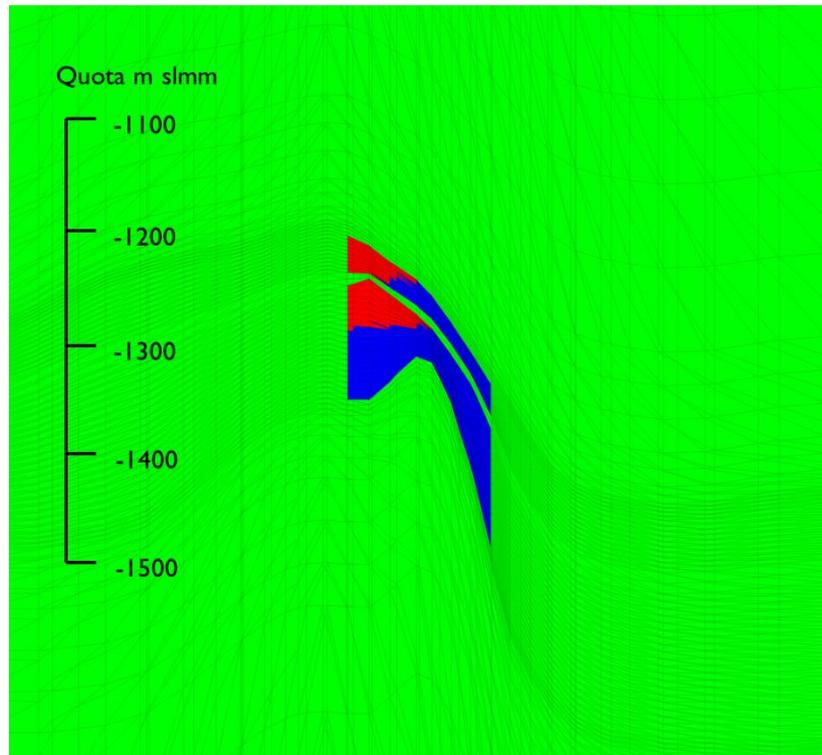


Figura 8: Sezione verticale del modello geomeccanico lungo la traccia A-A di Figura 6 in cui è evidenziata la discretizzazione verticale in corrispondenza dei pool mineralizzati. In rosso è evidenziato il giacimento e in blu il waterdrive. La scala verticale è amplificata 10 volte rispetto a quella orizzontale.

A partire da questa griglia sono stati "estratti" i modelli di flusso dei singoli waterdrive come sotto-domini del modello geomeccanico. In Figura 9 e Figura 10 sono rappresentati in pianta i modelli di flusso: l'estensione del waterdrive è stata eseguita tenendo conto dell'effetto "barriera idraulica" fornito delle faglie regionali e locali presenti nella [STOGIT, 2011; 2012]. Tali modelli sono stati utilizzati per propagare la variazione di pressione di strato dal giacimento all'acquifero in contatto idraulico, previa calibrazione della conduttività idraulica con l'impiego del bilancio di massa (vedi Capitolo 5).

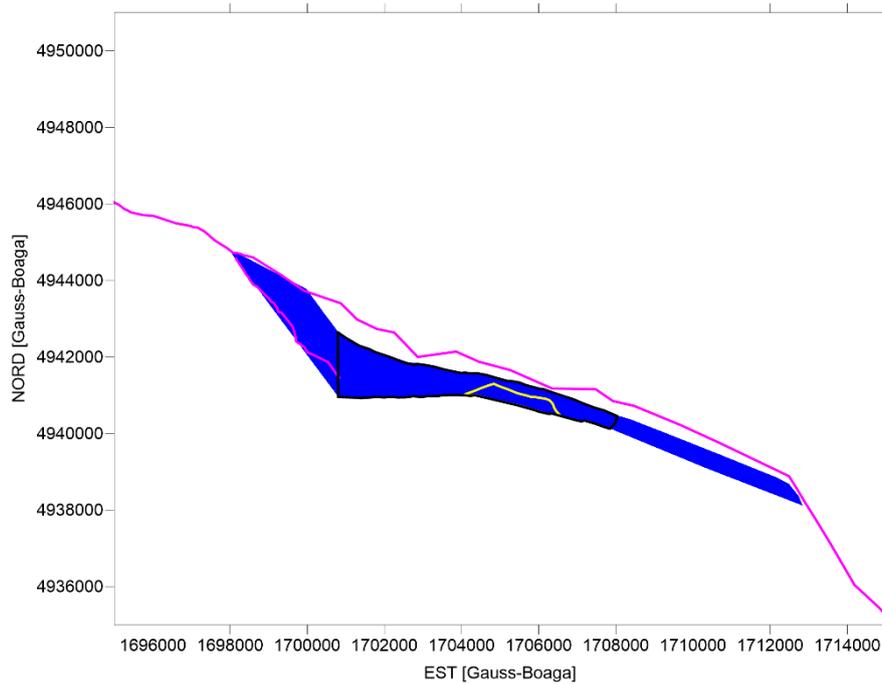


Figura 9: Vista in pianta del modello di flusso per il waterdrive associato al livello C1. In giallo è evidenziata la traccia del GWC, in nero il contorno del modello ELCIPSE e in viola le faglie regionali e locali.

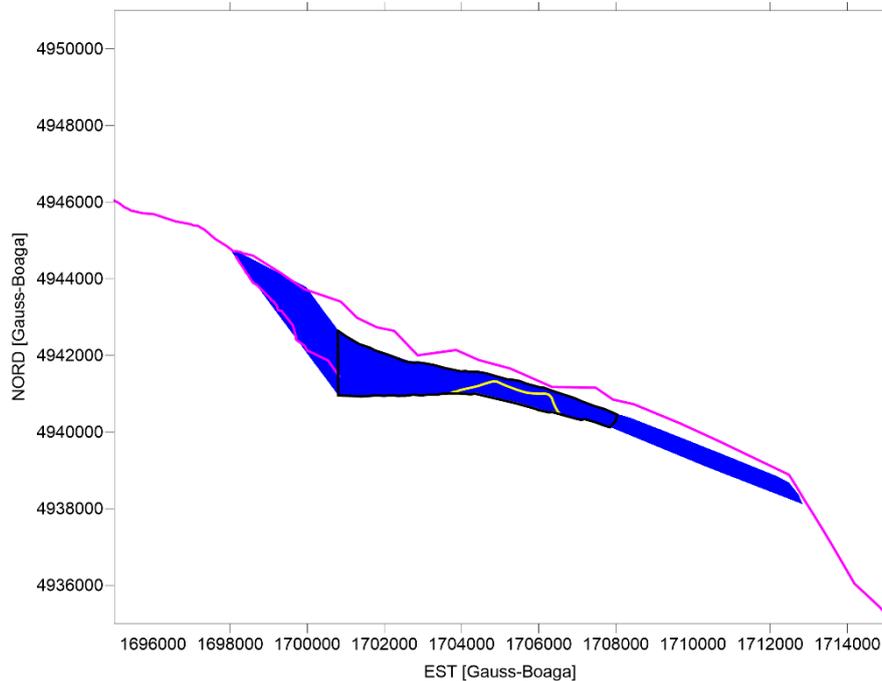


Figura 10: Vista in pianta del modello di flusso per il waterdrive associato al livello C2. In giallo è evidenziata la traccia del GWC, in nero il contorno del modello ELCIPSE e in viola le faglie regionali e locali.

4 MODELLO GEOMECCANICO E MODELLO IDRODINAMICO

4.1 Caratterizzazione geomeccanica

La caratterizzazione geomeccanica sia del modello geomeccanico che del modello di flusso è stata eseguita utilizzando una relazione costitutiva che fornisce la compressibilità verticale edometrica c_M del mezzo poroso in funzione della tensione verticale efficace σ_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), ad esempio Amelia-21, Barbara-101 e Angela-14.

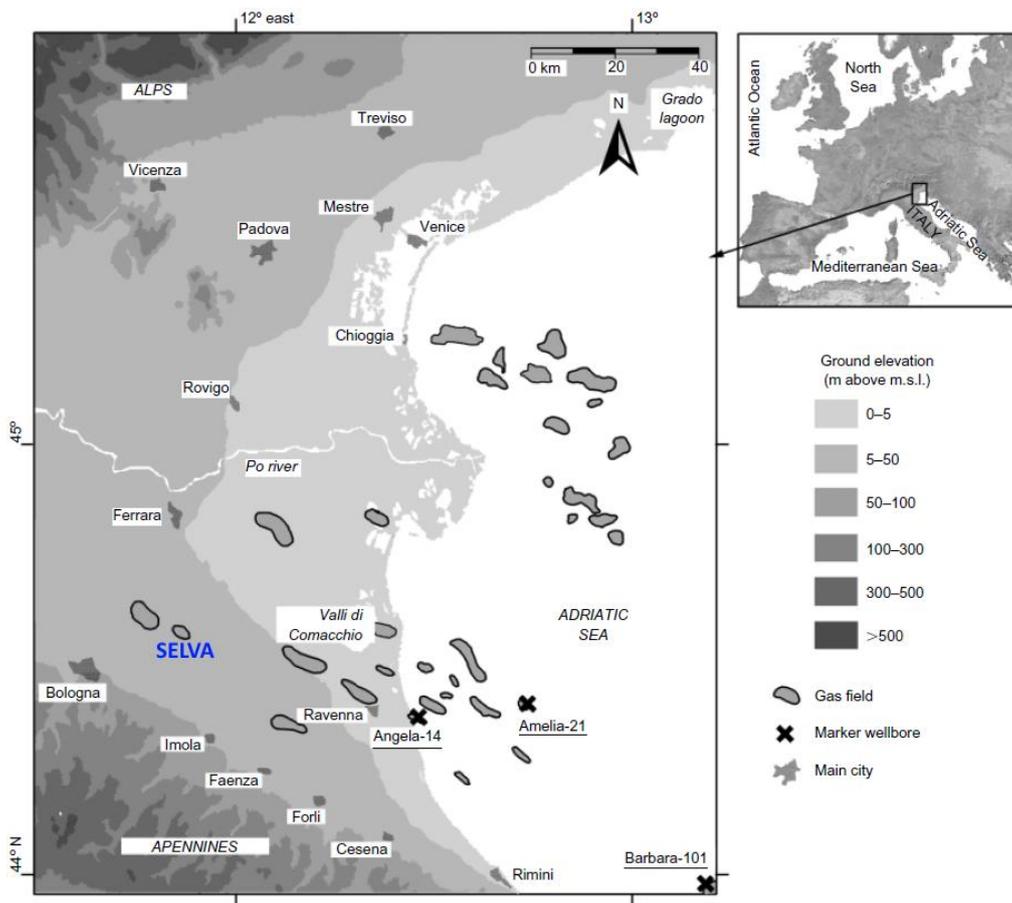


Figura 11: Mappa del bacino sedimentario padano con evidenziati i maggiori giacimenti di gas e le posizioni dei pozzi in cui sono effettuate le misure di compattazione profonda con la tecnica dei marker (anno 2000).

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

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

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

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

con 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^{-1}) e σ_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 σ_z utilizzando la procedura riportata in Baù *et al.* [2000]:

$$c_M^{II} = 0.00029 \times \sigma_z^{-0.4315} \quad (5)$$

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 qualitativa di c_M in primo e secondo ciclo è riportata in Figura 13.

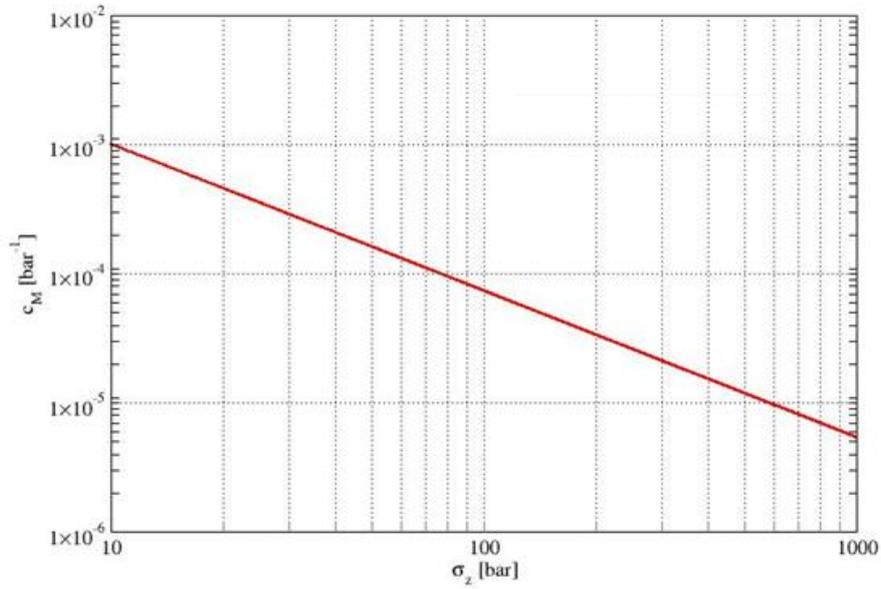


Figura 12: Grafico doppio logaritmico che riporta l'andamento medio della c_M in I ciclo di carico in funzione della σ_z efficace secondo la legge dell'Adriatico settentrionale [Baù *et al.*, 2002; Ferronato *et al.*, 2013].

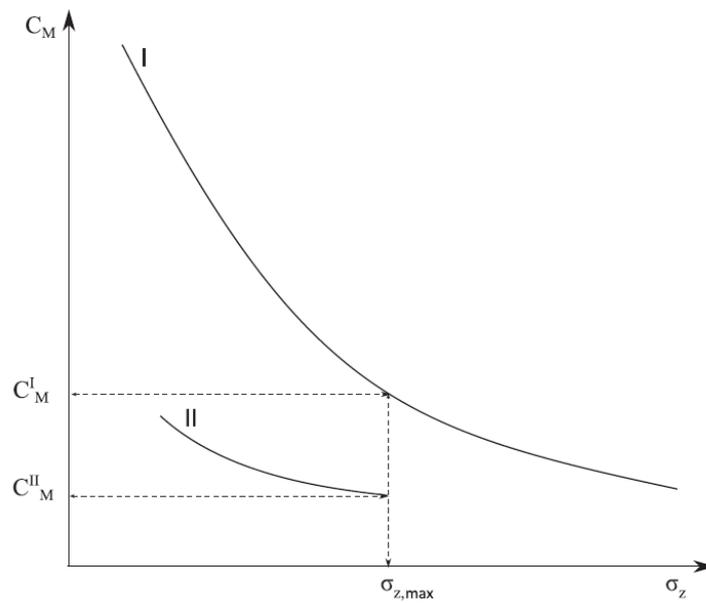


Figura 13: Rappresentazione grafica qualitativa della variazione di c_M con σ_z .

Il modello numerico implementato è di tipo ipo-plastico trasversalmente isotropo. Il modello trasversalmente isotropo prevede la definizione di un piano di isotropia, che nel caso in esame è il piano orizzontale x - y , e ipotizza un legame differente tra le tensioni e le deformazioni che giacciono su questo piano e quelle fuori del piano, lungo l'asse z . Scrivendo i tensori di stress e di deformazione con la notazione consueta in forma vettoriale:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix}$$

La relazione tensioni-deformazioni è $\sigma = C\varepsilon$ con la matrice C :

$$C = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_1}{E_1} & -\frac{\nu_3}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_1}{E_1} & \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_3}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_3}{E_3} & -\frac{\nu_3}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_3} \end{bmatrix}$$

Escluso il modulo di taglio G_1 , pari a $\frac{E_1}{2(1+\nu_1)}$ per la condizione di isotropia nel piano orizzontale,

la matrice C dipende da 5 parametri indipendenti, ovvero $E_1, E_3, \nu_1, \nu_3, G_3$, a differenza di quanto accade nel caso completamente isotropo in cui i parametri indipendenti sono solo due, E e ν . Nel caso trasversalmente isotropo la compressibilità verticale dipende da quattro dei parametri citati secondo la relazione:

$$c_M = \frac{1}{E_3} \left(1 - \frac{2\nu_3^2}{1-\nu_1} \frac{E_1}{E_3} \right)$$

Ricordando che come ipotesi di base si è assunto:

$$c_M = f(\sigma_z)$$

è possibile ridurre a quattro i parametri indipendenti con cui calibrare il modello geomeccanico trasversalmente isotropo. Definendo i rapporti $\beta = \frac{E_1}{E_3}$ e $\gamma = \frac{G_1}{G_3}$, la matrice C può essere scritta

come funzione di c_M e di altri quattro parametri:

$$C = F(c_M, \beta, \nu_1, \nu_3, \gamma)$$

A questi quattro parametri va infine aggiunto il rapporto s già definito in precedenza per ottenere la compressibilità in Il ciclo di carico [Baù *et al.*, 2002; Ferronato *et al.*, 2003].

Il modello geomeccanico trasversalmente isotropo è stato inizializzato coerentemente agli studi effettuati su altri campi del bacino sedimentario padano [Janna *et al.*, 2012; Ferronato *et al.*, 2013]. I valori usati dei parametri sono riassunti in Tabella I.

β	ν_1	ν_3	γ	s
3.0	0.15	0.25	1.0	5.0

Tabella I: Parametri del modello geomeccanico trasversalmente isotropo.

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 Ω (Figura 7) 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:

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

dove \mathbf{B} è la matrice delle derivate delle funzioni di forma, α 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:

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

e l'operatore tangente:

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

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

4.2 Modello idrodinamico

Oltre alla variazione di pressione di strato in giacimento, i processi geomeccanici connessi alla produzione di gas naturale sono influenzati anche dalla variazione di pressione che si propaga nell'acquifero collegato idraulicamente al campo. Poiché nei modelli di giacimento ECLIPSE l'acquifero dei livelli C1 e C2 è stato rappresentato numericamente solo per una porzione limitata prossima ai pool mineralizzati, sono state eseguite delle simulazioni idrodinamiche ex-novo per ricostruire l'andamento spazio-temporale della pressione in tutto il waterdrive collegato al campo. La variazione di pressione che si propaga in acquifero è stata calcolata mediante il modello FEM di flusso saturo in mezzi porosi messo a punto da M³E usando una variazione di pressione nel tempo in giacimento pari a quella prevista con ECLIPSE [Baù *et al.*, 2000; Ferronato *et al.*, 2004]. L'applicazione del modello di flusso richiede una calibrazione della permeabilità media in acquifero che risulta in generale essere diversa da quella utilizzata nel modello ECLIPSE. Come per la caratterizzazione geomeccanica, anche la permeabilità media in acquifero è stata stimata coerentemente ai modelli di flusso calibrati in Janna *et al.* [2012] e Ferronato *et al.* [2013]. Per ogni livello, i valori sono riassunti in Tabella 2.

Livello	Permeabilità [mD]
C1	220
C2	126

Tabella 2: Permeabilità media [mD] stimata nei modelli di flusso.

Di seguito vengono riportate le mappe di variazione di pressione in giacimento e nel waterdrive:

- al culmine della produzione primaria nel 1980 (Figura 14);
- allo stato attuale, 2019, (Figura 15);
- nello scenario forecast RF70 a fine produzione (Figura 16);
- nello scenario forecast RF70 a fine simulazione (Figura 17);
- nello scenario forecast RF83 a fine produzione (Figura 18);
- nello scenario forecast RF83 a fine simulazione (Figura 19);

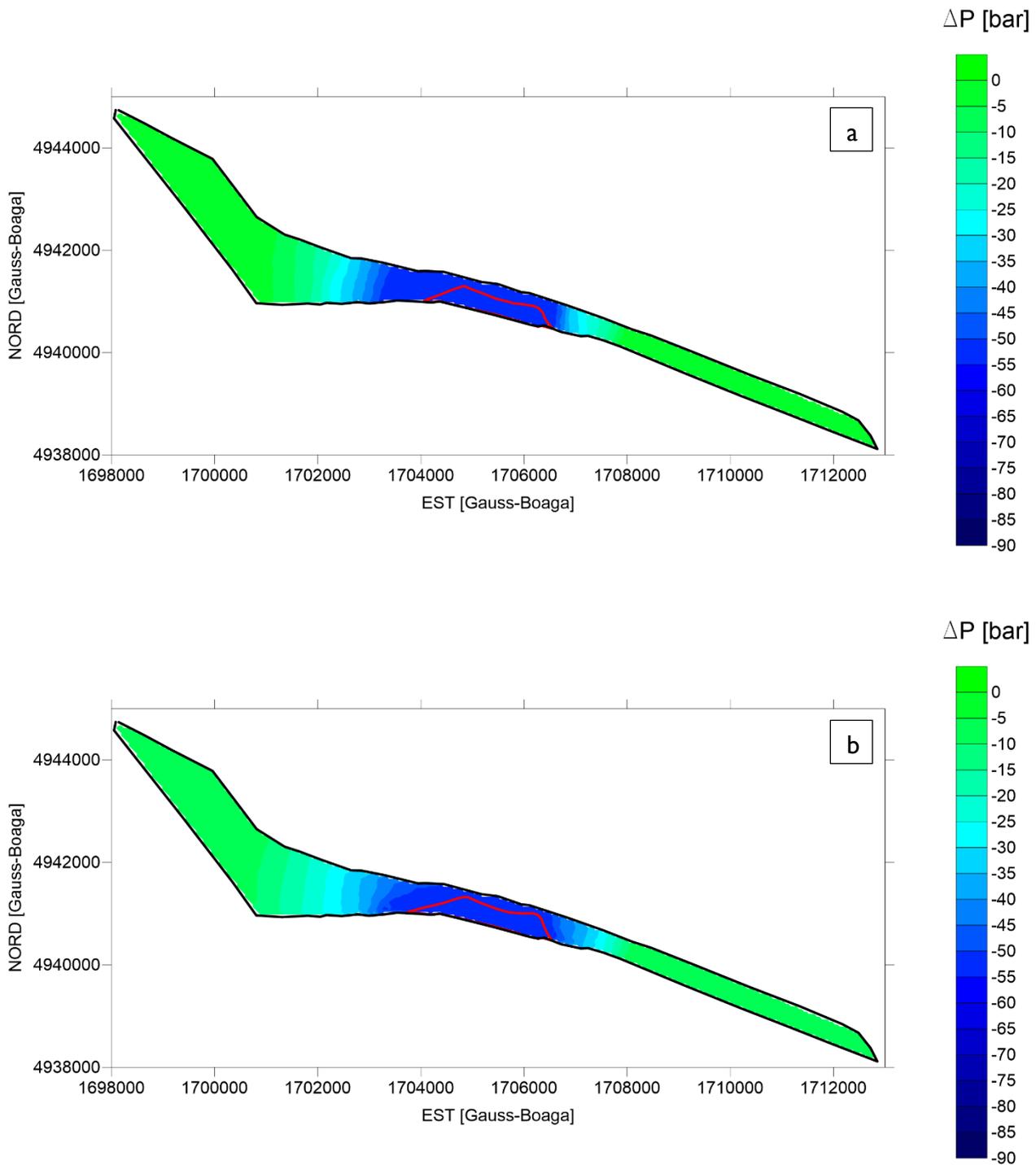


Figura 14: Variazione di pressione ΔP [bar] al termine della produzione primaria nel 1980: (a) livello C1; (b) livello C2. In rosso è evidenziata la traccia del GWC.

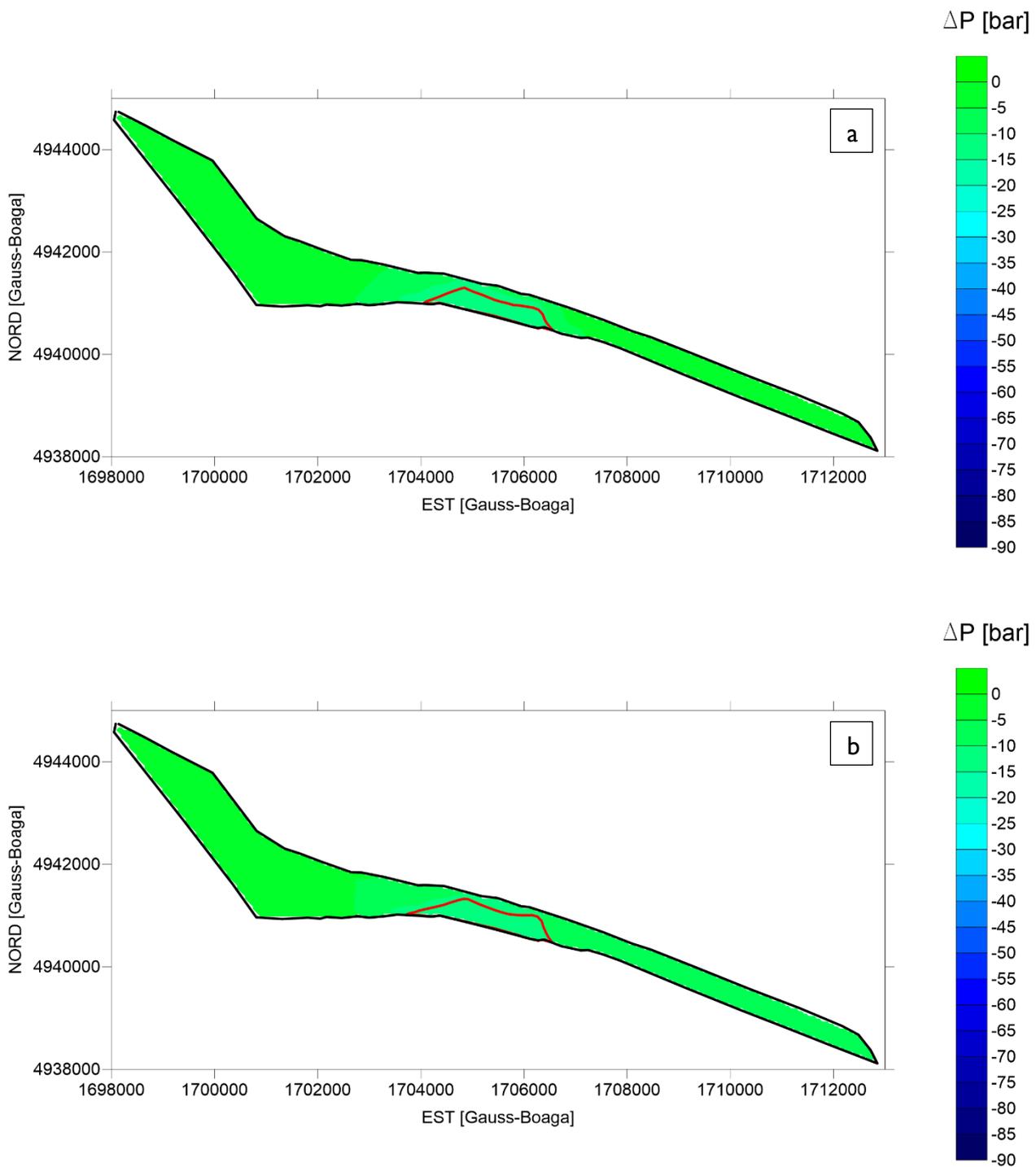


Figura 15: Variazione di pressione ΔP [bar] nello stato attuale nel 2019: (a) livello C1; (b) livello C2. In rosso è evidenziata la traccia del GWC.

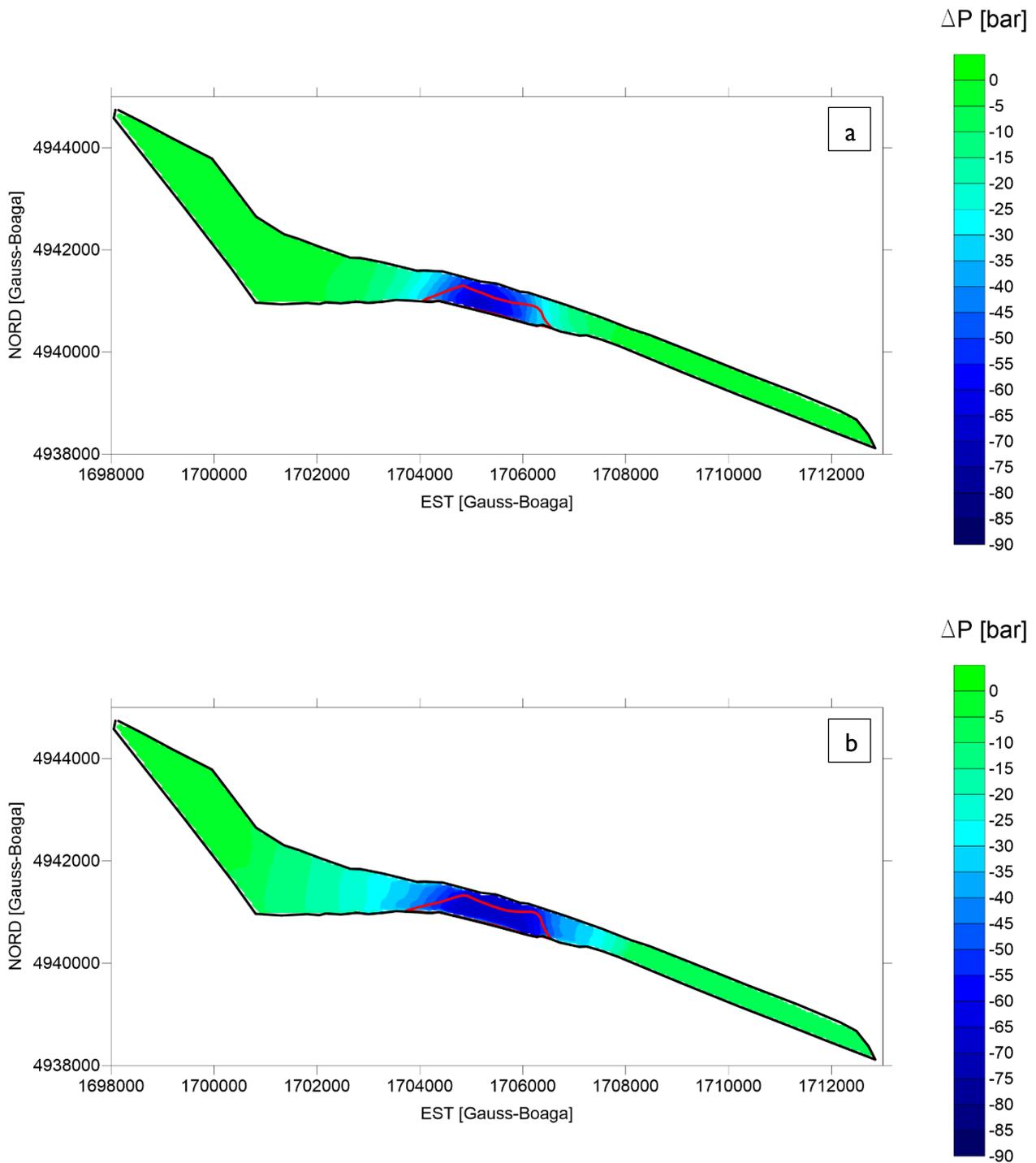


Figura 16: Variazione di pressione ΔP [bar] nello scenario forecast RF70 a fine produzione: (a) livello C1 (11° anno); (b) livello C2 (6° anno). In rosso è evidenziata la traccia del GWC.

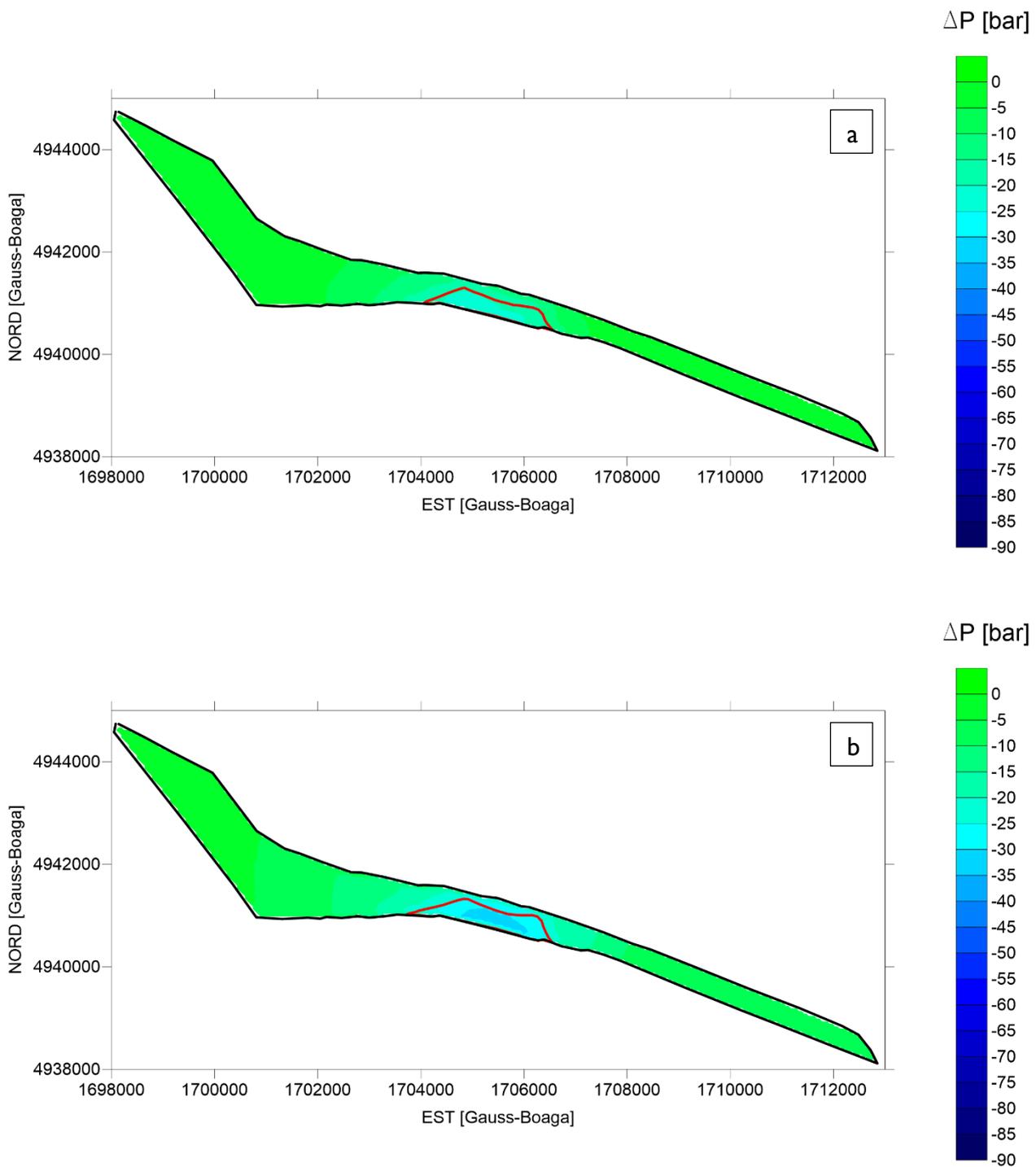


Figura 17: Variazione di pressione ΔP [bar] nello scenario forecast RF70 a fine simulazione (20° anno): (a) livello C1; (b) livello C2. In rosso è evidenziata la traccia del GWC.

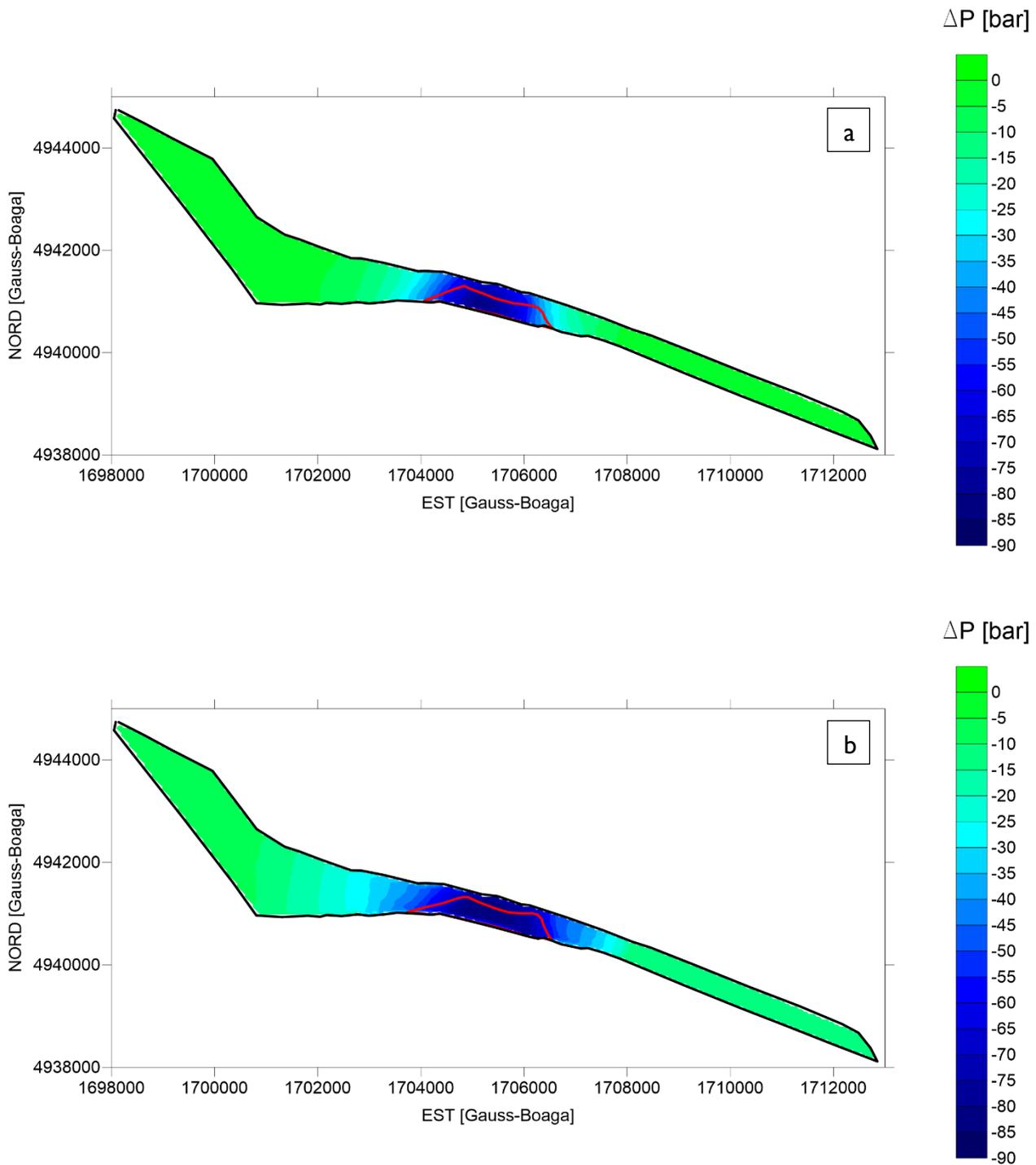


Figura 18: Variazione di pressione ΔP [bar] nello scenario forecast RF83 a fine produzione: (a) livello C1 (13° anno); (b) livello C2 (10° anno). In rosso è evidenziata la traccia del GWC.

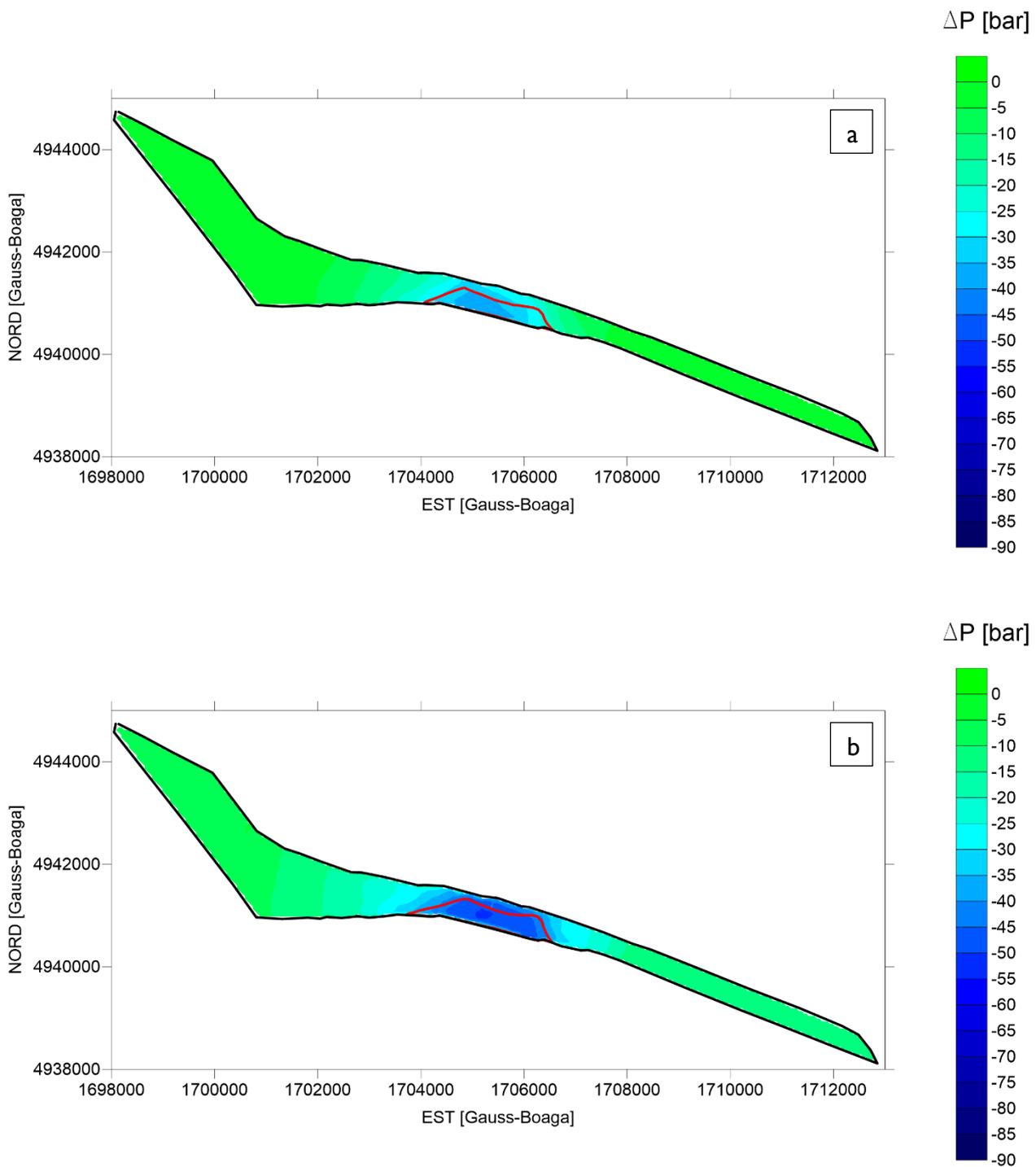


Figura 19: Variazione di pressione ΔP [bar] nello scenario forecast RF83 a fine simulazione (20° anno): (a) livello C1; (b) livello C2. In rosso è evidenziata la traccia del GWC.

5 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 Selva.

5.1 Subsidenza attuale nel 2019

La storia di deformazione e lo stato tensionale nel campo sono state simulate dall'inizio della coltivazione primaria (1959) al fine di riprodurre correttamente, data la non linearità della legge costitutiva adottata, le condizioni iniziali necessarie per la simulazione degli scenari di coltivazione previsti in futuro. In Figura 20 è mostrato l'andamento temporale dello spostamento verticale nel punto di massima subsidenza e in Figura 21 e Figura 22 sono mostrate le mappe di subsidenza al culmine della produzione primaria nel 1980 e allo stato attuale (2019), rispettivamente: il massimo abbassamento, calcolato in 3.8 cm, è posizionato al centro della traccia del giacimento. Il cono di subsidenza è leggermente allungato in direzione NO-SE secondo l'asse principale del giacimento e del waterdrive. Il recupero altimetrico a seguito della ripressurizzazione naturale avvenuta tra il 1980 e il 2019 è ovunque inferiore a 1 cm.

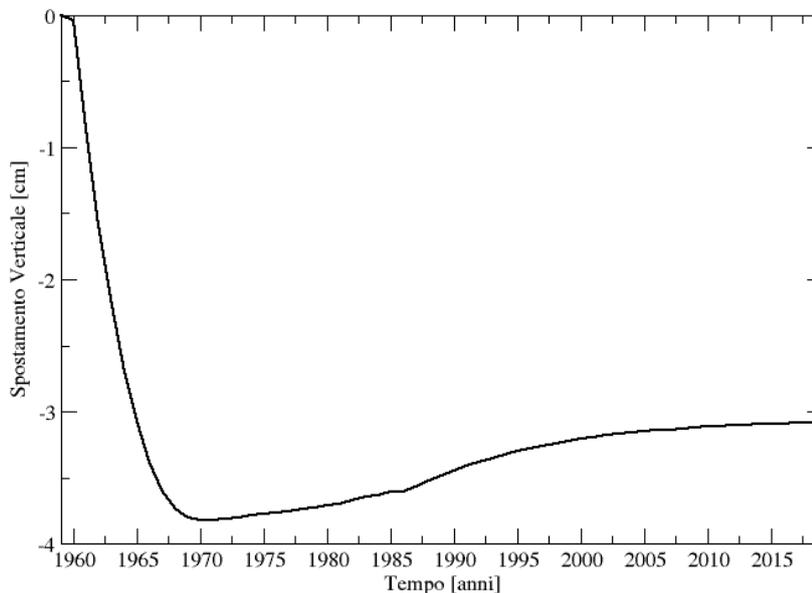


Figura 20: Andamento temporale dello spostamento verticale [cm] nel punto di subsidenza massima tra il 1959 (inizio della produzione primaria) e il 2019 (stato attuale).

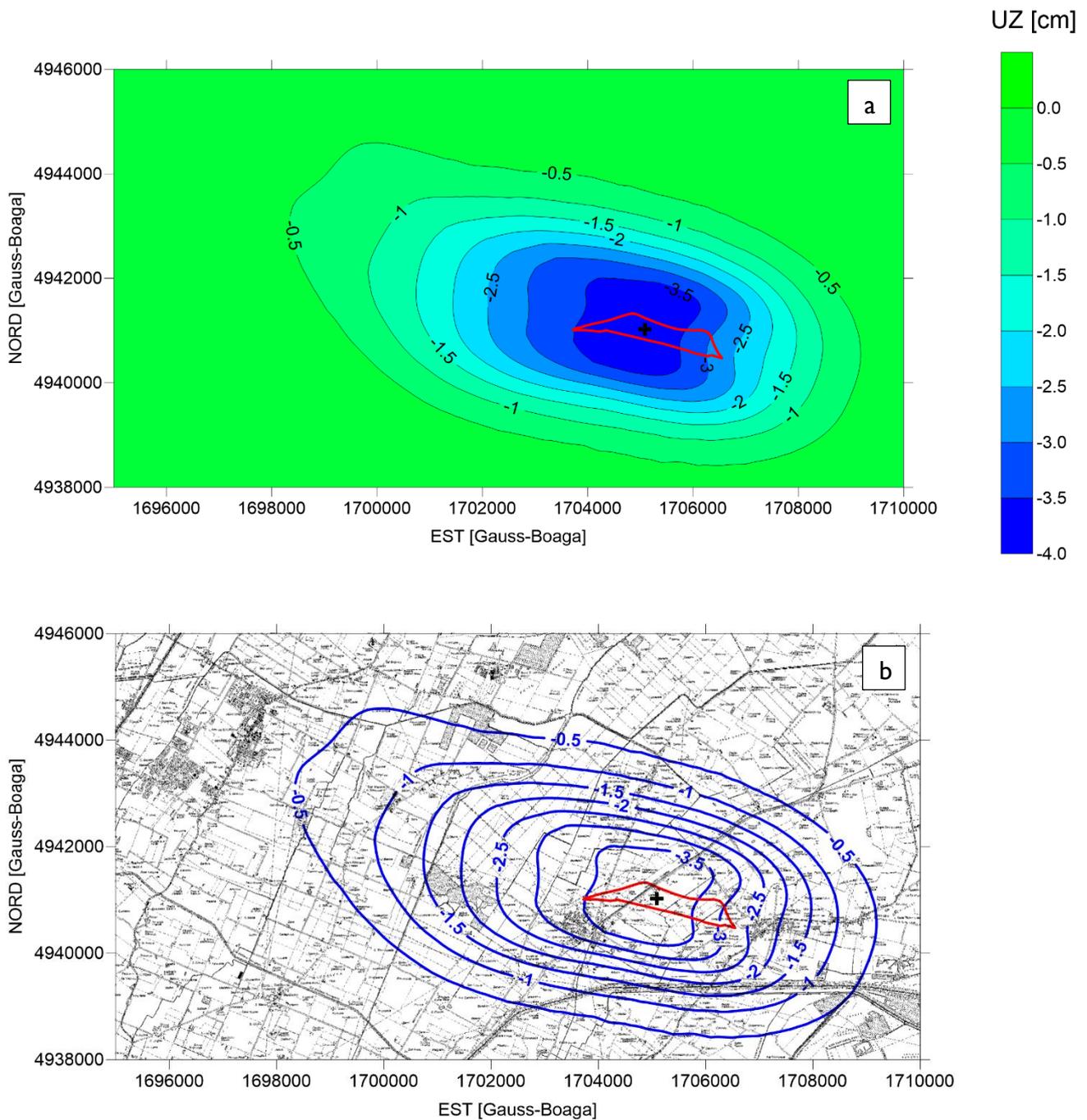


Figura 21: Subsidenza [cm] al culmine della produzione nel 1980: a) subsidenza in scala di colori; (b) subsidenza sovrapposta alla CTR25000. In rosso è evidenziata la traccia del giacimento; il simbolo + indica il punto di massima subsidenza.

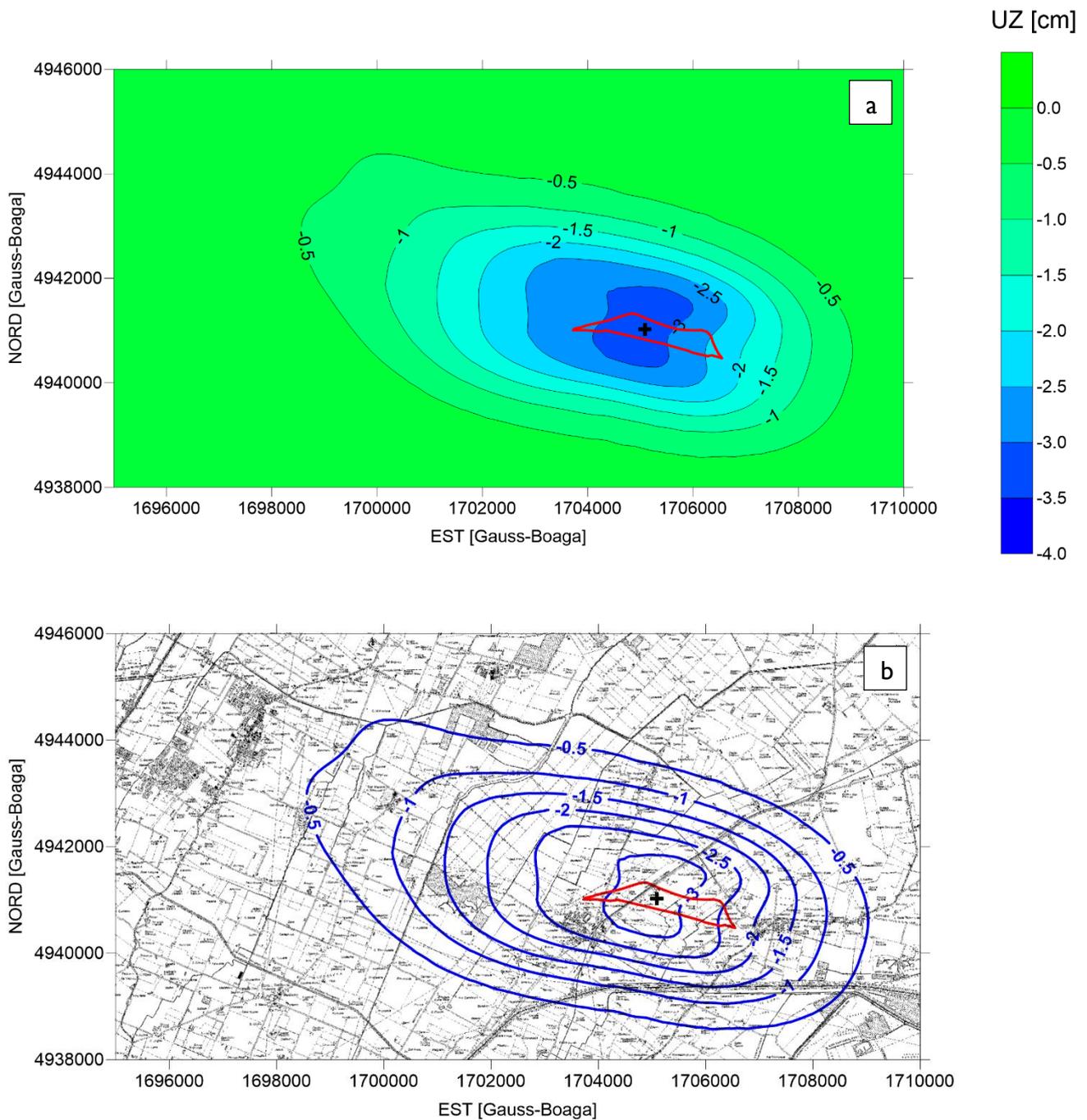


Figura 22: Subsidenza [cm] allo stato attuale (2019): a) subsidenza in scala di colori; (b) subsidenza sovrapposta alla CTR25000. In rosso è evidenziata la traccia del giacimento; il simbolo + indica il punto di massima subsidenza.

5.2 Scenari di coltivazione forecast - spostamenti della superficie

In FIGURA è mostrato l'andamento temporale della subsidenza massima in tutto il periodo coperto dalla simulazione numerica (1959-2039). L'andamento dello spostamento verticale nella sola fase di forecast è mostrato in FIGURA. Le mappe degli spostamenti verticali sono riportate in Figura 25 - Figura 26 e Figura 27 - Figura 28 a fine produzione e a fine simulazione (20 anni), rispettivamente. In Tabella 3 sono riassunti i valori più grandi: la subsidenza massima indotta è sempre inferiore a 1 cm. Le variazioni di pressione previste nello scenario RF70 sono di poco superiore alle massime prodotte durante la produzione primaria tra il 1959 e il 1984 (Figura 3 e Figura 5): la roccia serbatoio si deforma in campo pseudo elastico e nella fase di post produzione lo spostamento viene in gran parte recuperato.

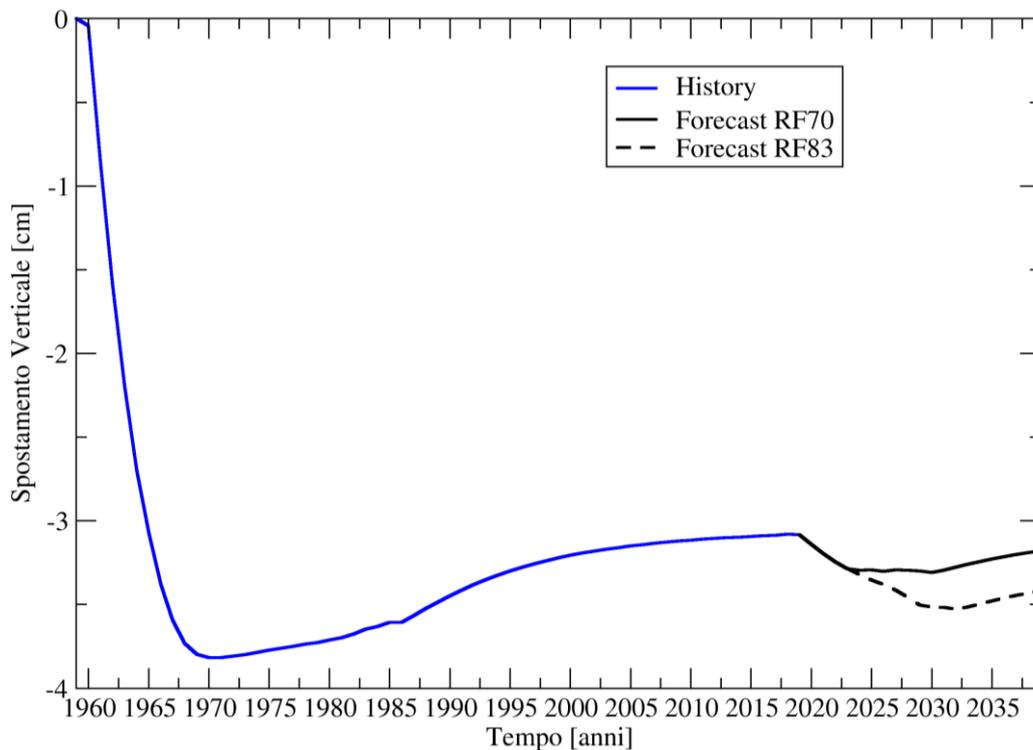


Figura 23: Andamento temporale dello spostamento verticale [cm] nel punto di subsidenza massima in tutto il periodo coperto dalla simulazione numerica (1959-2039).

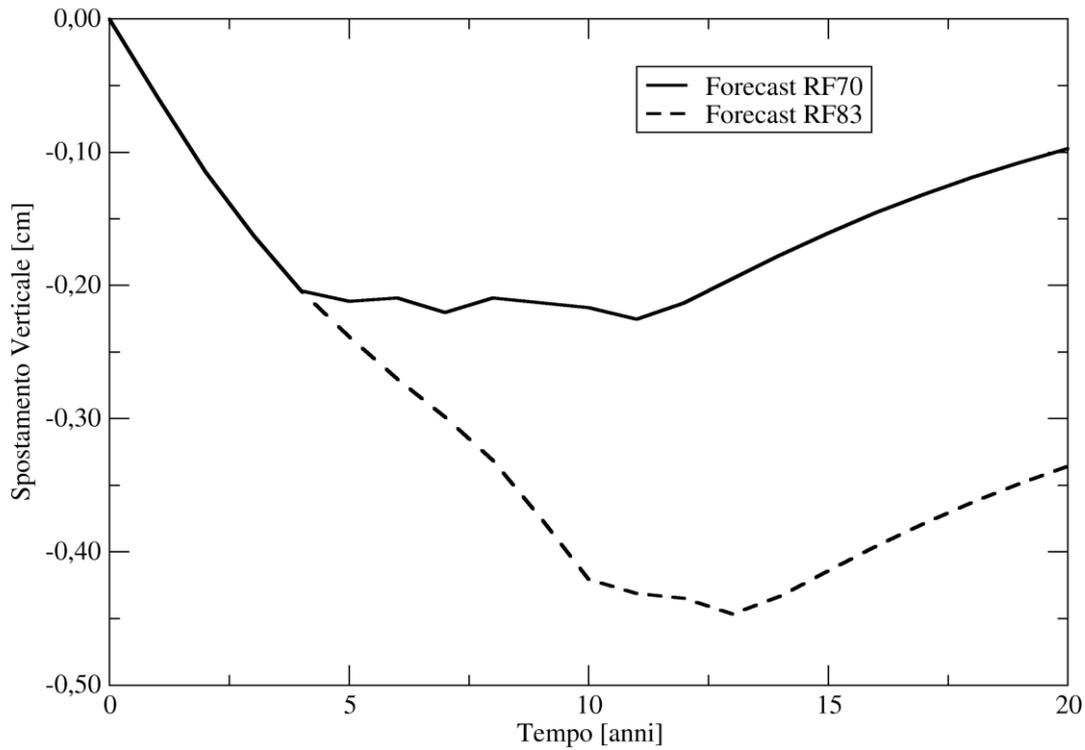


Figura 24: Andamento temporale dello spostamento verticale [cm] nel punto subsidenza massima negli scenari di coltivazione forecast.

Scenario forecast	Spostamento verticale massimo [cm]	
	Fine produzione	Fine simulazione
RF70	0.21	0.10
RF83	0.44	0.34

Tabella 3: Spostamento verticale massimo [cm] previsto negli scenari di coltivazione forecast.

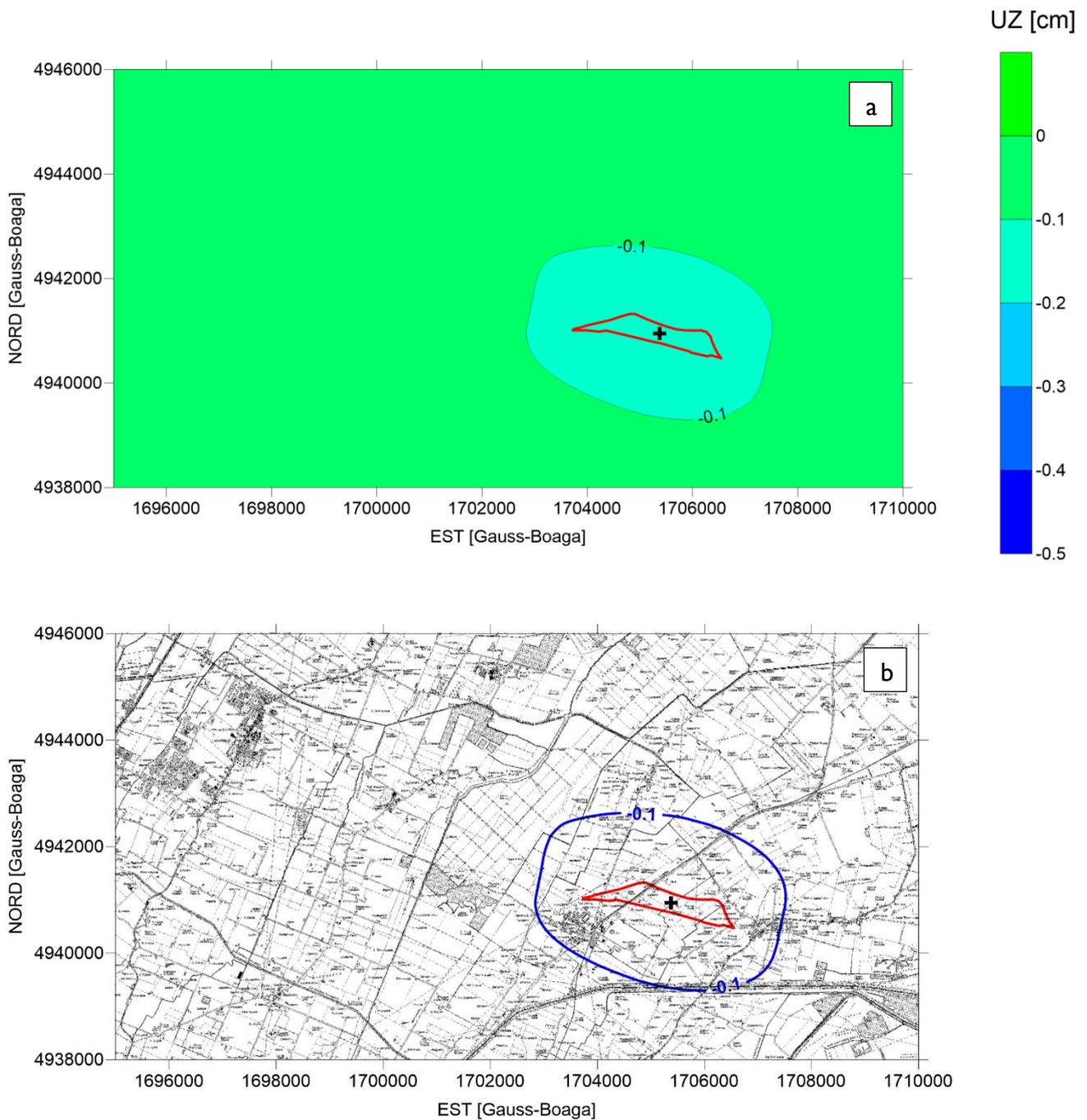


Figura 25: Subsidenza [cm] nello scenario RF70 a fine produzione (II° anno): a) subsidenza in scala di colori; (b) subsidenza sovrapposta alla CTR25000. In rosso è evidenziata la traccia del giacimento; il simbolo + indica il punto di massima subsidenza.

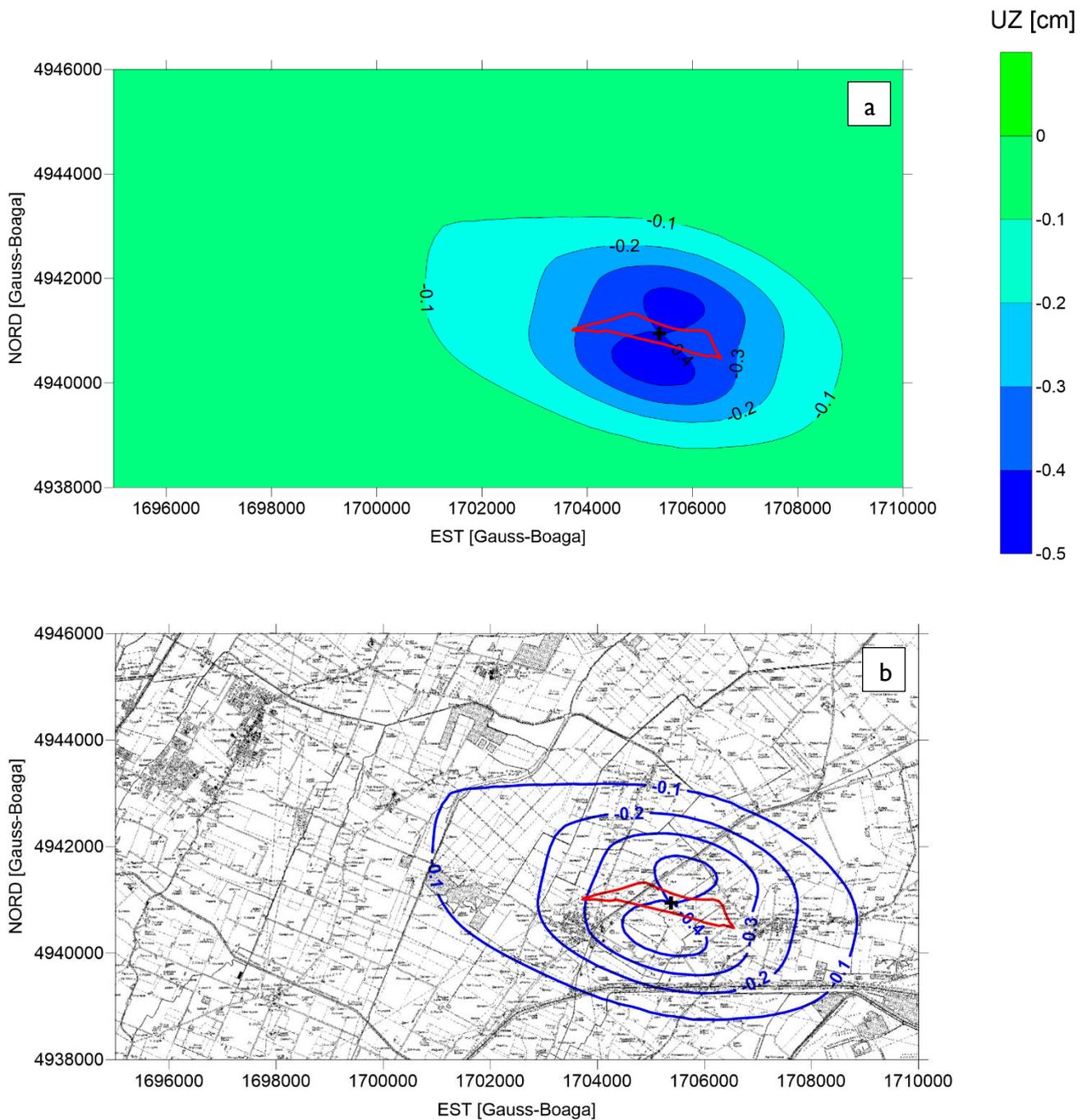


Figura 26: Subsidenza [cm] nello scenario RF83 a fine produzione (13° anno): a) subsidenza in scala di colori; (b) subsidenza sovrapposta alla CTR25000. In rosso è evidenziata la traccia del giacimento; il simbolo + indica il punto di massima subsidenza.

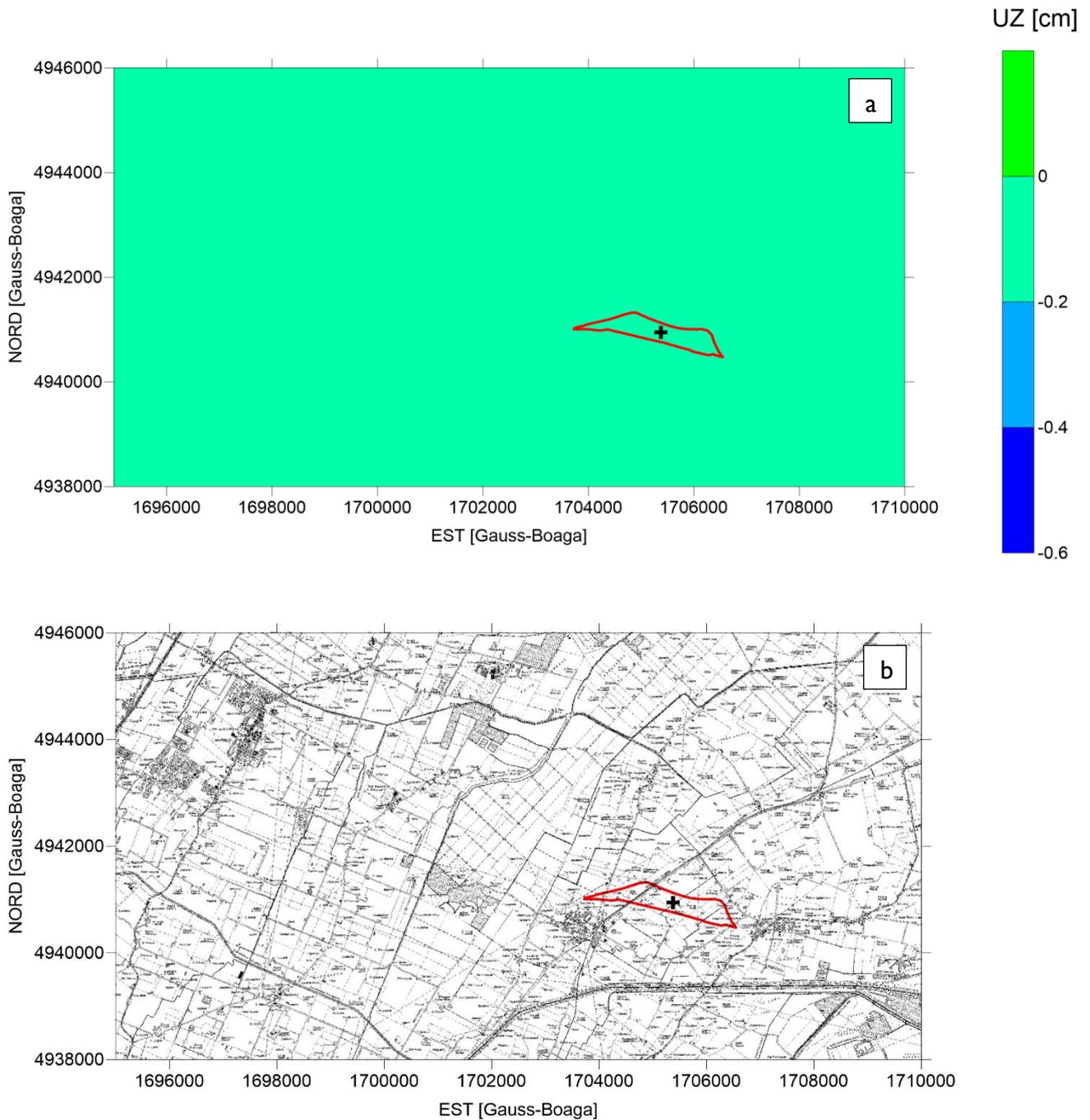


Figura 27: Spostamento verticale [cm] nello scenario RF70 a fine simulazione (20° anno): a) subsidenza in scala di colori; (b) subsidenza sovrapposta alla CTR25000. In rosso è evidenziata la traccia del giacimento; il simbolo + indica il punto di massima subsidenza.

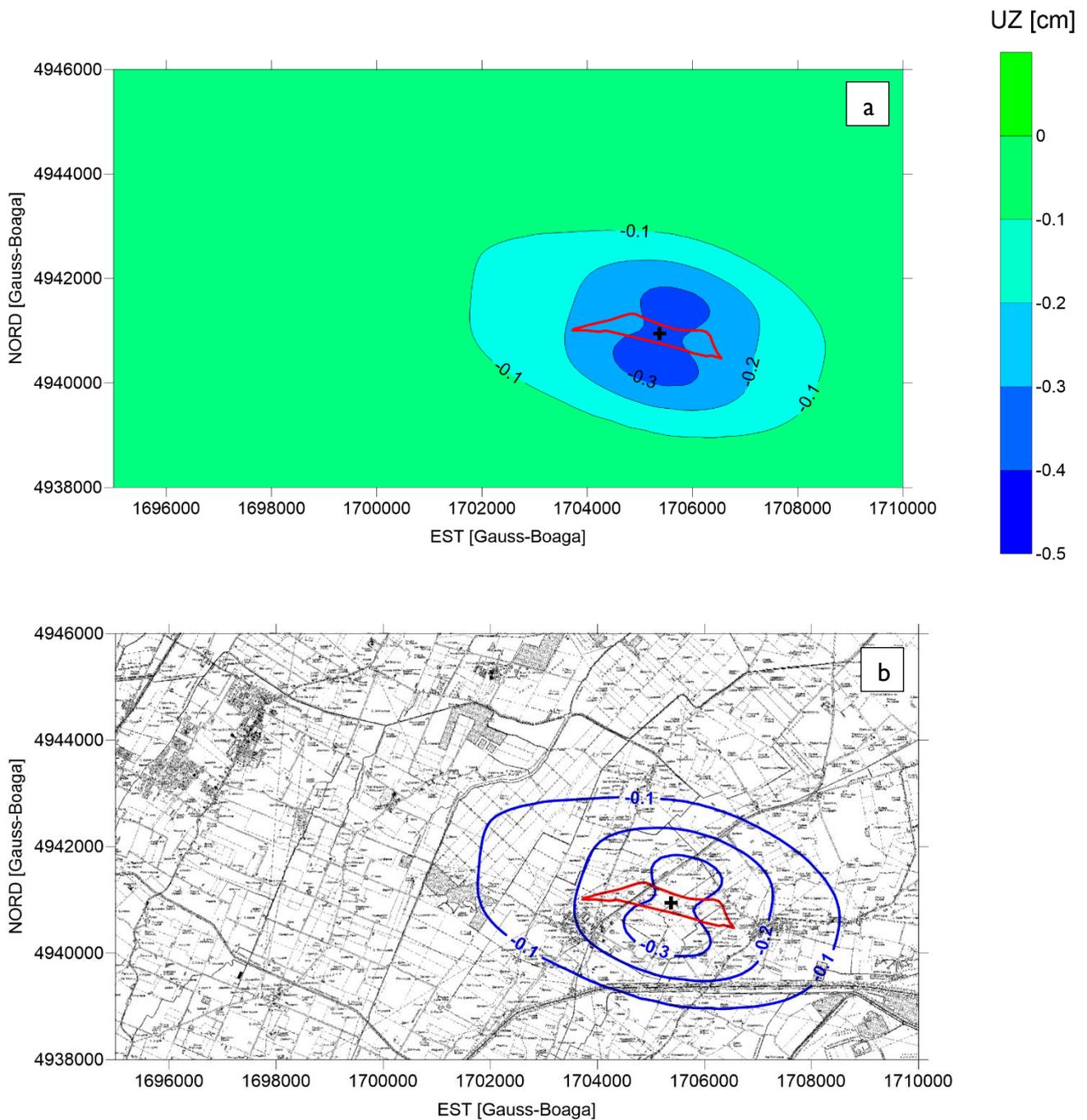


Figura 28: Subsidenza [cm] nello scenario RF83 a fine simulazione (20° anno): a) subsidenza in scala di colori; (b) subsidenza sovrapposta alla CTR25000. In rosso è evidenziata la traccia del giacimento; il simbolo + indica il punto di massima subsidenza.

5.3 Scenari di coltivazione forecast - gradiente dello spostamento

A partire dal campo di spostamento fornito dal modello, il calcolo degli spostamenti differenziali si esegue con una semplice operazione “gradiente”. In Figura 29 - Figura 30 e Figura 31 - Figura 32 sono riportati i risultati ottenuti a fine produzione e a fine simulazione, rispettivamente. Tali gradienti assumono significato qualora vengano confrontati con le distorsioni massime ammissibili per strutture di superficie. Le strutture multipiano in muratura sono le più sensibili agli spostamenti differenziali, con il limite più cautelativo per il gradiente di deformazione verticale fissato in $50e-5$, vale a dire 50 mm 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. In Tabella 4 sono riassunti i valori estremi: il gradiente massimo è pari a $0.34e-5$, cioè più di 100 volte inferiore al limite ammissibile.

Scenario forecast	Gradiente massimo dello spostamento verticale [mm/m]	
	Fine produzione	Fine simulazione
RF70	0.0016	0.0007
RF83	0.0034	0.0026

Tabella 4: Gradiente massimo dello spostamento verticale [mm/m] negli scenari di coltivazione forecast.

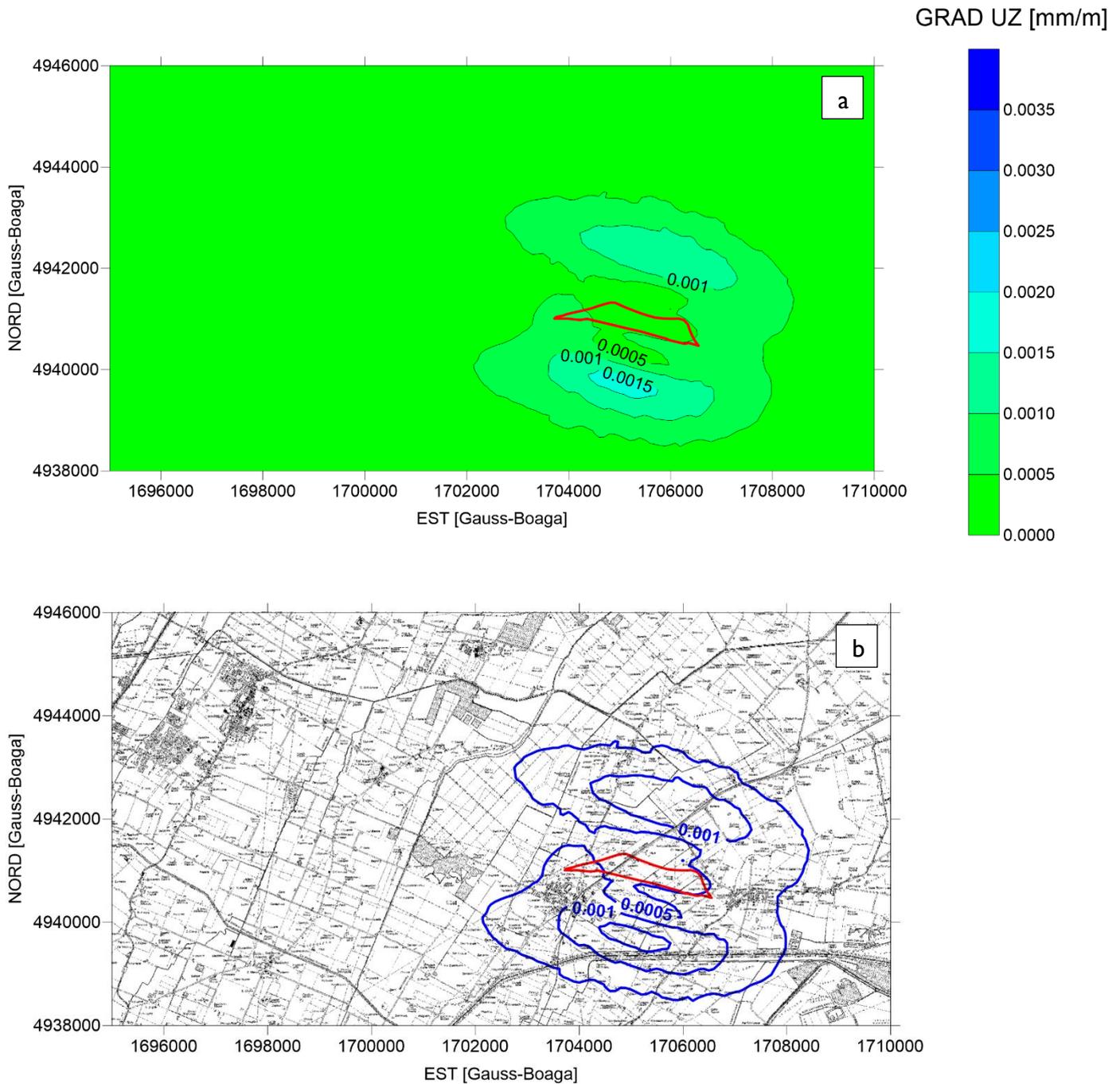


Figura 29: Gradiente dello spostamento verticale [mm/m] nello scenario RF70 a fine produzione (11° anno):
 a) gradiente in scala di colori; (b) gradiente sovrapposto alla CTR25000. In rosso è evidenziata la traccia del
 giacimento.

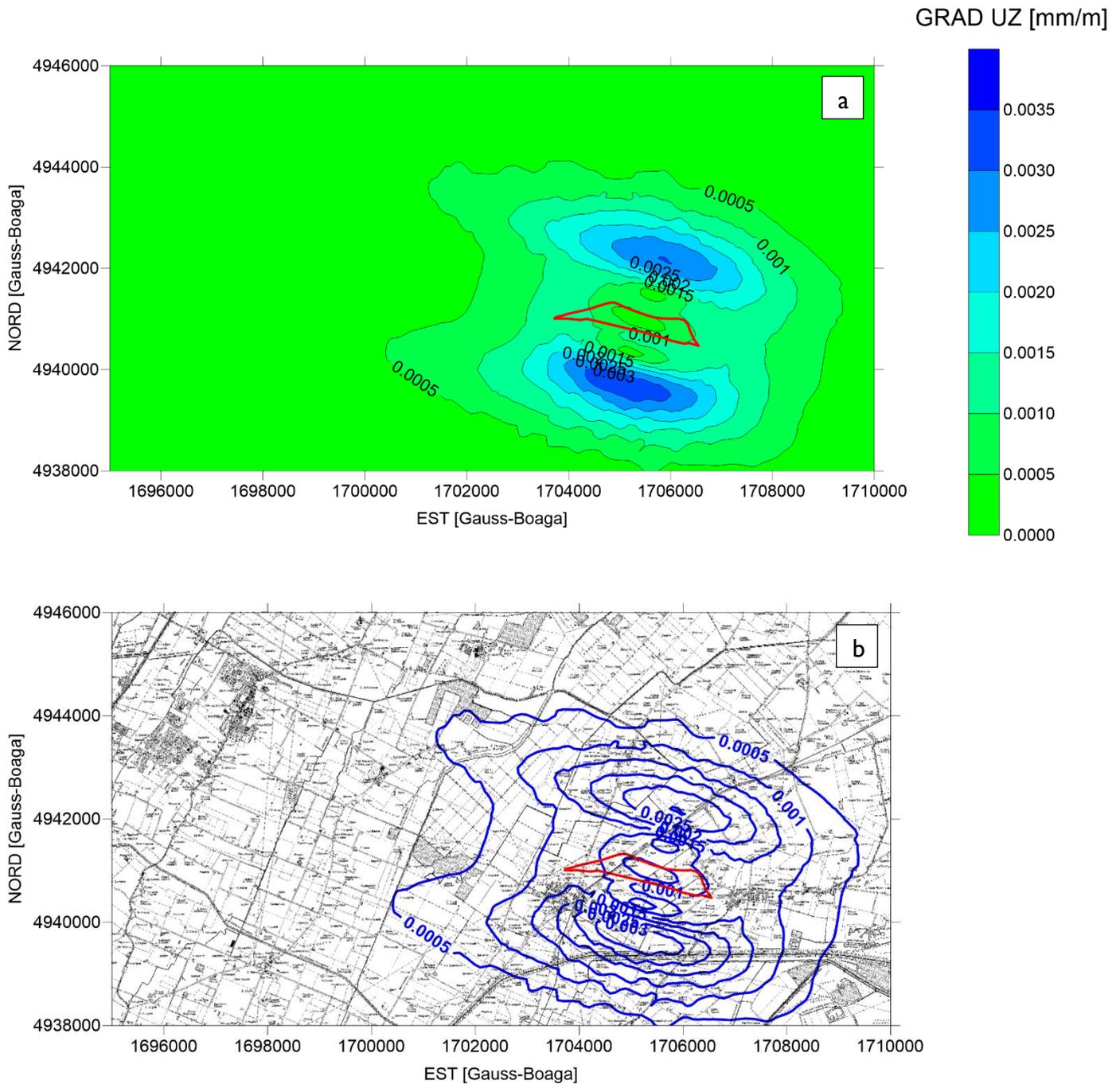


Figura 30: Gradiente dello spostamento verticale [mm/m] nello scenario RF83 a fine produzione (13° anno):
 a) gradiente in scala di colori; (b) gradiente sovrapposto alla CTR25000. In rosso è evidenziata la traccia del
 giacimento.

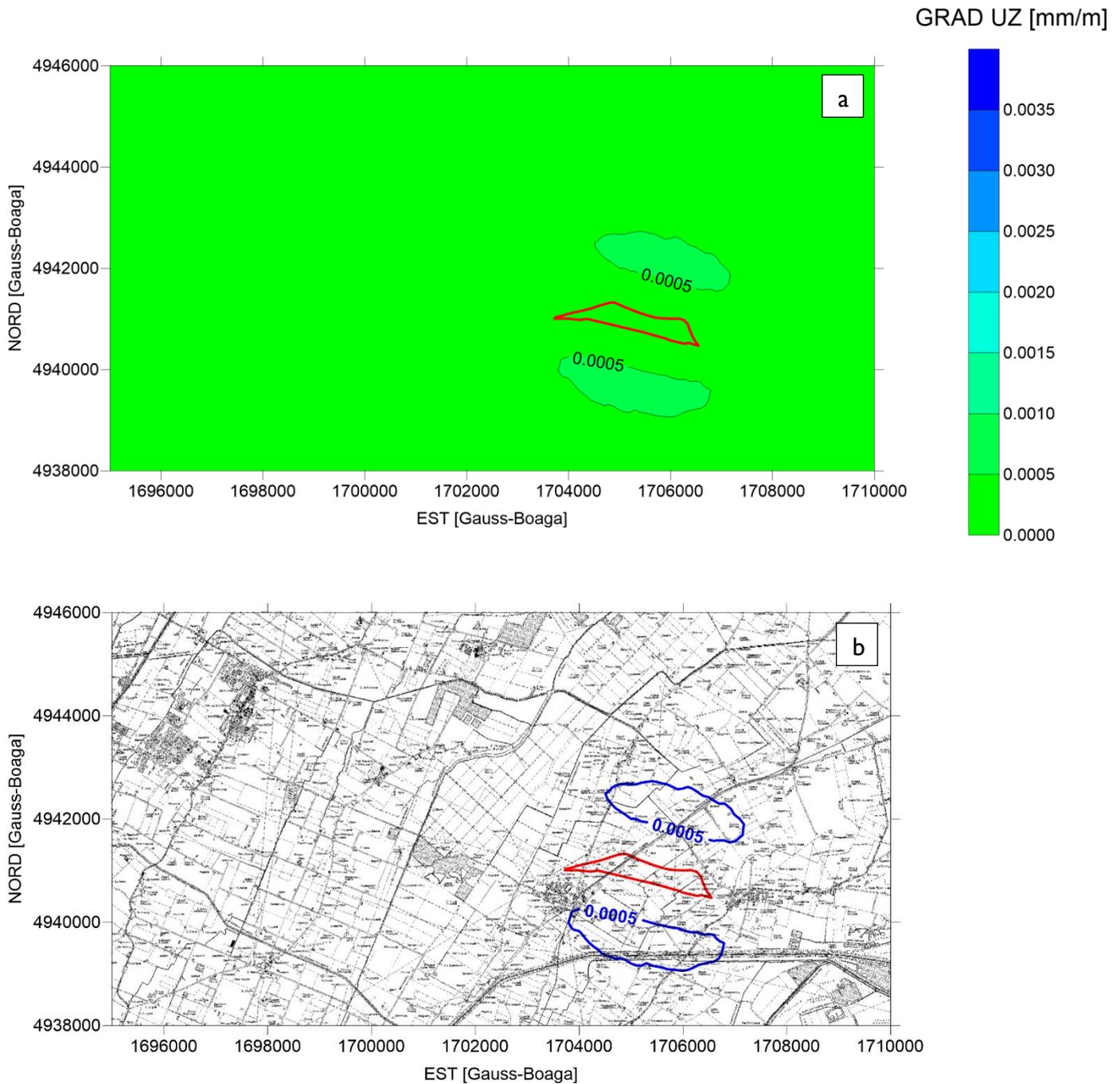


Figura 31: Gradiente dello spostamento verticale [mm/m] nello scenario RF70 a fine simulazione (20° anno):
 a) gradiente in scala di colori; (b) gradiente sovrapposto alla CTR25000. In rosso è evidenziata la traccia del
 giacimento.

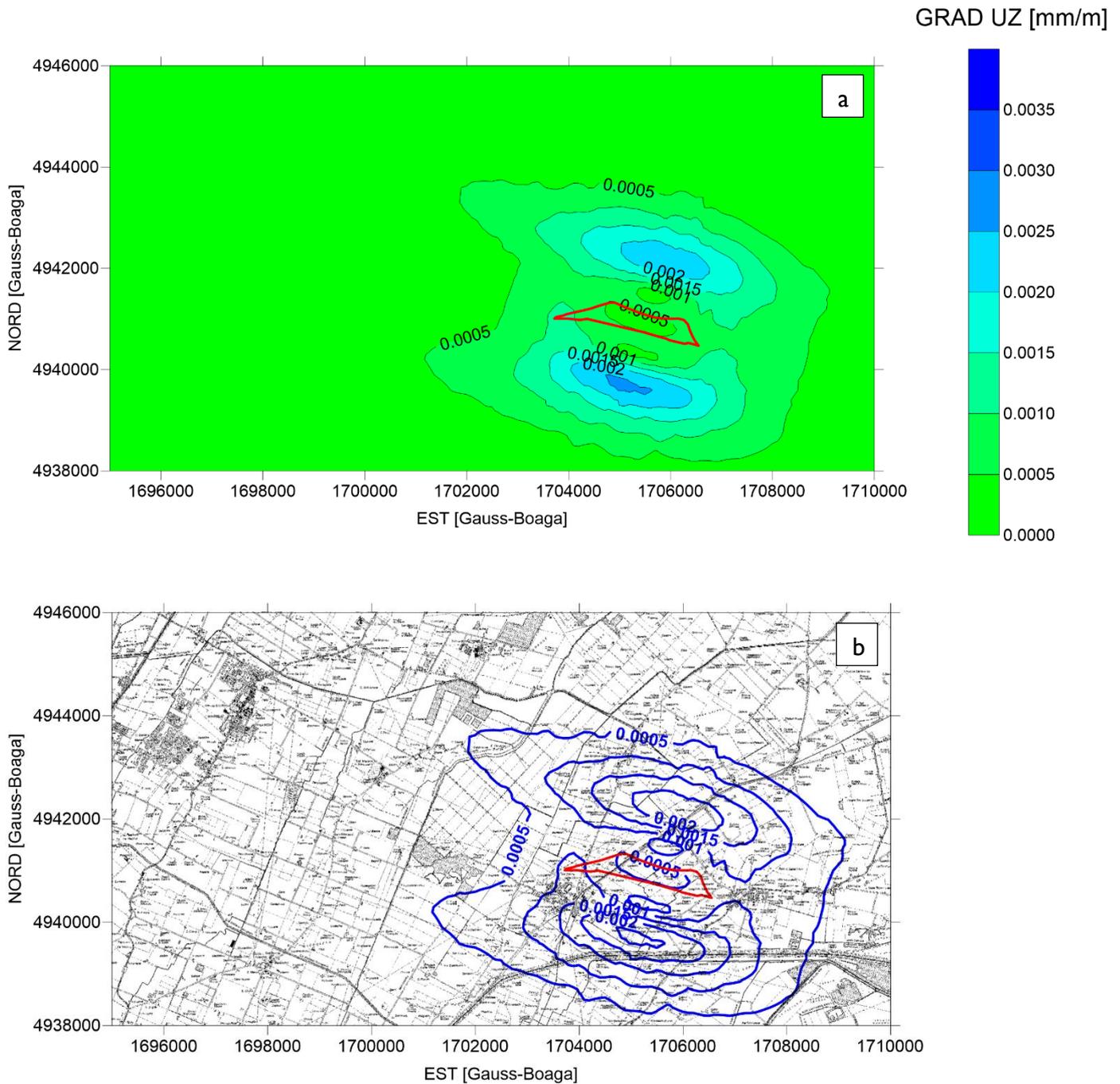


Figura 32: Gradiente dello spostamento verticale [mm/m] nello scenario RF83 a fine simulazione (20° anno):
 a) gradiente in scala di colori; (b) gradiente sovrapposto alla CTR25000. In rosso è evidenziata la traccia del
 giacimento.

6 CONCLUSIONI

Sono stati analizzati, elaborati e implementati i dati forniti da Po Valley Operations per la simulazione previsionale della subsidenza antropica causata dalla coltivazione del giacimento di Selva tramite il pozzo Podere Maiar I dir, ricadente nella concessione di coltivazione denominata "Selva Malvezzi". Nello specifico, sono stati analizzati due scenari con diverso valore del Recovery Factor, rispettivamente, 70% (RF70) e 83% (RF83). 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 l'acquifero è stato incluso solo parzialmente nel modello fluidodinamico di produzione, l'andamento spazio-temporale della pressione di strato in acquifero è simulato con un modello FEM idrodinamico. È stato quindi implementato un modello FEM geomeccanico, con legge costitutiva ipo-plastica trasversalmente isotropa, per la previsione della subsidenza a partire dagli abbattimenti di pressione di strato previsti in giacimento e nel waterdrive. Per quanto riguarda la caratterizzazione geomeccanica si è fatto riferimento agli studi effettuati su altri campi del bacino sedimentario padano [Janna *et al.*, 2012; Ferronato *et al.*, 2013]. Le simulazioni sono state condotte impiegando le conoscenze allo stato dell'arte. I risultati ottenuti in fase previsionale sono sintetizzati in Tabella 5 in termini di subsidenza massima e gradiente massimo di spostamento verticale. Nel caso più gravoso, la subsidenza è inferiore a 1 cm e lo spostamento differenziale è 100 volte inferiore al limite più restrittivo raccomandato nella letteratura di settore con riferimento alla stabilità strutturale delle opere murarie multipiano

Scenario	Subsidenza massima [cm]	Gradiente massimo [mm/m]
RF70	0.21	0.0016
RF83	0.44	0.0034

Tabella 5: Subsidenza massima [cm] e gradiente massimo di spostamento verticale [mm/m] previsti negli scenari di coltivazione forecast.

7 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 (2018). Giacimento a Gas si Selva “Podere Gallina”: Modello statico, modello dinamico e stima delle riserve recuperabili dai livelli C1 e C2. 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. Numer. 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.

- STOGIT (2011). Concessione Minerbio Stoccaggio (Minerbio – BO) Esercizio $P_{max} = 1,07$ Pi. Studio di Impatto Ambientale. Volume I. Sezione III – Quadro Progettuale.
- STOGIT (2012). Concessione Minerbio Stoccaggio (Minerbio – BO) Nota Sulla Sismicità dell'Area.
- 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

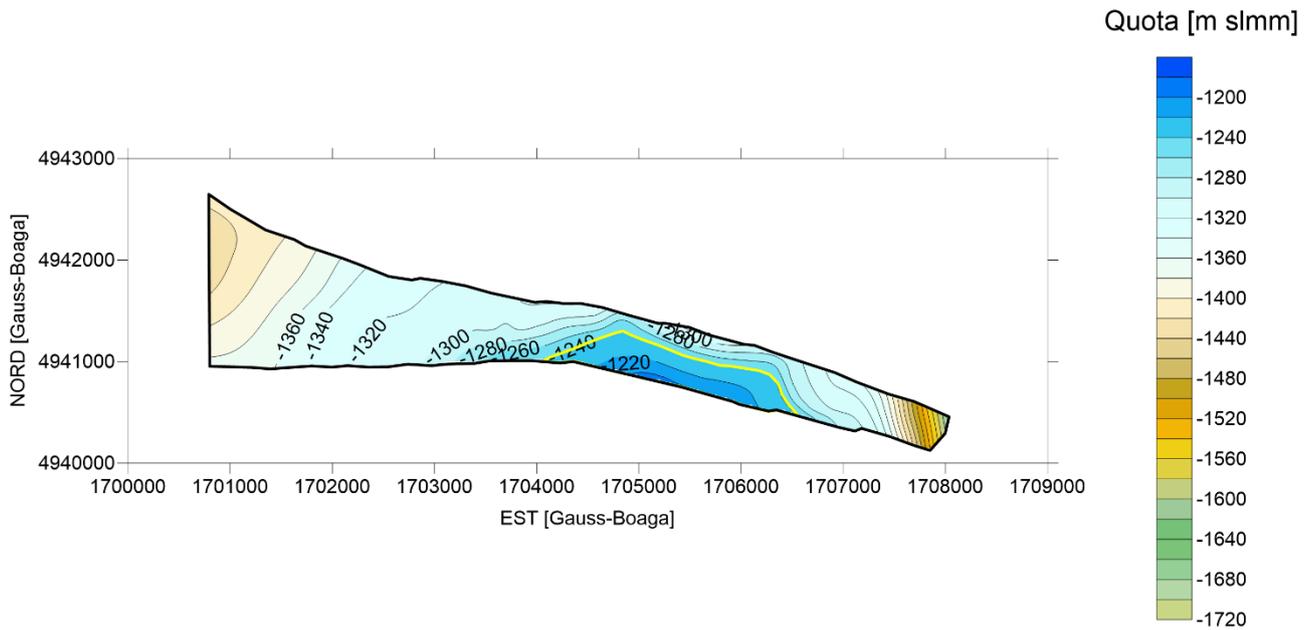


Figura A 1: Isobate [m slmm] del Top del livello C1. In giallo è evidenziato il GWC.

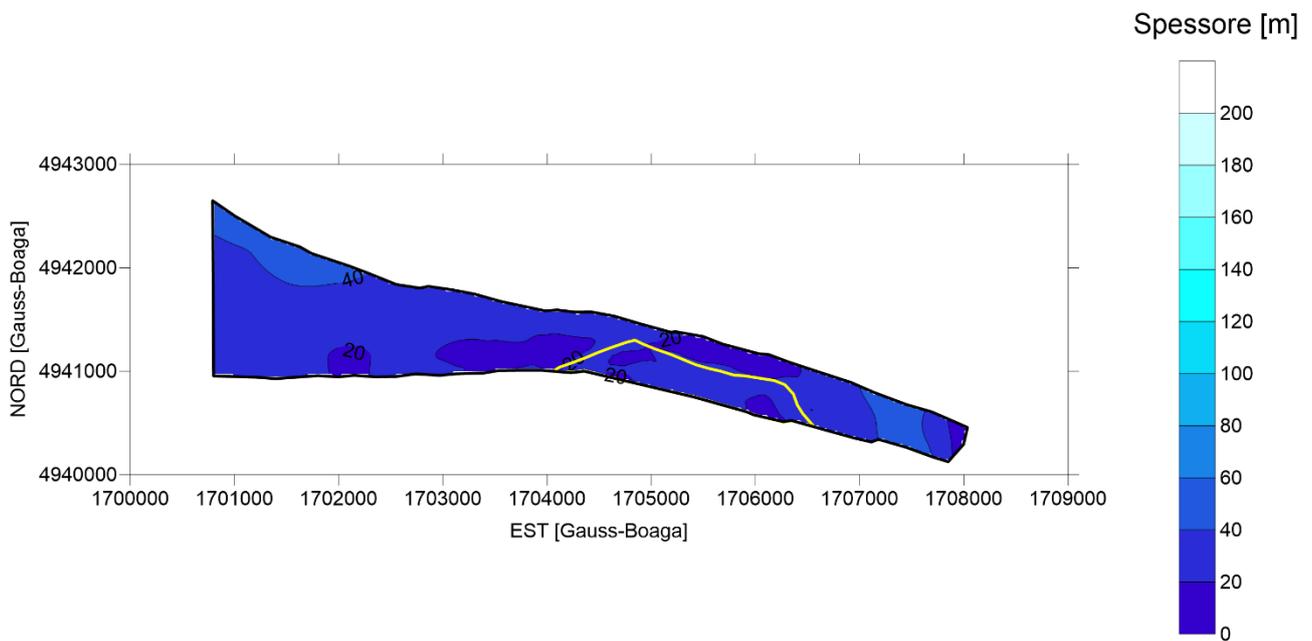


Figura A 2: Isopache [m] del livello C1. In giallo è evidenziato il GWC.

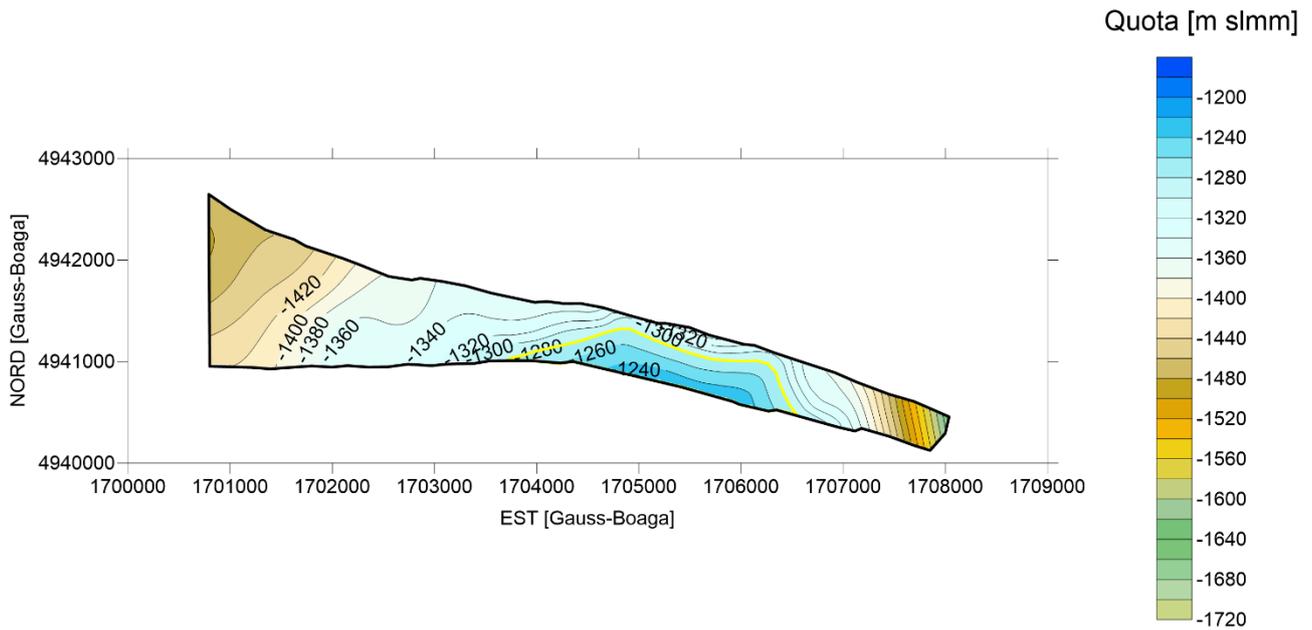


Figura A 3: Isobate [m slmm] del Top del livello C2. In giallo è evidenziato il GWC.

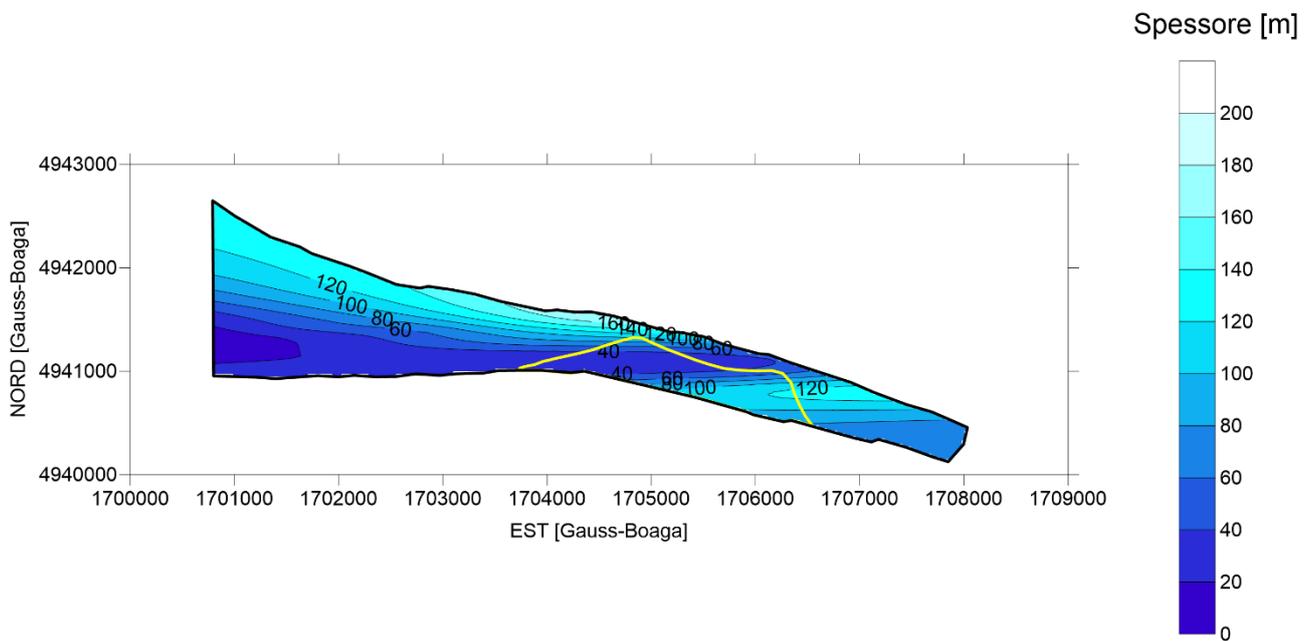


Figura A 4: Isopache [m] del livello C2. In giallo è evidenziato il GWC.