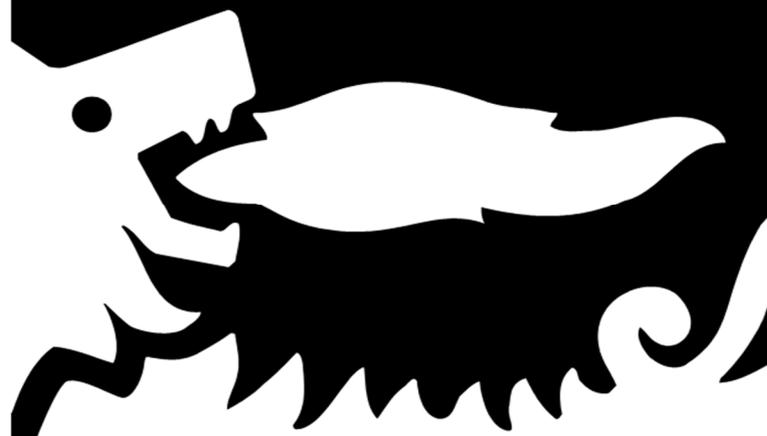


eni spa

**DISTRETTO
CENTRO
SETTENTRIONALE**



Doc. SICS 220

*STUDIO DI IMPATTO
AMBIENTALE*

*Progetto "Pozzo Donata 4 DIR"
Campo Gas Donata
Off-shore Adriatico Centro
Settentrionale*

*Appendice I: Modello Elasto-
Plastico di Subsidenza*



Campo di Donata

Modello Elasto-Plastico di Subsidenza

Management Summary

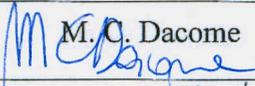
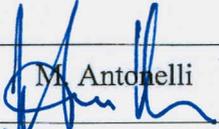
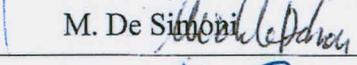
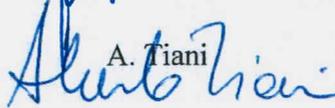
LISTA DI DISTRIBUZIONE:

GEOD/CS

GEOES/CS

AUTORI

Data: 29 settembre 2017

0	Rapporto Finale	M. C. Dacome 	M. Antonelli 
		M. De Simone 	A. Tiani 
		S. Mantica 	
AGGIORNAMENTI		CONTROLLATO DA	APPROVATO DA

Indice

1	Introduzione	3
2	Modello Geomeccanico agli Elementi Finiti	5
2.1	Approccio metodologico.....	5
2.2	Geometria del modello.....	6
2.3	Proprietà dei materiali.....	8
2.3.1	Densità della roccia.....	8
2.3.2	Compressibilità uniassiale	9
2.4	Inizializzazione	15
2.4.1	Stato tensionale iniziale	15
2.4.2	Pressioni iniziali.....	15
2.5	Storia di pressione.....	15
3	Risultati delle analisi eseguite con il modello elasto-plastico	16
4	Bibliografia	24

1 Introduzione

Il presente rapporto illustra i risultati dello studio geomeccanico relativo al campo di Donata, effettuato con lo scopo di valutare quantitativamente la subsidenza indotta dalla coltivazione del giacimento. Il campo di Donata è situato nell'offshore adriatico, a una distanza dalla costa (San Benedetto del Tronto) di circa 22 km (Figura 1). La proposta di sviluppo prevede la perforazione del pozzo Donata 4Dir lanciato dalla piattaforma di Emilio che si trova pochi km a sud del campo stesso.



Figura 1 – Posizione del campo di Donata, a circa 22 km dalla costa meridionale delle Marche.

La previsione di subsidenza attesa è stata eseguita tramite l'applicazione del modello poro-elastoplastico di Isamgeo Engineering GmbH. Le informazioni relative alla geometria del giacimento, le proprietà petrofisiche e l'evoluzione delle pressioni sono state ottenute dallo studio fluido-dinamico di giacimento realizzato da Eni S.p.A. con il codice di calcolo Eclipse [1].

Si prevede che la produzione del giacimento inizierà nel 2018 mentre il termine della produzione è previsto per il 2022. Lo studio dell'evoluzione delle pressioni è stato protratto, a pozzi chiusi, fino a gennaio 2052 per considerare l'effetto della redistribuzione delle pressioni in giacimento e in acquifero dopo la chiusura dei pozzi.

Nel presente studio sono stati analizzati due casi di sviluppo denominati "Base" e "Doppio". Il primo prevede erogazione in commingle di tutti i completamenti, il secondo prevede una stringa corta sul PL3-AC ed erogazione in commingle sui livelli PL3-B e PL3-C della stringa lunga. Per ciascuno di questi casi di produzione sono stati simulati tre scenari di compressibilità dei sedimenti: uno scenario di alta compressibilità (Upper), uno scenario di bassa compressibilità (Lower) ed uno scenario intermedio (Average), per un totale di 6 diversi scenari di subsidenza.

In relazione allo scenario di comprimibilità intermedio che presenta un gas in posto originario pari a $5.33 \times 10^8 \text{ Sm}^3$, alla chiusura del campo il caso “Base” prevede una produzione cumulativa di gas pari a $3.57 \times 10^8 \text{ Sm}^3$, mentre il caso “Doppio” prevede una produzione cumulativa pari a $3.61 \times 10^8 \text{ Sm}^3$.

2 Modello Geomeccanico agli Elementi Finiti

2.1 Approccio metodologico

Lo studio geomeccanico di subsidenza è stato realizzato da ISAMGEO Engineering GmbH utilizzando il codice proprietario ad Elementi Finiti (FE) Isamgeo. La costruzione del modello è stata basata sulle seguenti informazioni:

- Mappe geologiche dei livelli interessati dai campi, estese in misura tale da descrivere interamente non solo le zone mineralizzate ma anche gli acquiferi laterali;
- Dettagliata descrizione della geometria e geologia dei livelli mineralizzati e degli acquiferi connessi, riprodotta con accuratezza dalla maglia di calcolo numerica;
- Distribuzione di pressione nei livelli mineralizzati e degli acquiferi connessi, calcolata con il modello di flusso 3D Eclipse [1]. Lo studio fluido-dinamico di giacimento è stato comunque protratto per oltre 30 anni (a pozzi chiusi) in modo da considerare l'effetto dell'evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero dopo la fine della produzione.
- Proprietà meccaniche della roccia descritte con una legge costitutiva del tipo Cam Clay Modificato, che tiene conto non solo della variazione della compressibilità uniassiale (c_m) con lo stress efficace, ma modella accuratamente anche gli eventuali fenomeni di espansione dei sedimenti soggetti a ripressurizzazione;
- Calcolo della compattazione dei livelli mineralizzati e degli acquiferi connessi realizzato utilizzando parametri meccanici ottenuti da misure in situ effettuate nei pozzi equipaggiati con markers nell'offshore adriatico.

2.2 Geometria del modello

Il modello Eclipse di Donata, realizzato tramite il software Eclipse, interessa una superficie di 2 km × 8.5 km. Esso è composto da 23 x 179 x 302 celle nelle direzioni I, J e K rispettivamente. E' importante notare che il modello di giacimento presenta un'estensione areale limitata a causa della chiusura idraulica dei livelli in tutte le direzioni.

Al fine di evitare un'eventuale influenza delle condizioni al contorno sui risultati, è stato necessario estendere la zona modellata dal punto di vista geomeccanico al di là del perimetro della zona modellata dal punto di vista fluido-dinamico. E' stata quindi generata una mesh 3D a partire da una mesh 2D con estensione areale maggiore dell'estensione del modello Eclipse. Essa è stata inoltre proiettata verticalmente a generare i livelli del giacimento, overburden ed underburden. Il modello geomeccanico così costruito (Figura 2) risulta suddiviso in 30 livelli e si estende fino a oltre 5000 m di profondità per un totale di 230189 nodi, 64350 elementi e 690567 gradi di libertà, di cui 8655 bloccati.

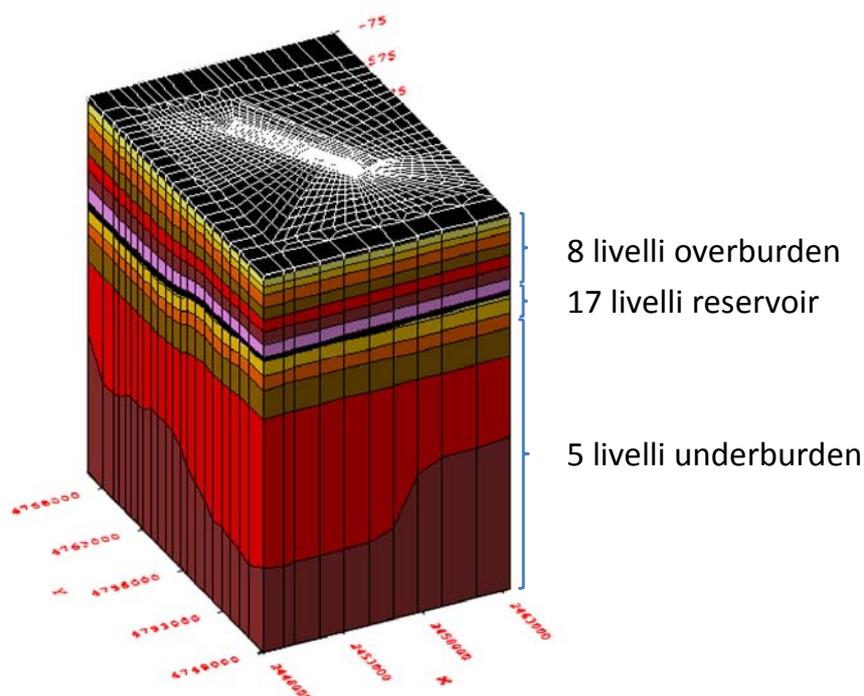


Figura 2 – Mesh di calcolo ad elementi finiti utilizzata nel modello Isamgeo per il campo di Donata. La scala verticale della rappresentazione è pari a 5 volte quella orizzontale.

Le condizioni al contorno meccaniche del modello sono state così scelte:

- Sono impediti i tre gradi di libertà dei nodi della base del modello, simulando così la presenza di un bedrock rigido.
- I nodi sui quattro lati del modello hanno impediti anch'essi i tre gradi di libertà di spostamento; un'analisi di sensitività è stata condotta usando una condizione al

contorno in cui i nodi sui quattro lati del modello hanno impediti i movimenti orizzontali in direzione ortogonale ai lati, ma non quello verticale: questa condizione al contorno è potenzialmente quella più conservativa (pessimistica) dal punto di vista della subsidenza prevista. Le due condizioni al contorno laterali conducono a risultati indistinguibili. I risultati del modello confermano che l'effetto di subsidenza del campo non raggiunge i bordi laterali del modello, per cui la condizione al contorno ivi applicata è irrilevante per i risultati della simulazione.

Parte di questo studio è stata anche l'analisi dell'impatto che le caratteristiche meccaniche dei carbonati alla base, incognite, possono avere sul comportamento del sistema. In Figura 3 è presentata la parte della mesh 3D che li rappresenta. Il suo top è ricavato dalla mappa illustrata nella stessa figura.

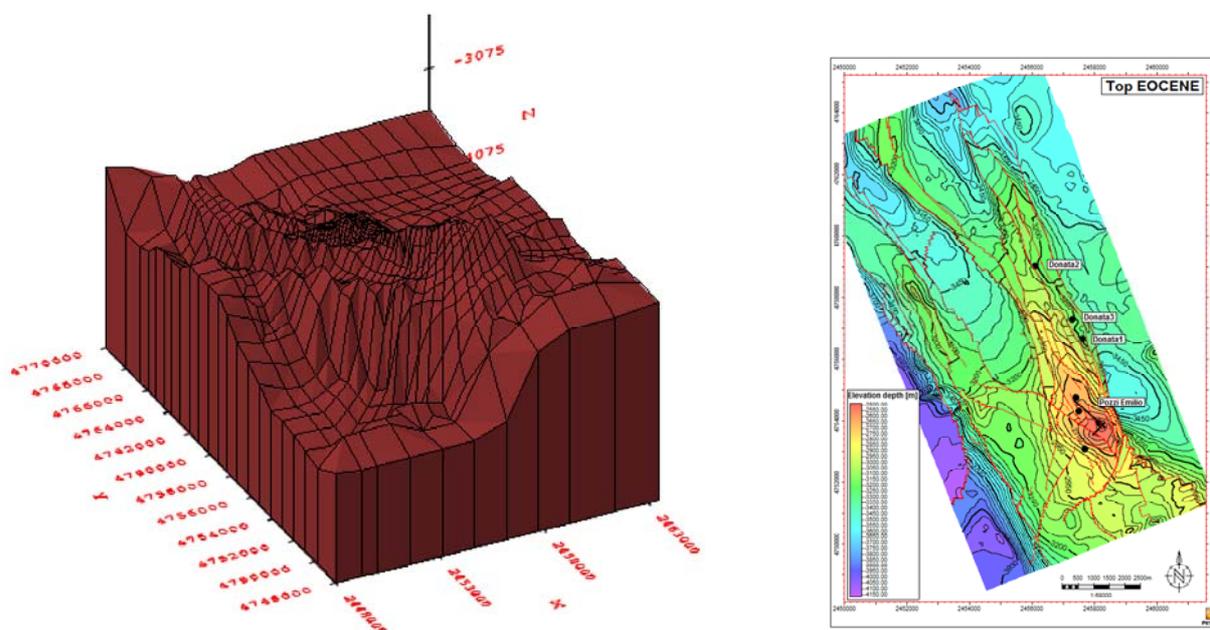


Figura 3 – Mesh dei carbonati (immagine a sx) come rappresentati nel modello di calcolo ad elementi finiti utilizzata nel modello Isamgeo per il campo di Donata. La scala verticale della rappresentazione è pari a 5 volte quella orizzontale. Sulla destra la mappa dei carbonati.

2.3 Proprietà dei materiali

2.3.1 Densità della roccia

Partendo dai density log registrati nei pozzi Donata 1 (441-2231 m tvdss), Donata 2 (340-1557 m tvdss), Donata 3 (357-1513 m tvdss) è stato calcolato un profilo continuo medio di densità ρ (Figura 4) interpolato attraverso la seguente relazione:

$$\rho(\text{g/cm}^3) = 1.6682 \cdot Z^{0.0405} \quad (2-1)$$

dove le profondità (Z) sono misurate in metri TVDSGL (*True Vertical Depth Sub Ground Level*) con riferimento al fondo marino (assunto pari a 84 m). Al di sopra della profondità di fondo mare la densità è stata assunta pari a 1.03 g/cm³.

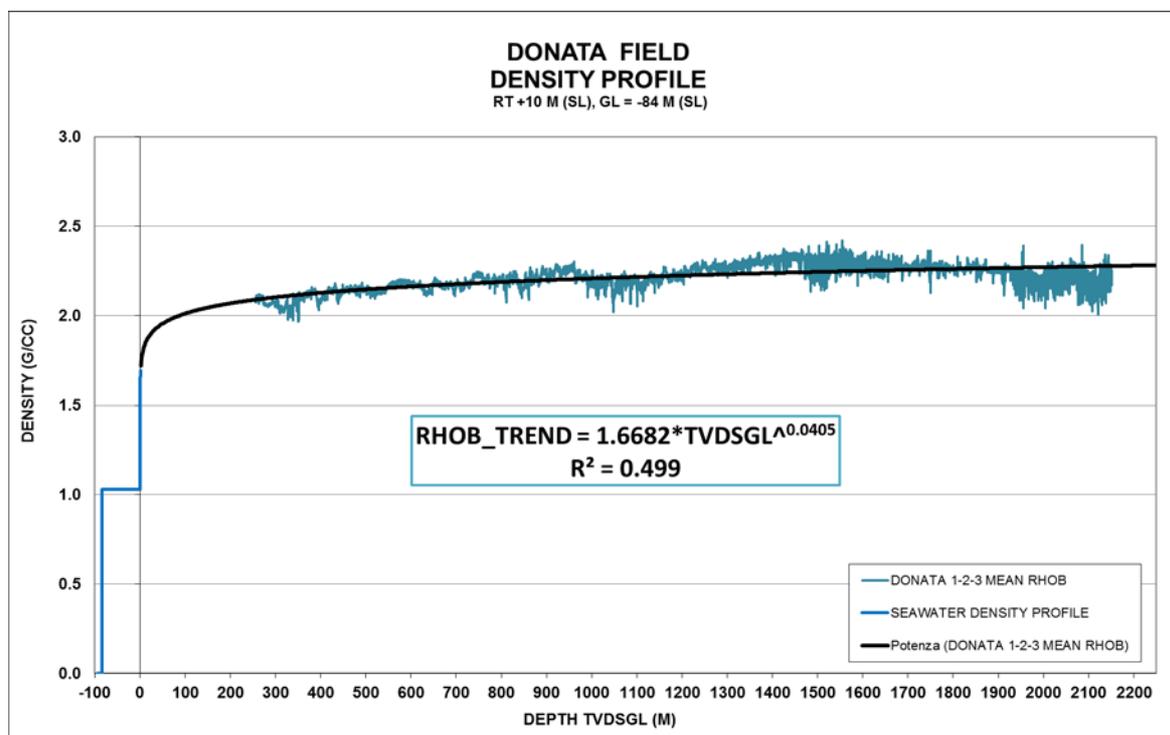


Figura 4 – Profilo di densità da log, media dei density log registrati nei pozzi Donata-1, Donata-2 e Donata-3 e profilo di densità interpolato con legge di potenza.

La curva analitica così ottenuta fornisce un'ottima approssimazione della densità misurata ed è stata perciò utilizzata nel modello FE per ricostruire la densità dei sedimenti e l'andamento dello stato di stress totale con la profondità.

La densità della roccia è stata fornita al modello FE in forma tabulare come funzione della profondità in accordo con la relazione sopra riportata.

2.3.2 Compressibilità uniassiale

Il parametro geomeccanico chiave nelle simulazioni di subsidenza è la compressibilità uniassiale c_m del materiale. E' oggi comunemente accettato [2] che i valori più attendibili di questo parametro, generalmente funzione non lineare dello stress efficace, siano quelli ottenuti dalle misure in situ tramite markers.

In assenza di dati specifici da marker sul campo oggetto dello studio si è utilizzata per la stima della compressibilità una correlazione regionale basata sul più ampio dataset possibile e relativa alle stesse formazioni del Nord Adriatico. Tale correlazione tra C_m e tensione verticale efficace σ'_v è stata proposta da Hueckel *et al.* [3] con la correzione di Ferronato *et al.* [4] (Scenario Average):

$$c_m = \begin{cases} 2 \cdot 0.01367 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} & z < 1500m \\ 0.01367 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} & z \geq 1500m \end{cases} \quad (2-2)$$

dove z è la profondità misurata in metri TVDSS (*True Vertical Depth Sub-Sea Level*) e la tensione verticale efficace σ'_v è stata calcolata tramite:

$$\sigma'_v = \sigma_v - p \quad (2-3)$$

dove σ_v è la tensione verticale totale e p la pressione dei pori. Quest'ultima è stata estratta dallo studio fluido-dinamico alle profondità di riferimento, mentre la tensione verticale totale σ_v è stata calcolata a partire dalla densità del materiale come riportato nel paragrafo 2.3.1.

I livelli di Donata messi in produzione in questo studio giacciono tutti nella regione al di sopra dei 1500 m di profondità. La relazione definita per profondità superiori ai 1500 m è stata usata solo per parte dell'underburden.

In accordo con le stime regionali di compressibilità in funzione dello stress verticale efficace, sono stati anche definiti i limiti superiore ed inferiore da utilizzare nell'analisi di sensitività, ovvero:

$$\text{Scenario Upper } C_m \text{ (quantile 97.5\%):} \quad C_m = 10^{0.467} \cdot 0.01367 \sigma'^{-1.16434} \quad (2-4)$$

$$\text{Scenario Lower } C_m \text{ (quantile 2.5\%):} \quad C_m = 10^{-0.467} \cdot 0.01367 \sigma'^{-1.16434} \quad (2-5)$$

Si sottolinea che i campi di pressione del modello Eclipse sono stati stimati utilizzando compressibilità dei pori coerenti con il modello geomeccanico.

In Tabella 1 sono riportati i valori di profondità media, tensione verticale totale σ_v , pressione dei pori iniziale p , tensione verticale efficace σ'_v , per il modello geomeccanico di Donata.

In Tabella 2, Tabella 3 e Tabella 4 sono riportati i valori di compressibilità uniassiale C_m , pendenza della retta di normal-compressione λ e di scarico-ricarico κ nel piano $e:\ln(p')$ (dove e è l'indice dei vuoti e p' è la tensione efficace media), nonché l'intercetta e_0 della linea di stato critico alla tensione di riferimento (1 bar), assegnati al modello geomeccanico relativamente agli scenari Average, Lower e Upper rispettivamente.

La pendenza della linea di stato critico M è stata scelta = 1.33, mentre la formulazione ad elementi finiti del Modified Cam-Clay Model (MCCM) richiede anche un rapporto di Poisson, scelto uguale a 0.33.

Il primo strato di overburden è stato simulato come elastico lineare. È stata condotta un'analisi di sensitività raddoppiando il modulo di Young utilizzato per questo livello, senza ottenere alcuna variazione nelle previsioni, pertanto si è concluso che l'effettivo valore dei parametri elastici di questo primo livello non ha impatto sui risultati della previsione.

Per quanto concerne il basamento carbonatico al di sotto dei sedimenti, è stata condotta una analisi di sensitività rispetto alle caratteristiche meccaniche. Nei quattro casi di diversi parametri elastici considerati i risultati del modello non hanno manifestato alcuna dipendenza dai parametri elastici del basamento.

Tabella 1 – Valori di profondità media, stress totale, pressione neutra iniziale e stress efficace iniziale per il modello geomeccanico di Donata.

Materiale modello ISAMGEO	Profondità media (m)	Stress totale verticale (bar)	Pressione (bar)	Stress efficace verticale iniziale (bar)
1	103.5	11.9	4.3	7.7
2	189.0	28.4	14.4	14.1
3	303.0	51.3	27.8	23.5
4	445.6	80.7	44.7	36.0
5	616.6	116.5	64.9	51.6
6	787.6	152.8	85.1	67.6
7	958.7	189.4	105.3	84.1
8	1129.7	226.4	125.6	100.8
9	1176.9	236.6	131.1	105.5
10	1248.1	252.1	139.6	112.5
11	1181.9	237.7	131.7	106.0
12	1253.5	253.3	140.2	113.1
13	1187.0	238.8	132.3	106.5
14	1258.9	254.5	140.8	113.6
15	1192.1	239.9	132.9	107.0
16	1264.4	255.6	141.5	114.2
17	1197.2	241.0	133.5	107.5
18	1269.8	256.8	142.1	114.7
19	1202.3	242.1	134.1	108.0
20	1275.2	258.0	142.8	115.2
21	1207.3	243.2	134.7	108.5
22	1280.6	259.2	143.4	115.8
23	1214.1	244.7	135.5	109.2
24	1287.0	260.6	144.1	116.4
25	1220.5	246.1	136.3	109.8
26	1292.2	261.7	144.8	116.9
27	1223.5	246.7	136.6	110.1
28	1294.8	262.3	145.1	117.2
29	1225.2	247.1	136.8	110.3
30	1297.0	262.8	145.3	117.4

31	1227.1	247.5	137.1	110.5
32	1299.5	263.3	145.6	117.7
33	1230.3	248.2	137.5	110.8
34	1302.9	264.0	146.0	118.0
35	1234.9	249.2	138.0	111.2
36	1307.3	265.0	146.5	118.5
37	1239.5	250.2	138.5	111.7
38	1311.7	266.0	147.1	118.9
39	1244.2	251.2	139.1	112.2
40	1316.2	266.9	147.6	119.3
41	1248.8	252.2	139.6	112.6
42	1324.3	268.7	148.6	120.2
43	1391.1	283.3	156.5	126.9
44	1580.0	324.8	178.8	146.0
45	1863.4	387.3	212.3	175.0
46	2668.4	567.1	307.4	259.7
47	4179.9	910.5	486.1	424.4

Tabella 2 – Valori di compressibilità uniassiale, di porosità, di indice dei vuoti, e dei parametri del MCCM lambda, ϵ_0 e κ per il modello geomeccanico di Donata, nello scenario Average Cm.

Materiale modello ISAMGEO	Cm in 1/bar	Porosità	Indice dei vuoti	λ	ϵ_0	$\kappa=\lambda/3$
1	LIVELLO ELASTICO LINEARE CON MODULO DI YOUNG = 1000 BAR					
2	1.26E-03	0.389	0.6371	0.0290	0.7137	0.0097
3	6.93E-04	0.375	0.5993	0.0260	0.6814	0.0087
4	4.22E-04	0.357	0.5544	0.0236	0.6389	0.0079
5	2.77E-04	0.335	0.5038	0.0215	0.5886	0.0072
6	2.02E-04	0.313	0.4563	0.0199	0.5403	0.0066
7	1.57E-04	0.292	0.4118	0.0186	0.4943	0.0062
8	1.27E-04	0.270	0.3699	0.0175	0.4508	0.0058
9	1.21E-04	0.270	0.3699	0.0174	0.4510	0.0058
10	1.12E-04	0.270	0.3699	0.0172	0.4513	0.0057
11	1.20E-04	0.270	0.3699	0.0174	0.4510	0.0058
12	1.11E-04	0.270	0.3699	0.0172	0.4513	0.0057
13	1.19E-04	0.270	0.3699	0.0174	0.4510	0.0058
14	1.11E-04	0.270	0.3699	0.0172	0.4513	0.0057
15	1.19E-04	0.270	0.3699	0.0174	0.4511	0.0058
16	1.10E-04	0.270	0.3699	0.0172	0.4513	0.0057
17	1.18E-04	0.270	0.3699	0.0174	0.4511	0.0058
18	1.09E-04	0.270	0.3699	0.0172	0.4513	0.0057
19	1.17E-04	0.270	0.3699	0.0174	0.4511	0.0058
20	1.09E-04	0.270	0.3699	0.0172	0.4514	0.0057
21	1.17E-04	0.270	0.3699	0.0173	0.4511	0.0058
22	1.08E-04	0.270	0.3699	0.0172	0.4514	0.0057
23	1.16E-04	0.270	0.3699	0.0173	0.4511	0.0058
24	1.07E-04	0.270	0.3699	0.0171	0.4514	0.0057
25	1.15E-04	0.270	0.3699	0.0173	0.4512	0.0058
26	1.07E-04	0.270	0.3699	0.0171	0.4514	0.0057

27	1.15E-04	0.270	0.3699	0.0173	0.4512	0.0058
28	1.07E-04	0.270	0.3699	0.0171	0.4514	0.0057
29	1.14E-04	0.270	0.3699	0.0173	0.4512	0.0058
30	1.06E-04	0.270	0.3699	0.0171	0.4514	0.0057
31	1.14E-04	0.270	0.3699	0.0173	0.4512	0.0058
32	1.06E-04	0.270	0.3699	0.0171	0.4514	0.0057
33	1.14E-04	0.270	0.3699	0.0173	0.4512	0.0058
34	1.06E-04	0.270	0.3699	0.0171	0.4514	0.0057
35	1.13E-04	0.270	0.3699	0.0173	0.4512	0.0058
36	1.05E-04	0.270	0.3699	0.0171	0.4515	0.0057
37	1.13E-04	0.270	0.3699	0.0173	0.4512	0.0058
38	1.05E-04	0.270	0.3699	0.0171	0.4515	0.0057
39	1.12E-04	0.270	0.3699	0.0172	0.4512	0.0057
40	1.04E-04	0.270	0.3699	0.0171	0.4515	0.0057
41	1.12E-04	0.270	0.3699	0.0172	0.4513	0.0057
42	1.04E-04	0.270	0.3699	0.0170	0.4515	0.0057
43	9.72E-05	0.270	0.3699	0.0169	0.4517	0.0056
44	4.13E-05	0.23	0.2987	0.0078	0.3377	0.0026
45	3.34E-05	0.18	0.2195	0.0071	0.2564	0.0024
46	2.11E-05	0.18	0.2195	0.0067	0.2567	0.0022
47	1.19E-05	0.1	0.1111	0.0056	0.1451	0.0019

Tabella 3 – Valori di compressibilità uniassiale, di porosità, di indice dei vuoti, e dei parametri del MCCM lambda, e_0 e κ per il modello geomeccanico di Donata, nello scenario Lower Cm

Materiale modello ISAMGEO	Cm in 1/bar	Porosità	Indice dei vuoti	λ	e_0	$\kappa=\lambda/3$
1	LIVELLO ELASTICO LINEARE CON MODULO DI YOUNG = 1000 BAR					
2	2.15E-04	0.389	0.6371	0.0049	0.6502	0.0016
3	1.18E-04	0.375	0.5993	0.0044	0.6133	0.0015
4	7.20E-05	0.357	0.5544	0.0040	0.5688	0.0013
5	4.73E-05	0.335	0.5038	0.0037	0.5182	0.0012
6	3.45E-05	0.313	0.4563	0.0034	0.4706	0.0011
7	2.68E-05	0.292	0.4118	0.0032	0.4259	0.0011
8	2.17E-05	0.270	0.3699	0.0030	0.3837	0.0010
9	2.06E-05	0.270	0.3699	0.0030	0.3837	0.0010
10	1.91E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3837	0.0010
11	2.05E-05	0.270	0.3699	0.0030	0.3837	0.0010
12	1.90E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3838	0.0010
13	2.03E-05	0.270	0.3699	0.0030	0.3837	0.0010
14	1.89E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3838	0.0010
15	2.02E-05	0.270	0.3699	0.0030	0.3837	0.0010
16	1.88E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3838	0.0010
17	2.01E-05	0.270	0.3699	0.0030	0.3837	0.0010
18	1.87E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3838	0.0010
19	2.00E-05	0.270	0.3699	0.0030	0.3837	0.0010
20	1.85E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3838	0.0010
21	1.99E-05	0.270	0.3699	0.0030	0.3837	0.0010
22	1.84E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3838	0.0010

23	1.98E-05	0.270	0.3699	0.0030	0.3837	0.0010
24	1.83E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3838	0.0010
25	1.96E-05	0.270	0.3699	0.0030	0.3837	0.0010
26	1.82E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3838	0.0010
27	1.96E-05	0.270	0.3699	0.0030	0.3837	0.0010
28	1.82E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3838	0.0010
29	1.95E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3837	0.0010
30	1.81E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3838	0.0010
31	1.95E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3837	0.0010
32	1.81E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3838	0.0010
33	1.94E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3837	0.0010
34	1.80E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3838	0.0010
35	1.93E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3837	0.0010
36	1.80E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3838	0.0010
37	1.92E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3837	0.0010
38	1.79E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3838	0.0010
39	1.91E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3837	0.0010
40	1.78E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3838	0.0010
41	1.91E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3837	0.0010
42	1.77E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3838	0.0010
43	1.66E-05	0.270	0.3699	0.0029	0.3838	0.0010
44	1.41E-05	0.23	0.2987	0.0027	0.3120	0.0009
45	1.14E-05	0.18	0.2195	0.0024	0.2321	0.0008
46	7.20E-06	0.18	0.2195	0.0023	0.2322	0.0008
47	4.07E-06	0.1	0.1111	0.0019	0.1227	0.0006

Tabella 4 – Valori di compressibilità uniassiale, di porosità, di indice dei vuoti, e dei parametri del MCCM λ , e_0 e κ per il modello geomeccanico di Donata, nello scenario Upper Cm.

Materiale modello ISAMGEO	Cm in 1/bar	Porosità	Indice dei vuoti	λ	e_0	$\kappa=\lambda/3$
1	LIVELLO ELASTICO LINEARE CON MODULO DI YOUNG = 1000 BAR					
2	1.85E-03	0.389	0.6371	0.0425	0.7494	0.0142
3	1.02E-03	0.375	0.5993	0.0381	0.7197	0.0127
4	6.18E-04	0.357	0.5544	0.0346	0.6782	0.0115
5	4.06E-04	0.335	0.5038	0.0315	0.6280	0.0105
6	2.96E-04	0.313	0.4563	0.0292	0.5793	0.0097
7	2.30E-04	0.292	0.4118	0.0273	0.5328	0.0091
8	1.86E-04	0.270	0.3699	0.0257	0.4885	0.0086
9	1.77E-04	0.270	0.3699	0.0255	0.4888	0.0085
10	1.64E-04	0.270	0.3699	0.0253	0.4891	0.0084
11	1.76E-04	0.270	0.3699	0.0255	0.4888	0.0085
12	1.63E-04	0.270	0.3699	0.0252	0.4892	0.0084
13	1.75E-04	0.270	0.3699	0.0255	0.4888	0.0085
14	1.62E-04	0.270	0.3699	0.0252	0.4892	0.0084
15	1.74E-04	0.270	0.3699	0.0255	0.4889	0.0085
16	1.61E-04	0.270	0.3699	0.0252	0.4892	0.0084
17	1.73E-04	0.270	0.3699	0.0254	0.4889	0.0085
18	1.60E-04	0.270	0.3699	0.0252	0.4893	0.0084



19	1.72E-04	0.270	0.3699	0.0254	0.4889	0.0085
20	1.59E-04	0.270	0.3699	0.0252	0.4893	0.0084
21	1.71E-04	0.270	0.3699	0.0254	0.4889	0.0085
22	1.58E-04	0.270	0.3699	0.0251	0.4893	0.0084
23	1.70E-04	0.270	0.3699	0.0254	0.4890	0.0085
24	1.57E-04	0.270	0.3699	0.0251	0.4893	0.0084
25	1.69E-04	0.270	0.3699	0.0254	0.4890	0.0085
26	1.57E-04	0.270	0.3699	0.0251	0.4894	0.0084
27	1.68E-04	0.270	0.3699	0.0253	0.4890	0.0084
28	1.56E-04	0.270	0.3699	0.0251	0.4894	0.0084
29	1.68E-04	0.270	0.3699	0.0253	0.4890	0.0084
30	1.56E-04	0.270	0.3699	0.0251	0.4894	0.0084
31	1.67E-04	0.270	0.3699	0.0253	0.4890	0.0084
32	1.56E-04	0.270	0.3699	0.0251	0.4894	0.0084
33	1.67E-04	0.270	0.3699	0.0253	0.4891	0.0084
34	1.55E-04	0.270	0.3699	0.0251	0.4894	0.0084
35	1.66E-04	0.270	0.3699	0.0253	0.4891	0.0084
36	1.54E-04	0.270	0.3699	0.0250	0.4894	0.0083
37	1.65E-04	0.270	0.3699	0.0253	0.4891	0.0084
38	1.54E-04	0.270	0.3699	0.0250	0.4894	0.0083
39	1.64E-04	0.270	0.3699	0.0253	0.4891	0.0084
40	1.53E-04	0.270	0.3699	0.0250	0.4895	0.0083
41	1.64E-04	0.270	0.3699	0.0253	0.4892	0.0084
42	1.52E-04	0.270	0.3699	0.0250	0.4895	0.0083
43	1.42E-04	0.270	0.3699	0.0248	0.4898	0.0083
44	1.21E-04	0.23	0.2987	0.0229	0.4130	0.0076
45	9.79E-05	0.18	0.2195	0.0209	0.3275	0.0070
46	6.19E-05	0.18	0.2195	0.0196	0.3285	0.0065
47	3.49E-05	0.1	0.1111	0.0165	0.2108	0.0055

2.4 Inizializzazione

2.4.1 Stato tensionale iniziale

L'andamento dello sforzo totale verticale è stato determinato a partire dalle interpretazioni di density e sonic log sonic registrati nei pozzi Donata 1 (441-2231 m TVDSS), Donata 2 (340-1557 m TVDSS), Donata 3 (357-1513 m TVDSS). Sulla base di tali informazioni è stato possibile ricavare la seguente relazione:

$$\sigma_v(z_{tvdss}) = \left[\frac{1668.2}{1.0405} (z_{tvdss} - z_{fm})^{1.0405} g + \rho_w g z_{fm} \right] \times 10^{-5} \quad (2-7)$$

dove σ_v è lo sforzo totale verticale (in bar), z_{tvdss} è la profondità (in metri) riferita al livello medio del mare, z_{fm} è la profondità (in metri) del fondo mare pari, in questo caso, a 84 m, ρ_w è la densità dell'acqua assunta pari a 1030 kg/m³ e g è l'accelerazione di gravità assunta pari a 9.807 m/sec².

Lo sforzo orizzontale σ'_h è stato inizializzato partendo da condizioni di tipo edometrico definite come:

$$\sigma'_h = K_0 \cdot \sigma'_v \quad (2-8)$$

dove K_0 rappresenta il coefficiente di spinta a riposo che è stato posto pari a 0.546 [5].

2.4.2 Pressioni iniziali

Per quanto concerne la parte del modello geomeccanico che rappresenta il reservoir e gli acquiferi circostanti, la pressione nel modello geomeccanico è stata introdotta importando punto per punto la pressione simulata nel modello fluidodinamico Eclipse.

La parte restante del modello geomeccanico (interlayers, sideburden, overburden ed underburden) richiede comunque valori di pressione per definire gli stress efficaci sulla base di quelli totali, che sono stati stimati sulla base dei dati disponibili per i livelli produttivi del campo.

2.5 Storia di pressione

La distribuzione tridimensionale di pressione e la sua evoluzione temporale, così come calcolata dal modello fluido-dinamico Eclipse, è stata importata nel modello ad elementi finiti. In particolare, le pressioni sono state importate ad intervalli annuali dall'inizio della produzione fino a 30 anni dal termine della stessa.

3 Risultati delle analisi eseguite con il modello elasto-plastico

Nel presente paragrafo sono riportati i risultati delle simulazioni eseguite al fine di stimare l'entità della subsidenza attesa dalla coltivazione del campo di Donata. Si ricorda che la simulazione è stata protratta a pozzi chiusi per circa 30 anni dopo la chiusura dei campi per analizzare l'impatto della depressurizzazione degli acquiferi idraulicamente connessi alla zona mineralizzata (si ricorda comunque che il campo presenta chiusura idraulica dei livelli in tutte le direzioni) e della redistribuzione delle pressioni in giacimento.

Le simulazioni effettuate con il modello ISAMGEO danno un'immagine molto chiara della possibile entità della subsidenza legata alla pianificata produzione di gas dal giacimento di Donata. I risultati delle previsioni di subsidenza dei due casi di produzione (Base e Doppio) e dei relativi scenari di compressibilità dei sedimenti sono riportati in Tabella 5 ed in Tabella 6. In particolare, sono riportati i valori di massima subsidenza e la minima distanza dalla linea di costa, calcolata come distanza della linea di iso-subsidenza dei 2cm dalla linea di costa stessa. Per entrambi i casi di produzione, le previsioni di subsidenza sono riportate alle seguenti date:

- 1 gennaio 2022
- 1 gennaio 2052.

Tabella 5 – Risultati finali: massima subsidenza e distanza della linea di iso-subsidenza dei 2 cm dalla linea di costa al 2022 e al 2052, per il caso Base.

Data	BASE - Lower		BASE - Average		BASE - Upper	
	Massima Subsidenza (cm)	Minima distanza dalla costa (km)	Massima Subsidenza (cm)	Minima distanza dalla costa (km)	Massima Subsidenza (cm)	Minima distanza dalla costa (km)
1-gen-2022	4	24.5	19	23.8	22	24.0
1-gen-2052	4	24.5	19	23.6	22	23.6

Tabella 6 – Risultati finali: massima subsidenza e distanza della linea di iso-subsidenza dei 2 cm dalla linea di costa al 2022 e al 2052, per il caso Doppio.

Data	DOPPIO - Lower		DOPPIO - Average		DOPPIO - Upper	
	Massima Subsidenza (cm)	Minima distanza dalla costa (km)	Massima Subsidenza (cm)	Minima distanza dalla costa (km)	Massima Subsidenza (cm)	Minima distanza dalla costa (km)
1-gen-2022	4	24.5	19	23.9	24	24.0
1-gen-2052	4	24.5	19	23.6	23	23.6

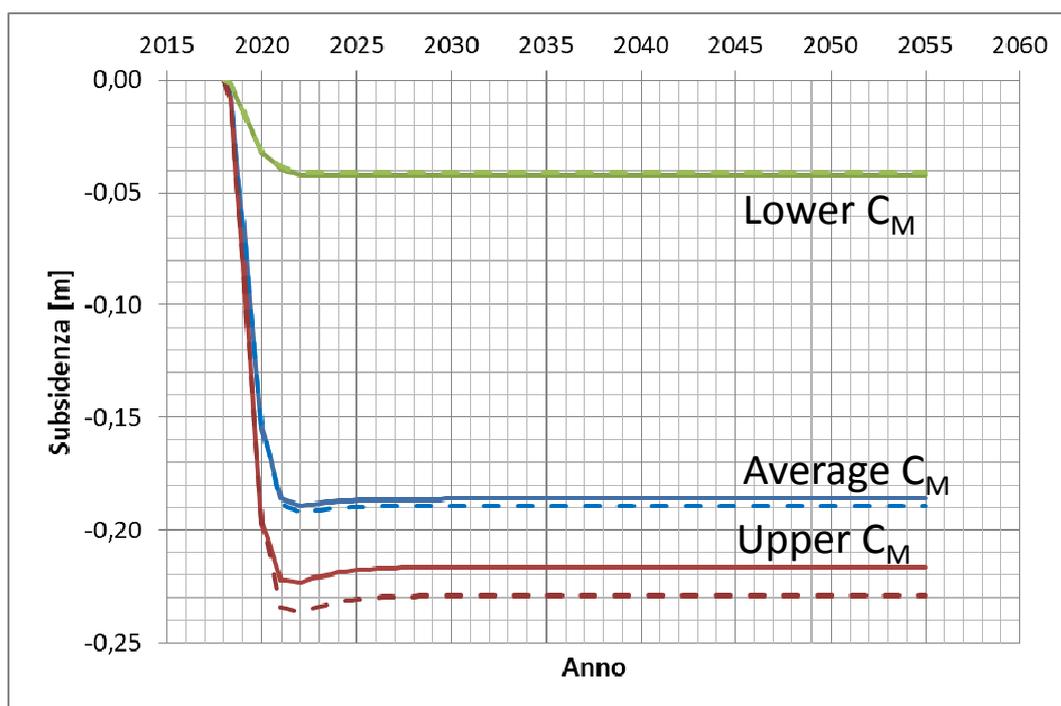


Figura 5 – Evoluzione temporale della subsidenza sul punto di massima subsidenza: confronto tra caso Base (linea continua) e Doppio (linea tratteggiata).

L'analisi dei risultati consente di osservare che:

- nello scenario geomeccanico più probabile, ovvero quello con valori di compressibilità pari al valore atteso (Average), la subsidenza massima è di circa 19 cm a fine produzione (2022), sia nel caso di produzione Base che in quello Doppio (Figura 5);
- la variazione della massima subsidenza, controllata dalla banda di confidenza dei valori di compressibilità, ricade tra 4 cm e 22 cm per il caso Base, tra 4 cm e 24 cm per il caso Doppio (Figura 5). La massima subsidenza si osserva nel 2022, ovvero a fine produzione, con un leggero rebound nel seguito;
- l'estensione della subsidenza, valutata sulla base della linea di livello pari a 2 cm, si attesta in tutti i casi molto prossima al giacimento, a causa della chiusura idraulica dei livelli in tutte le direzioni. La linea di iso-subsidenza dei 2 cm non si avvicina mai, per nessun caso di produzione e nessuno scenario di compressibilità, a meno di 23 km dalla costa delle Marche.

Di seguito sono presentate le mappe subsidenza a fine produzione e fine simulazione per tutte le analisi effettuate.

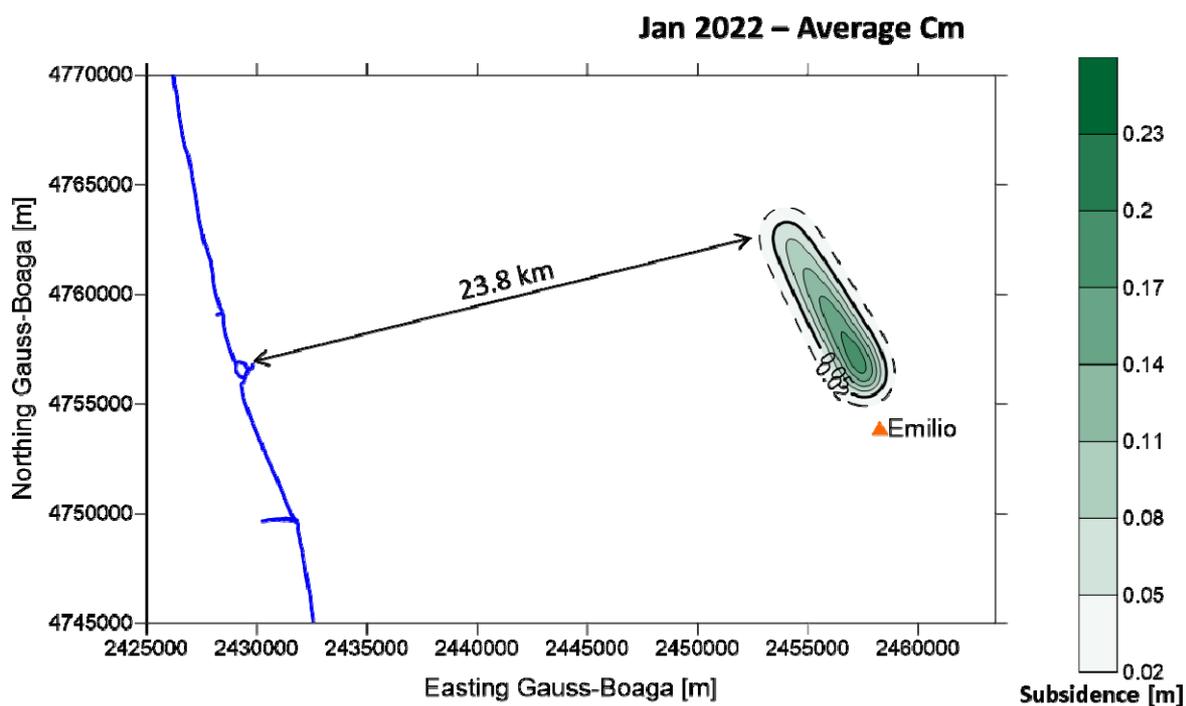


Figura 6 – Subsidenza prevista (in m) al 2022, caso Base scenario Average Cm

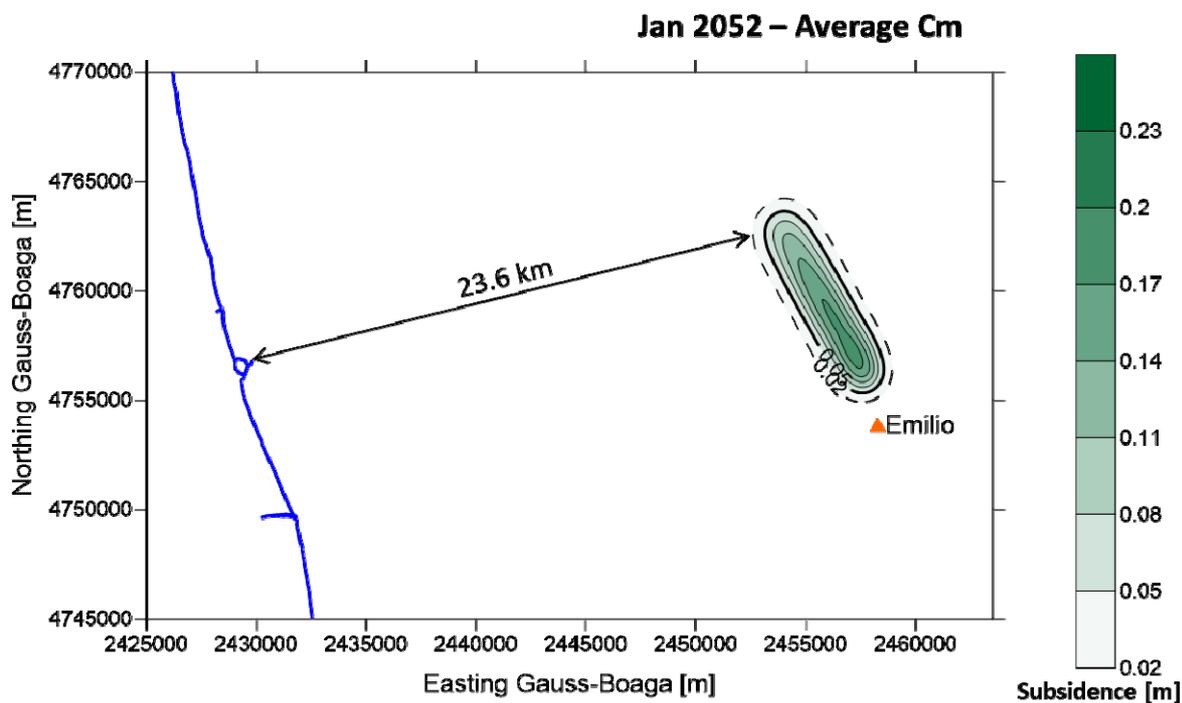


Figura 7 – Subsidenza prevista (in m) al 2052 (30 anni dopo fine della produzione), caso Base scenario Average Cm.

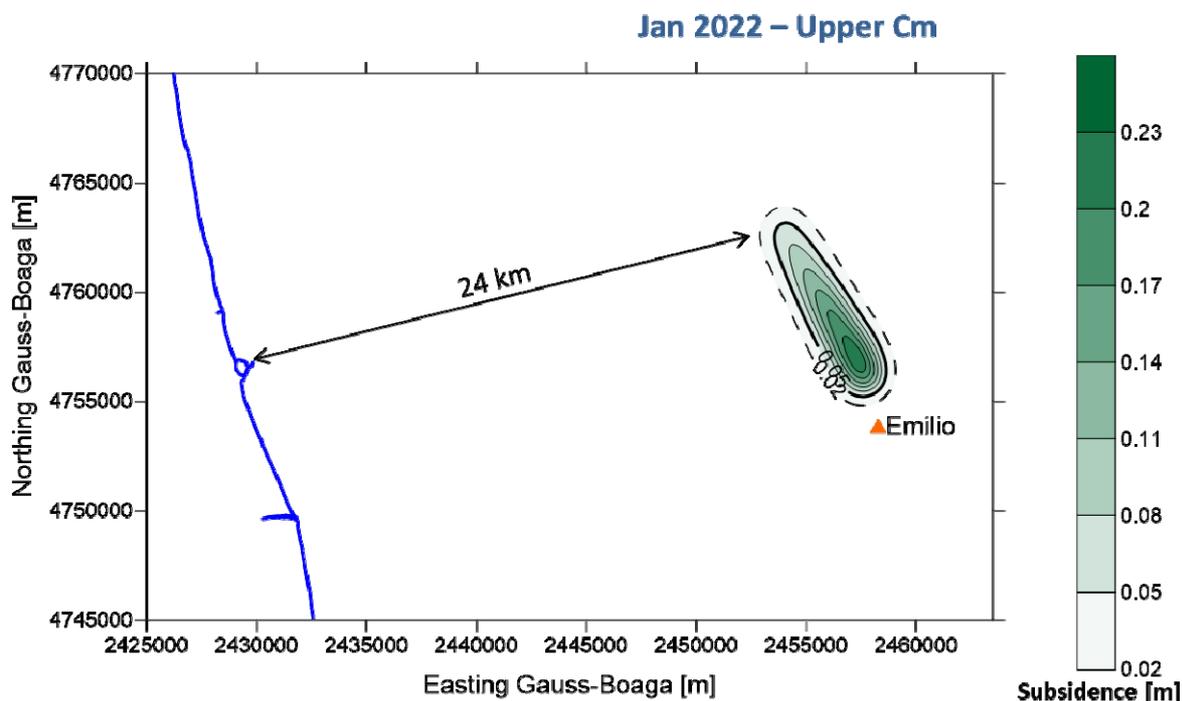


Figura 8 – Subsidenza prevista (in m) al 2022, caso Base scenario Upper Cm.

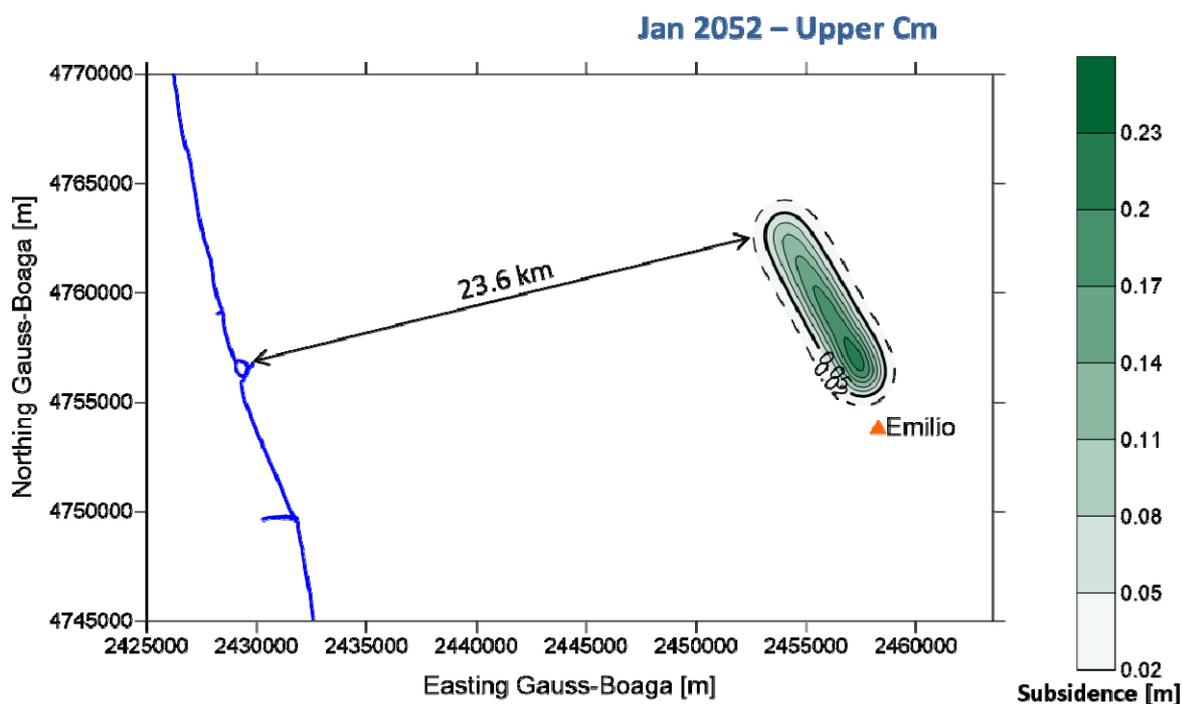


Figura 9 – Subsidenza prevista (in m) al 2052 (30 anni dopo la fine della produzione), caso Base scenario Upper Cm.

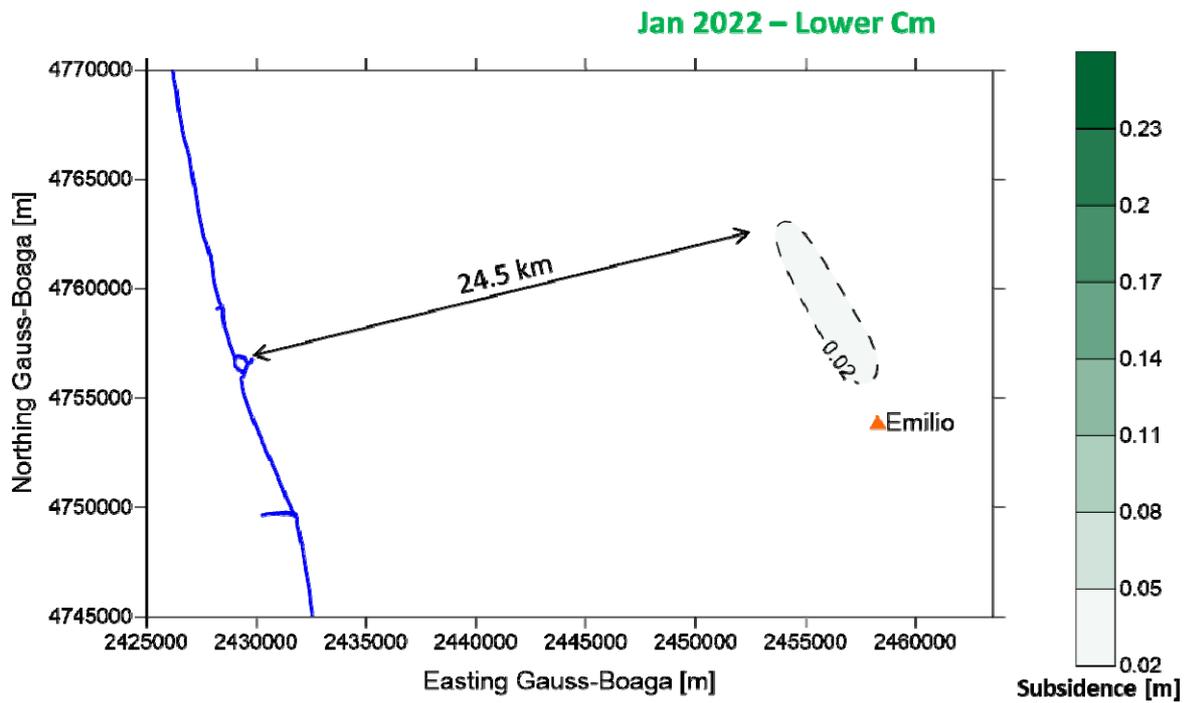


Figura 10 – Subsidenza prevista (in m) al 2022, caso Base scenario Lower Cm.

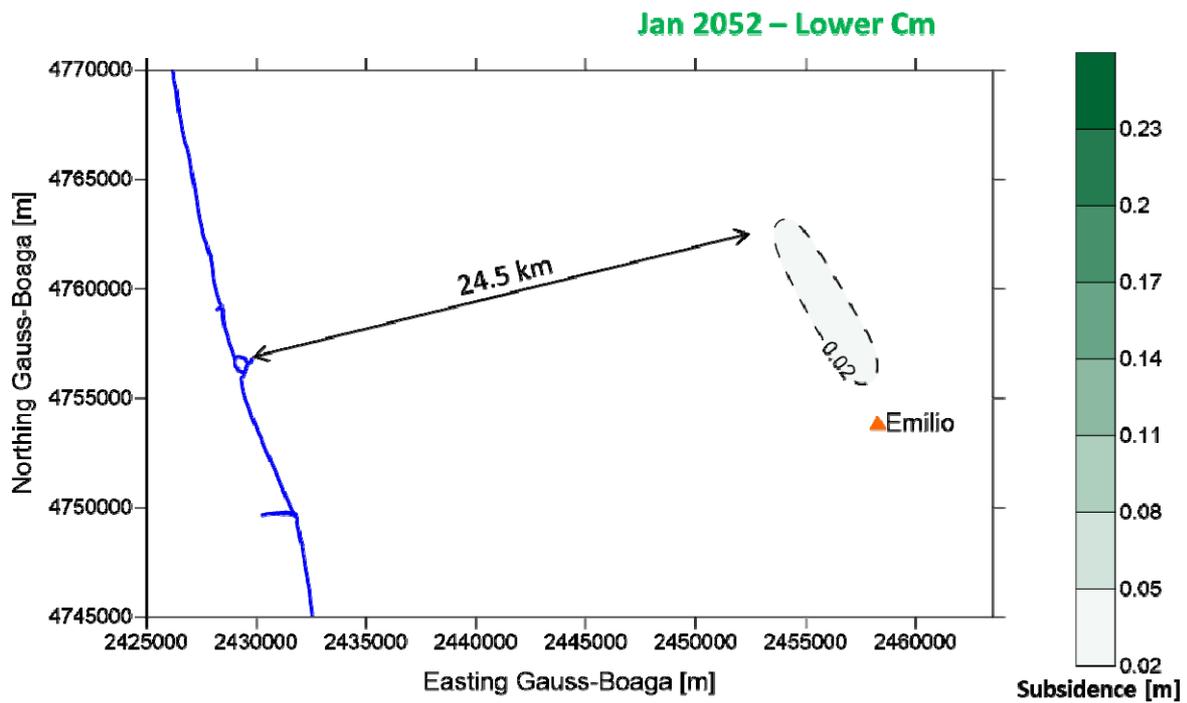


Figura 11 – Subsidenza prevista (in m) al 2052 (30 anni dopo la fine della produzione), caso Base scenario Lower Cm.

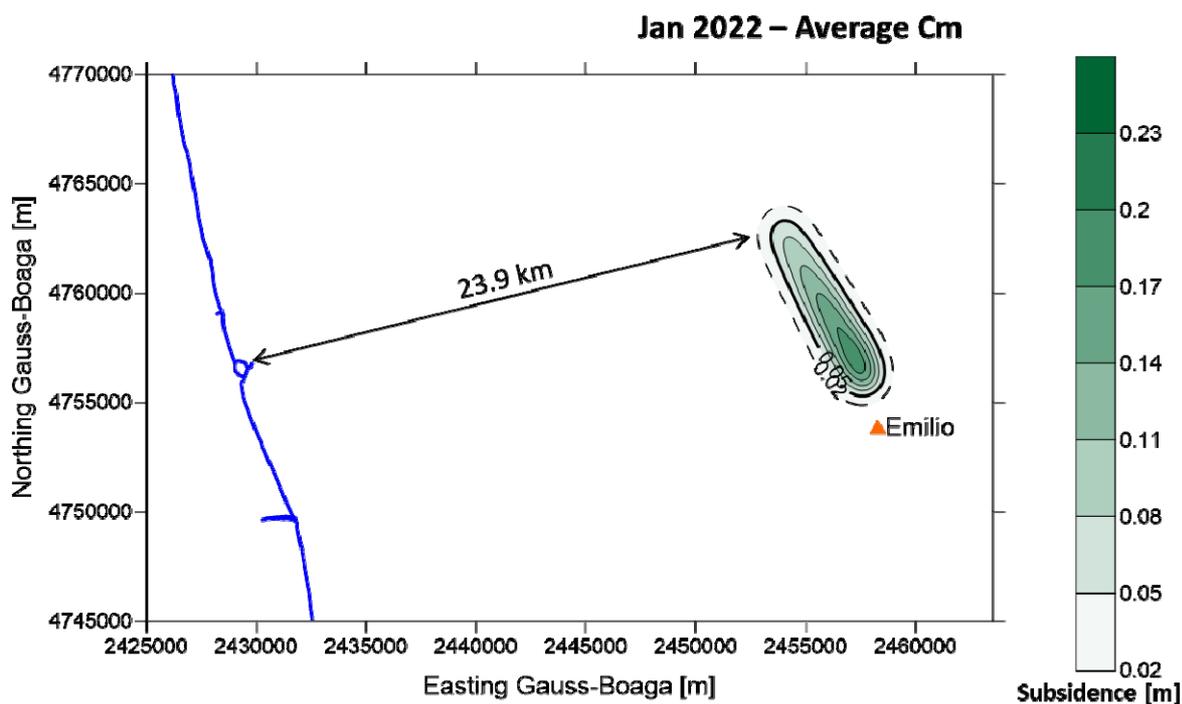


Figura 12 – Subsidenza prevista (in m) al 2022, caso Doppio scenario Average Cm.

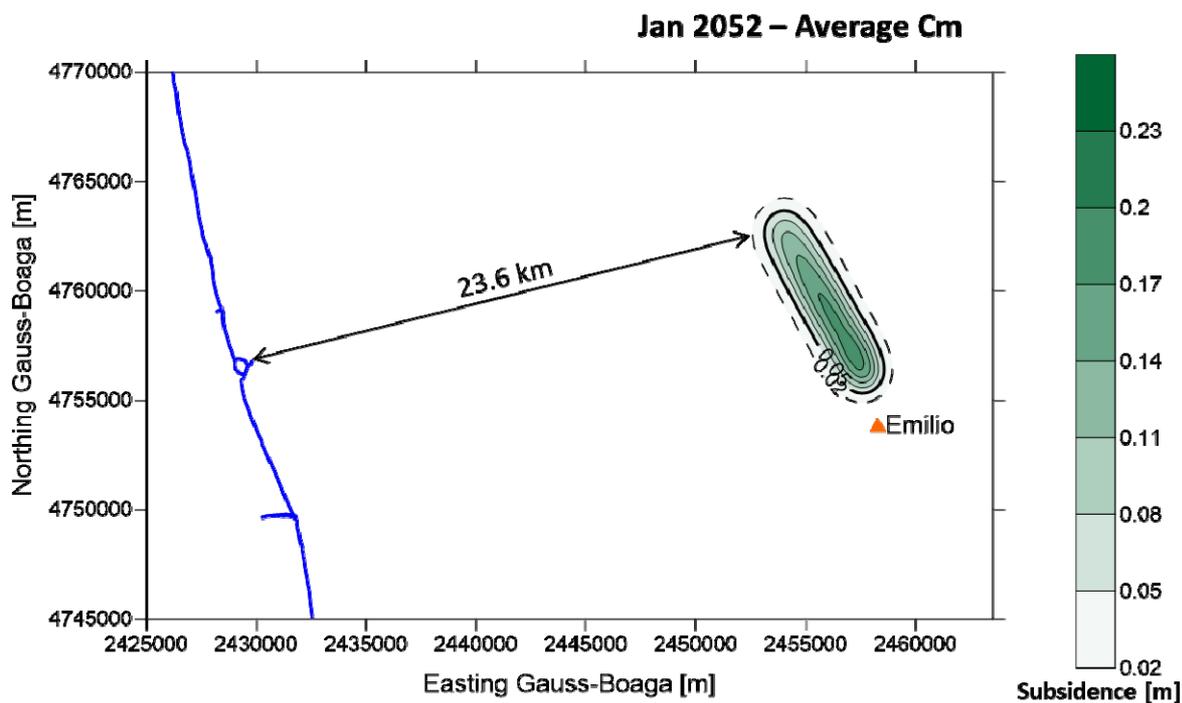


Figura 13 – Subsidenza prevista (in m) al 2052 (30 anni dopo fine della produzione), caso Doppio scenario Average Cm.

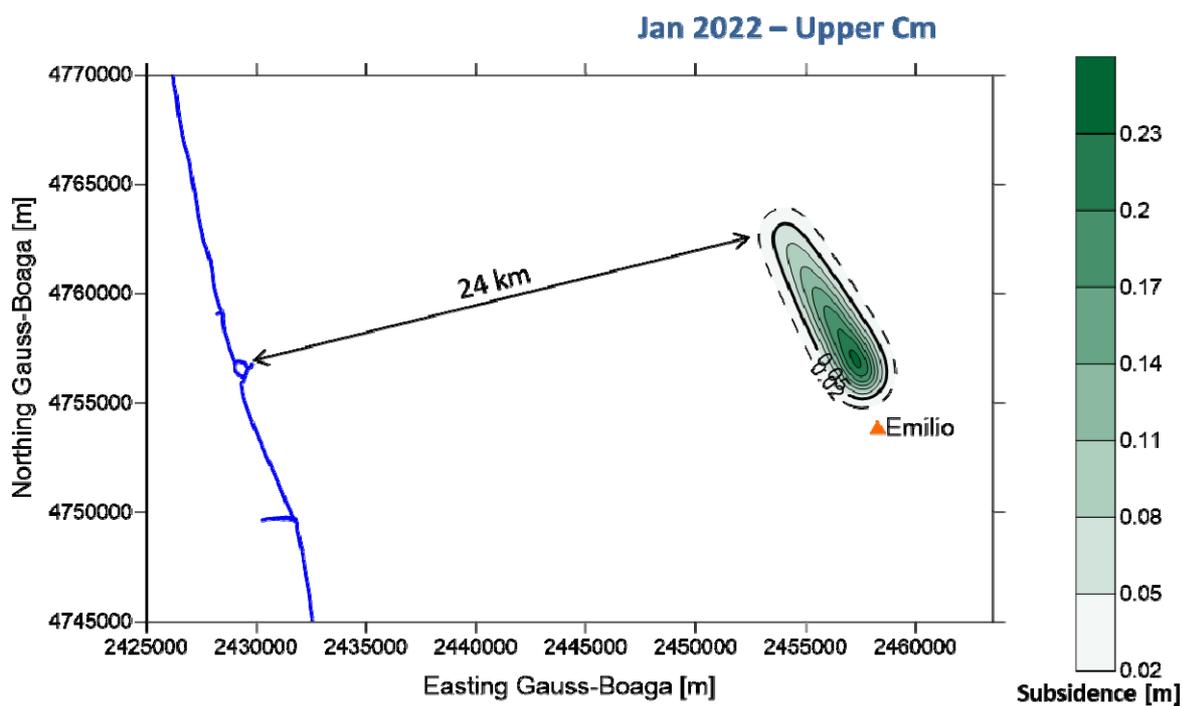


Figura 14 – Subsidenza prevista (in m) al 2022, caso Doppio scenario Upper Cm.

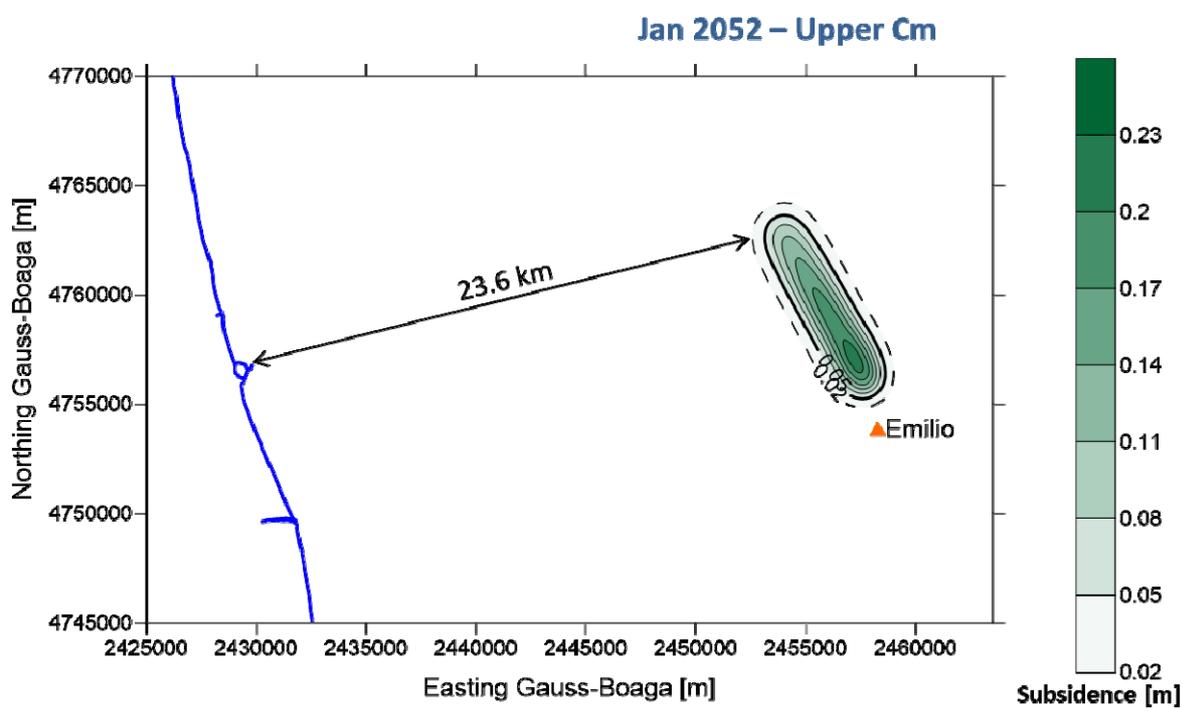


Figura 15 – Subsidenza prevista (in m) al 2052 (30 anni dopo fine della produzione), caso Doppio scenario Upper Cm.

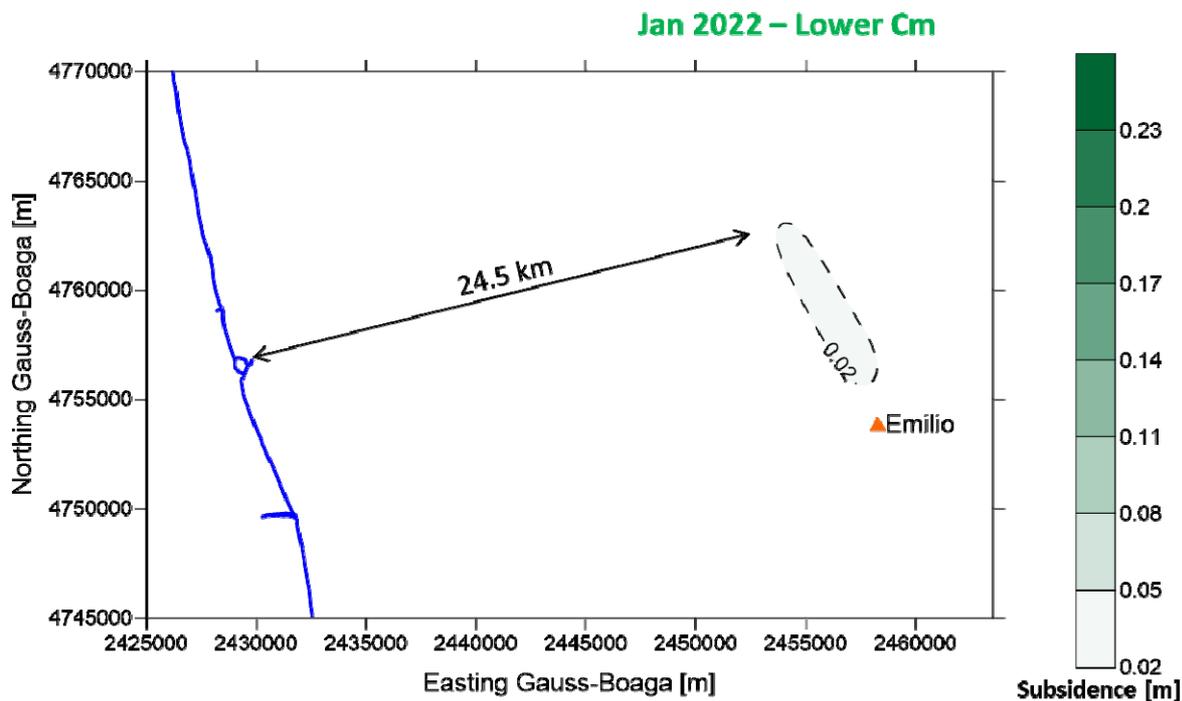


Figura 16 – Subsidenza prevista (in m) al 2022, caso Doppio scenario Lower Cm.

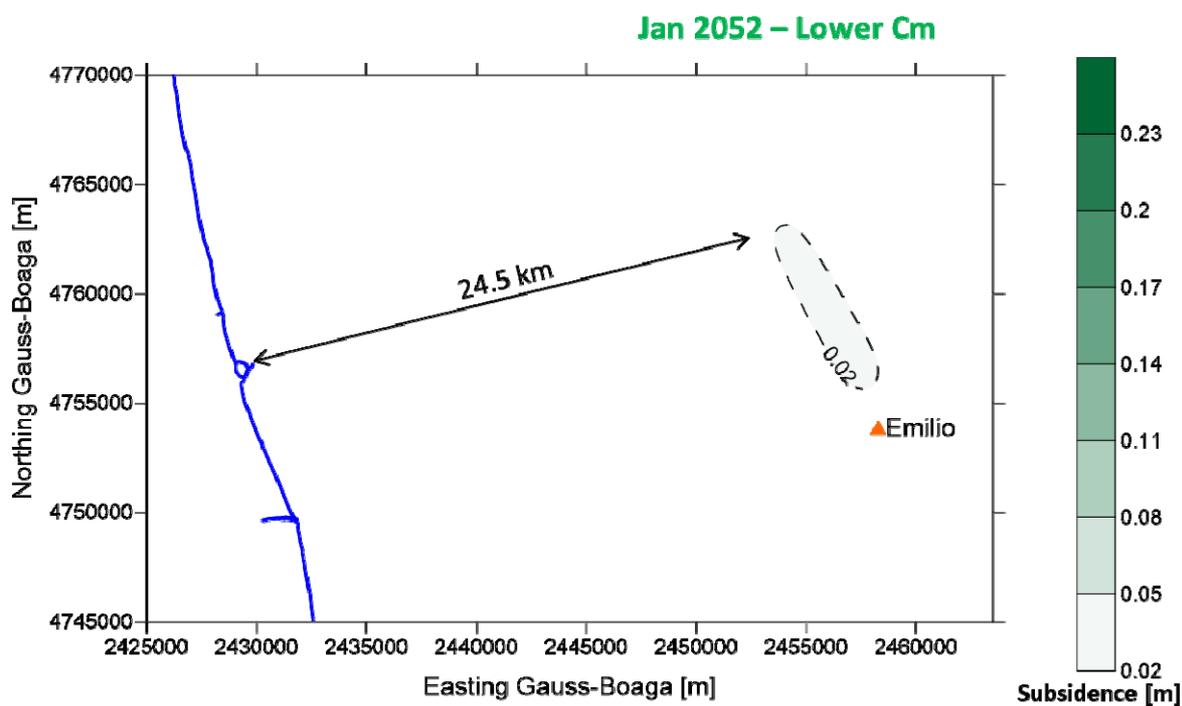


Figura 17 – Subsidenza prevista (in m) al 2052 (30 anni dopo fine della produzione), caso Doppio scenario Lower Cm.

4 Bibliografia

1. Eclipse™, Schlumberger, versione 2015.2.
2. D. Baù, M. Ferronato, G. Gambolati and P. Teatini: *Basin-scale compressibility of the northern Adriatic by the radioactive marker technique*. Géotechnique 52, No. 8, 605–616, 2002.
3. T. Hueckel, G. Cassiani, J.H. Prévost and D.A. Walters: *Field Derived Compressibility of Deep Sediments of the Northern Adriatic*. Land Subsidence, Special Volume, Proc. 7th Int. Symp. on Land Subsidence, Shanghai, 2005.
4. M. Ferronato, G. Gambolati, P. Teatini and D. Baù: *Interpretation of Radioactive Marker Measurements To Evaluate Compaction in the Northern Adriatic Gas Field*, SPE Evaluation & Engineering, December 2003. D. Baù, M. Ferronato, G. Gambolati and P. Teatini: *Basin-scale compressibility of the northern Adriatic by the radioactive marker technique*. Géotechnique 52, No. 8, 605–616, 2002.
5. F.J. Santarelli, M. Brignoli, A. Pellegrino: *La scelta del coefficiente di Poisson per formazioni a grande scala* - 04/1996.