



# Campi di Annabella e Annalisa

## Modello Elasto-Plastico di Subsidenza

### Management Summary

#### Executive Summary

Il presente rapporto illustra i risultati dello studio geomeccanico relativo ai campi di Annabella e Annalisa, effettuato con lo scopo di valutare quantitativamente la subsidenza indotta dall'attività estrattiva. Parametro chiave per la valutazione della subsidenza è la comprimibilità della roccia che è stata descritta attraverso una correlazione regionale con lo stress efficace *in situ*, derivata da misure di compattazione rilevate attraverso marker radioattivi in campi a gas del bacino nord Adriatico. Lo scenario corrispondente al quantile del 50% di tale correlazione (scenario medio) permette di riprodurre con elevata accuratezza i dati GPS disponibili su entrambi i campi. A fine simulazione cioè 30 anni dopo la fine della produzione, la massima subsidenza prevista risulta pari a circa 11 cm, mentre la distanza minima del fenomeno dalla linea di costa risulta superiore a 27 km.

**Data**  
**19/12/2022**



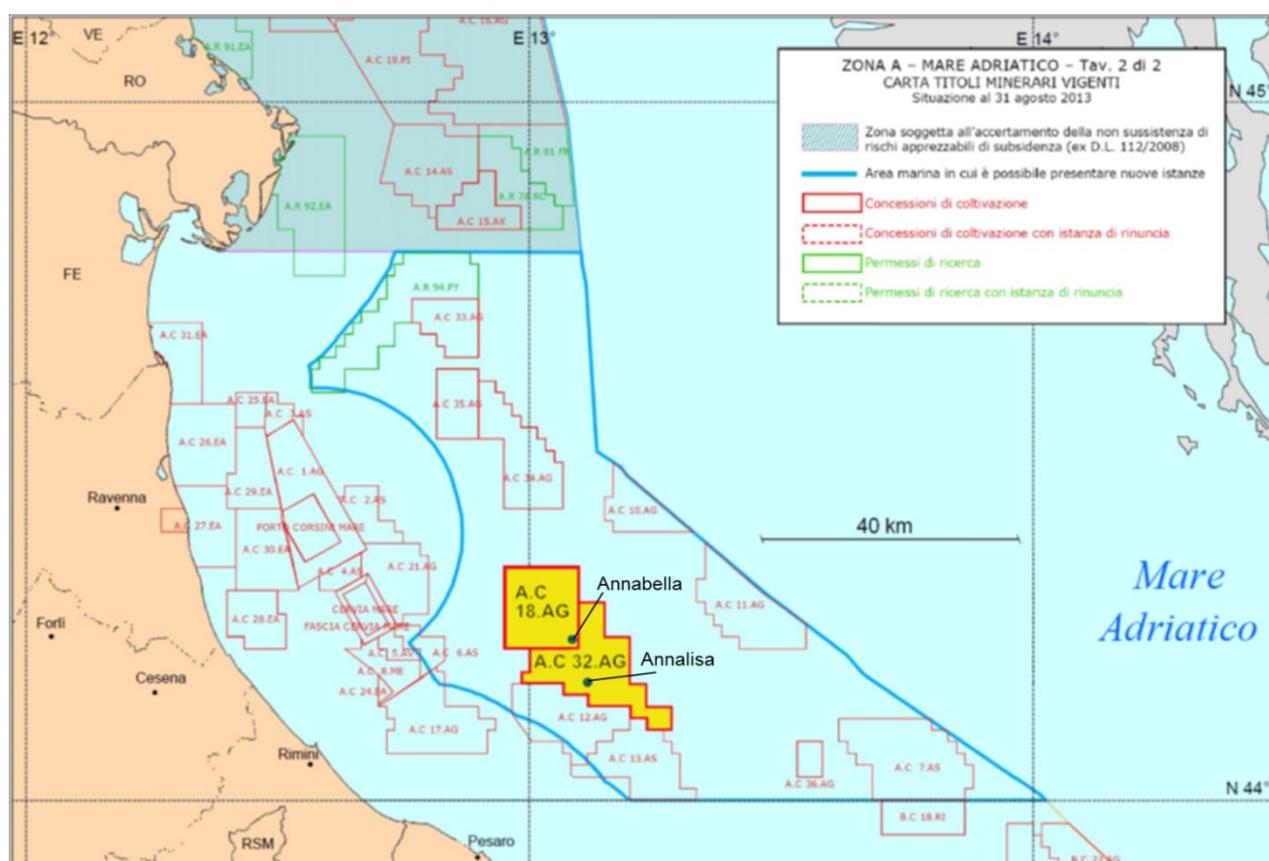
## Indice

1	Introduzione .....	3
2	Dati CGPS.....	5
2.1	Stazione CGPS di Annabella .....	5
2.2	Stazione CGPS di Annalisa.....	5
3	Modello geomeccanico agli elementi finiti.....	7
3.1	Approccio metodologico.....	7
3.2	Geometria del modello.....	7
3.3	Proprietà dei materiali .....	8
3.3.1	Densità della roccia .....	8
3.3.2	Peso specifico dei fluidi saturanti .....	8
3.3.3	Comprimibilità uniassiale .....	9
3.4	Inizializzazione e storia di pressione .....	15
3.4.1	Stato tensionale iniziale .....	15
3.4.2	Storia di pressione.....	15
4	Risultati delle analisi eseguite con il modello elasto-plastico.....	16
5	Confronto con i dati delle stazioni CGPS .....	19
	Bibliografia .....	21

# 1 Introduzione

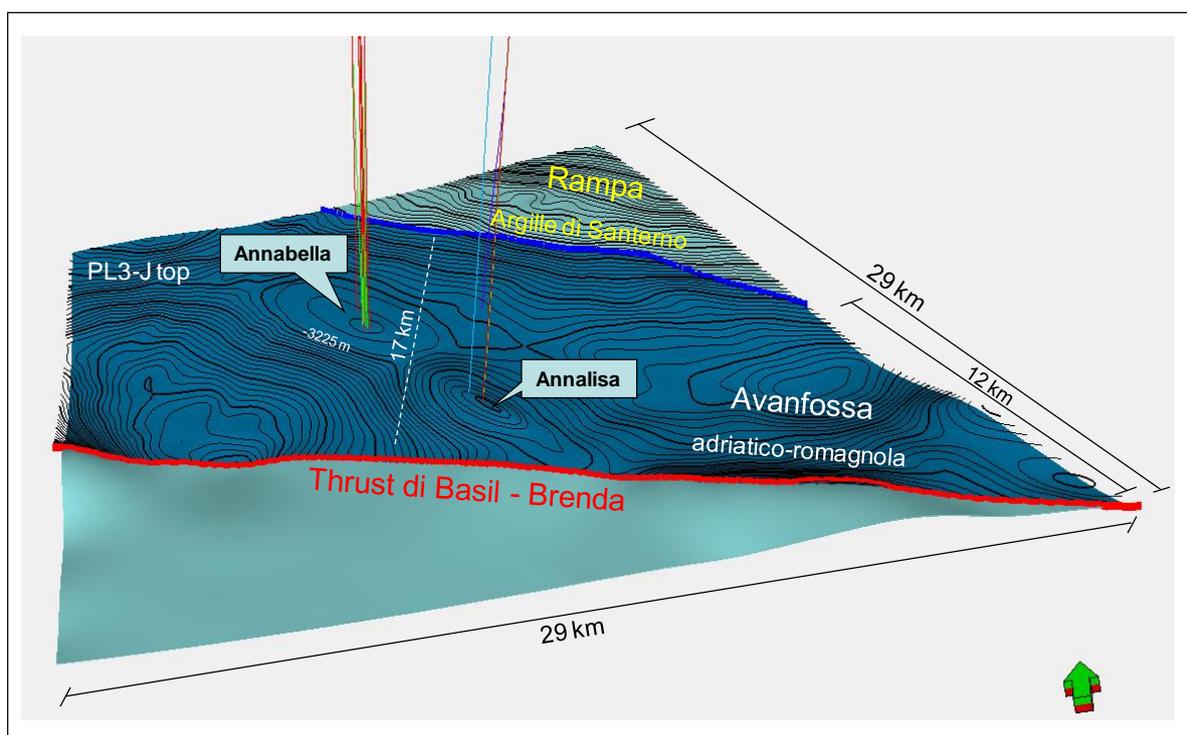
Il presente rapporto illustra i risultati dello studio geomeccanico relativo ai campi di Annabella ed Annalisa, effettuato con lo scopo di valutare quantitativamente la subsidenza indotta dalla coltivazione dei giacimenti. I campi di Annabella ed Annalisa si trovano nel bacino settentrionale del mare Adriatico e ricadono in due diverse concessioni di coltivazione, la A.C18.AG (scadenza in data 03/09/2027) per Annabella e la A.C32.AG per Annalisa (scadenza in data 30/11/2024), di cui Eni è operatore esclusivo (Figura 1) [1].

Le due piattaforme si trovano in direzione Nord-Est rispetto alla costa di Pesaro ad una distanza di circa 35 km. La profondità del fondale marino è di circa 52 m.



**Figura 1 – Ubicazione delle concessioni di coltivazione A.C18.AG ed A.C32.AG, e delle piattaforme Annabella ed Annalisa. La presente mappa è un’elaborazione dell’originale del Ministero dello Sviluppo Economico [1].**

La valutazione della subsidenza per i campi in esame è stata effettuata con un modello geomeccanico 3D ad elementi finiti (FE) costruito utilizzando il codice di calcolo Abaqus [2]; in tale modello le informazioni relative alla geometria del giacimento, le proprietà petrofisiche e l’evoluzione della pressione sono state ottenute dallo studio fluido-dinamico di giacimento realizzato con il codice di calcolo alle differenze finite (FD) Eclipse [3]. Tale modello è caratterizzato da mappe strutturali comprendenti entrambi i campi: infatti, in ragione della ridotta distanza tra essi (7 km), del loro assetto strutturale in relazione all’assetto geologico dell’area e della continuità laterale delle *facies* di ognuno di essi (Figura 2), nonché dell’assenza di faglie importanti nell’area, è ragionevole assumere che i due giacimenti siano in comunicazione idraulica attraverso l’acquifero interposto. Di conseguenza, anche il presente studio geomeccanico di subsidenza integra entrambi i campi di Annabella ed Annalisa.



**Figura 2 – Struttura geologica del giacimento Annabella- Annalisa.**

La produzione del giacimento Annabella è stata avviata nell'ottobre 1992 e la produzione cumulativa di gas al termine dell'history match (30 settembre 2022) è pari a 3909 MSm<sup>3</sup>, con *recovery factor* (RF) del 46%, dato un valore di *gas originally in place* (GOIP) dei soli livelli sviluppati pari a 8491 MSm<sup>3</sup>.

La produzione del giacimento Annalisa, invece, è stata avviata nel marzo 2000 e la produzione cumulativa di gas al 30 settembre 2022 è pari a 2044 MSm<sup>3</sup>, con RF del 40%, dato un valore di GOIP dei soli livelli sviluppati pari a 5163 MSm<sup>3</sup>.

È stato considerato un unico scenario di forecast corrispondente al do nothing in quanto non sono al momento previste azioni sui pozzi. In tale scenario, si prevede che la produzione terminerà a dicembre 2033 per il giacimento di Annabella (con una produzione cumulativa pari a 4264 MSm<sup>3</sup>) e ad agosto 2029 per il giacimento di Annalisa (con una produzione cumulativa pari a 2214 MSm<sup>3</sup>).

## 2 Dati CGPS

Sulle piattaforme di Annabella e Annalisa sono installate due stazioni GPS che registrano i dati di spostamento utilizzati per la calibrazione del modello geomeccanico.

### 2.1 Stazione CGPS di Annabella

La stazione CGPS è installata sulla piattaforma di produzione di Annabella in corrispondenza delle coordinate 2366570 m E, 4899010 m N. Il periodo di osservazione in cui sono stati analizzati i dati va dal 9 agosto 2007 al 30 aprile 2022 (Figura 3).

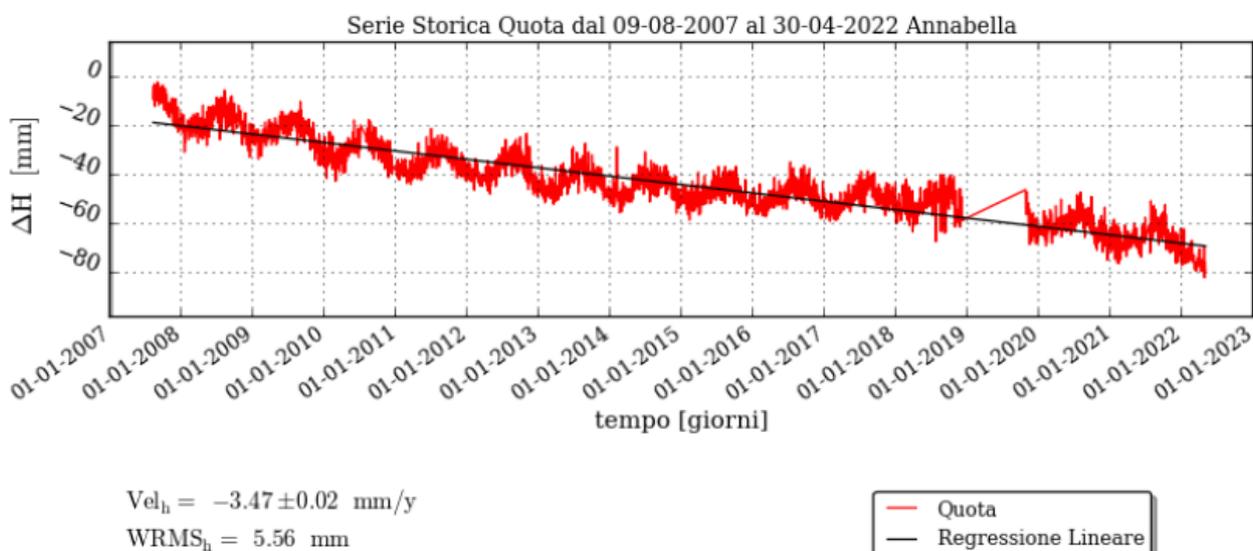
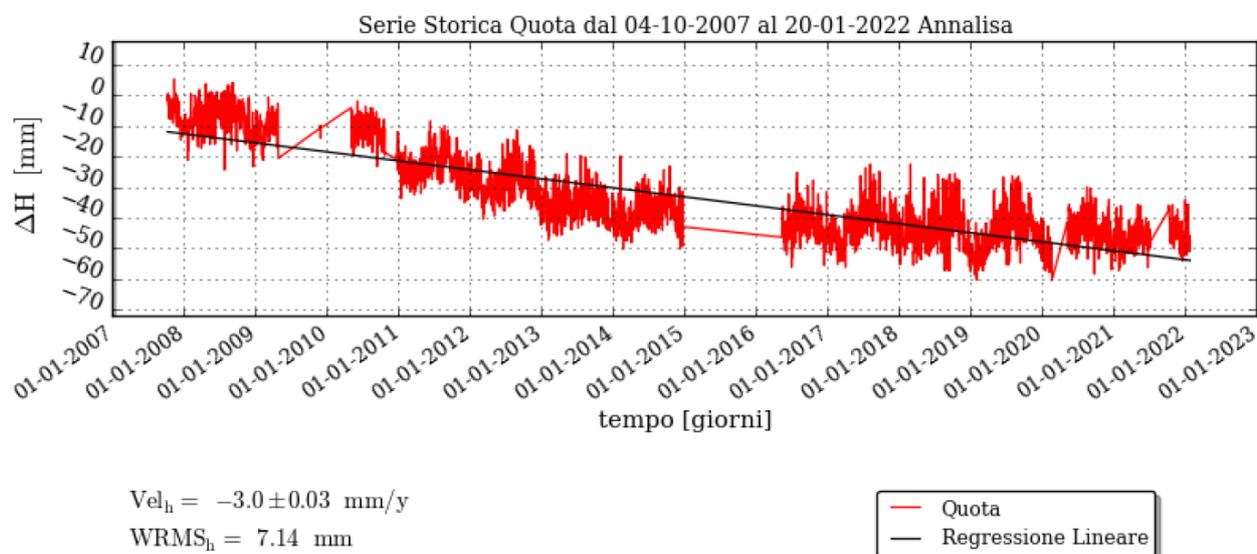


Figura 3 – Dati di spostamento verticale registrati dalla stazione CGPS di Annabella, aggiornati al 30/04/2022.

### 2.2 Stazione CGPS di Annalisa

La stazione CGPS è installata sulla piattaforma di produzione di Annalisa in corrispondenza delle coordinate 2369199 m E, 4892608 m N. Il periodo di osservazione in cui sono stati analizzati i dati va dal 4 ottobre 2007 al 20 gennaio 2022 (Figura 4).



**Figura 4 – Dati di spostamento verticale registrati dalla stazione CGPS di Annalisa, aggiornati al 20/01/2022.**

## 3 Modello geomeccanico agli elementi finiti

### 3.1 Approccio metodologico

Lo studio geomeccanico di subsidenza è stato condotto utilizzando il codice FE Abaqus. La costruzione del modello è stata basata sulle seguenti informazioni:

- mappe geologiche dei livelli interessati dal giacimento, estese in misura tale da descrivere interamente non solo le zone mineralizzate ma anche gli acquiferi laterali idraulicamente connessi agli strati produttivi;
- descrizione dettagliata di geometria e geologia dei livelli mineralizzati e degli acquiferi ad essi connessi idraulicamente, riprodotti con accuratezza dalla maglia di calcolo numerica;
- distribuzione di pressione nei livelli mineralizzati e negli acquiferi connessi, calcolata con un modello di flusso 3D Eclipse [4]. Lo studio fluido-dinamico di giacimento è stato comunque protratto per 30 anni oltre la fine della produzione, in modo da considerare l'effetto della successiva evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero;
- descrizione della risposta meccanica della roccia con una legge costitutiva del tipo Cam Clay Modificato, che tiene conto non solo della variazione della comprimibilità 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 basato sullo spessore *gross* degli stessi e sulla più aggiornata stima della comprimibilità uniassiale, ottenuta da misure in situ effettuate nei pozzi equipaggiati con markers nell'offshore adriatico.

### 3.2 Geometria del modello

Il modello Eclipse [4] è composto da 332x400x273 celle nelle direzioni I, J e K rispettivamente, per un totale di oltre 36 milioni di celle, di cui quasi 11 milioni attive.

Considerato che il modello FE deve essere ulteriormente esteso, è stato necessario effettuare un processo di *upscaling* per limitare il numero dei gradi di libertà.

Per la zona del giacimento, nel modello Abaqus sono stati accorpati verticalmente strati adiacenti inattivi e strati attivi a depressurizzazione nulla. Un ulteriore processo di *upscaling* è stato attuato in direzione orizzontale, unendo tra loro un differente numero di celle a seconda del grado di saturazione a gas.

Il modello fluido-dinamico interessa un'area di circa 55x65 km<sup>2</sup> e a partire dalla sua geometria è stata creata una griglia FE che, per non risentire dell'influenza delle condizioni al contorno imposte ai bordi, è stata estesa (*sideburden*) fino a ricoprire un'area di circa 76x76 km<sup>2</sup>.

Il modello complessivo (Figura 5) risulta suddiviso in 208 layer, dal fondo mare fino ad una profondità di 6000 m, per un totale di 1491120 elementi, 1534533 nodi e 5578628 gradi di libertà.

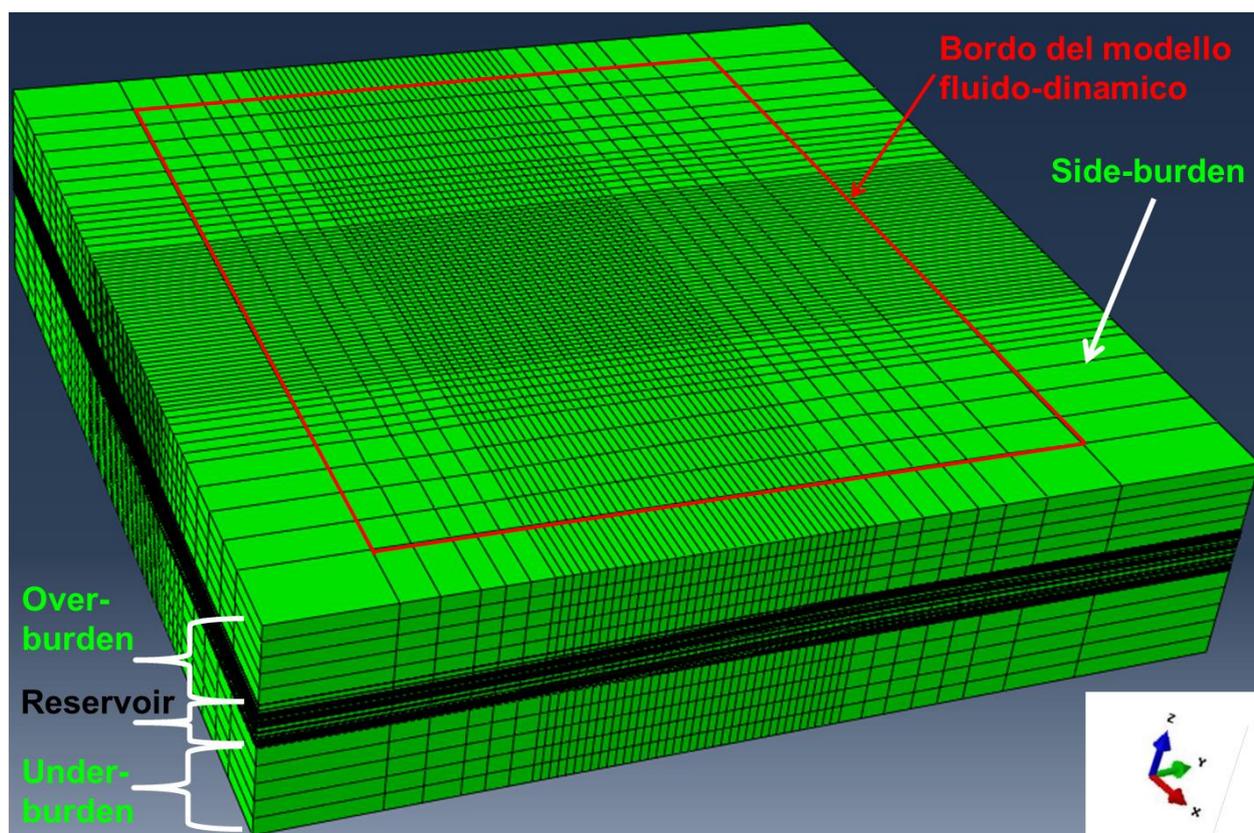


Figura 5 – Estensione del modello geomeccanico (il riquadro rosso indica l'estensione del modello Eclipse).

Le condizioni al contorno assegnate al modello sono di spostamento nullo alla base e spostamento orizzontale impedito ai lati.

### 3.3 Proprietà dei materiali

#### 3.3.1 Densità della roccia

Per mezzo dei *density logs* registrati in cinque pozzi, tre di Annabella (1R, 2R e 7R) e due di Annalisa (1R e 2R), è stato possibile ricavare la seguente relazione tra la densità  $\rho$  del mezzo poroso e la profondità  $z$ :

$$\rho(z) = 1.4142 \cdot (z - z_{fm})^{0.0628} \quad (1)$$

con  $z$  misurata in metri TVDSS (True Vertical Depth Sub Sea) e  $\rho$  in  $\text{g/cm}^3$ , mentre la profondità del fondale marino  $z_{fm}$  è pari a 52 m. Per la densità dell'acqua marina è stato assunto il valore di  $1030.0 \text{ kg/m}^3$ . La relazione (1) è stata implementata in forma tabulare nel modello numerico ed è stata utilizzata per il calcolo della tensione verticale totale  $\sigma_v$ .

#### 3.3.2 Peso specifico dei fluidi saturanti

Viene fornito al modello FE il valore del peso specifico dei fluidi saturanti. Per ogni regione idromeccanica il valore di  $\gamma_f$  (relativo al gas o all'acqua) è stato considerato costante. Esso è stato

determinato partendo dalla profondità del contatto gas-acqua e dalla distribuzione iniziale delle pressioni calcolata dai modelli Eclipse.

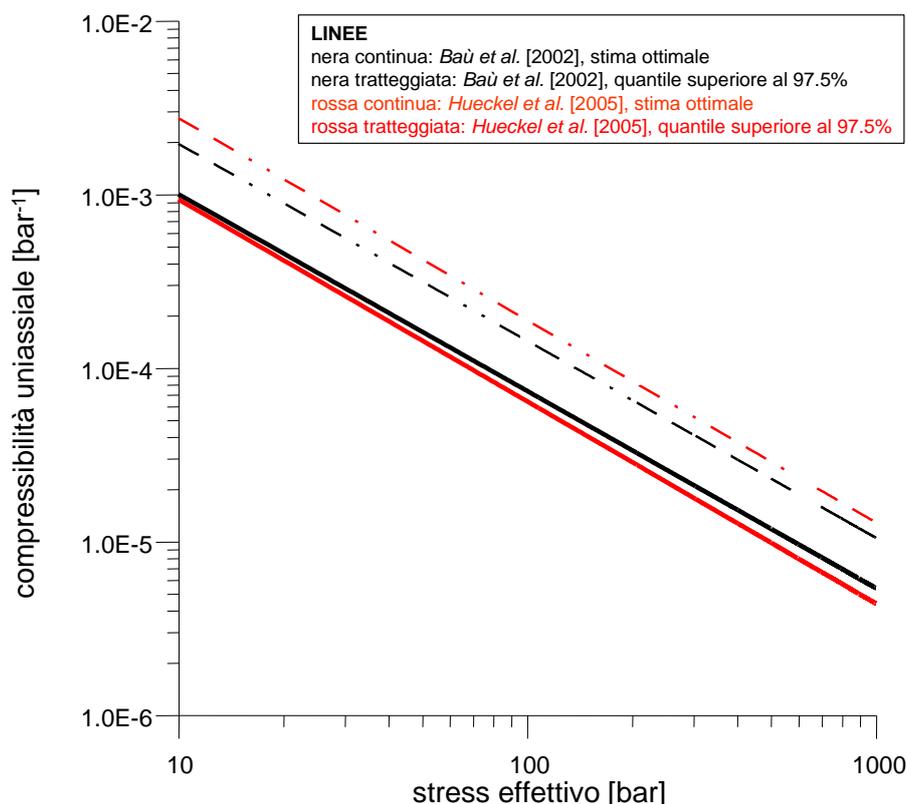
### 3.3.3 Comprimibilità uniassiale

Il parametro geomeccanico chiave nelle simulazioni di subsidenza è la comprimibilità uniassiale  $c_m$  del materiale. È oggi comunemente accettato [5] che i valori più attendibili di questo parametro, generalmente funzione non lineare dello stress efficace, siano quelli ottenuti dalle misure *in situ* tramite markers.

Si è, quindi, utilizzata per la stima della comprimibilità una correlazione regionale ricavata da uno studio statistico basato sui valori di comprimibilità calcolati su campi dell'Adriatico dotati di marker radioattivi. Tale correlazione tra  $c_m$  e tensione verticale efficace  $\sigma'_v$  è stata proposta da Hueckel *et al.* [6] ed è riportata in Figura 6 ove sono rappresentate la miglior stima

$$C_m = 0.01367 \cdot \sigma'_v{}^{-1.16434} \quad (2)$$

ed il quantile superiore al 97.5%. Nella relazione (2)  $\sigma'_v$  è la tensione efficace verticale espressa in bar e  $c_m$  è espresso in  $\text{bar}^{-1}$ . Inoltre, in Figura 6 la relazione di Hueckel *et al.* [6] è messa a confronto con quella di Baù *et al.* [5]; si può osservare come le due risultino analoghe.



**Figura 6 – Correlazione tra la comprimibilità uniassiale  $c_m$  e lo stress efficace *in situ*, derivata da misure su marker nei campi a gas del bacino nord Adriatico (da [6]).**

La relazione (2) è stata utilizzata per la caratterizzazione geomeccanica dei materiali.

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

I valori di tensione verticale efficace necessari per le stime di  $c_m$  nell'equazione (2) sono stati calcolati tramite:

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

dove  $\sigma_v$  è la tensione verticale totale e  $p$  la pressione dei pori. Quest'ultima è stata estratta dallo studio fluido-dinamico alla profondità di riferimento, mentre  $\sigma_v$  è stata calcolata a partire dalla densità del materiale come riportato nel paragrafo 3.3.1.

In Tabella 1, Tabella 2 e Tabella 3 sono riportate le proprietà meccaniche delle 5 regioni di over-burden, delle 5 regioni di under-burden e delle 208 regioni meccaniche in cui è suddiviso il giacimento.

**Tabella 1 – Proprietà assegnate alle 5 regioni di over-burden.**

Region #	Depth m	Cm 1/bar	$\nu$ -	E kPa
OB1	273.9	4.65E-04	0.3	160
OB2	694.8	1.14E-04	0.3	651
OB3	1115.5	5.89E-05	0.3	1260
OB4	1536.5	3.81E-05	0.3	1950
OB5	1957.5	2.75E-05	0.3	2703

**Tabella 2 – Proprietà assegnate alle 5 regioni di under-burden.**

Region #	Depth m	Cm 1/bar	$\nu$ -	E kPa
UB1	3506	1.27E-05	0.3	5867
UB2	4055.5	1.05E-05	0.3	7108
UB3	4605.5	8.84E-06	0.3	8402
UB4	5155	7.63E-06	0.3	9742
UB5	5705	6.68E-06	0.3	11126

**Tabella 3 – Proprietà assegnate alle 208 regioni di giacimento.**

Region #	Cm 1/bar	$\lambda$ -	$\nu$ -	E kPa
1	2.72E-05	7.68E-03	0.3	2732
2	2.72E-05	7.68E-03	0.3	2732
3	2.71E-05	7.67E-03	0.3	2742
4	2.71E-05	7.67E-03	0.3	2742
5	2.61E-05	7.63E-03	0.3	2844
6	2.61E-05	7.63E-03	0.3	2844
7	2.48E-05	7.58E-03	0.3	2997
8	2.48E-05	7.58E-03	0.3	2997
9	2.51E-05	7.59E-03	0.3	2963



10	2.51E-05	7.59E-03	0.3	2963
11	2.49E-05	7.58E-03	0.3	2984
12	2.49E-05	7.58E-03	0.3	2984
13	2.44E-05	7.56E-03	0.3	3042
14	2.44E-05	7.56E-03	0.3	3042
15	2.44E-05	7.56E-03	0.3	3050
16	2.44E-05	7.56E-03	0.3	3050
17	2.36E-05	6.96E-03	0.3	3144
18	2.36E-05	6.96E-03	0.3	3144
19	2.36E-05	6.96E-03	0.3	3144
20	2.39E-05	7.54E-03	0.3	3107
21	2.39E-05	7.54E-03	0.3	3107
22	2.35E-05	7.52E-03	0.3	3164
23	2.35E-05	7.52E-03	0.3	3164
24	2.37E-05	7.53E-03	0.3	3134
25	2.37E-05	7.53E-03	0.3	3134
26	2.37E-05	7.43E-03	0.3	3138
27	2.37E-05	7.43E-03	0.3	3138
28	2.36E-05	7.43E-03	0.3	3143
29	2.36E-05	7.43E-03	0.3	3143
30	2.36E-05	7.42E-03	0.3	3152
31	2.36E-05	7.42E-03	0.3	3152
32	2.34E-05	7.42E-03	0.3	3170
33	2.34E-05	7.42E-03	0.3	3170
34	2.35E-05	7.42E-03	0.3	3160
35	2.35E-05	7.42E-03	0.3	3160
36	2.34E-05	7.42E-03	0.3	3180
37	2.34E-05	7.42E-03	0.3	3180
38	2.31E-05	7.21E-03	0.3	3222
39	2.31E-05	7.21E-03	0.3	3222
40	2.30E-05	7.40E-03	0.3	3237
41	2.30E-05	7.40E-03	0.3	3237
42	2.27E-05	6.92E-03	0.3	3272
43	2.27E-05	6.92E-03	0.3	3272
44	2.25E-05	7.19E-03	0.3	3295
45	2.25E-05	7.19E-03	0.3	3295
46	2.24E-05	7.37E-03	0.3	3314
47	2.24E-05	7.37E-03	0.3	3314
48	2.26E-05	7.69E-03	0.3	3291
49	2.26E-05	7.69E-03	0.3	3291
50	2.25E-05	7.48E-03	0.3	3295
51	2.25E-05	7.48E-03	0.3	3295
52	2.23E-05	7.67E-03	0.3	3336
53	2.23E-05	7.67E-03	0.3	3336
54	2.22E-05	7.57E-03	0.3	3341
55	2.22E-05	7.56E-03	0.3	3344
56	2.22E-05	7.56E-03	0.3	3344
57	2.22E-05	7.46E-03	0.3	3350
58	2.22E-05	7.46E-03	0.3	3350



59	2.22E-05	7.46E-03	0.3	3350
60	2.13E-05	7.42E-03	0.3	3489
61	2.12E-05	7.41E-03	0.3	3498
62	2.12E-05	7.41E-03	0.3	3498
63	2.12E-05	7.32E-03	0.3	3501
64	2.12E-05	7.32E-03	0.3	3501
65	2.12E-05	7.31E-03	0.3	3502
66	2.12E-05	7.31E-03	0.3	3502
67	2.11E-05	7.31E-03	0.3	3527
68	2.11E-05	7.31E-03	0.3	3527
69	2.07E-05	7.29E-03	0.3	3594
70	2.07E-05	7.29E-03	0.3	3594
71	2.09E-05	7.40E-03	0.3	3546
72	2.09E-05	7.40E-03	0.3	3546
73	2.10E-05	7.40E-03	0.3	3544
74	2.10E-05	7.40E-03	0.3	3544
75	2.10E-05	7.11E-03	0.3	3538
76	2.10E-05	7.11E-03	0.3	3538
77	2.10E-05	7.11E-03	0.3	3543
78	2.10E-05	7.11E-03	0.3	3543
79	2.06E-05	7.10E-03	0.3	3602
80	2.06E-05	7.10E-03	0.3	3602
81	2.08E-05	7.39E-03	0.3	3571
82	2.08E-05	7.39E-03	0.3	3571
83	2.01E-05	7.26E-03	0.3	3699
84	2.01E-05	7.26E-03	0.3	3699
85	2.03E-05	7.27E-03	0.3	3666
86	2.03E-05	7.27E-03	0.3	3666
87	1.98E-05	7.25E-03	0.3	3747
88	1.98E-05	7.25E-03	0.3	3747
89	1.98E-05	7.24E-03	0.3	3749
90	1.98E-05	7.24E-03	0.3	3749
91	2.00E-05	7.26E-03	0.3	3711
92	2.00E-05	7.26E-03	0.3	3711
93	1.98E-05	7.24E-03	0.3	3752
94	1.98E-05	7.24E-03	0.3	3752
95	1.97E-05	6.87E-03	0.3	3763
96	1.97E-05	6.87E-03	0.3	3763
97	1.95E-05	6.86E-03	0.3	3806
98	1.98E-05	6.79E-03	0.3	3753
99	1.98E-05	6.79E-03	0.3	3753
100	1.98E-05	6.79E-03	0.3	3753
101	1.95E-05	6.78E-03	0.3	3804
102	1.95E-05	6.78E-03	0.3	3804
103	1.95E-05	6.78E-03	0.3	3809
104	1.95E-05	6.78E-03	0.3	3809
105	1.95E-05	6.45E-03	0.3	3818
106	1.85E-05	7.08E-03	0.3	4025
107	1.85E-05	7.08E-03	0.3	4025



108	1.86E-05	7.09E-03	0.3	3995
109	1.86E-05	7.09E-03	0.3	3995
110	1.88E-05	6.74E-03	0.3	3959
111	1.88E-05	6.74E-03	0.3	3959
112	1.87E-05	6.74E-03	0.3	3973
113	1.87E-05	6.74E-03	0.3	3973
114	1.83E-05	7.07E-03	0.3	4064
115	1.83E-05	7.07E-03	0.3	4064
116	1.84E-05	7.07E-03	0.3	4044
117	1.84E-05	7.07E-03	0.3	4044
118	1.83E-05	7.07E-03	0.3	4050
119	1.83E-05	7.07E-03	0.3	4050
120	1.83E-05	7.07E-03	0.3	4067
121	1.83E-05	7.07E-03	0.3	4067
122	1.83E-05	6.72E-03	0.3	4057
123	1.83E-05	6.72E-03	0.3	4057
124	1.72E-05	7.01E-03	0.3	4312
125	1.72E-05	7.01E-03	0.3	4312
126	1.73E-05	7.02E-03	0.3	4284
127	1.73E-05	7.02E-03	0.3	4284
128	1.73E-05	7.02E-03	0.3	4286
129	1.73E-05	7.02E-03	0.3	4286
130	1.73E-05	7.01E-03	0.3	4295
131	1.73E-05	7.01E-03	0.3	4295
132	1.68E-05	6.89E-03	0.3	4433
133	1.68E-05	6.89E-03	0.3	4433
134	1.68E-05	6.90E-03	0.3	4409
135	1.68E-05	6.90E-03	0.3	4409
136	1.68E-05	6.90E-03	0.3	4409
137	1.64E-05	6.87E-03	0.3	4522
138	1.64E-05	6.87E-03	0.3	4522
139	1.63E-05	6.61E-03	0.3	4558
140	1.63E-05	6.61E-03	0.3	4558
141	1.63E-05	6.61E-03	0.3	4558
142	1.65E-05	6.79E-03	0.3	4509
143	1.61E-05	6.76E-03	0.3	4619
144	1.61E-05	6.76E-03	0.3	4619
145	1.61E-05	6.76E-03	0.3	4624
146	1.61E-05	6.76E-03	0.3	4624
147	1.61E-05	6.76E-03	0.3	4626
148	1.61E-05	6.76E-03	0.3	4626
149	1.61E-05	6.77E-03	0.3	4608
150	1.61E-05	6.77E-03	0.3	4608
151	1.60E-05	6.76E-03	0.3	4655
152	1.57E-05	6.74E-03	0.3	4719
153	1.57E-05	6.74E-03	0.3	4719
154	1.58E-05	6.66E-03	0.3	4695
155	1.58E-05	6.66E-03	0.3	4695
156	1.58E-05	6.84E-03	0.3	4697



157	1.58E-05	6.84E-03	0.3	4697
158	1.58E-05	6.58E-03	0.3	4704
159	1.58E-05	6.58E-03	0.3	4704
160	1.59E-05	6.67E-03	0.3	4677
161	1.59E-05	6.67E-03	0.3	4677
162	1.59E-05	6.58E-03	0.3	4686
163	1.59E-05	6.58E-03	0.3	4686
164	1.58E-05	6.58E-03	0.3	4689
165	1.58E-05	6.58E-03	0.3	4689
166	1.58E-05	6.58E-03	0.3	4691
167	1.58E-05	6.58E-03	0.3	4691
168	1.58E-05	6.66E-03	0.3	4694
169	1.58E-05	6.66E-03	0.3	4694
170	1.58E-05	6.66E-03	0.3	4694
171	1.58E-05	6.66E-03	0.3	4694
172	1.58E-05	6.66E-03	0.3	4696
173	1.58E-05	6.66E-03	0.3	4696
174	1.56E-05	6.65E-03	0.3	4750
175	1.56E-05	6.65E-03	0.3	4750
176	1.55E-05	6.64E-03	0.3	4792
177	1.55E-05	6.64E-03	0.3	4792
178	1.54E-05	6.73E-03	0.3	4811
179	1.54E-05	6.72E-03	0.3	4814
180	1.54E-05	6.72E-03	0.3	4814
181	1.51E-05	6.88E-03	0.3	4912
182	1.51E-05	6.88E-03	0.3	4912
183	1.50E-05	6.70E-03	0.3	4943
184	1.50E-05	6.70E-03	0.3	4943
185	1.50E-05	6.87E-03	0.3	4951
186	1.50E-05	6.87E-03	0.3	4951
187	1.50E-05	6.70E-03	0.3	4963
188	1.51E-05	6.54E-03	0.3	4915
189	1.51E-05	6.54E-03	0.3	4915
190	1.51E-05	6.54E-03	0.3	4915
191	1.49E-05	6.78E-03	0.3	4998
192	1.49E-05	6.78E-03	0.3	4998
193	1.48E-05	6.69E-03	0.3	5008
194	1.48E-05	6.69E-03	0.3	5008
195	1.48E-05	6.77E-03	0.3	5022
196	1.48E-05	6.77E-03	0.3	5022
197	1.49E-05	6.53E-03	0.3	4969
198	1.49E-05	6.53E-03	0.3	4969
199	1.49E-05	6.53E-03	0.3	4969
200	1.49E-05	6.53E-03	0.3	4969
201	1.49E-05	6.53E-03	0.3	4969
202	1.49E-05	6.53E-03	0.3	4969
203	1.49E-05	6.53E-03	0.3	4969
204	1.46E-05	6.51E-03	0.3	5079
205	1.46E-05	6.51E-03	0.3	5079

206	1.46E-05	6.51E-03	0.3	5079
207	1.46E-05	6.51E-03	0.3	5079
208	1.46E-05	6.51E-03	0.3	5079

### 3.4 Inizializzazione e storia di pressione

#### 3.4.1 Stato tensionale iniziale

Per i campi di Annabella ed Annalisa lo sforzo totale verticale è stato calcolato dal gradiente di overburden definito a partire dai density log come descritto nel paragrafo 3.3.1. Lo sforzo orizzontale  $\sigma'_h$  è stato inizializzato partendo da condizioni di tipo edometrico definite come:

$$\sigma'_h = K_0 \cdot \sigma'_v \quad (4)$$

dove  $K_0$  rappresenta il coefficiente di spinta a riposo che è stato posto pari a 0.54 [7].

#### 3.4.2 Storia di pressione

La distribuzione tridimensionale del campo di pressione e la sua evoluzione temporale, così come calcolata dai modelli fluido-dinamici Eclipse, è stata imposta come condizione forzante nei nodi del modello FE corrispondenti ai livelli dei giacimenti e degli acquiferi connessi. Le pressioni sono state importate in 33 step temporali per la fase di history, selezionati in modo che non si verificassero eccessive variazioni di pressione tra due intervalli successivi. Sono stati poi importati 6 step di forecast per analizzare l'andamento della subsidenza in seguito alla chiusura dei pozzi.

## 4 Risultati delle analisi eseguite con il modello elasto-plastico

I risultati delle previsioni di subsidenza sono riportati in Tabella 4 per alcuni step temporali (a fine history match, quando entrambi i campi hanno esaurito la produzione e a fine simulazione) durante e dopo la vita produttiva dei campi. Gli studi, infatti, sono stati protratti fino al 01/01/2064 (a pozzi chiusi) in modo da considerare l'effetto dell'evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero dopo la fine della produzione.

In particolare, sono riportati i valori di massima subsidenza e l'estensione del fenomeno, calcolata come massima distanza del punto di massima subsidenza dalla linea di iso-subsidenza dei 2 cm.

**Tabella 4 – Risultati finali: massima subsidenza ed estensione del fenomeno.**

30-set-2022		1-gen-2034		1-gen-2064	
Max sub (cm)	Max estensione (km)	Max sub (cm)	Max estensione (km)	Max sub (cm)	Max estensione (km)
10	13	11	14	11	14

La Tabella 5 riporta invece la subsidenza calcolata in corrispondenza della piattaforma di Annabella e di Annalisa ad alcune date significative.

**Tabella 5 – Risultati del modello geomeccanico in corrispondenza delle piattaforme di Annabella e Annalisa.**

Data	Subsidenza (cm)	
	Annabella	Annalisa
30/09/2022	10	7
01/01/2034	11	8
01/01/2064	10	8

L'analisi dei risultati consente di osservare che:

- il valore massimo di subsidenza (11 cm) è previsto che venga raggiunto a fine produzione (01/01/2034), in corrispondenza del punto di coordinate 2366580 m E, 4899497 m N, localizzato a poco più di 500 metri dalla piattaforma di Annabella. L'evoluzione nel tempo della subsidenza valutata in tale punto è riportata in Figura 7;
- al termine della produzione (01/01/2034), la massima estensione della linea di iso-subsidenza dei 2 cm risulta pari a circa 14 km (Figura 8). Tale distanza rimane costante fino alla fine della simulazione (01/01/2064): la Figura 9 mostra le linee di iso-subsidenza a tale data;
- il fenomeno si esaurisce a oltre 27 km dalla linea di costa. La distanza dalla costa rimane sempre pressoché inalterata tra il 2034 e il 2064, come mostrato in Figura 10.

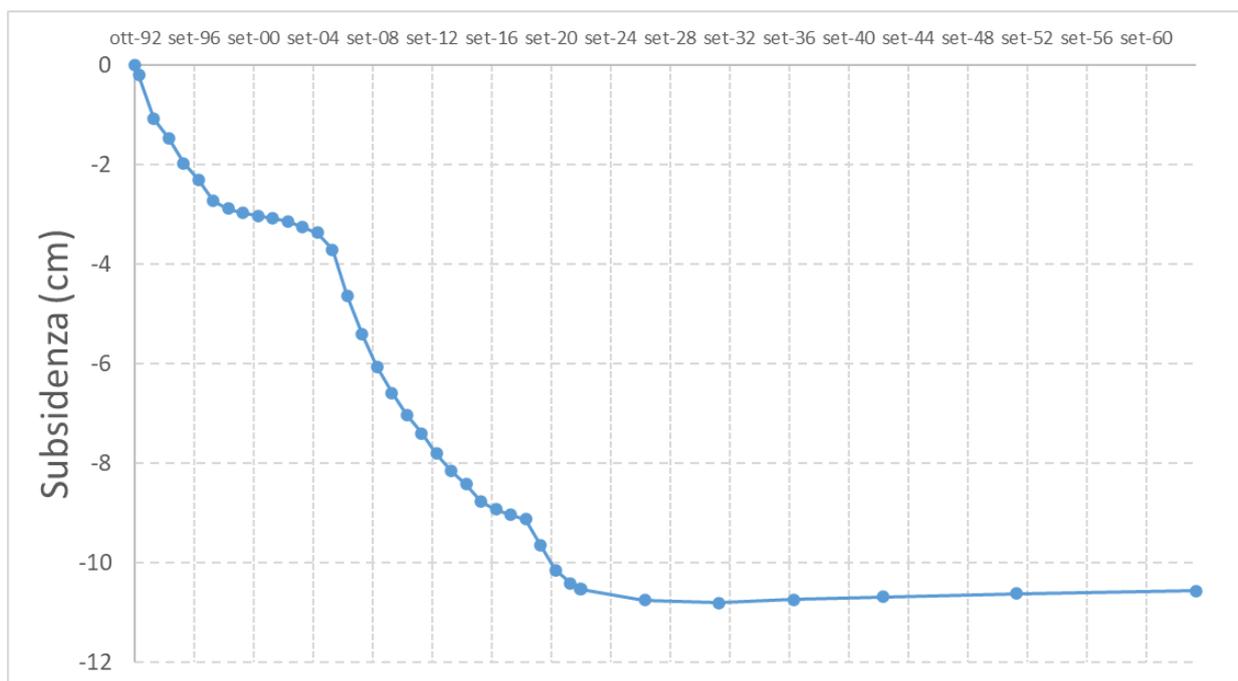


Figura 7 – Evoluzione temporale della subsidenza (cm) nel punto di massimo.

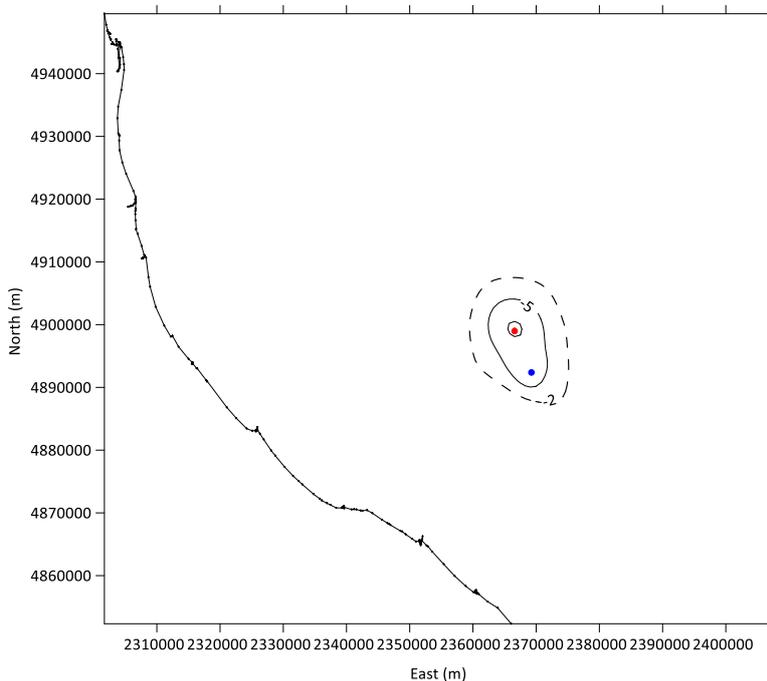
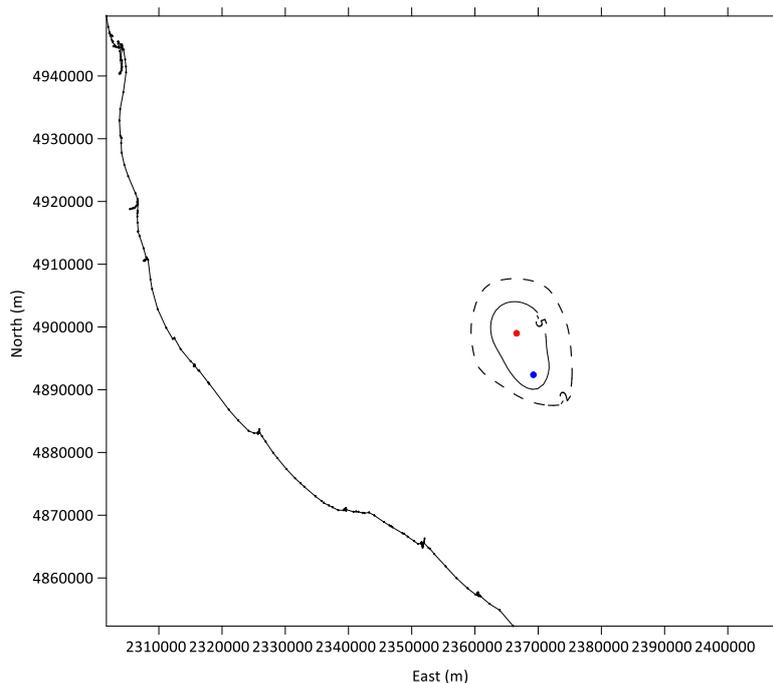
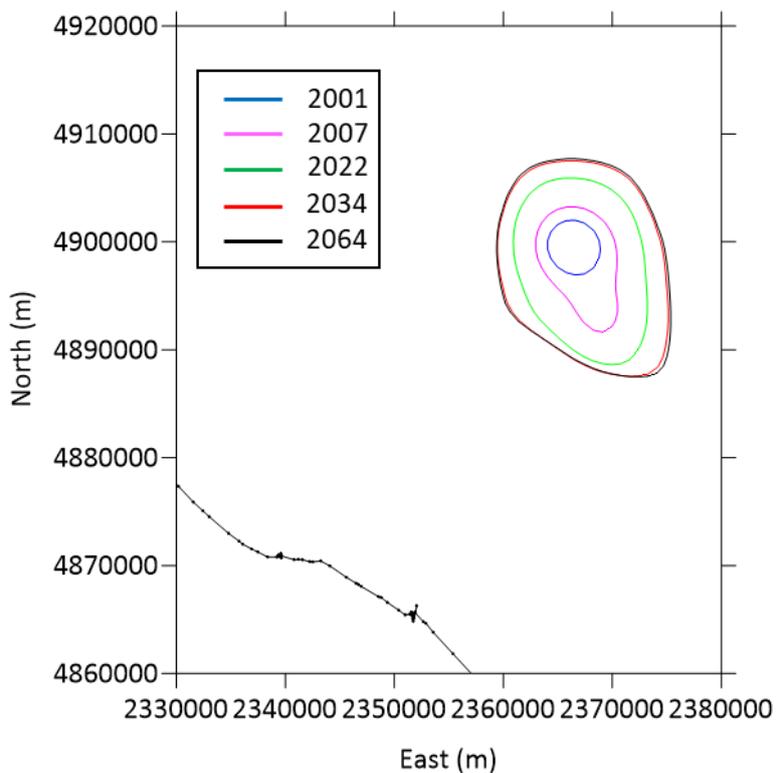


Figura 8 – Curve di iso-subsidenza dei 2 e 5 cm a fine produzione (01/01/2034). In rosso è riportata la posizione della piattaforma di Annabella, in blu quella di Annalisa.



**Figura 9 – Curve di iso-subsidenza dei 2 e 5 cm a fine simulazione (01/01/2064). In rosso è riportata la posizione della piattaforma di Annabella, in blu quella di Annalisa.**



**Figura 10 – Evoluzione temporale dell'estensione della linea di iso-subsidenza dei 2 cm.**

## 5 Confronto con i dati delle stazioni CGPS

Nella Figura 11 e Figura 12 si mostra il confronto tra la subsidenza stimata dal modello geomeccanico e la serie storica di spostamenti verticali registrati dalle stazioni CGPS in corrispondenza delle due piattaforme. Si nota come il modello geomeccanico riproduca con precisione le misure di subsidenza registrate dalle stazioni CGPS.

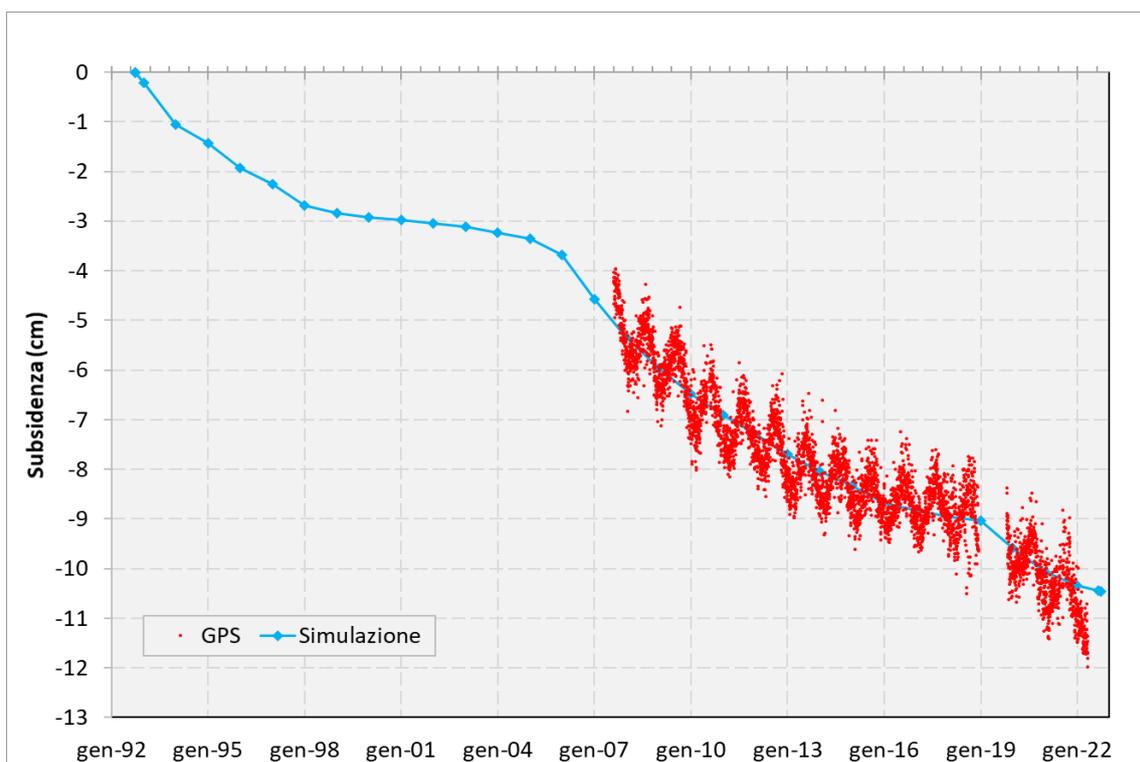
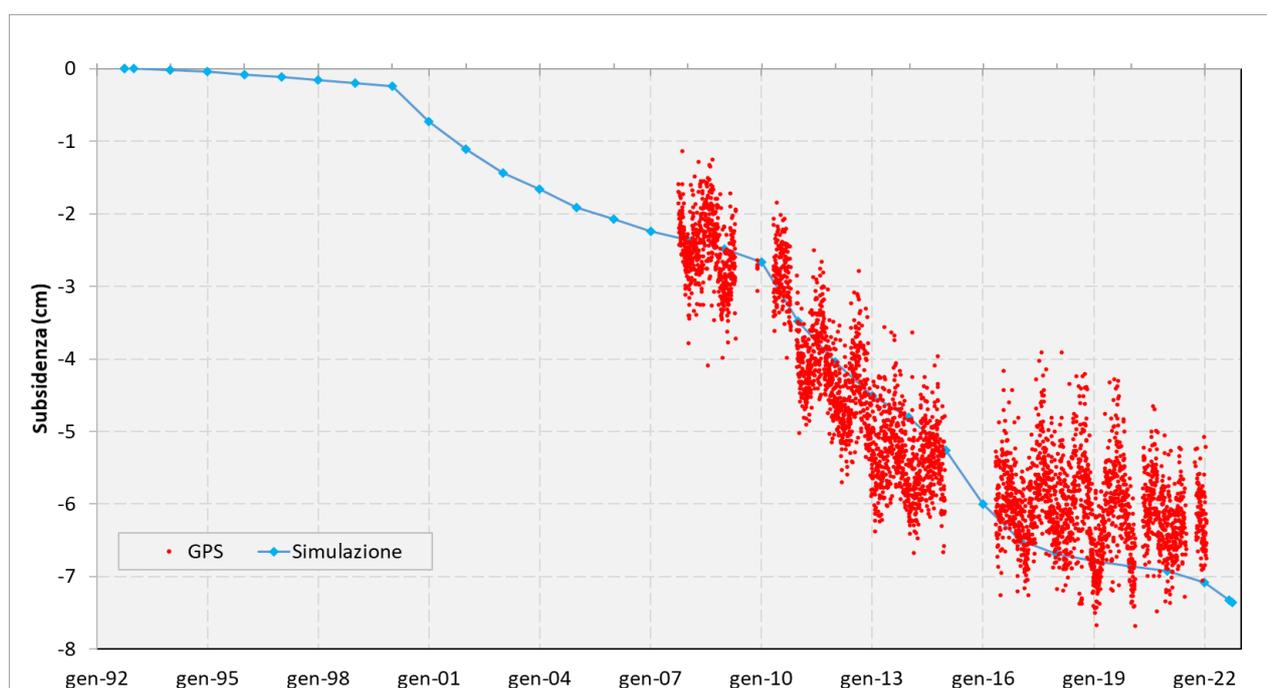


Figura 11 – Spostamento verticale misurato e calcolato (cm) alla stazione CGPS di Annabella.



**Figura 12 – Spostamento verticale misurato e calcolato (cm) alla stazione CGPS di Annalisa.**

## Bibliografia

1. Ministero dello Sviluppo Economico, Direzione Generale per le Risorse Minerarie ed Energetiche (DGRME): *Elenco delle piattaforme marine e strutture assimilabili* (Dati al 31/12/2012, aggiornamento del 31/08/ 2013).
2. Abaqus<sup>TM</sup>, Simulia, versione 2016hf4.
3. Eclipse<sup>TM</sup>, Schlumberger, versione 2017.2.
4. Campi di Annabella – Annalisa. Aggiornamento modello dinamico 2016. Scheda riassuntiva. – EORG IPET-E5149F94-0. Novembre 2018.
5. 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.
6. 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.
7. F.J. Santarelli, M. Brignoli, A. Pellegrino: *La scelta del coefficiente di Poisson per formazioni a grande scala* - 04/1996.