



Campo di Naomi-Pandora

Modello Elasto-Plastico di Subsidenza

Management Summary

LISTA DI DISTRIBUZIONE:





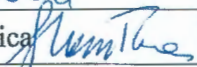
GEOD/CS
GEOES/CS

AUTORI

C. Cannone

EORG

Data: 22 dicembre 2017

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



Indice

1	Introduzione	3
2	Dati di subsidenza misurati dalla stazione CGPS	5
2.1	Stazione CGPS di Naomi-Pandora	5
3	Modello Geomeccanico agli Elementi Finiti	6
3.1	Approccio metodologico	6
3.2	Geometria del modello	6
3.3	Proprietà dei materiali	8
3.3.1	Densità della roccia	8
3.3.2	Compressibilità uniassiale	9
3.4	Inizializzazione e storia di pressione	16
3.4.1	Stato tensionale iniziale	16
3.4.1	Pressioni iniziali	16
3.4.2	Storia di pressione	16
4	Risultati delle analisi eseguite con il modello elasto-plastico	17
4.1	Mappe di subsidenza	19
5	Confronto con i dati della stazione CGPS	22
6	Confronto con i dati da marker radioattivi	24
	Bibliografia	26

1 Introduzione

Il presente rapporto illustra i risultati dello studio geomeccanico relativo al campo di Naomi-Pandora, effettuato con lo scopo di valutare quantitativamente la subsidenza indotta dalla coltivazione dei giacimenti. I giacimenti di Naomi e Pandora sono situati nell'offshore adriatico circa 50 km a NE di Ravenna (Figura 1). La profondità del fondale marino è di circa 36 m.

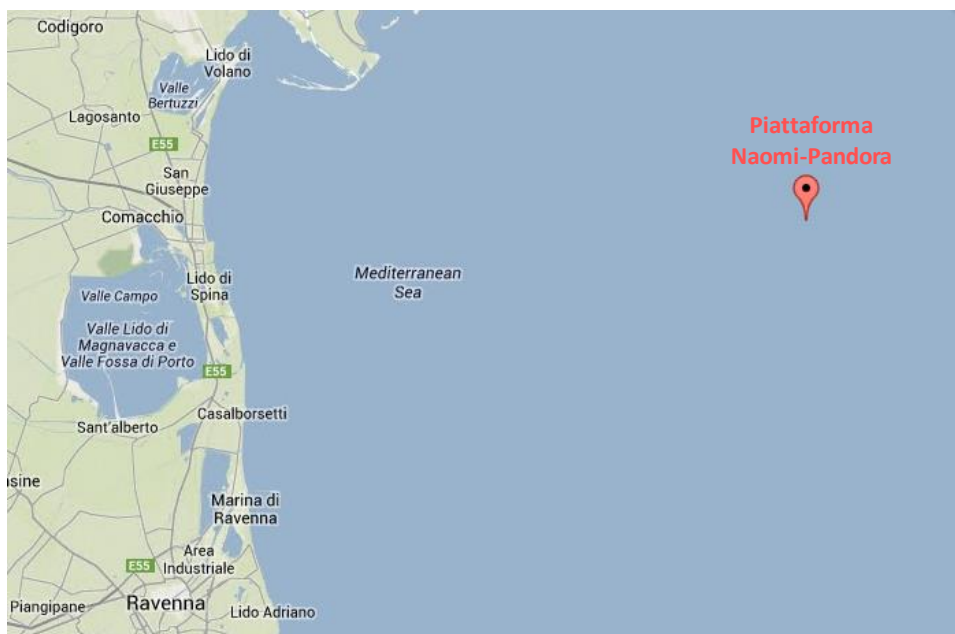


Figura 1 – Posizione del giacimento di Naomi-Pandora.

La previsione di subsidenza è stata eseguita da ISAMGEO Engineering GmbH con un modello geomeccanico 3D ad elementi finiti (FE), impiegando il codice di calcolo proprietario Isamgeo. 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 [2] con il codice di calcolo Eclipse [1].

La produzione dei campi di Naomi e Pandora è iniziata ad agosto 2011 e i due campi sono stati chiusi alla produzione da marzo 2013 ad aprile 2011. Nel modello dinamico, la storia produttiva dei pozzi eroganti dai livelli dei due giacimenti è stata aggiornata fino al 31 dicembre 2016 (fine history match) e lo studio dell'evoluzione delle pressioni è stato protratto, a pozzi chiusi, sino a gennaio 2086 per considerare l'effetto della redistribuzione delle pressioni in giacimento e in acquifero dopo la chiusura dei pozzi.

L'unico scenario previsto per la fase di Forecast è il Do Nothing, che prevede di proseguire lo sviluppo dei giacimenti mediante i 3 completamenti aperti a fine history match senza ulteriori interventi. Le portate giornaliere in fase di Forecast sono state stimate sulla base del comportamento produttivo osservato negli ultimi mesi di history match, ovvero:

- Naomi 2 dir A_Corta: 156 kSm³/day
- Naomi 3 dir_Corta: 118 kSm³/day
- Pandora 2 Dir A_Singola: 75 kSm³/day



La vita produttiva del campo di Naomi è previsto che termini nel 2053, con una produzione cumulativa di campo di 2091 MSm³ ed un RF (Recovery Factor) finale del 71%. La vita produttiva del campo di Pandora è previsto che termini nel 2025, con una produzione cumulativa di campo di 360 MSm³ ed un RF finale del 65%. La produzione totale dei campi di Naomi e Pandora è di 2451 MSm³, con un RF finale del 70%. La produzione di gas nel periodo 2017–2053 è di 1476 MSm³, dei quali 1369 MSm³ prodotti dal campo di Naomi e 108 MSm³ prodotti dal campo di Pandora.

2 Dati di subsidenza misurati dalla stazione CGPS

2.1 Stazione CGPS di Naomi-Pandora

La stazione CGPS è installata sulla piattaforma di Naomi-Pandora in corrispondenza delle coordinate 2349437.58 m E, 4950688.61m N. Il periodo di osservazione in cui sono stati analizzati i dati va dal 20 giugno 2002 al 23 settembre 2017 (Figura 2).

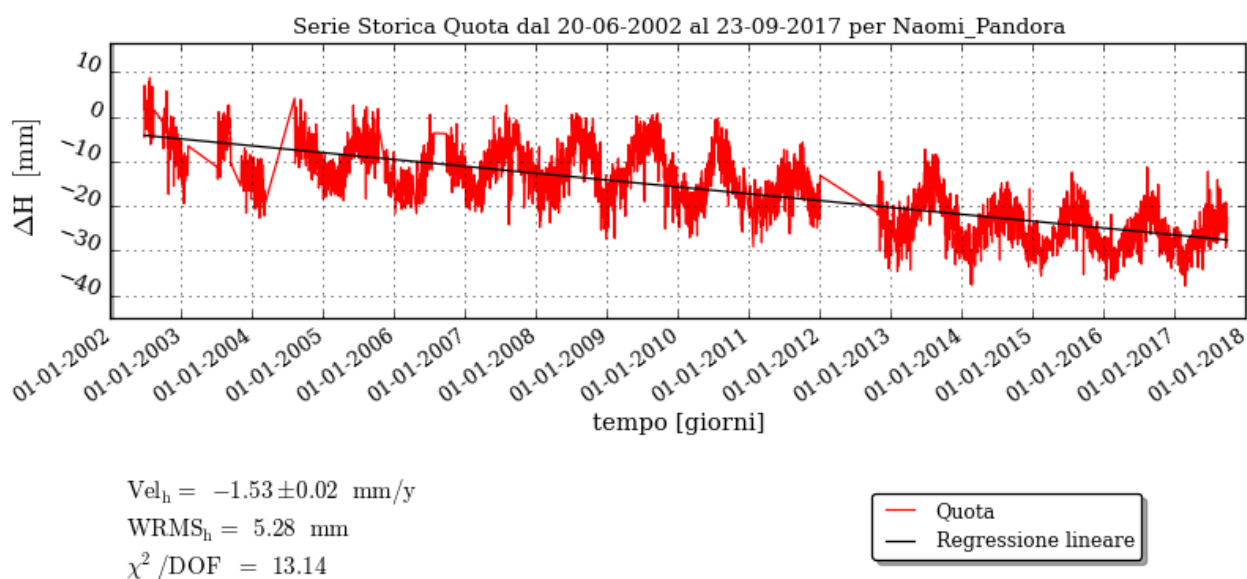


Figura 2 – Misurazioni effettuate dalla stazione CGPS di Naomi-Pandora, aggiornate al 23 settembre 2017.

3 Modello Geomeccanico agli Elementi Finiti

3.1 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 + acquiferi connessi”, riprodotta con accuratezza dalla maglia di calcolo numerica;
- Distribuzione di pressione nei “livelli mineralizzati + acquiferi connessi”, calcolata con il modello di flusso 3D Eclipse;
- 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 + acquiferi connessi” fatto sulla base della più aggiornata stima della compressibilità uniassiale ottenuta da misure in situ effettuate nei pozzi equipaggiati con markers nell’offshore adriatico.

3.2 Geometria del modello

Il modello di giacimento, realizzato tramite il software Eclipse, interessa una superficie di 27.8 km × 40.6 km scelta per poter simulare tutta l’area interessata dalla depressurizzazione prodotta dalla coltivazione dei giacimenti e per poter riprodurre in maniera accurata l’influenza dell’acquifero. Il modello rappresenta in modo accurato e completo l’intera sequenza degli orizzonti permeabili ed impermeabili dei quattro campi.

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. È 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 3 e Figura 4) risulta suddiviso in 35 livelli e si estende fino a oltre 6500 m di profondità per un totale di 774984 nodi, 224700 elementi a 16 o 20 nodi (6420 elementi per ciascun livello) e 2324952 gradi di libertà.

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

- (a) sono impediti i tre gradi di libertà dei nodi della base del modello, simulando così la presenza di un bedrock rigido;
- (b) i nodi sui quattro lati del modello hanno impediti anch'essi i tre gradi di libertà dei nodi; 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.

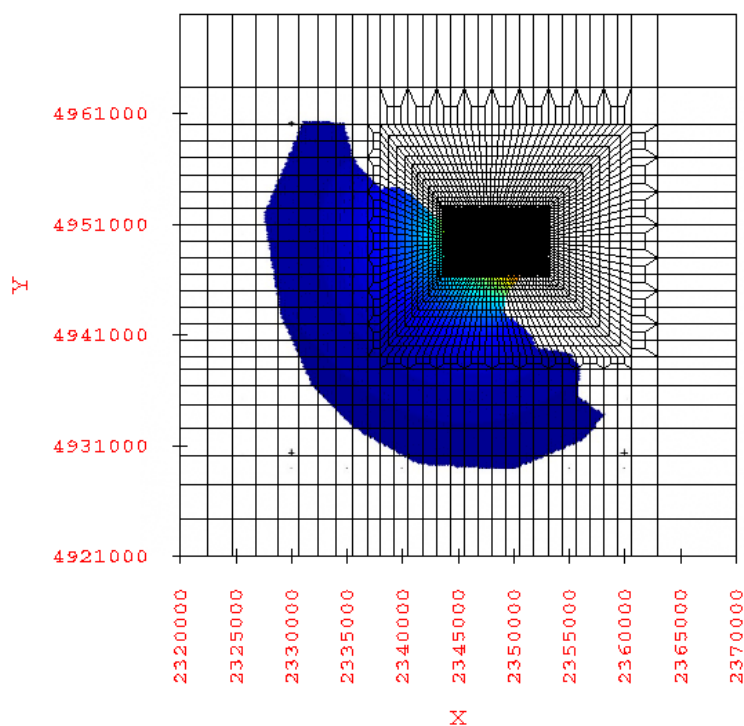


Figura 3 – Visione in pianta della mesh di calcolo utilizzata nel modello ISAMGEO per i campi di Naomi e Pandora.

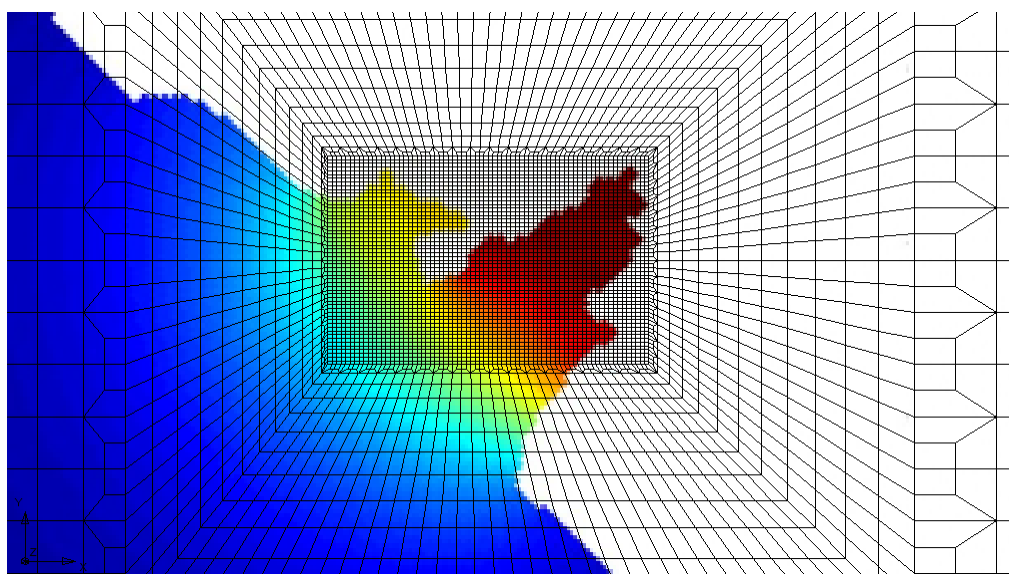


Figura 4 – Zoom della parte centrale della mesh di calcolo utilizzata nel modello ISAMGEO per i campi di Naomi e Pandora.

3.3 Proprietà dei materiali

3.3.1 Densità della roccia

Partendo dai density log registrati nei pozzi Naomi-1 e Pandora-1 dir, è stato possibile calcolare un profilo di densità ρ definito attraverso la seguente relazione:

$$\rho(z) = 0.1471(z - z_{fm}) + 1973.08 \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (1)$$

ove le profondità (z) sono misurate in metri TVDSS (*True Vertical Depth Sub Sea*) ed è stata considerata una profondità del fondale marino z_{fm} pari a 36 m, al di sopra della quale la densità è stata assunta pari a 1030 kg/m^3 .

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.

3.3.2 Compressibilità uniassiale

Il parametro geomeccanico chiave nelle simulazioni di subsidenza è la compressibilità uniassiale c_m del materiale. È oggi comunemente accettato [3] 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 compressibilità una correlazione regionale ricavata da uno studio statistico basato sui valori di compressibilità calcolati su campi dell'Adriatico dotati di marker radioattivi. Tale correlazione tra c_m e tensione verticale efficace σ'_v è stata proposta da Hueckel *et al.* [4] ed è riportata in Figura 5 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) σ'_v è la tensione efficace verticale espressa in bar e c_m è il coefficiente di compressibilità edometrica espresso in bar^{-1} . In Figura 5 la relazione di Hueckel *et al.* [4] è inoltre messa a confronto con quella di Baù *et al.* [3]; si può osservare come le due risultino analoghe.

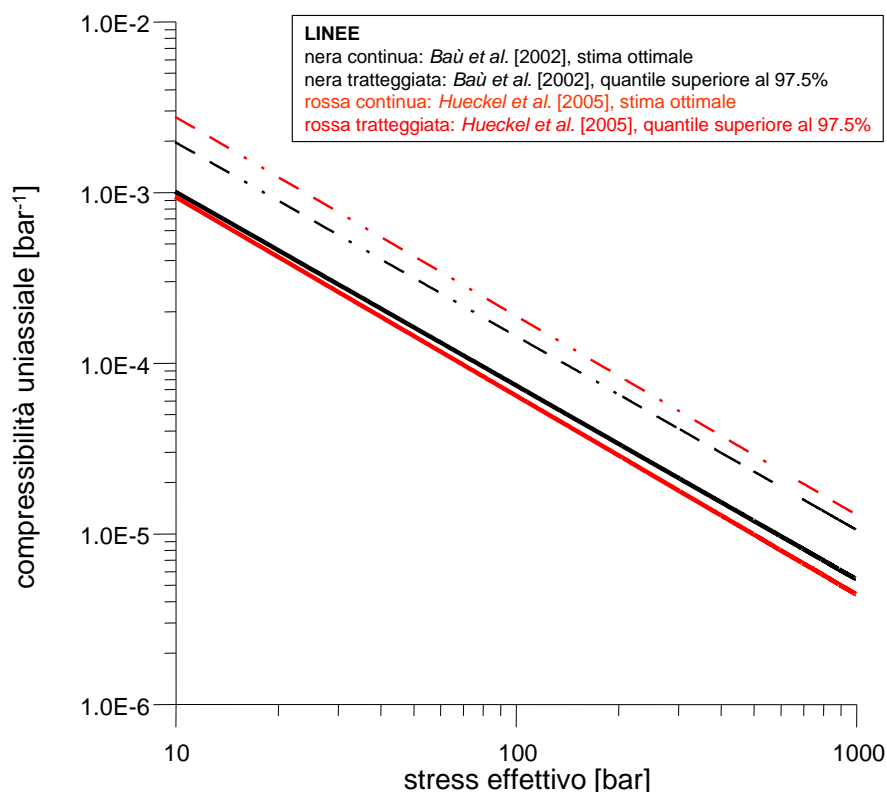


Figura 5 – Correlazione tra la compressibilità uniassiale c_m e lo stress efficace *in situ*, derivata da misure su marker nei campi a gas del bacino nord adriatico (da [4]).

Si segnala che studi successivi [5] hanno evidenziato come, sia la correlazione di Baù *et al.* [3] sia quella di Hueckel *et al.* [4], tendano a sottostimare la compressibilità uniassiale dei sedimenti posti a meno di 1500 m di profondità. Per tener conto di ciò, ovvero per profondità inferiori a 1500 m, Ferronato *et al.* [5] hanno proposto che, in via cautelativa, il valore di c_m ottenuto dalle precedenti correlazioni sia moltiplicato per 2. Si ottiene così la legge impiegata nello scenario medio:

$$c_m = \begin{cases} 2 \cdot 0.01367 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} & z < 1500m \\ 0.01367 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} & z \geq 1500m \end{cases} \quad (3)$$

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:

$$\sigma'_v = \sigma_v - p \quad (4)$$

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 3.3.1.

Allo scopo di effettuare un'analisi parametrica, oltre alle relazioni (3), è stata considerata anche la legge di compressibilità relativa al quantile superiore:

- relazione upper, quantile 97.5%:
$$c_m = 0.01367 \cdot 10^{0.467} \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} \quad (5)$$

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 Naomi e Pandora.

In Tabella 2 e Tabella 3 sono riportati i valori di compressibilità uniassiale C_m , pendenza della retta di normal-compressione λ e di scarico-ricarico κ nel piano $e:lnp'$ (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 Medio e Upper rispettivamente.

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

Materiale Modello ISAMGEO	Profondità media (m)	Stress totale verticale (bar)	Pressione (bar)	Stress efficace verticale iniziale (bar)
1	94.5	15.5	9.9	5.6
2	287.9	53.4	30.2	23.2
3	545.7	104.7	57.3	47.4
4	868.1	170.3	91.2	79.1
5	1254.9	250.9	131.8	119.1
6	1641.7	333.6	172.4	161.2
7	2028.5	418.6	213.0	205.5
8	2415.3	505.6	253.7	252.0
9	2652.1	560.0	293.7	266.3
10	2617.2	552.0	290.2	261.7
11	2685.2	567.7	297.0	270.7
12	2650.3	559.6	293.5	266.1
13	2690.1	568.8	297.5	271.3
14	2654.6	560.6	293.9	266.7
15	2692.5	569.4	297.7	271.7
16	2656.5	561.0	294.1	266.9
17	2693.9	569.7	297.9	271.8
18	2657.6	561.3	294.2	267.0
19	2695.4	570.0	298.0	272.0
20	2658.6	561.5	294.3	267.2
21	2697.4	570.5	298.2	272.3
22	2659.9	561.8	294.5	267.4
23	2699.3	571.0	298.4	272.6
24	2661.4	562.2	294.6	267.6
25	2701.2	571.4	298.6	272.8
26	2662.9	562.5	294.8	267.8
27	2703.1	571.8	298.8	273.1
28	2664.5	562.9	294.9	268.0
29	2704.1	572.1	298.9	273.2
30	2665.6	563.1	295.0	268.1
31	2704.9	572.2	298.9	273.3
32	2666.5	563.3	295.1	268.2
33	2707.8	572.9	299.2	273.7
34	2667.9	563.7	295.3	268.4
35	2711.1	573.7	299.6	274.1
36	2671.2	564.4	295.6	268.8
37	2712.7	574.1	299.7	274.3
38	2674.0	565.1	295.9	269.2
39	2714.6	574.5	299.9	274.6
40	2676.4	565.6	296.1	269.5
41	2717.4	575.1	300.2	275.0
42	2679.1	566.3	296.4	269.9
43	2720.1	575.8	300.5	275.3
44	2682.0	566.9	296.7	270.3
45	2722.6	576.4	300.7	275.6

46	2684.8	567.6	297.0	270.6
47	2725.1	576.9	301.0	276.0
48	2688.3	568.4	297.3	271.1
49	2727.1	577.4	301.2	276.2
50	2691.5	569.1	297.6	271.5
51	2728.5	577.7	301.3	276.4
52	2692.3	569.3	297.7	271.6
53	2737.7	579.9	302.2	277.6
54	2695.0	569.9	298.0	272.0
55	2918.9	622.2	320.3	302.0
56	3492.3	759.5	377.5	382.0
57	4256.9	949.8	453.7	496.2
58	5594.8	1303.2	587.1	716.2

Tabella 2 – 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 Naomi e Pandora, nello scenario Cm medio.

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	7.04E-04	0.386	0.6298	0.0266	0.7133	0.0089
3	3.06E-04	0.368	0.5830	0.0230	0.6716	0.0077
4	1.69E-04	0.346	0.5283	0.0204	0.6173	0.0068
5	1.05E-04	0.318	0.4674	0.0183	0.5548	0.0061
6	3.68E-05	0.291	0.4111	0.0084	0.4536	0.0028
7	2.77E-05	0.264	0.3590	0.0077	0.4002	0.0026
8	2.19E-05	0.237	0.3106	0.0072	0.3505	0.0024
9	2.05E-05	0.237	0.3106	0.0072	0.3506	0.0024
10	2.09E-05	0.237	0.3106	0.0072	0.3506	0.0024
11	2.01E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
12	2.05E-05	0.237	0.3106	0.0072	0.3506	0.0024
13	2.01E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
14	2.05E-05	0.237	0.3106	0.0072	0.3506	0.0024
15	2.00E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
16	2.04E-05	0.237	0.3106	0.0072	0.3506	0.0024
17	2.00E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
18	2.04E-05	0.237	0.3106	0.0072	0.3506	0.0024
19	2.00E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
20	2.04E-05	0.237	0.3106	0.0072	0.3506	0.0024
21	2.00E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
22	2.04E-05	0.237	0.3106	0.0072	0.3506	0.0024
23	2.00E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
24	2.04E-05	0.237	0.3106	0.0072	0.3506	0.0024
25	1.99E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
26	2.04E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
27	1.99E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
28	2.04E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
29	1.99E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
30	2.03E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024

31	1.99E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
32	2.03E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
33	1.99E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
34	2.03E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
35	1.98E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
36	2.03E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
37	1.98E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
38	2.02E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
39	1.98E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
40	2.02E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
41	1.98E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
42	2.02E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
43	1.97E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
44	2.02E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
45	1.97E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
46	2.01E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
47	1.97E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
48	2.01E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
49	1.96E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
50	2.00E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
51	1.96E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
52	2.00E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
53	1.95E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
54	2.00E-05	0.237	0.3106	0.0071	0.3506	0.0024
55	1.77E-05	0.22	0.2821	0.0069	0.3212	0.0023
56	1.35E-05	0.21	0.2658	0.0065	0.3045	0.0022
57	9.93E-06	0.2	0.2500	0.0062	0.2882	0.0021
58	6.48E-06	0.2	0.2500	0.0058	0.2881	0.0019

Tabella 3 – 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 Naomi e Pandora, nello scenario Cm Upper.

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	1.03E-03	0.386	0.6298	0.0390	0.7522	0.0130
3	4.48E-04	0.368	0.5830	0.0336	0.7129	0.0112
4	2.47E-04	0.346	0.5283	0.0299	0.6588	0.0100
5	1.53E-04	0.318	0.4674	0.0268	0.5955	0.0089
6	1.08E-04	0.291	0.4111	0.0245	0.5357	0.0082
7	8.13E-05	0.264	0.3590	0.0227	0.4799	0.0076
8	6.41E-05	0.237	0.3106	0.0212	0.4276	0.0071
9	6.01E-05	0.237	0.3106	0.0210	0.4277	0.0070
10	6.13E-05	0.237	0.3106	0.0210	0.4277	0.0070
11	5.90E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
12	6.01E-05	0.237	0.3106	0.0210	0.4277	0.0070
13	5.88E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
14	6.00E-05	0.237	0.3106	0.0210	0.4277	0.0070
15	5.87E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070



16	5.99E-05	0.237	0.3106	0.0210	0.4277	0.0070
17	5.87E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
18	5.99E-05	0.237	0.3106	0.0210	0.4277	0.0070
19	5.86E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
20	5.99E-05	0.237	0.3106	0.0210	0.4277	0.0070
21	5.86E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
22	5.98E-05	0.237	0.3106	0.0210	0.4277	0.0070
23	5.85E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
24	5.98E-05	0.237	0.3106	0.0210	0.4277	0.0070
25	5.84E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
26	5.97E-05	0.237	0.3106	0.0210	0.4278	0.0070
27	5.84E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
28	5.97E-05	0.237	0.3106	0.0210	0.4278	0.0070
29	5.83E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
30	5.96E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
31	5.83E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
32	5.96E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
33	5.82E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
34	5.95E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
35	5.81E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
36	5.94E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
37	5.80E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
38	5.93E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
39	5.80E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
40	5.93E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
41	5.79E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
42	5.92E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
43	5.78E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
44	5.91E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
45	5.77E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
46	5.90E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
47	5.76E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
48	5.89E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
49	5.76E-05	0.237	0.3106	0.0208	0.4278	0.0069
50	5.87E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
51	5.75E-05	0.237	0.3106	0.0208	0.4278	0.0069
52	5.87E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
53	5.72E-05	0.237	0.3106	0.0208	0.4278	0.0069
54	5.86E-05	0.237	0.3106	0.0209	0.4278	0.0070
55	5.19E-05	0.22	0.2821	0.0201	0.3968	0.0067
56	3.95E-05	0.21	0.2658	0.0191	0.3793	0.0064
57	2.91E-05	0.2	0.2500	0.0181	0.3621	0.0060
58	1.90E-05	0.2	0.2500	0.0170	0.3618	0.0057

3.4 Inizializzazione e storia di pressione

3.4.1 Stato tensionale iniziale

L'andamento dello sforzo totale verticale è stato determinato a partire dalle interpretazioni dei density log dei pozzi Naomi-1 e Pandora-1 dir. Sulla base di tali informazioni è stato possibile ricavare la seguente relazione:

$$\sigma_v(z_{tvdss}) = 7.215 \cdot 10^{-6} (z_{tvdss} - z_{fm})^2 + 0.1935 (z_{tvdss} - z_{fm}) + 10^{-5} \rho_w g z_{fm} \quad (6)$$

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 36 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:

$$\sigma'_h = K_0 \cdot \sigma'_v \quad (7)$$

dove K_0 rappresenta il coefficiente di spinta a riposo che è stato posto pari a 0.546 [6].

3.4.1 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. Per questa stima dei valori di pressione, è stato possibile fittare una relazione lineare tra profondità (z) e pressione (p) sfruttando i dati relativi ai livelli produttivi del campo:

$$p = 0.0997 z + 29.271 \quad (8)$$

Questa relazione è stata utilizzata ai fini dell'inizializzazione del modello geomeccanico e del calcolo dei parametri geomeccanici.

3.4.2 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 (2001) fino al 2086.

4 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 dei campi di Naomi e Pandora.

I risultati delle previsioni di subsidenza ottenuti per lo scenario medio e per lo scenario upper sono riportati in Tabella 4 e in Figura 6 per alcuni step temporali durante e dopo la vita produttiva del campo, in corrispondenza del punto GPS e del punto di massima subsidenza (collocato praticamente sulla verticale del giacimento di Naomi, che contiene la maggioranza delle riserve di gas). Gli studi, infatti, sono stati protratti fino al 1° gennaio 2086 (a pozzi chiusi) in modo da considerare l'effetto dell'evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero dopo la fine della produzione. La data di fine produzione differisce leggermente tra i due casi a causa del diverso comportamento meccanico dei sistemi: 1-gen-2053 per il caso medio e 1-gen-2049 per il caso upper.

L'estensione della subsidenza, calcolata come distanza del punto di massima subsidenza dalla linea dei 2 cm, è riportata in Tabella 5.

Tabella 4 – Andamento temporale della subsidenza totale (in cm) prevista in corrispondenza del punto GPS e del punto di massimo, per i casi Cm medio e Cm upper.

Data	Cm MEDIO		Cm UPPER	
	GPS	Massimo	GPS	Massimo
01/01/2017	0.8	1.3	1.9	3.2
01/01/2030	1.5	2.3	4.0	6.2
01/01/2040	1.7	2.5	4.5	6.8
01/01/2049	1.8	2.6	4.7	7.0
01/01/2053	1.8	2.6	4.7	7.0
01/01/2056	1.8	2.6	4.7	7.0
01/01/2070	1.8	2.6	4.7	7.0
01/01/2083	1.8	2.6	4.6	6.9
01/01/2086	1.8	2.6	4.6	6.9

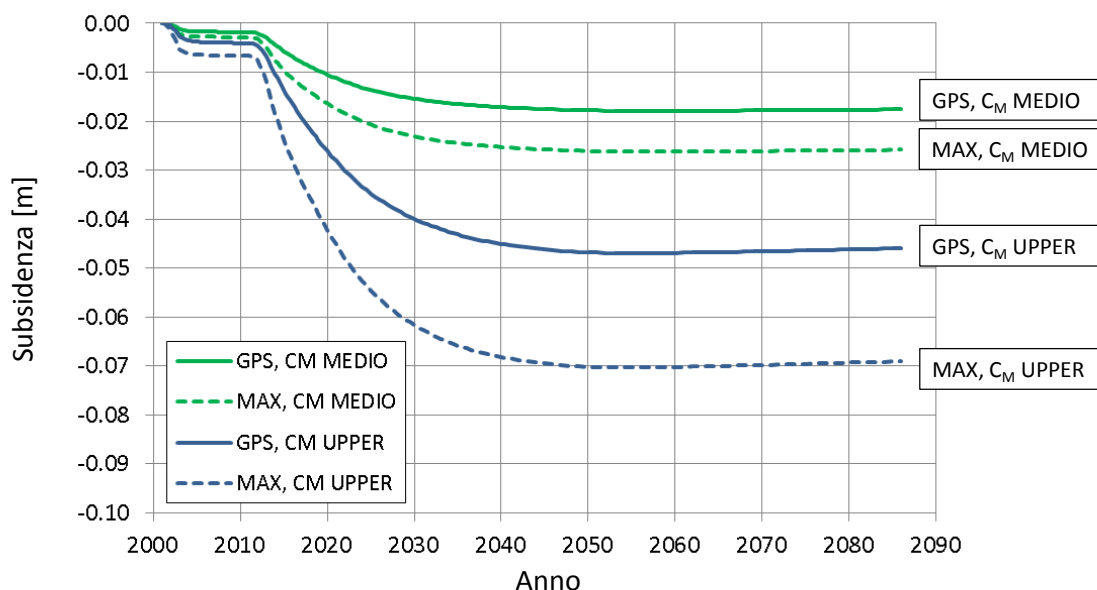


Figura 6 –Evoluzione temporale della subsidenza prevista nel punto di massimo ed in corrispondenza alla piattaforma con GPS, per i casi Cm medio e Cm upper.

Tabella 5 – Andamento temporale della distanza dell'isolinea di subsidenza dei 2 cm dalla linea di costa, per i casi Cm medio e Cm upper.

Data	Cm MEDIO	Cm UPPER
01/01/2017	N/A	31.6 km
01/01/2030	34.0 km	29.2 km
01/01/2049	32.7 km	28.8 km
01/01/2053	32.5 km	28.5 km
01/01/2056	32.5 km	28.7 km
01/01/2083	32.6 km	27.7 km
01/01/2086	32.6 km	27.7 km

L'analisi dei risultati consente di osservare che:

- il valore massimo di subsidenza, collocato praticamente sulla verticale del giacimento di Naomi, si attesta ad un valore finale compreso tra 2.6 cm e 6.9 cm, considerando la forchetta dei casi di compressibilità considerati.
- l'estensione della subsidenza, valutata sulla base della linea di livello pari a 2 cm, rimane relativamente prossima ai giacimenti, con una distanza dal valore del punto di massimo compreso tra 4.9 km e 8.8. km.
- la distanza dalla linea di costa della stessa isolinea dei 2 cm si attesta ad un valore finale compreso rispettivamente tra 32.6 km e 27.7 km nel caso, rispettivamente, dello scenario medio e dello scenario upper. La distanza dalla costa rimane quasi inalterata tra la data di fine produzione e il 2086 in entrambi i casi.

4.1 Mappe di subsidenza

Nel presente paragrafo sono riportate le mappe di subsidenza a fine produzione (2053 per lo scenario medio e 2049 per lo scenario upper) e a fine simulazione (2090), per i due scenari di compressibilità.

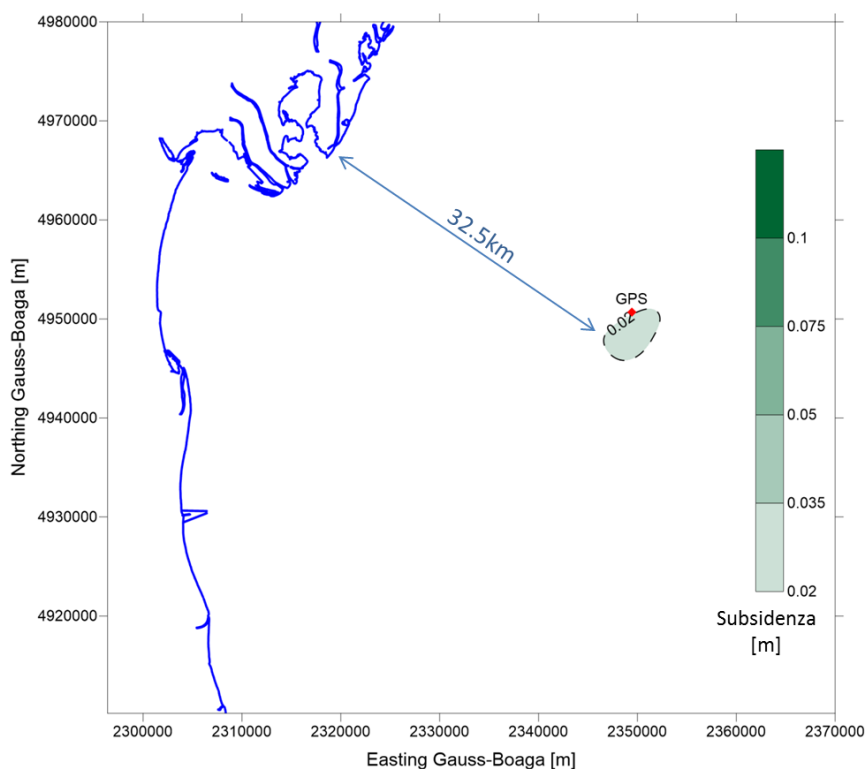


Figura 7 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario medio a fine produzione (2053).

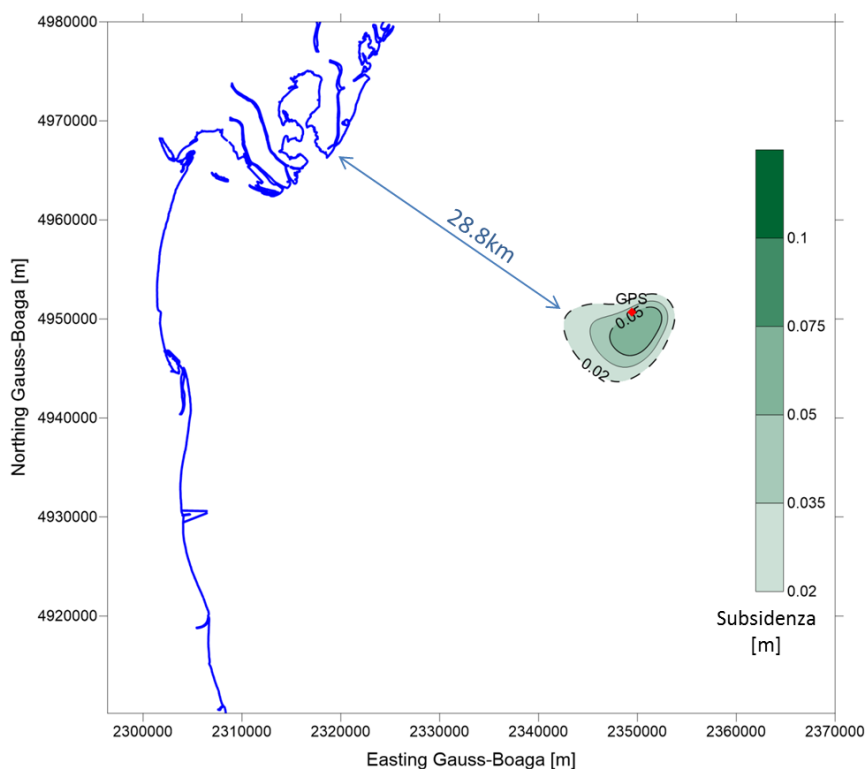


Figura 8 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario upper a fine produzione (2049).

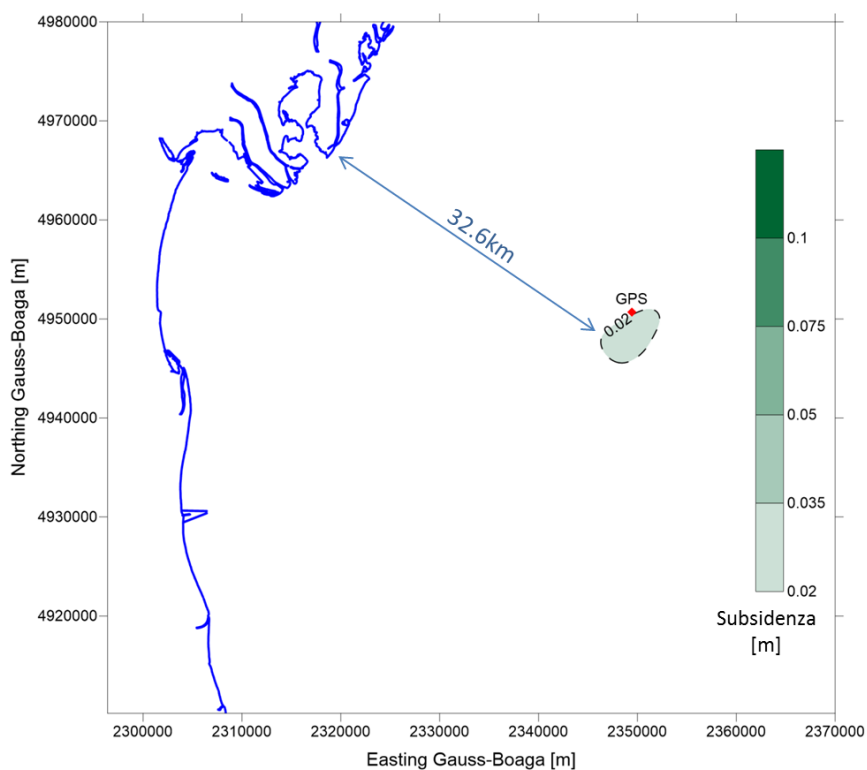


Figura 9 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario medio a fine simulazione (2086).

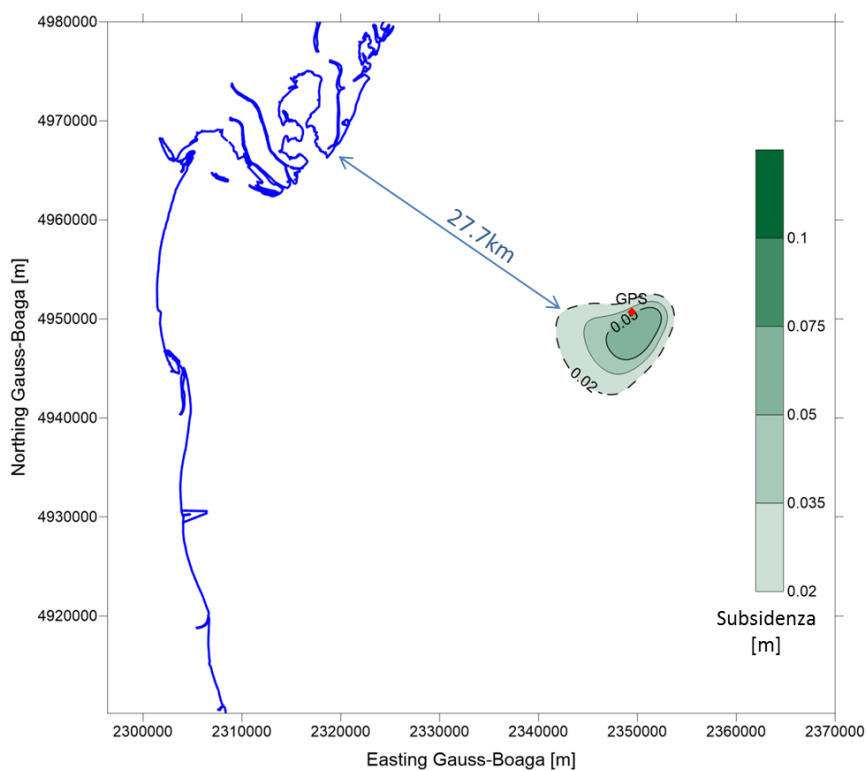


Figura 10 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario upper a fine simulazione (2086).

5 Confronto con i dati della stazione CGPS

I valori di subsidenza calcolati dal modello numerico sono stati confrontati con quelli misurati dalla stazione CGPS (Figura 2) installata sulla piattaforma di produzione di Naomi-Pandora e sono illustrati in Figura 11 e Figura 12.

Al fine di un'analisi dei dati CGPS, è importante ricordare che la storia produttiva del campo di Naomi-Pandora può essere suddivisa in tre fasi distinte: una prima fase di produzione da settembre 2001 a marzo 2003 (durante la quale è iniziata la registrazione delle misurazioni CGPS), una fase di chiusura dei pozzi e una seconda fase di produzione a partire da giugno 2011. Durante la fase di chiusura dei pozzi è stato osservato il permanere di una componente di subsidenza pari a 0.87 mm/anno (Figura 2).

Un periodo di chiusura dei pozzi così lungo (preceduto da un periodo di produzione breve e non intensa) consente di considerare tale velocità come una misura della componente naturale della subsidenza (sedimentaria o tettonica) in corrispondenza del campo. Tale misura è compatibile con le stime della componente naturale della subsidenza per l'area in esame riportate in letteratura, ad esempio in [7] e [8]. Pertanto, allo scopo di confrontare i risultati del modello con la subsidenza rilevata dalla stazione CGPS, tale componente può essere sottratta ai dati misurati dal CGPS. Il modello geomeccanico, infatti, calcola la subsidenza imputabile alla depressurizzazione dovuta alla produzione di idrocarburi e non tiene conto della componente naturale della subsidenza.

In Figura 11 è mostrato il confronto tra i risultati ottenuti con gli scenari medio e upper del modello geomeccanico e la serie storica misurata con il CGPS tal quali. In Figura 12 gli stessi dati CGPS sono stati depurati di questa componente "naturale".

Per quanto il tasso di subsidenza misurato (e simulato) sia sempre molto piccolo, appare chiaro come l'andamento misurato dal CGPS (per quanto fortemente disturbato dalla componente stagionale) sia riprodotto in modo convincente dalle simulazioni effettuate, con una forchetta di valori possibili di compressibilità dei sedimenti compresa tra lo scenario medio e lo scenario upper.

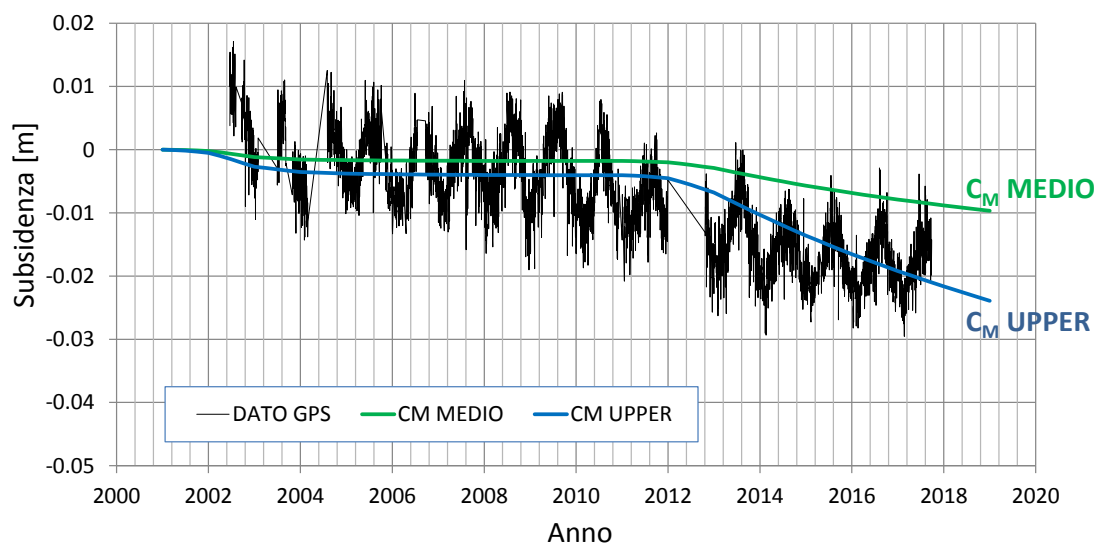


Figura 11 – Andamento della subsidenza misurata (GPS sulla piattaforma) comparata con simulazioni con C_m medio e C_m upper.

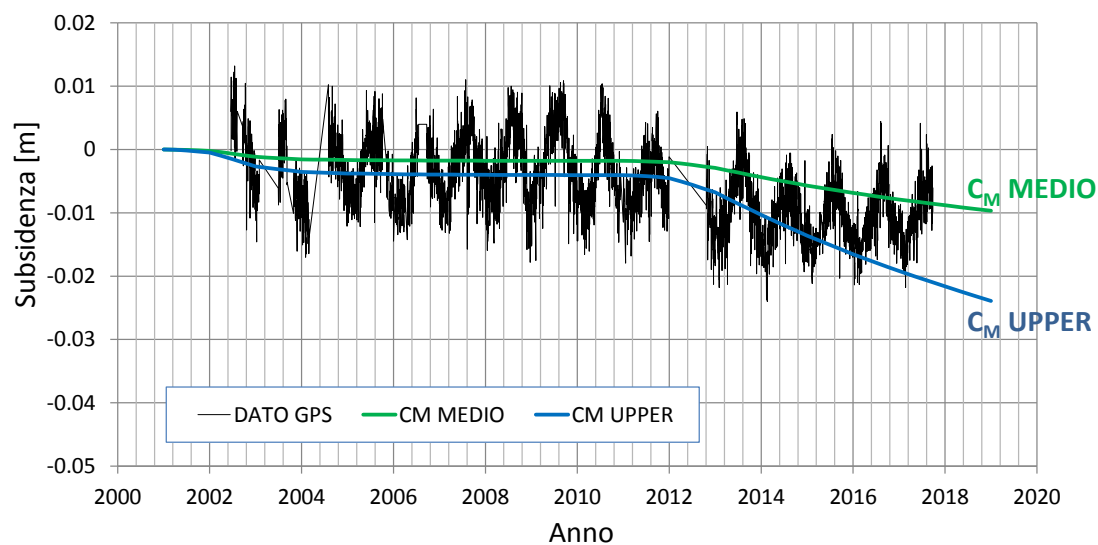


Figura 12 – Andamento della subsidenza misurata (GPS sulla piattaforma) depurata della componente naturale (0.87 mm/anno) stimata durante il periodo di chiusura della produzione (2003-2011) dagli stessi dati GPD, comparata con simulazioni con C_m medio e C_m upper.

6 Confronto con i dati da marker radioattivi

I valori di compattazione calcolati dal modello numerico sono stati confrontati con quelli misurati dalla serie di marker radioattivi installati nel pozzo Naomi 4 Dir, il cui posizionamento è avvenuto prima dell'inizio della produzione del campo.

Sono stati posizionati complessivamente 12 marker radioattivi tra le profondità di 3083.9 m MD e 3140.8 m MD, corrispondenti rispettivamente a circa 2616.9 m TVDSS e 2673.6 m TVDSS. I tre marker spacing più superficiali si trovano interamente al di sopra dei livelli attivi del reservoir. È stato effettuato, quindi, un survey iniziale nel giugno 2001, prima dell'inizio della produzione, seguito da un survey a maggio 2002, durante la prima fase di produzione. Il survey successivo è stato effettuato nel marzo 2011 appena prima della ripresa della produzione, seguito da ulteriori surveys a cadenza annuale.

In Tabella 6 sono riportate le profondità dei marker che delimitano ogni singolo marker spacing ed i risultati dei surveys di misura, in termini di valore medio di ampiezza degli spacing e di deviazione standard di ogni misura.

Tabella 6 – Risultati dei survey effettuati sul pozzo Naomi 4 Dir.

Marker Spacing	Profondità Marker Superiore	Profondità Marker Inferiore	Survey 2001		Survey 2002		Survey 2011		Survey 2012	
			Valore medio	Deviazione Standard	Valore medio	Deviazione Standard	Valore medio	Deviazione Standard	Valore medio	Deviazione Standard
#	[m MD]	[m MD]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1	3083.90	3092.30	10.1653	0.0005	10.1619	0.0021	10.1613	0.0027	10.1589	0.00366
2	3089.00	3099.30	10.2108	0.0005	10.2080	0.0026	10.2104	0.0039	10.2093	0.00139
3	3092.30	3104.10	10.2569	0.0003	10.2560	0.0043	10.2458	0.001	10.2589	0.00203
4	3099.30	3109.30	10.1435	0.001	10.1415	0.0036	10.1431	0.0057	10.1507	0.0007
5	3104.10	3115.30	10.9898	0.0004	10.9853	0.0046	10.9894	0.0046	10.9854	0.00152
6	3109.30	3120.30	11.1256	0.0006	11.1208	0.0042	11.1252	0.001	11.1256	0.0013
7	3115.30	3125.50	10.2157	0.0004	10.2131	0.0063	10.2113	0.0023	10.2159	0.00303
8	3120.30	3130.70	10.1163	0.0004	10.1128	0.0009	10.1169	0.0042	10.1187	0.00561
9	3125.50	3135.80	10.0824	0.0004	10.0780	0.0026	10.0798	0.0009	10.0783	0.00216
10	3130.70	3140.80	10.1552	0.0034	10.1538	0.0008	10.1580	0.0037	10.1525	0.00194

Marker Spacing	Profondità Marker Superiore	Profondità Marker Inferiore	Survey 2014		Survey 2015		Survey 2016	
			Valore medio	Deviazione Standard	Valore medio	Deviazione Standard	Valore medio	Deviazione Standard
#	[m MD]	[m MD]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
1	3083.90	3092.30	10.16272	0.0022	10.1646	0.0012	10.16275	0.0015
2	3089.00	3099.30	10.21389	0.0023	10.2120	0.0013	10.21156	0.0019
3	3092.30	3104.10	10.25666	0.0047	10.2552	0.0053	10.25645	0.0002
4	3099.30	3109.30	10.14495	0.0043	10.1403	0.0016	10.13603	0.0018
5	3104.10	3115.30	10.97915	0.003	10.9777	0.0055	10.97286	0.0020
6	3109.30	3120.30	11.12536	0.0037	11.1140	0.0083	11.11118	0.0109
7	3115.30	3125.50	10.21052	0.0019	10.2108	0.0017	10.20471	0.0011
8	3120.30	3130.70	10.11626	0.0049	10.1098	0.0031	10.10718	0.0005
9	3125.50	3135.80	10.08164	0.0019	10.0751	0.0002	10.07351	0.0016
10	3130.70	3140.80	10.15406	0.0019	10.1471	0.0031	10.14471	0.0045

La Figura 13 mostra il confronto tra compattazione misurata e simulata, rispettivamente nei casi Cm medio e Cm upper, nell'intervallo temporale complessivo in cui sono state effettuate misure di compattazione *in situ* (2001-2016). Per ciascuna misura è mostrato anche il relativo intervallo di confidenza (determinato come +/- due volte la deviazione standard).

Considerando la compattazione totale, come per i dati GPS, anche i dati da markers appaiono collocarsi circa a metà tra le previsioni di compattazione nei casi Cm medio e Cm upper.

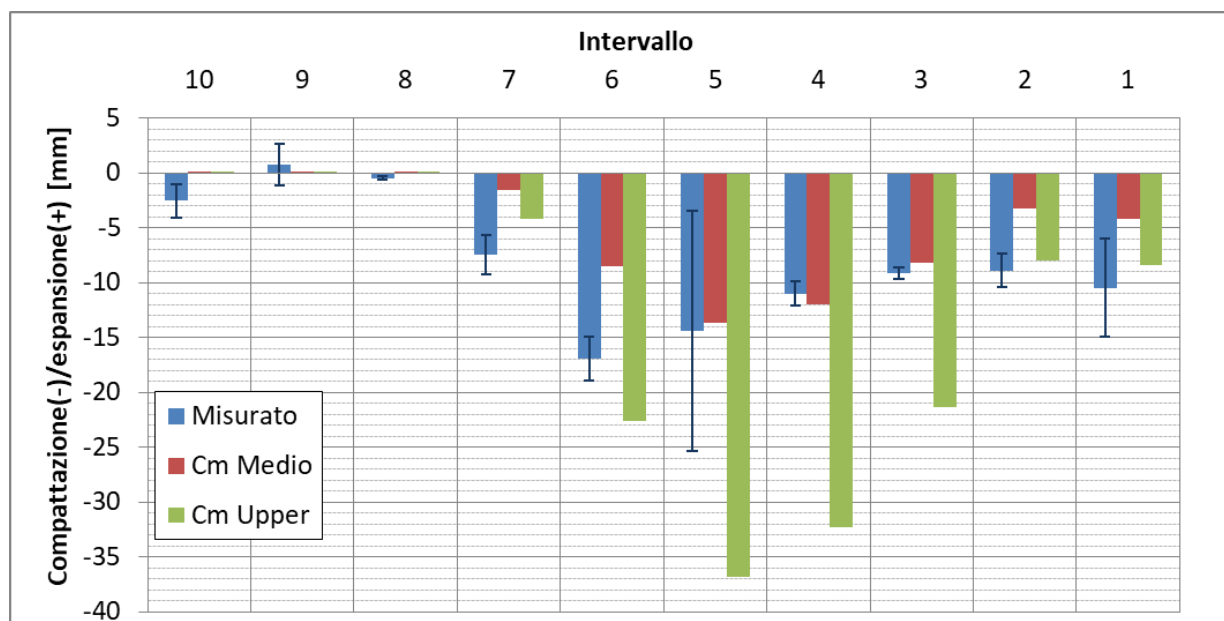


Figura 13 – Confronto tra compattazione osservata con markers radioattivi e compattazione simulata nel pozzo Naomi 4 Dir nell'intervallo temporale 2001-2016 nei diversi intervalli. La compattazione misurata è riportata insieme all'errore, calcolato a partire dalla deviazione standard delle misure.

Bibliografia

1. Eclipse™, Schlumberger, versione 2016.2.
2. Campi di Naomi e Pandora – Studio di giacimento – Scheda riassuntiva. Relazione Eni/GISE 02/2017. Marzo 2017.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. F.J. Santarelli, M. Brignoli, A. Pellegrino: *La scelta del coefficiente di Poisson per formazioni a grande scala* - 04/1996.
7. E. Carminati, C. Doglioni, D. Scrocca: *Apennines subduction-related subsidence of Venice (Italy)*. Geophysical Research Letters 30, No. 13, 1717, doi:10.1029/2003GL017001, 2003.
8. G. Gambolati, P. Teatini: *Natural land subsidence due to sediment compaction of the upper Adriatic sea basin*. Ingegneria e geologia degli acquiferi, n°11, 1998.