



Campo di Anemone

Modello Geomeccanico di Subsidenza

Management Summary

Executive Summary

Il presente rapporto illustra i risultati dello studio geomeccanico relativo al campo a gas di Anemone effettuato con lo scopo di valutare quantitativamente la subsidenza indotta dall'attività estrattiva. Il modello geomeccanico utilizzato è 3D agli elementi finiti e per descrivere il comportamento del materiale si è adottata una legge costitutiva elasto-viscoplastica, i cui parametri sono stati calibrati sui dati CGPS registrati in corrispondenza della piattaforma Anemone B. A fine simulazione, nel 2049, 30 anni dopo la fine della produzione, la massima subsidenza attesa è pari a 49 cm. La distanza minima del fenomeno dalla linea di costa risulta pari a circa 11 km.

Data
10/12/2019



Indice

1.	Introduzione	3
2.	Dati di subsidenza misurati dalla stazione CGPS	4
3.	Modello Geomeccanico agli Elementi Finiti	5
3.1.	Approccio metodologico	5
3.2.	Geometria del modello	5
3.3.	Proprietà dei materiali	7
3.3.1.	Densità della roccia	7
3.3.2.	Peso specifico dei fluidi saturanti	7
3.3.3.	Proprietà meccaniche	7
3.4.	Inizializzazione e storia di pressione	14
3.4.1.	Stato tensionale iniziale	14
3.4.2.	Storia di pressione	14
4.	Risultati delle simulazioni FEM	15
5.	Confronto con i dati di subsidenza misurati dalla stazione CGPS.....	18
	Bibliografia	19

2. Dati di subsidenza misurati dalla stazione CGPS

Sulla piattaforma di produzione Anemone B è installata una stazione CGPS in corrispondenza delle coordinate 2336.692 km E e 4899.913 km N. I valori di variazione altimetrica misurati dalla stazione sono stati utilizzati per calibrare i parametri del modello geomeccanico. Il periodo di osservazione va da agosto 2007 ad agosto 2019 (Figura 2).

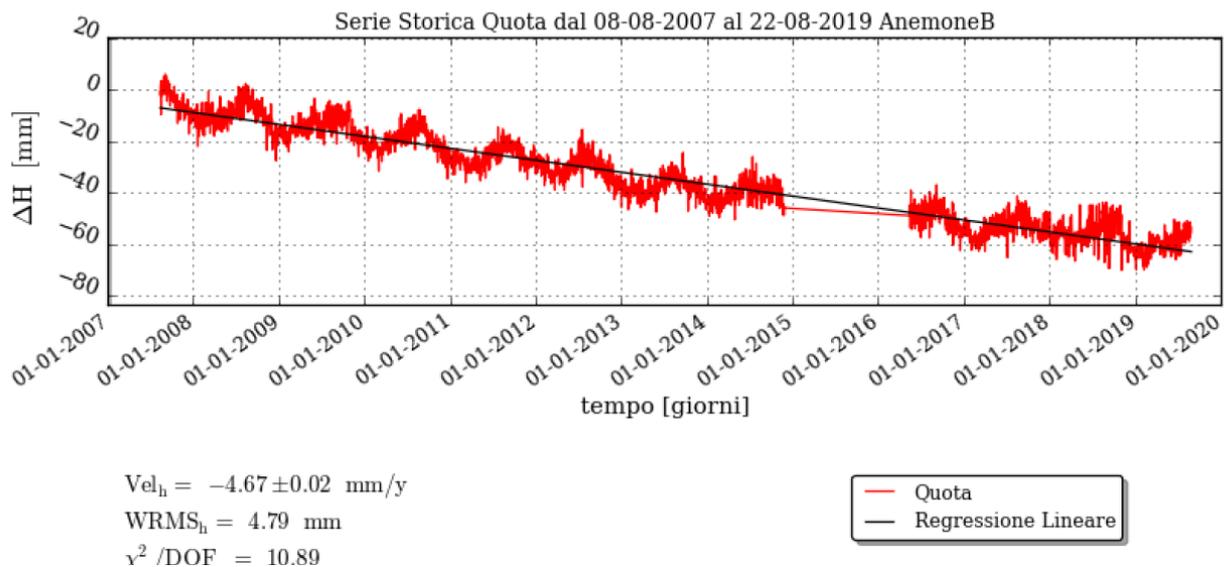


Figura 2 – Misurazioni effettuate dalla stazione CGPS di Anemone, aggiornate al 22/08/2019.

3. Modello Geomeccanico agli Elementi Finiti

3.1. *Approccio metodologico*

Lo studio geomeccanico di subsidenza è stato condotto utilizzando il codice agli elementi finiti 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, riprodotte 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 protratto per 30 anni, a pozzi chiusi dalla data di fine produzione, in modo da considerare l'effetto dell'evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero dopo la fine della produzione;
- il comportamento meccanico del materiale costituente le formazioni geologiche è stato descritto secondo il modello costitutivo elasto-viscoplastico 'Soft-Soil-Creep' di Vermeer e Neher [5] (nel seguito abbreviato con VNM), che è stato formulato arricchendo il classico modello elasto-plastico 'Modified Cam-Clay Model' con la componente viscosa della deformazione.
- variazioni altimetriche registrate dalla stazione CGPS installata sulla piattaforma Anemone B, utilizzate per calibrare alcuni parametri caratteristici della legge costitutiva.

3.2. *Geometria del modello*

Il modello agli elementi finiti è stato costruito a partire dal modello fluido-dinamico alle differenze finite del sistema giacimento-acquifero. Come ampiamente descritto in [4], la griglia di quest'ultimo è composta da 104x32x209 celle nelle direzioni X, Y e Z, rispettivamente, per un totale di 695552 celle, di cui 338035 attive.

Al fine di limitare il numero di gradi di libertà del modello agli elementi finiti, è stato effettuato un processo di *upscaling* orizzontale, cioè, un accorpamento di celle adiacenti e aventi un grado simile di saturazione a gas. Tale operazione ha prodotto un modello in cui ognuno dei 209 livelli del sistema giacimento-acquifero è composto da 39 elementi lungo X e 16 lungo Y.

Al fine di rendere trascurabili gli effetti dei vincoli cinematici che verranno imposti al contorno del modello agli elementi finiti, la griglia alle differenze finite (25 km di lunghezza e 7 km di larghezza) è stata estesa lateralmente fino a diventare un'area rettangolare di lati 100 km e 80 km. Tale estensione è stata realizzata con l'aggiunta, ad ognuno dei 209 livelli, di 40 elementi lungo X e 52 elementi lungo Y. L'insieme di tali elementi compone il *side-burden*. Per la stessa motivazione la griglia è stata estesa verso il basso con l'aggiunta di 5 livelli di *under-burden*, fino al raggiungimento della profondità di 8000 mssl.

Infine, dato l'obiettivo del presente studio, è necessario che il modello raggiunga il fondale marino e, quindi, sono stati aggiunti 5 livelli di *over-burden*.

Il modello complessivo risulta perciò composto da 79x68x219 elementi nelle direzioni X, Y e Z, rispettivamente, per un totale di 1176468 elementi, 1214400 nodi e 3768761 gradi di libertà. Esso si

estende verticalmente da 23 a 8000 mssl, ed in pianta copre un'area rettangolare di 100x80 km² (Figura 3).

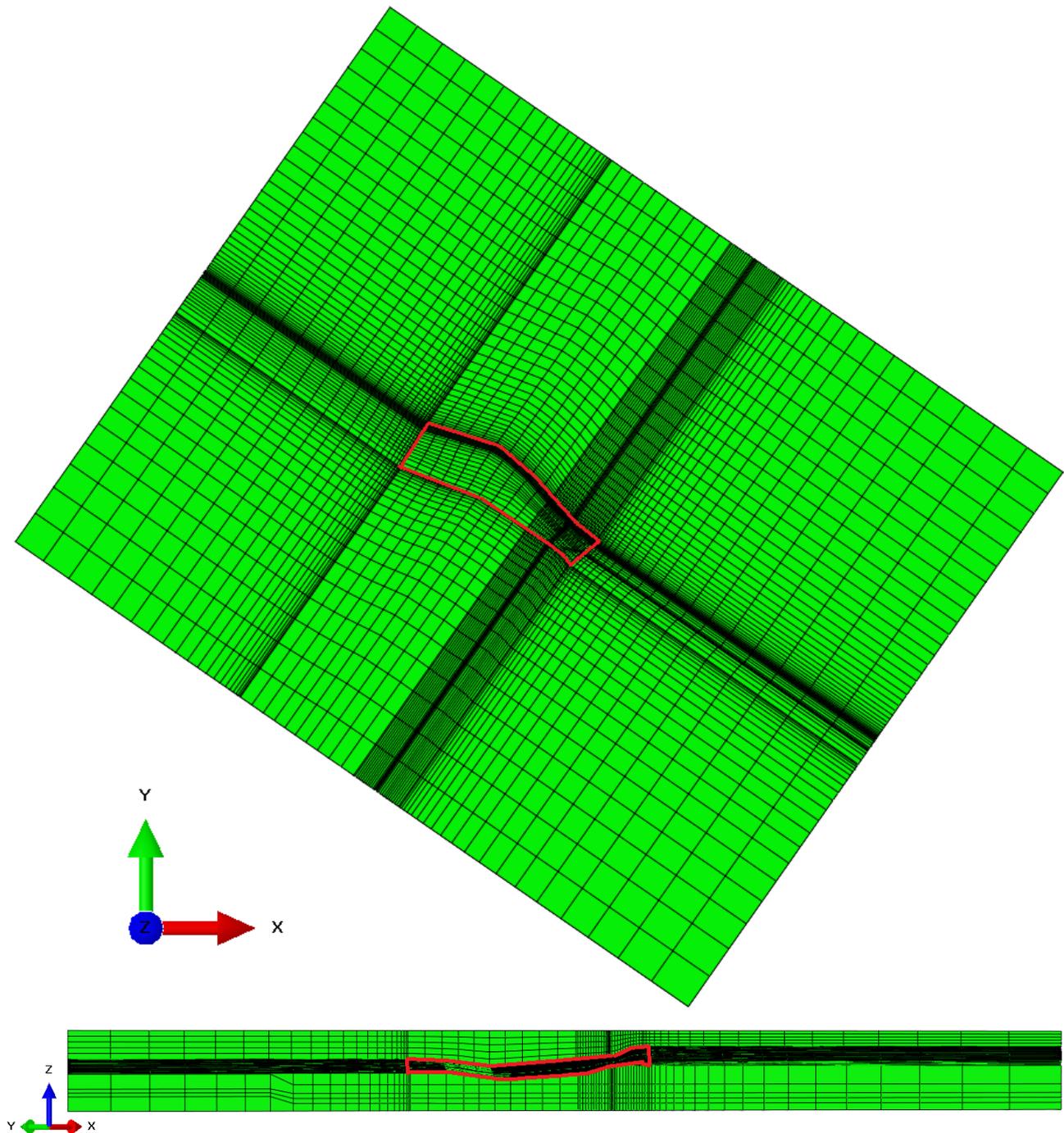


Figura 3 – Estensione del modello geomeccanico (il riquadro rosso indica l'estensione del modello fluido-dinamico).

3.3. Proprietà dei materiali

3.3.1. Densità della roccia

Per mezzo dei *density log* registrati in tre pozzi (Anemone 3 Dir A, Anemone 9 Dir, Benedetta 1) e del *sonic log* nel pozzo Anemone 1 è stato possibile ricavare il seguente profilo di densità ρ del mezzo poroso:

$$\rho(z) = 0.1324 \cdot (z - z_{fm}) + 2062.71 \quad (1)$$

in cui la profondità z è misurata in metri TVDSS (*True Vertical Depth Sub Sea*) e ρ in kg/m^3 , mentre la profondità del fondale marino z_{fm} è pari a 23 m (Figura 4). Per la densità dell'acqua marina è stato assunto il valore di 1030.0 kg/m^3 .

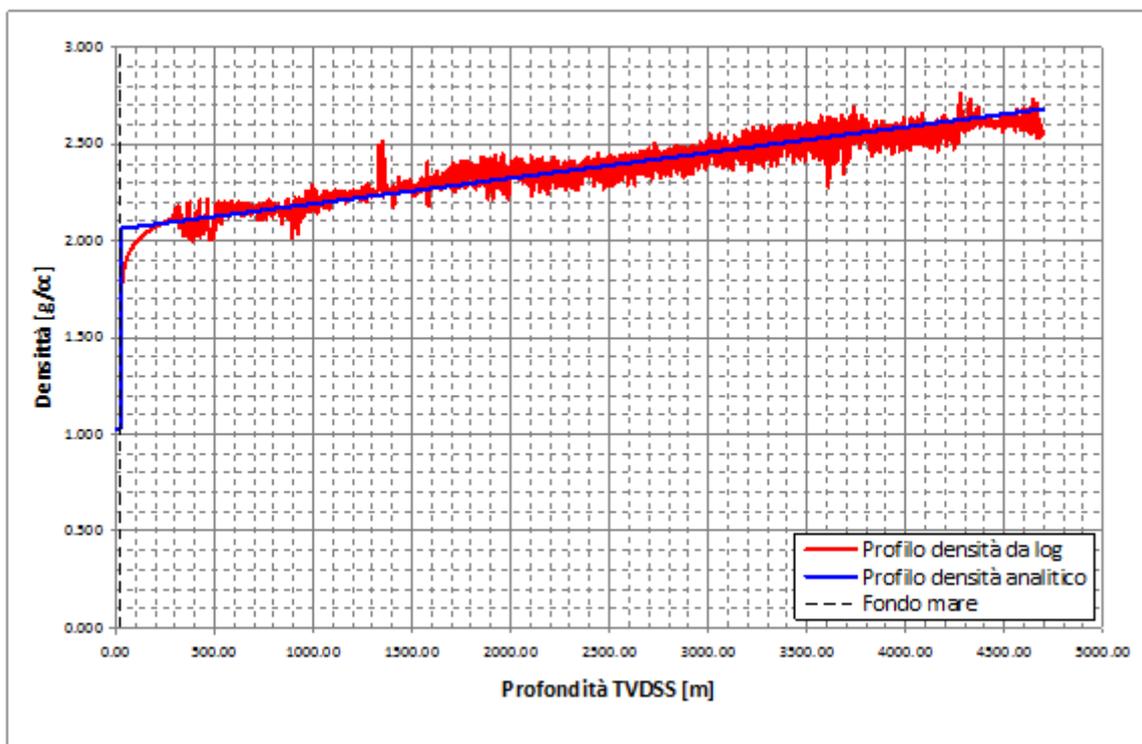


Figura 4 – Profilo di densità da log e analitico.

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 γ_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 dal modello Eclipse.

3.3.3. Proprietà meccaniche

Il comportamento meccanico del materiale costituente le formazioni geologiche è stato descritto secondo la legge costitutiva elasto-viscoplastica 'Soft-Soil-Creep' di Vermeer e Neher [5] (VNM),

che è stata formulata arricchendo il classico modello elasto-plastico ‘Modified Cam-Clay Model’ [6] (MCCM) con la componente viscosa della deformazione. Evidenze sperimentali mostrano che materiali come quelli dei giacimenti dell’area adriatica possono presentare una risposta di tipo elasto-viscoplastico alle variazioni di sforzo efficace [7].

I parametri del VNM, avendo un chiaro significato fisico, possono essere ricavati da prove sperimentali. I parametri da assegnare sono i seguenti:

- λ^* indice di compressione modificato;
- κ^* indice di ricompressione modificato;
- μ^* indice di creep modificato;
- ν coefficiente di Poisson;
- M pendenza della retta di stato critico;
- $pseudo-OCR_{ini-rif}$ grado di sovraconsolidazione iniziale.

I valori dei parametri λ^* e κ^* sono stati ottenuti direttamente dall’interpretazione dei risultati di prove di laboratorio effettuate su 8 campioni prelevati dal pozzo Anemone 3 dir [8] e sono rispettivamente pari a 3.86e-02 e 4.44e-03.

Il valore di μ^* ottenuto sulla base delle medesime prove sperimentali è stato successivamente calibrato in modo da riprodurre accuratamente le misure registrate dalla stazione CGPS installata sulla piattaforma Anemone B (§2), e nel modello è stato posto pari a 1.21e-03.

Per il coefficiente di Poisson è stato utilizzato il valore 0.25, in accordo con dati di laboratorio del pozzo Anemone 11 Dir. Infine la pendenza M della linea di stato critico è stata posta pari a 1.33.

Non essendo possibile ricavare il valore del grado di consolidazione iniziale da prove di laboratorio, in prima approssimazione è stata ottenuta una stima analitica di questo parametro ipotizzando un *rate* di deformazione costante durante tutto il periodo di sedimentazione. Successivamente questo valore è stato calibrato in modo da riprodurre gli spostamenti osservati in corrispondenza della stazione CGPS. Il valore finale utilizzato per $pseudo-OCR_{ini-rif}$ è pari a 1.9.

Il parametro geomeccanico chiave negli studi di subsidenza è la comprimibilità edometrica c_m del materiale, calcolata come segue:

$$c_m = \kappa^* / \sigma'_v \quad (2)$$

dove κ^* è l’indice di ricompressione modificato del modello costitutivo di Vermeer e Neher e σ'_v è la tensione verticale efficace, definita come la differenza tra la tensione verticale totale e la pressione dei pori p :

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

con σ_v calcolata a partire dalla densità del materiale e p fornita dal modello fluido-dinamico.

Si precisa che gli interlayer inattivi nel modello fluido-dinamico e le regioni di over-, under-, side-burden sono descritti come mezzi elastici lineari, approssimazione più che sufficiente dal momento che in tali intervalli non sono presenti variazioni di pressione dovute alla produzione.

Infine, si sottolinea che il campo di pressione del modello è stato stimato utilizzando nel modello dinamico comprimibilità dei pori coerenti con la comprimibilità edometrica c_m del modello geomeccanico.

Per la caratterizzazione meccanica delle formazioni carbonatiche e marnoso-gessose presenti nell’under-burden, invece, si è fatto riferimento alle informazioni disponibili per degli analoghi e si



sono assegnati i seguenti valori di c_m e coefficiente di Poisson: $2.77e-06 \text{ bar}^{-1}$ e 0.35 per i carbonati, $4.80e-06 \text{ bar}^{-1}$ e 0.25 per marne e gessi, rispettivamente.

Nella Tabella 1 sono riportati, per ciascuno dei 219 livelli di Abaqus, i valori di profondità media, p , σ_v , σ'_v , c_m , ν e modulo di Young E .

Tabella 1 – Proprietà dei materiali assegnate ad ogni layer.

LIVELLO GEOLOGICO	Eclipse Layer		Abaqus Layer	z media	p	σ_v	σ'_v	c_m	ν	E
	0/1 flag	number		[m]	[bar]	[bar]	[bar]	[bar ⁻¹]	-	[bar]
Over-burden			OVB1	470.8	47.6	94.3	46.8	9.50E-05	0.25	8.77E+03
			OVB2	919.6	92.9	189.0	96.1	4.62E-05	0.25	1.80E+04
			OVB3	1368.4	138.2	286.3	148.1	3.00E-05	0.25	2.78E+04
			OVB4	1817.1	183.6	386.3	202.7	2.19E-05	0.25	3.81E+04
			OVB5	2265.9	228.9	488.8	260.0	1.71E-05	0.25	4.87E+04
PL1-D1	1	1		2714.7	297.4	594.0	296.6	1.50E-05	0.25	5.56E+04
interlayer	0	2		-	-	-	295.7	1.50E-05	0.25	5.55E+04
PL1-E	0	3		2723.2	300.3	596.0	295.7	1.50E-05	0.25	5.55E+04
PL1-Ea	1	4		2731.7	303.2	598.0	294.8	1.51E-05	0.25	5.53E+04
PL1-E1	1	5		2737.0	304.0	599.3	295.4	1.50E-05	0.25	5.54E+04
PL1-E1a	1	6		2744.1	303.7	601.0	297.3	1.49E-05	0.25	5.58E+04
interlayer	0	7		-	-	-	297.3	1.49E-05	0.25	5.58E+04
PL1-F	1	8		2757.3	303.1	604.1	301.0	1.48E-05	0.25	5.65E+04
interlayer	0	9		-	-	-	301.9	1.47E-05	0.25	5.66E+04
PL1-G	1	10		2767.1	303.7	606.5	302.8	1.47E-05	0.25	5.68E+04
interlayer	0	11		-	-	-	304.6	1.46E-05	0.25	5.71E+04
PL1-H	1	12		2780.7	303.4	609.7	306.3	1.45E-05	0.25	5.75E+04
interlayer	0	13		-	-	-	306.3	1.45E-05	0.25	5.75E+04
PL1-H1	1	14		2789.6	303.2	611.8	308.7	1.44E-05	0.25	5.79E+04
interlayer	0	15		-	-	-	310.5	1.43E-05	0.25	5.83E+04
PL1-H3	1	16		2808.0	303.8	616.2	312.4	1.42E-05	0.25	5.86E+04
interlayer	0	17		-	-	-	313.0	1.42E-05	0.25	5.87E+04
PL1-H4	1	18		2813.3	304.0	617.5	313.5	1.42E-05	0.25	5.88E+04
interlayer	0	19		-	-	-	312.3	1.42E-05	0.25	5.86E+04
PL1-I_1	1	20		2829.5	310.3	621.3	311.1	1.43E-05	0.25	5.84E+04
interlayer	0	21		-	-	-	311.1	1.43E-05	0.25	5.84E+04
PL1-I_2	1	22		2829.5	310.3	621.3	311.1	1.43E-05	0.25	5.84E+04
PL1-I_3	1	23		2829.5	310.3	621.3	311.1	1.43E-05	0.25	5.84E+04
PL1-I_4	1	24		2833.1	309.9	622.2	312.3	1.42E-05	0.25	5.86E+04
interlayer	0	25		-	-	-	312.8	1.42E-05	0.25	5.87E+04
PL1-I1	1	26		2837.8	310.1	623.3	313.2	1.42E-05	0.25	5.88E+04
interlayer	0	27		-	-	-	314.1	1.41E-05	0.25	5.89E+04
PL1-J_1	1	28		2847.1	310.6	625.5	314.9	1.41E-05	0.25	5.91E+04
interlayer	0	29		-	-	-	314.9	1.41E-05	0.25	5.91E+04



PL1-J_2	1	30	2851.3	310.1	626.5	316.4	1.40E-05	0.25	5.94E+04
interlayer	0	31	-	-	-	317.6	1.40E-05	0.25	5.96E+04
PL1-J_3	1	32	2857.1	309.2	627.9	318.8	1.39E-05	0.25	5.98E+04
interlayer	0	33	-	-	-	315.3	1.41E-05	0.25	5.91E+04
PL1-K_1	1	34	2874.6	320.3	632.1	311.8	1.42E-05	0.25	5.85E+04
PL1-K_2	1	35	2874.6	320.3	632.1	311.8	1.42E-05	0.25	5.85E+04
interlayer	0	36	-	-	-	313.5	1.42E-05	0.25	5.88E+04
PL1-K_3	1	37	2890.1	320.6	635.8	315.2	1.41E-05	0.25	5.91E+04
PL1-K_4	1	38	2890.1	320.6	635.8	315.2	1.41E-05	0.25	5.91E+04
PL1-K_5	1	39	2899.3	320.8	638.0	317.3	1.40E-05	0.25	5.95E+04
interlayer	0	40	-	-	-	320.5	1.39E-05	0.25	6.01E+04
PL1-L_1	1	41	2926.6	320.9	644.6	323.7	1.37E-05	0.25	6.07E+04
interlayer	0	42	-	-	-	325.6	1.36E-05	0.25	6.11E+04
PL1-L_2	1	43	2946.1	321.8	649.3	327.5	1.36E-05	0.25	6.14E+04
interlayer	0	44	-	-	-	328.4	1.35E-05	0.25	6.16E+04
PL1-L_3	1	45	2954.7	322.0	651.3	329.4	1.35E-05	0.25	6.18E+04
interlayer	0	46	-	-	-	330.4	1.34E-05	0.25	6.20E+04
PL1-M_1	1	47	2966.4	322.7	654.1	331.4	1.34E-05	0.25	6.22E+04
PL1-M_2	1	48	2979.5	323.9	657.3	333.4	1.33E-05	0.25	6.25E+04
interlayer	0	49	-	-	-	333.4	1.33E-05	0.25	6.25E+04
PL1-N	1	50	2997.4	330.7	661.6	331.0	1.34E-05	0.25	6.21E+04
interlayer	0	51	-	-	-	331.0	1.34E-05	0.25	6.21E+04
PL1-N1	1	52	3006.7	331.6	663.8	332.3	1.34E-05	0.25	6.23E+04
interlayer	0	53	-	-	-	333.1	1.33E-05	0.25	6.25E+04
PL1-N2	1	54	3014.0	331.6	665.6	334.0	1.33E-05	0.25	6.27E+04
interlayer	0	55	-	-	-	335.2	1.33E-05	0.25	6.29E+04
PL1-O_1	1	56	3026.1	332.2	668.5	336.3	1.32E-05	0.25	6.31E+04
interlayer	0	57	-	-	-	339.0	1.31E-05	0.25	6.36E+04
PL1-O_2	1	58	3047.4	332.0	673.7	341.6	1.30E-05	0.25	6.41E+04
PL1-O_3	1	59	3047.4	332.0	673.7	341.6	1.30E-05	0.25	6.41E+04
PL1-O_4	1	60	3061.4	333.9	677.1	343.1	1.29E-05	0.25	6.44E+04
interlayer	0	61	-	-	-	340.8	1.30E-05	0.25	6.39E+04
PL1-P	1	62	3083.7	343.9	682.4	338.5	1.31E-05	0.25	6.35E+04
interlayer	0	63	-	-	-	338.5	1.31E-05	0.25	6.35E+04
PL1-Pa	1	64	3083.7	343.9	682.4	338.5	1.31E-05	0.25	6.35E+04
interlayer	0	65	-	-	-	339.8	1.31E-05	0.25	6.37E+04
PL1-P1	1	66	3110.0	347.7	688.8	341.1	1.30E-05	0.25	6.40E+04
interlayer	0	67	-	-	-	344.3	1.29E-05	0.25	6.46E+04
PL1-Q_1	1	68	3135.9	347.6	695.1	347.5	1.28E-05	0.25	6.52E+04
PL1-Q_2	1	69	3135.9	347.6	695.1	347.5	1.28E-05	0.25	6.52E+04
interlayer	0	70	-	-	-	347.7	1.28E-05	0.25	6.52E+04
PL1-R_1	1	71	3149.1	350.4	698.3	347.9	1.28E-05	0.25	6.53E+04
PL1-R_2	1	72	3157.2	350.3	700.3	350.0	1.27E-05	0.25	6.57E+04



interlayer	0	73	-	-	-	350.3	1.27E-05	0.25	6.57E+04
PL1-Sa	1	74	3180.0	355.6	705.8	350.3	1.27E-05	0.25	6.57E+04
PL1-Sb	1	75	3180.0	355.6	705.8	350.3	1.27E-05	0.25	6.57E+04
interlayer	0	76	-	-	-	353.0	1.26E-05	0.25	6.62E+04
PL1-S_1	1	77	3202.5	355.6	711.3	355.7	1.25E-05	0.25	6.67E+04
interlayer	0	78	-	-	-	355.0	1.25E-05	0.25	6.66E+04
PL1-S_2a	1	79	3207.8	358.3	712.6	354.3	1.25E-05	0.25	6.65E+04
interlayer	0	80	-	-	-	355.0	1.25E-05	0.25	6.66E+04
PL1-S_2b	1	81	3214.8	358.5	714.3	355.8	1.25E-05	0.25	6.67E+04
interlayer	0	82	-	-	-	356.2	1.25E-05	0.25	6.68E+04
PL1-Ta	1	83	3238.1	363.4	720.0	356.5	1.25E-05	0.25	6.69E+04
PL1-Tb	1	84	3238.1	363.4	720.0	356.5	1.25E-05	0.25	6.69E+04
PL1-Tc	1	85	3238.1	363.4	720.0	356.5	1.25E-05	0.25	6.69E+04
interlayer	0	86	-	-	-	359.7	1.23E-05	0.25	6.75E+04
PL1-T_1a	1	87	3274.6	366.0	728.9	362.9	1.22E-05	0.25	6.81E+04
PL1-T_1b	1	88	3274.6	366.0	728.9	362.9	1.22E-05	0.25	6.81E+04
interlayer	0	89	-	-	-	362.9	1.22E-05	0.25	6.81E+04
PL1-U_1	1	90	3274.6	366.0	728.9	362.9	1.22E-05	0.25	6.81E+04
interlayer	0	91	-	-	-	362.9	1.22E-05	0.25	6.81E+04
PL1-U_2	1	92	3274.6	366.0	728.9	362.9	1.22E-05	0.25	6.81E+04
interlayer	0	93	-	-	-	362.9	1.22E-05	0.25	6.81E+04
PL1-U_3	1	94	3274.6	366.0	728.9	362.9	1.22E-05	0.25	6.81E+04
interlayer	0	95	-	-	-	364.7	1.22E-05	0.25	6.84E+04
PL1-V_1	1	96	3325.3	374.9	741.3	366.5	1.21E-05	0.25	6.87E+04
PL1-V_2	1	97	3325.3	374.9	741.3	366.5	1.21E-05	0.25	6.87E+04
PL1-V_3	1	98	3342.7	375.6	745.6	369.9	1.20E-05	0.25	6.94E+04
interlayer	0	99	-	-	-	370.2	1.20E-05	0.25	6.95E+04
PL1-Z	1	100	3365.9	380.7	751.3	370.6	1.20E-05	0.25	6.95E+04
interlayer	0	101	-	-	-	371.3	1.20E-05	0.25	6.96E+04
PL-A	1	102	3385.1	384.0	756.0	372.0	1.19E-05	0.25	6.98E+04
interlayer	0	103	-	-	-	372.0	1.19E-05	0.25	6.98E+04
PL-B_1	1	104	3399.5	387.6	759.5	372.0	1.19E-05	0.25	6.98E+04
interlayer	0	105	-	-	-	369.6	1.20E-05	0.25	6.93E+04
PL-B_2	1	106	3423.8	398.3	765.5	367.3	1.21E-05	0.25	6.89E+04
interlayer	0	107	-	-	-	369.5	1.20E-05	0.25	6.93E+04
PL-B_3	1	108	3445.5	399.2	770.9	371.7	1.19E-05	0.25	6.97E+04
interlayer	0	109	-	-	-	374.0	1.19E-05	0.25	7.02E+04
PL-B1	1	110	3464.8	399.3	775.6	376.3	1.18E-05	0.25	7.06E+04
interlayer	0	111	-	-	-	377.5	1.18E-05	0.25	7.08E+04
PL-B2	1	112	3492.3	403.8	782.4	378.6	1.17E-05	0.25	7.10E+04
interlayer	0	113	-	-	-	378.6	1.17E-05	0.25	7.10E+04
PL-C_1	1	114	3492.3	403.8	782.4	378.6	1.17E-05	0.25	7.10E+04
interlayer	0	115	-	-	-	378.6	1.17E-05	0.25	7.10E+04



PL-C_2	1	116	3492.3	403.8	782.4	378.6	1.17E-05	0.25	7.10E+04
PL-C_3	1	117	3492.3	403.8	782.4	378.6	1.17E-05	0.25	7.10E+04
interlayer	0	118	-	-	-	379.8	1.17E-05	0.25	7.13E+04
PL-D	1	119	3515.3	407.1	788.1	381.0	1.17E-05	0.25	7.15E+04
interlayer	0	120	-	-	-	381.4	1.16E-05	0.25	7.16E+04
PL-E	1	121	3531.3	410.3	792.1	381.8	1.16E-05	0.25	7.16E+04
interlayer	0	122	-	-	-	388.6	1.14E-05	0.25	7.29E+04
PL-F_1	1	123	3562.1	411.1	799.7	388.6	1.14E-05	0.25	7.29E+04
PL-F_2	1	124	3562.1	411.1	799.7	388.6	1.14E-05	0.25	7.29E+04
interlayer	0	125	-	-	-	384.9	1.15E-05	0.25	7.22E+04
PL-G_1	1	126	3605.7	429.4	810.6	381.2	1.17E-05	0.25	7.15E+04
PL-G_2	1	127	3605.7	429.4	810.6	381.2	1.17E-05	0.25	7.15E+04
interlayer	0	128	-	-	-	381.2	1.17E-05	0.25	7.15E+04
PL-H	1	129	3605.7	429.4	810.6	381.2	1.17E-05	0.25	7.15E+04
interlayer	0	130	-	-	-	381.2	1.17E-05	0.25	7.15E+04
PL-I_1	1	131	3605.7	429.4	810.6	381.2	1.17E-05	0.25	7.15E+04
interlayer	0	132	-	-	-	384.7	1.15E-05	0.25	7.22E+04
PL-I_2	1	133	3638.7	430.6	818.8	388.2	1.14E-05	0.25	7.28E+04
PL-I_3	1	134	3638.7	430.6	818.8	388.2	1.14E-05	0.25	7.28E+04
interlayer	0	135	-	-	-	388.2	1.14E-05	0.25	7.28E+04
PL-I1	1	136	3654.1	431.2	822.6	391.5	1.13E-05	0.25	7.34E+04
interlayer	0	137	-	-	-	390.7	1.14E-05	0.25	7.33E+04
PL-J_1	1	138	3667.6	436.1	826.0	389.9	1.14E-05	0.25	7.32E+04
PL-J_2	1	139	3667.6	436.1	826.0	389.9	1.14E-05	0.25	7.32E+04
interlayer	0	140	-	-	-	391.3	1.14E-05	0.25	7.34E+04
PL-J_3	1	141	3697.2	440.6	833.4	392.8	1.13E-05	0.25	7.37E+04
PL-J_4	1	142	3697.2	440.6	833.4	392.8	1.13E-05	0.25	7.37E+04
PL-J_5	1	143	3697.2	440.6	833.4	392.8	1.13E-05	0.25	7.37E+04
interlayer	0	144	-	-	-	392.8	1.13E-05	0.25	7.37E+04
PL-J_6	1	145	3733.2	449.6	842.4	392.9	1.13E-05	0.25	7.37E+04
interlayer	0	146	-	-	-	392.9	1.13E-05	0.25	7.37E+04
PL-J1_1	1	147	3733.2	449.6	842.4	392.9	1.13E-05	0.25	7.37E+04
PL-J1_2	1	148	3733.2	449.6	842.4	392.9	1.13E-05	0.25	7.37E+04
interlayer	0	149	-	-	-	392.9	1.13E-05	0.25	7.37E+04
PL-J2_1	1	150	3733.2	449.6	842.4	392.9	1.13E-05	0.25	7.37E+04
PL-J2_2	1	151	3753.9	451.8	847.6	395.8	1.12E-05	0.25	7.43E+04
interlayer	0	152	-	-	-	395.8	1.12E-05	0.25	7.43E+04
PL-K	1	153	3774.6	451.4	852.8	401.4	1.11E-05	0.25	7.53E+04
interlayer	0	154	-	-	-	401.4	1.11E-05	0.25	7.53E+04
PL-K1_1	1	155	3774.6	451.4	852.8	401.4	1.11E-05	0.25	7.53E+04
PL-K1_2	1	156	3791.2	453.0	857.0	403.9	1.10E-05	0.25	7.58E+04
interlayer	0	157	-	-	-	403.9	1.10E-05	0.25	7.58E+04
PL-L_1	1	158	3791.2	453.0	857.0	403.9	1.10E-05	0.25	7.58E+04



interlayer	0	159	-	-	-	404.2	1.10E-05	0.25	7.58E+04
PL-L_2	1	160	3811.5	457.8	862.1	404.2	1.10E-05	0.25	7.58E+04
PL-L_3	1	161	3836.8	483.0	868.4	385.4	1.15E-05	0.25	7.23E+04
interlayer	0	162	-	-	-	385.4	1.15E-05	0.25	7.23E+04
PL-M_1	1	163	3836.8	483.0	868.4	385.4	1.15E-05	0.25	7.23E+04
interlayer	0	164	-	-	-	385.4	1.15E-05	0.25	7.23E+04
PL-M_2	1	165	3836.8	483.0	868.4	385.4	1.15E-05	0.25	7.23E+04
PL-M_3	1	166	3836.8	483.0	868.4	385.4	1.15E-05	0.25	7.23E+04
interlayer	0	167	-	-	-	390.2	1.14E-05	0.25	7.32E+04
PL-N_0	1	168	3855.9	483.0	873.2	390.2	1.14E-05	0.25	7.32E+04
interlayer	0	169	-	-	-	393.4	1.13E-05	0.25	7.38E+04
PL-N_1	1	170	3868.6	483.1	876.4	393.4	1.13E-05	0.25	7.38E+04
PL-N_2	1	171	3868.6	483.1	876.4	393.4	1.13E-05	0.25	7.38E+04
PL-N_3	1	172	3868.6	483.1	876.4	393.4	1.13E-05	0.25	7.38E+04
interlayer	0	173	-	-	-	397.4	1.12E-05	0.25	7.46E+04
PL-N_4	1	174	3896.3	486.0	883.4	397.4	1.12E-05	0.25	7.46E+04
PL-N_5	1	175	3896.3	486.0	883.4	397.4	1.12E-05	0.25	7.46E+04
interlayer	0	176	-	-	-	397.4	1.12E-05	0.25	7.46E+04
PL-O_1	1	177	3896.3	486.0	883.4	397.4	1.12E-05	0.25	7.46E+04
PL-O_2	1	178	3896.3	486.0	883.4	397.4	1.12E-05	0.25	7.46E+04
interlayer	0	179	-	-	-	402.4	1.10E-05	0.25	7.55E+04
PL-O_3	1	180	3919.4	486.9	889.3	402.4	1.10E-05	0.25	7.55E+04
interlayer	0	181	-	-	-	402.4	1.10E-05	0.25	7.55E+04
PL-P_1	1	182	3933.5	495.7	892.8	397.1	1.12E-05	0.25	7.45E+04
interlayer	0	183	-	-	-	397.1	1.12E-05	0.25	7.45E+04
PL-P_2	1	184	3949.3	495.2	896.8	401.6	1.11E-05	0.25	7.53E+04
interlayer	0	185	-	-	-	401.6	1.11E-05	0.25	7.53E+04
PL-P_3	1	186	3958.2	495.5	899.1	403.6	1.10E-05	0.25	7.57E+04
interlayer	0	187	-	-	-	405.6	1.10E-05	0.25	7.61E+04
PL-Q_1	1	188	3973.3	497.3	902.9	405.6	1.10E-05	0.25	7.61E+04
interlayer	0	189	-	-	-	405.6	1.10E-05	0.25	7.61E+04
PL-Q_2	1	190	3987.5	498.4	906.5	408.2	1.09E-05	0.25	7.66E+04
interlayer	0	191	-	-	-	408.2	1.09E-05	0.25	7.66E+04
PL-R_1	1	192	4017.2	499.9	914.1	414.2	1.07E-05	0.25	7.77E+04
PL-R_2	1	193	4017.2	499.9	914.1	414.2	1.07E-05	0.25	7.77E+04
PL-R_3	1	194	4017.2	499.9	914.1	414.2	1.07E-05	0.25	7.77E+04
interlayer	0	195	-	-	-	417.3	1.06E-05	0.25	7.83E+04
PL-S_1	1	196	4044.2	500.5	920.9	420.5	1.06E-05	0.25	7.89E+04
interlayer	0	197	-	-	-	418.6	1.06E-05	0.25	7.85E+04
PL-S_2	1	198	4059.4	508.1	924.8	416.7	1.07E-05	0.25	7.82E+04
PL-S_3	1	199	4072.7	508.1	928.2	420.1	1.06E-05	0.25	7.88E+04
interlayer	0	200	-	-	-	421.3	1.05E-05	0.25	7.90E+04
PL-T_1	1	201	4084.4	508.6	931.2	422.6	1.05E-05	0.25	7.93E+04

interlayer	0	202	-	-	-	422.2	1.05E-05	0.25	7.92E+04
PL-T_2	1	203	4091.2	511.1	932.9	421.8	1.05E-05	0.25	7.91E+04
interlayer	0	204	-	-	-	423.3	1.05E-05	0.25	7.94E+04
PL-T_3	1	205	4108.5	512.5	937.3	424.8	1.05E-05	0.25	7.97E+04
interlayer	0	206	-	-	-	424.8	1.05E-05	0.25	7.97E+04
PL-T_4	1	207	4124.1	514.4	941.3	426.9	1.04E-05	0.25	8.01E+04
interlayer	0	208	-	-	-	429.5	1.03E-05	0.25	8.06E+04
PL-U	0	209	4134.1	514.4	943.9	429.5	1.03E-05	0.25	8.06E+04
Under-burden		UDB1 (marne)	4770.1	481.8	1109.1	627.3	4.80E-06	0.25	1.74E+05
		UDB2 (marne)	5416.1	547.1	1282.3	735.2	4.80E-06	0.25	1.74E+05
		UDB2 (carbo)					2.77E-06	0.35	2.25E+05
		UDB3 (marne)	6062.1	612.3	1461.0	848.6	4.80E-06	0.25	1.74E+05
		UDB3 (carbo)					2.77E-06	0.35	2.25E+05
		UDB4 (marne)	6708.0	677.6	1645.0	967.4	4.80E-06	0.25	1.74E+05
		UDB4 (carbo)					2.77E-06	0.35	2.25E+05
		UDB5	7354.0	742.8	1834.5	1091.7	2.77E-06	0.35	2.25E+05

3.4. Inizializzazione e storia di pressione

3.4.1. Stato tensionale iniziale

Lo sforzo verticale totale σ_v è stato definito a partire dal profilo di densità descritto nel paragrafo 3.3.1.

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

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

dove K_0 denota il coefficiente di spinta a riposo che è stato posto pari a 0.54 [9], e considerando uno stato tensionale isotropo nel piano orizzontale.

3.4.2. Storia di pressione

La distribuzione tridimensionale del campo di pressione e la sua evoluzione temporale, così come calcolata dal modello fluido-dinamico Eclipse, è stata imposta come condizione forzante nei nodi del modello FE corrispondenti ai livelli del giacimento e degli acquiferi connessi.

Le pressioni sono state importate in 67 step temporali, selezionati in modo tale che non si verificassero eccessive variazioni di pressione tra due intervalli successivi.

4. Risultati delle simulazioni FEM

In questo paragrafo vengono riportati i risultati forniti dalle simulazioni geomeccaniche agli elementi finiti. Il fenomeno di subsidenza viene descritto sinteticamente attraverso tre indici:

1. la subsidenza massima;
2. l'estensione massima, definita come la massima distanza del punto di massimo dalla linea di iso-subsidenza dei 2 cm – considerata come limite areale del fenomeno;
3. la distanza minima della linea di iso-subsidenza dei 2 cm dalla costa.

Le previsioni di subsidenza fornite dal modello elasto-viscoplastico agli elementi finiti sono riportate in Tabella 2 per alcuni step temporali: 1-gen-2019 (fine produzione), 1-gen-2028 e 1-gen-2049 (fine della simulazione). Lo studio, infatti, è stato protratto per 30 anni dopo la chiusura dei pozzi in modo da considerare l'effetto dell'evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero dopo la fine della produzione.

Tabella 2 – Risultati: massima subsidenza, estensione e distanza dalla costa del fenomeno.

Data	Subsidenza Punto di Max (cm)	Estensione Max (km)	Distanza Min da Costa (km)
01-gen-2019	45	9	11
01-gen-2028	48	10	11
01-gen-2049	49	11	11

Dall'analisi dei risultati segue che:

- il valore di massima subsidenza è pari a 49 cm ed è previsto alla fine della simulazione in corrispondenza del punto di coordinate 2335763 m E, 4898177 m N. Tale punto si trova a 2 km dalla piattaforma Anemone B. In Figura 5 è riportata l'evoluzione nel tempo della subsidenza relativa al punto di massimo;
- la massima estensione della linea di iso-subsidenza dei 2 cm è in direzione Nord-Ovest: a fine produzione (1-gen-2019) è pari a 9 km (Figura 6), mentre raggiunge gli 11 km circa al termine della simulazione (Figura 7);
- come dimostra l'analisi dell'evoluzione temporale della linea di iso-subsidenza dei 2 cm (Figura 8), l'area interessata dal fenomeno subsidenziale risulta in fase di stabilizzazione. Il fenomeno si esaurisce a circa 11 km dalla linea di costa di Rimini.

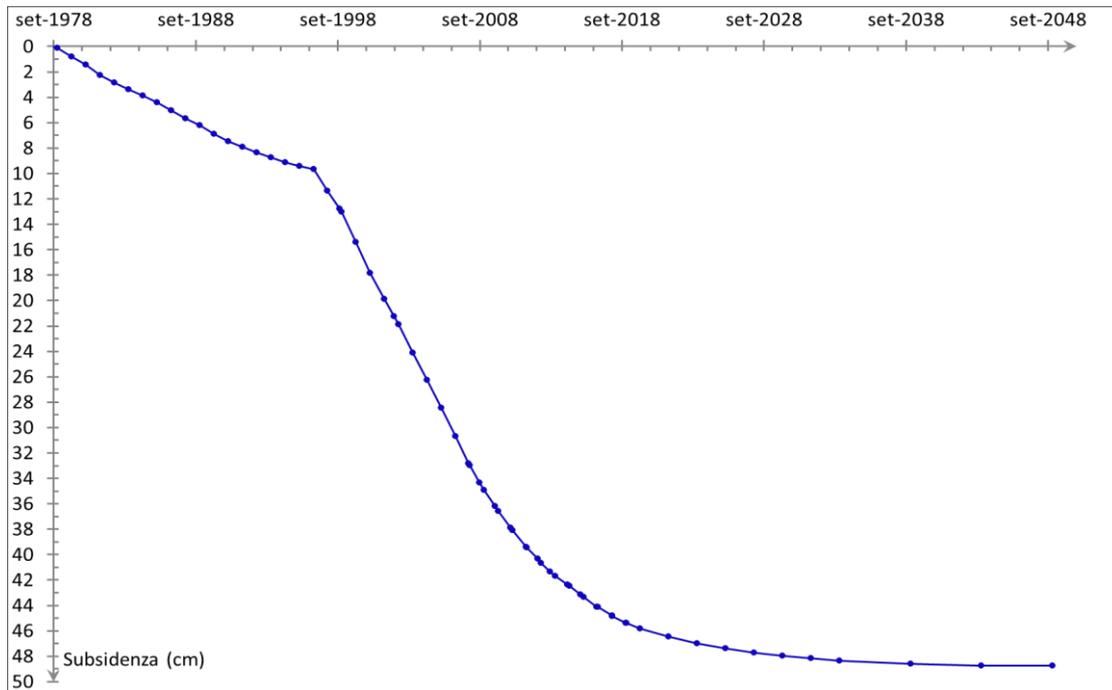


Figura 5 – Evoluzione temporale della subsidenza nel punto di massimo.

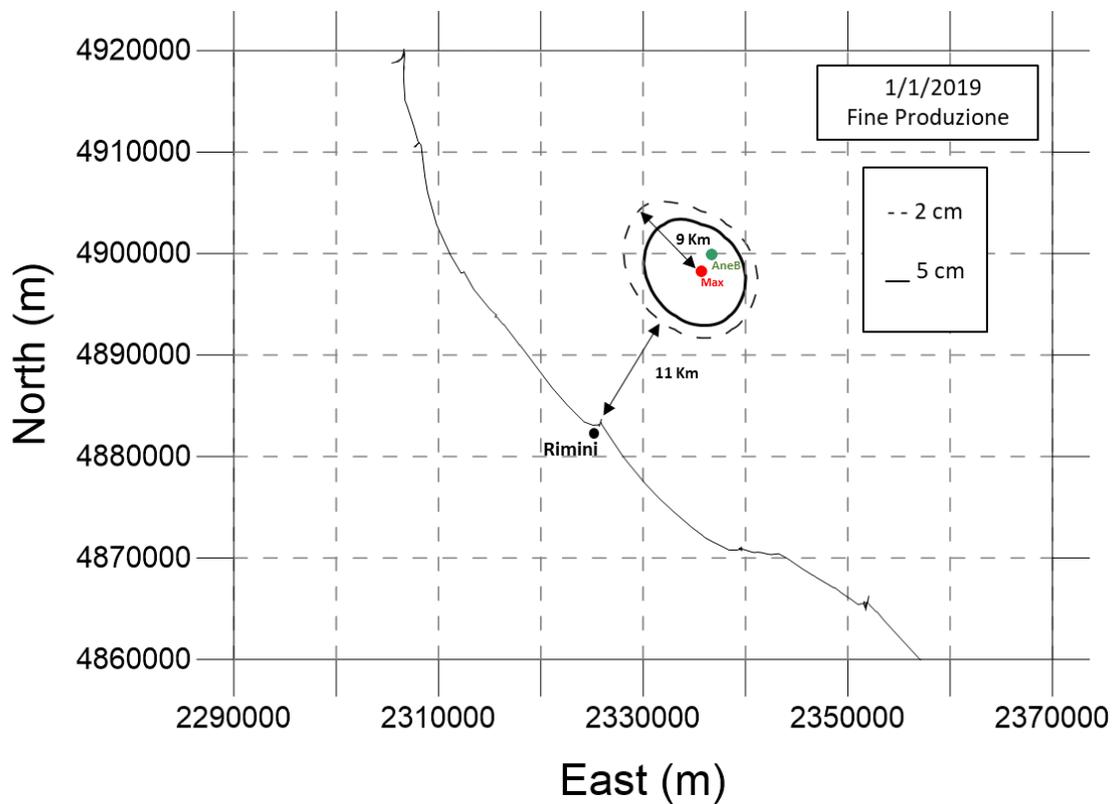


Figura 6 – Curve di iso-subsidenza dei 2 cm e dei 5 cm a fine produzione (01/01/2019).

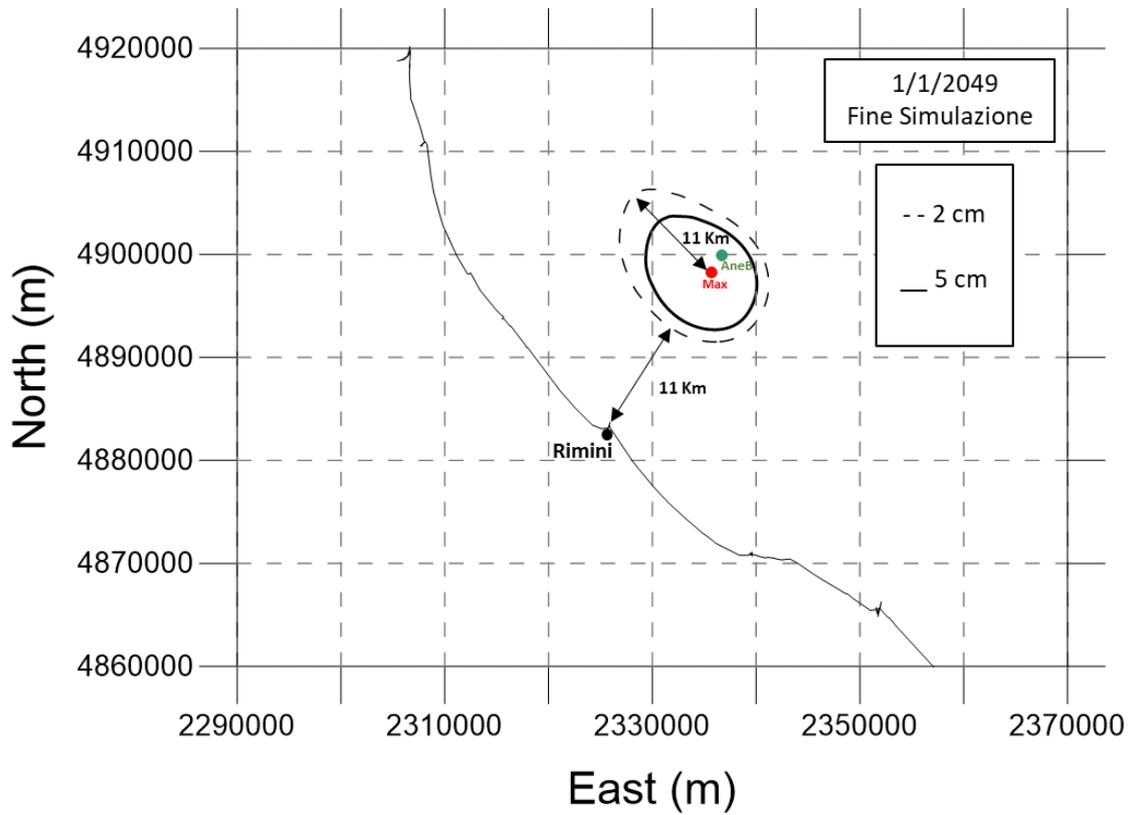


Figura 7 – Curve di iso-subsidenza dei 2 cm e dei 5 cm a fine simulazione (01/01/2049).

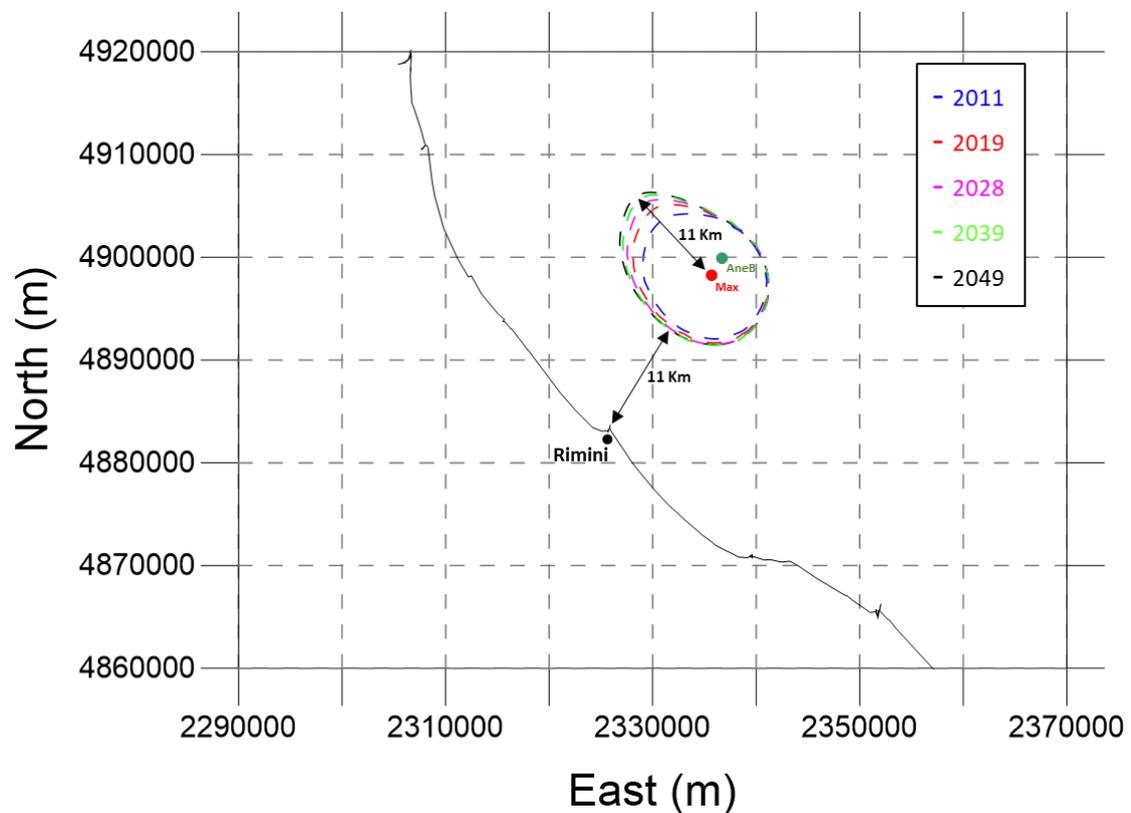


Figura 8 – Evoluzione nel tempo dell'estensione della curva di iso-subsidenza dei 2 cm.

5. Confronto con i dati di subsidenza misurati dalla stazione CGPS

In Figura 9 è riportato il confronto tra i risultati ottenuti con il modello geomeccanico e la serie storica misurata con il CGPS. Si può osservare come il modello numerico riproduca con accuratezza gli spostamenti registrati dalla stazione CGPS.

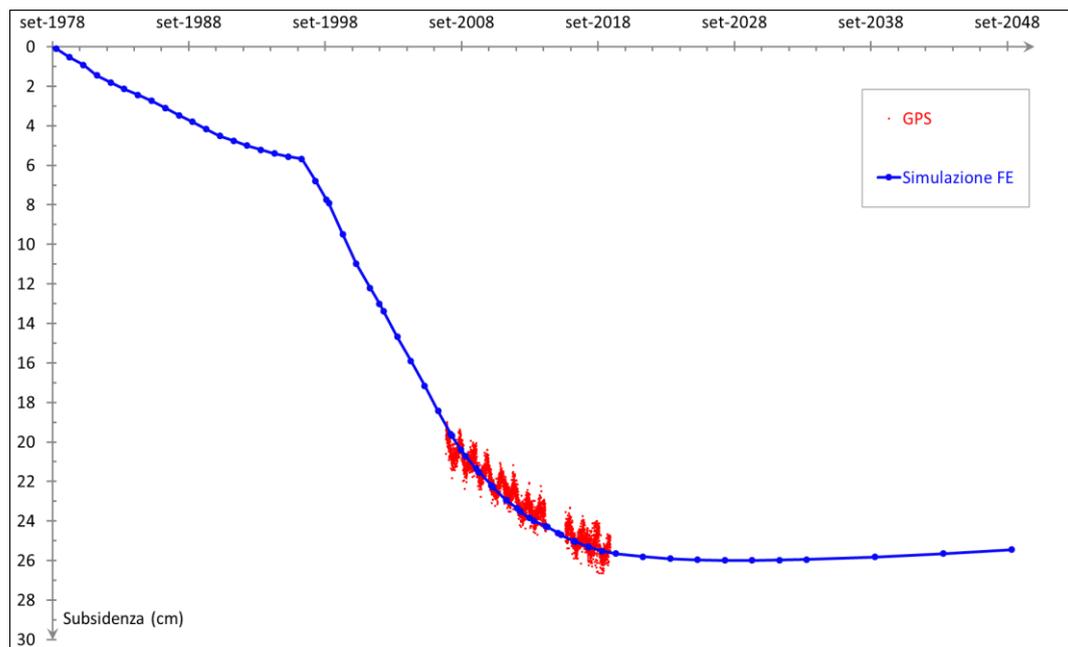


Figura 9 – Spostamento verticale della piattaforma Anemone B: dati CGPS e risultati simulazione FE.

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 24/04/ 2013).
2. AbaqusTM, Simulia, versione 2017.
3. EclipseTM, Schlumberger, versione 2018.2.
4. Campo di Anemone– Aggiornamento dello studio di giacimento – Scheda riassuntiva – IPET-51E2EB37-0. Dicembre 2019.
5. P.A. Vermeer and H.P. Neher: *A soft soil model that accounts for creep*. Beyond 2000 in Computational Geotechnics, Balkema, Rotterdam, 1999.
6. K. Roscoe and J. B. Burland: *On the generalized stress-strain behaviour of wet clay*. Engineering Plasticity, Cambridge Univ. Press, 535-609, 1968
7. G. Volonté, F. Gemelli, S.K. Nguyen, G. Musso, R. Lancellotta, M. Brignoli and S. Mantica: *Advances in geomechanical subsidence modeling: effects of elasto-visco-plastic constitutive behavior*. ARMA 17-1043. 51st US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, June 2017.
8. Italy - Anemone 3 dir well – Geomechanical analyses – LAIP 16/2019/GM. October 2019.
9. F.J. Santarelli, M. Brignoli, A. Pellegrino. *La scelta del coefficiente di Poisson per formazioni a grande scala*. Relazione Agip S.p.A, LAPO-12/96. Aprile 1996.