



eni S.p.A.
Exploration & Production
Division

Doc. SICS 197
Studio di Impatto Ambientale
Progetto "Clara NW"

Appendice 5

Appendice 5

Modello elasto-plastico di subsidenza



Campi del Clara Complex, Calipso ed Elettra

Modello Elasto-Plastico di Subsidenza

Management Summary

LISTA DI DISTRIBUZIONE:

GEOD/CS

GEOES/CS

AUTORI

G. Volonté

TEOR

Data: 29 Dicembre 2011

0	Rapporto Finale	F. Casolini 	F. Italiano 
		S. Mantica 	P. Consonni 
AGGIORNAMENTI		CONTROLLATO DA	APPROVATO DA



Campi del Clara Complex, Calipso ed Elettra

Modello Elasto-Plastico di Subsidenza

Management Summary

LISTA DI DISTRIBUZIONE:

GEOD/CS

GEOES/CS

AUTORI

G. Volonté

TEOR

Data: 29 Dicembre 2011

0	Rapporto Finale	F. Casolini	F. Italiano
		S. Mantica	P. Consonni
AGGIORNAMENTI		CONTROLLATO DA	APPROVATO DA



Indice

1	Introduzione	3
2	Modello Geomeccanico agli Elementi Finiti	6
2.1	Approccio metodologico.....	6
2.2	Geometria del modello.....	7
2.3	Proprietà dei materiali.....	8
2.3.1	Compressibilità uniassiale.....	8
2.4	Inizializzazione	12
2.4.1	Stato tensionale iniziale	12
2.4.2	Pressioni iniziali.....	12
2.5	Storia di pressione.....	13
3	Risultati delle analisi eseguite con il modello elasto-plastico.....	14
3.1	Scenario di riferimento Cm_Med: mappe di subsidenza	16
3.2	Scenario Cm_Upper: mappe di subsidenza	18
3.3	Scenario Cm_Lower: mappe di subsidenza	20
	Bibliografia	22

1 Introduzione

Il presente rapporto illustra i risultati dello studio geomeccanico relativo all'insieme dei campi del Clara Complex (Clara Nord, Clara Est e Calpurnia), di Calipso e di Elettra, effettuato con lo scopo di valutare quantitativamente la subsidenza indotta dalla coltivazione dei giacimenti. Tali campi sono situati nell'offshore adriatico a circa 70 km al largo di Ancona (Figura 1); la profondità del fondale marino in tale area è di circa 75 m. La posizione relativa dei cinque campi considerati è illustrata in Figura 2.



Figura 1 – Posizione dei campi del Clara Complex, Calipso ed Elettra.

Nello studio è considerato anche il nuovo progetto di sviluppo, denominato “Clara NW”, che prevede la perforazione di nuovi pozzi in corrispondenza di una culminazione secondaria (NW) di Clara Est (si veda la Figura 2, Figura 3 e Figura 4) per lo sfruttamento del livello PLQ1-A.

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 E&P con il codice di calcolo Eclipse [1].

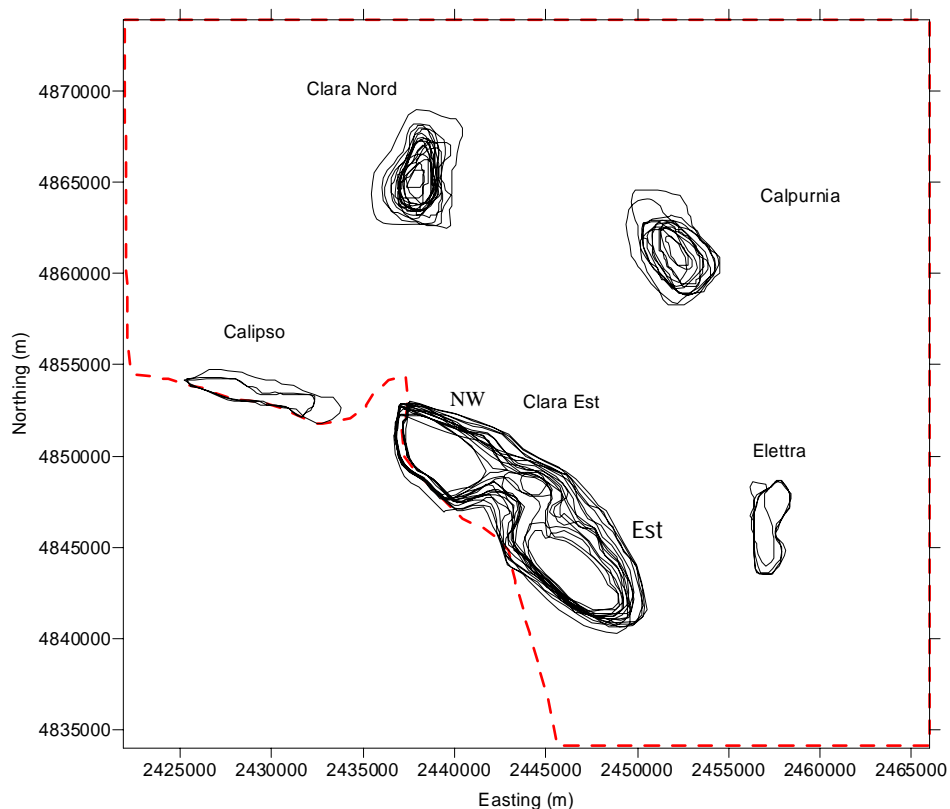


Figura 2 – Posizione relativa dei tre campi che compongono il Clara Complex (Clara Nord, Clara Est e Calpurnia), di Calipso e di Elettra, visualizzati sulla base dei loro contatti gas-acqua originali.

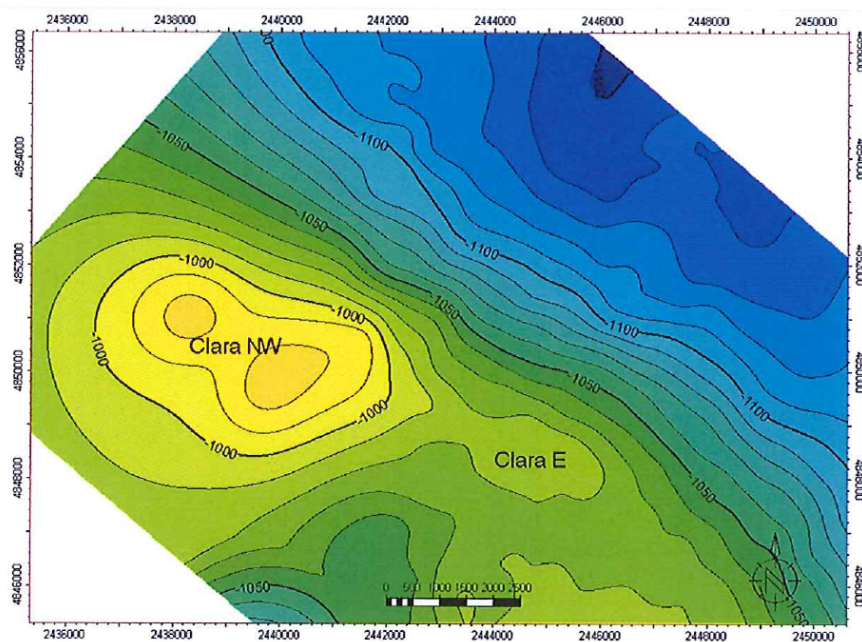


Figura 3 – Mappa delle due culminazioni del giacimento di Clara Est (NW e Est).

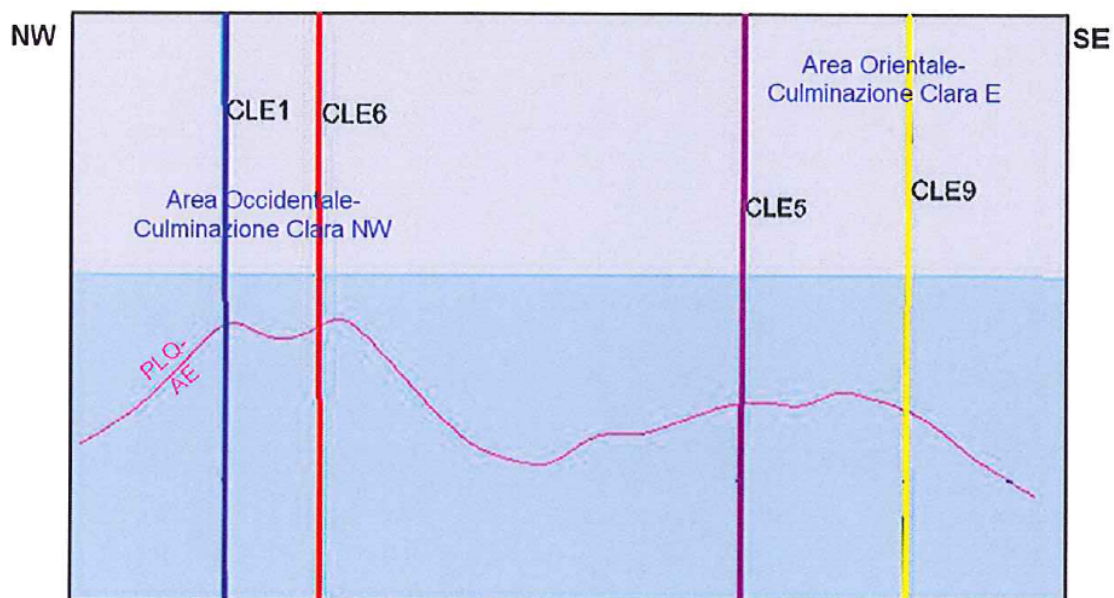


Figura 4 – Sezione semplificata del campo di Clara Est con indicazione delle due culminazioni.

2 Modello Geomeccanico agli Elementi Finiti

2.1 Approccio metodologico

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

- Mappe geologiche dei livelli interessati dai campi, estese in misura tale da descrivere interamente non solo le zone mineralizzate ma anche gli acquiferi laterali;
- Dettagliata descrizione della geometria e geologia dei "livelli mineralizzati + 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. A fine produzione di tutti i campi (che si verifica nel 2020 per Clara Nord e Calipso, nel 2016 per Calpurnia, nel 2028 per Clara Est e nel 2025 per Elettra), si prevede un'estrazione di gas complessiva tra $10.889 \times 10^9 \text{ Sm}^3$ e $11.077 \times 10^9 \text{ Sm}^3$ a seconda dello scenario considerato. Lo studio fluido-dinamico di giacimento è stato comunque protratto fino al 2060 (a pozzi chiusi) in modo da considerare l'effetto dell'evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero dopo la fine della produzione;
- Proprietà meccaniche della roccia descritte con una legge costitutiva del tipo Cam Clay Modificato, che tiene conto non solo della variazione della compressibilità uniassiale (c_m) con lo stress efficace, ma modella accuratamente anche gli eventuali fenomeni di espansione dei sedimenti soggetti a ripressurizzazione;
- Calcolo della compattazione dei "livelli mineralizzati + acquiferi connessi" fatto sulla base dello spessore gross degli stessi e della più aggiornata stima della compressibilità uniassiale ottenuta da misure in situ effettuate nei pozzi equipaggiati con markers nell'offshore adriatico.

Al fine di effettuare un'analisi di sensitività, sono stati considerati tre possibili scenari di compressibilità (si veda il paragrafo 2.3.1), illustrati di seguito:

- "**Cm_Med**" (scenario di riferimento): scenario con i valori di compressibilità derivati dalla relazione di Hueckel *et al.* [2] corrispondente al valore medio con la correzione suggerita da Ferronato *et al.* [3];
- "**Cm_Upper**": scenario con i valori di compressibilità derivati dalla relazione di Hueckel *et al.* [2] corrispondente al quantile 97.5%;
- "**Cm_Lower**": scenario con i valori di compressibilità derivati dalla relazione di Hueckel *et al.* [2] corrispondente al quantile 2.5%.

2.2 Geometria del modello

Il modello fluido-dinamico di giacimento è composto da 220x200x70 celle nelle direzioni I, J e K rispettivamente, per un totale di oltre tre milioni di celle; tale modello interessa un'area di circa 48x45 km², scelta per simulare tutta l'area interessata dalla depressurizzazione prodotta dalla coltivazione dei giacimenti e per riprodurre in maniera accurata l'influenza dell'acquifero garantendo di non avere effetti di bordo sul calcolo delle pressioni.

Analogamente, per non risentire dell'influenza delle condizioni al contorno imposte ai lati del modello geomeccanico, esso è stato esteso lateralmente rispetto al modello fluido-dinamico (sideburden) fino a ricoprire un'area di circa 75x62 km². A tal fine, è stata generata una griglia 3D tale da rappresentare adeguatamente la distribuzione di pressione all'interno di ogni livello permeabile in cui la produzione è simulata con il modello Eclipse; tale griglia 3D è stata generata a partire da una griglia 2D proiettata verticalmente, in modo tale da comprendere la regione che va dal fondo mare fino ad una profondità di 2500 m. La mesh è stata costruita con l'obiettivo di onorare i layer definiti nel modello Eclipse ed i relativi contatti gas-acqua; allo stesso tempo, il numero di gradi di libertà su ogni piano nodale (cioè nella griglia 2D) è stato limitato perché non si desse luogo, dopo l'espansione della mesh in 3D, ad un problema di dimensione eccessiva persino per le attuali capacità di calcolo.

La griglia 3D FE così costruita, illustrata in Figura 5, risulta suddivisa in 84 livelli ed è costituita da 301812 elementi e 967780 nodi per un totale di 2903340 gradi di libertà.

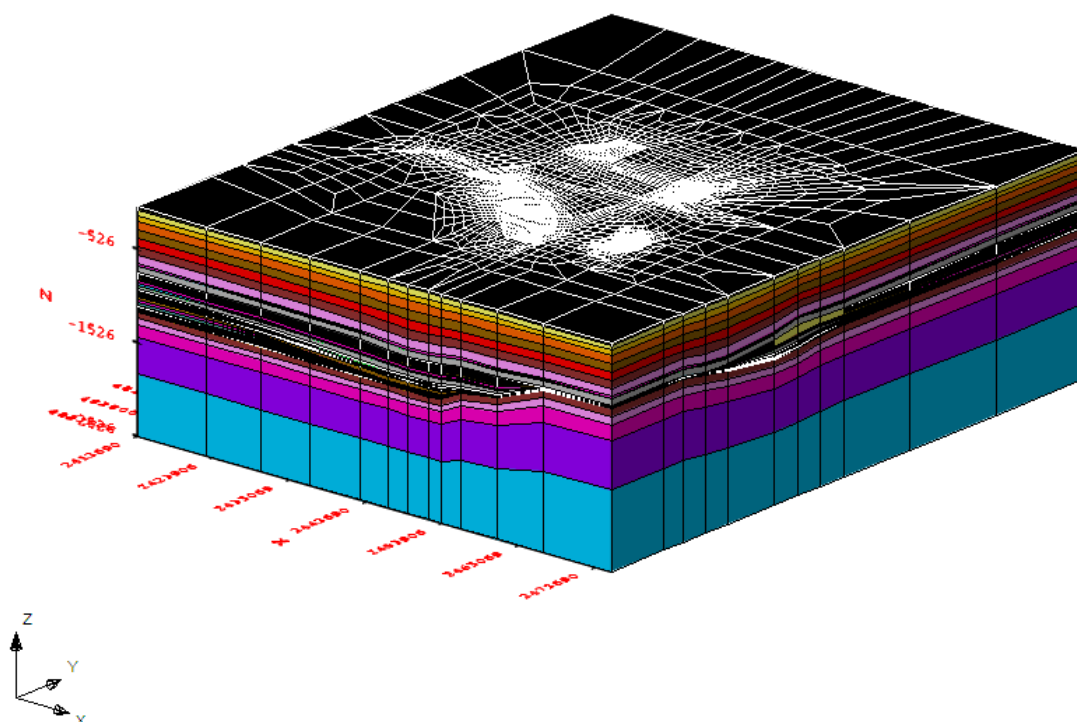


Figura 5 – Griglia di calcolo ad elementi finiti utilizzata nel modello geomeccanico Isamgeo. La scala verticale della rappresentazione è pari a 10 volte quella orizzontale.

Le condizioni al contorno assegnate al modello sono di spostamento nullo alla base della griglia e spostamento laterale impedito sui lati del modello.

2.3 Proprietà dei materiali

2.3.1 Compressibilità uniassiale

Il parametro geomeccanico chiave nelle simulazioni di subsidenza è la compressibilità uniassiale c_m del materiale. E' oggi comunemente accettato [4] che i valori più attendibili di questo parametro, generalmente funzione non lineare dello stress efficace, siano quelli ottenuti dalle misure in situ tramite markers.

In assenza di dati specifici da marker sui campi oggetto dello studio si è utilizzata per la stima della compressibilità una correlazione regionale basata sul più ampio dataset possibile e relativa alle stesse formazioni del Nord Adriatico. Tale correlazione tra c_m e tensione verticale efficace σ'_v è stata proposta da Hueckel *et al.* [2] ed è riportata in Figura 6 ove sono rappresentate la miglior stima:

$$c_m = 0.01367 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} \quad (1)$$

ed il quantile superiori al 97.5%. Nella relazione (1), 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 6 la relazione di Hueckel *et al.* [2] è inoltre messa a confronto con quella di Baù *et al.* [4]; si può osservare come le due risultino analoghe.

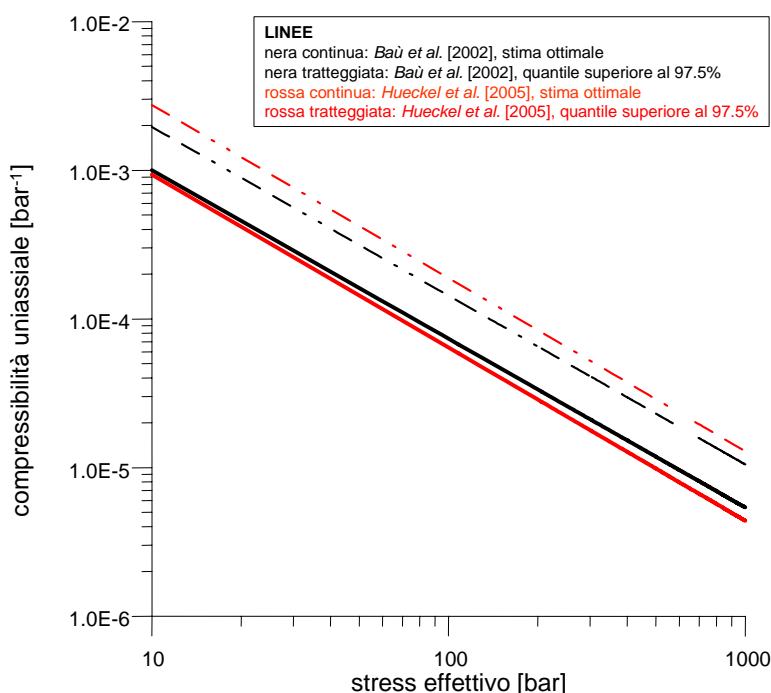


Figura 6 – Correlazione tra la compressibilità uniassiale c_m e lo stress efficace in situ, derivata da misure su marker nei campi a gas del bacino nord adriatico (da [2]).

Si segnala che studi recenti [3] hanno evidenziato come sia la correlazione di Baù *et al.* [4] sia quella di Hueckel *et al.* [2] 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.* [3] 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 di riferimento, denominato di seguito “**scenario Cm_Med**”:

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

Allo scopo di effettuare un’analisi parametrica, oltre alla relazione (2), sono state considerate anche le leggi di compressibilità relative al quantile superiore ed inferiore [2]:

$$- \text{quantile 97.5\%:} \quad c_m = 0.01367 \cdot 10^{0.467} \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} \quad (3)$$

$$- \text{quantile 2.5\%:} \quad c_m = 0.01367 \cdot 10^{-0.467} \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} \quad (4)$$

Tali leggi sono state utilizzate per la determinazione della compressibilità degli ulteriori due scenari denominati di seguito, rispettivamente, “**scenario Cm_Upper**” e “**scenario Cm_Lower**”.

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

I valori di stress verticale efficace necessari per le stime di c_m nelle equazioni (2), (3) e (4) sono stati calcolati tramite:

$$\sigma'_v = \sigma_v - p \quad (5)$$

dove σ_v è la tensione verticale totale e p la pressione dei pori. Quest’ultima è stata estratta dallo studio fluido-dinamico alle profondità di riferimento, mentre la tensione verticale totale σ_v è stata calcolata a partire dalla densità del materiale come riportato nel paragrafo 2.4.1.

In Tabella 1 sono riportati i valori di compressibilità uniassiale c_m , modulo di Young E , 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 ai vari livelli per lo scenario Cm_Med. Per ogni layer sono anche indicati i valori di profondità media z_m , tensione verticale totale σ_v , pressione dei pori iniziale p e tensione verticale efficace iniziale σ'_v .

Tabella 1 – Proprietà assegnate, regione per regione, per lo scenario di riferimento Cm_Med.

Layer name	ECL index	FE layer	z_m (m)	σ_v (bar)	p (bar)	σ'_v (bar)	c_m (bar ⁻¹)	λ	e_0	$\kappa(=\lambda/3)$
Overburden		1	91.56	10.6	9.4	1.2	Lineare Elastico			
Overburden		2	135.26	19.3	13.9	5.3	3.90E-03	0.03635	0.8110	0.01212
Overburden		3	193.51	30.8	19.9	10.9	1.70E-03	0.03184	0.7998	0.01061
Overburden		4	266.34	45.3	27.4	17.9	9.52E-04	0.02880	0.7750	0.00960
Overburden		5	353.72	62.9	36.4	26.4	6.04E-04	0.02642	0.7417	0.00881
Overburden		6	441.11	80.6	45.4	35.1	4.34E-04	0.02468	0.7079	0.00823



Overburden		7	528.49	98.4	54.4	44	3.34E-04	0.02329	0.6744	0.00776
Overburden		8	615.88	116.4	63.4	52.9	2.69E-04	0.02213	0.6418	0.00738
PLQ2-B	1	9	666.87	126.9	66.6	60.3	2.31E-04	0.02141	0.6235	0.00714
	2	10	677.43	129.1	67.5	61.6	2.26E-04	0.02128	0.6197	0.00709
PLQ2-B1	3	11	680.64	129.8	67.8	61.9	2.24E-04	0.02124	0.6185	0.00708
	4	12	683.79	130.4	68.1	62.3	2.22E-04	0.02121	0.6174	0.00707
PLQ2-B2	5	13	716.33	137.2	71.1	66.1	2.08E-04	0.02085	0.6058	0.00695
	6	14	750.92	144.4	74.4	70	1.94E-04	0.02049	0.5936	0.00683
PLQ1-A	7	15	800.37	154.8	79.4	75.4	1.78E-04	0.02002	0.5764	0.00667
	8	16	848.56	164.9	84.6	80.3	1.66E-04	0.01960	0.5599	0.00653
PLQ1-B1	9	17	853.16	165.9	85.1	80.8	1.64E-04	0.01956	0.5584	0.00652
	10	18	860.61	167.4	85.9	81.5	1.63E-04	0.01950	0.5559	0.0065
PLQ1-B1a	11	19	878.39	171.2	87.9	83.3	1.59E-04	0.01936	0.5499	0.00645
	12	20	896.8	175.1	90.1	85	1.55E-04	0.01921	0.5437	0.0064
PLQ1-C	13	21	907.38	177.3	91.3	86	1.53E-04	0.01913	0.5402	0.00638
	14	22	913.95	178.7	92.1	86.6	1.52E-04	0.01908	0.5381	0.00636
PLQ1-C1	15	23	942.73	184.8	95.6	89.2	1.47E-04	0.01887	0.5286	0.00629
	16	24	974.5	191.6	99.6	92	1.41E-04	0.01865	0.5183	0.00622
PLQ1-D	17	25	981.22	193	100.5	92.5	1.40E-04	0.01860	0.5161	0.0062
	18	26	984.02	193.6	100.8	92.8	1.40E-04	0.01858	0.5152	0.00619
PLQ1-D1	19	27	987.54	194.4	101.3	93.1	1.39E-04	0.01856	0.5141	0.00619
	20	28	991.2	195.1	101.8	93.4	1.39E-04	0.01854	0.5129	0.00618
PLQ1-D2	21	29	994.17	195.8	102.1	93.6	1.38E-04	0.01852	0.512	0.00617
	22	30	1009.37	199	104.1	94.9	1.36E-04	0.01842	0.5071	0.00614
PLQ1-D5	23	31	1027.23	202.8	106.5	96.3	1.34E-04	0.01830	0.5015	0.0061
	24	32	1017.9	200.8	105.3	95.6	1.35E-04	0.01836	0.5044	0.00612
	24	33	1029.4	203.3	106.8	96.5	1.34E-04	0.01829	0.5008	0.0061
PLQ-A	25	34	1055.8	209	110.5	98.5	1.31E-04	0.01812	0.4925	0.00604
	26	35	1041.19	205.8	108.4	97.4	1.32E-04	0.01821	0.4971	0.00607
PLQ-A1	27	36	1058.81	209.6	110.9	98.7	1.30E-04	0.01810	0.4916	0.00603
	28	37	1043.27	206.3	108.7	97.6	1.32E-04	0.01820	0.4964	0.00607
PLQ-B	29	38	1062.55	210.4	111.4	99	1.30E-04	0.01808	0.4904	0.00603
	30	39	1045.29	206.7	109	97.7	1.32E-04	0.01819	0.4958	0.00606
PLQ-B1	31	40	1065.51	211	111.8	99.2	1.29E-04	0.01806	0.4895	0.00602
	32	41	1047.58	207.2	109.3	97.9	1.32E-04	0.01817	0.4951	0.00606
PLQ-C	33	42	1069.35	211.9	112.3	99.5	1.29E-04	0.01804	0.4883	0.00601
	34	43	1050.02	207.7	109.7	98.1	1.31E-04	0.01816	0.4943	0.00605
PLQ-C2	35	44	1073.06	212.7	112.9	99.8	1.29E-04	0.01802	0.4871	0.00601
	36	45	1051.5	208	109.9	98.2	1.31E-04	0.01815	0.4939	0.00605
PLQ-D1	37	46	1076.1	213.3	113.3	100	1.28E-04	0.01800	0.4862	0.006



	38	47	1054.21	208.6	110.2	98.4	1.31E-04	0.01813	0.4930	0.00604
PLQ-D2	39	48	1079.64	214.1	113.8	100.3	1.28E-04	0.01798	0.4851	0.00599
	40	49	1055.94	209	110.5	98.5	1.31E-04	0.01812	0.4925	0.00604
PLQ-E1	41	50	1082.93	214.8	114.3	100.5	1.27E-04	0.01796	0.4841	0.00599
	42	51	1057.95	209.4	110.7	98.7	1.30E-04	0.01811	0.4918	0.00604
PLQ-E2	43	52	1085.92	215.4	114.7	100.7	1.27E-04	0.01794	0.4832	0.00598
	44	53	1088.22	215.9	115	100.9	1.27E-04	0.01793	0.4824	0.00598
PLQ-G1	45	54	1090.91	216.5	115.4	101.1	1.27E-04	0.01791	0.4816	0.00597
	46	55	1096.15	217.6	116.2	101.5	1.26E-04	0.01788	0.4800	0.00596
PLQ-H	47	56	1104.49	219.4	117.4	102.1	1.25E-04	0.01783	0.4774	0.00594
	48	57	1113.51	221.4	118.7	102.7	1.24E-04	0.01778	0.4747	0.00593
PLQ-H1	49	58	1119.19	222.6	119.5	103.1	1.24E-04	0.01775	0.4729	0.00592
	50	59	1142.77	227.7	123	104.7	1.22E-04	0.01762	0.4658	0.00587
PLQ-O2	51	60	1163.83	232.2	126.2	106	1.20E-04	0.01750	0.4595	0.00583
	52	61	1172.63	234.2	127.6	106.6	1.19E-04	0.01746	0.4568	0.00582
PLQ-O3	53	62	1180.01	235.7	128.7	107	1.19E-04	0.01742	0.4546	0.00581
	54	63	1195.74	239.2	131.2	108	1.17E-04	0.01734	0.4500	0.00578
PLQ-P	55	64	1201.4	240.4	132.1	108.3	1.17E-04	0.01731	0.4483	0.00577
	56	65	1208.18	241.9	133.2	108.7	1.16E-04	0.01727	0.4463	0.00576
PLQ-P1	57	66	1212.57	242.8	133.9	108.9	1.16E-04	0.01725	0.4450	0.00575
	58	67	1213.99	243.1	134.1	109	1.16E-04	0.01724	0.4446	0.00575
PLQ-P2	59	68	1216.87	243.8	134.6	109.2	1.16E-04	0.01723	0.4437	0.00574
	60	69	1221.93	244.9	135.4	109.5	1.15E-04	0.01721	0.4423	0.00574
PLQ-Q	61	70	1225.64	245.7	136	109.7	1.15E-04	0.01719	0.4412	0.00573
	62	71	1231.38	246.9	136.9	110	1.15E-04	0.01716	0.4395	0.00572
PLQ-R	63	72	1240.69	248.9	138.4	110.5	1.14E-04	0.01711	0.4368	0.0057
	64	73	1252.1	251.4	140.3	111.1	1.13E-04	0.01706	0.4335	0.00569
PLQ-ST	65	74	1262.09	253.6	142	111.7	1.13E-04	0.01701	0.4306	0.00567
	66	75	1271.76	255.7	143.6	112.1	1.12E-04	0.01696	0.4278	0.00565
PLQ-Usup	67	76	1276.79	256.8	144.4	112.4	1.12E-04	0.01694	0.4264	0.00565
	68	77	1285.95	258.8	146	112.9	1.11E-04	0.0169	0.4237	0.00563
PLQ-Uinf	69	78	1293.7	260.5	147.3	113.2	1.11E-04	0.01686	0.4215	0.00562
	70	79	1222.89	245.1	135.5	109.5	1.15E-04	0.01720	0.4420	0.00573
Underburden		80	1348.27	272.5	156.8	115.7	1.08E-04	0.01662	0.4062	0.00554
Underburden		81	1486.82	303.1	182.8	120.4	1.03E-04	0.01607	0.3685	0.00536
Underburden		82	1584.75	325	202.7	122.3	5.07E-05	0.00786	0.3053	0.00262
Underburden		83	1845.89	384.2	262.1	122.1	5.08E-05	0.00749	0.2435	0.0025
Underburden		84	2368.17	506.3	408.4	97.9	6.57E-05	0.00710	0.1356	0.00237

La pendenza della linea di stato critico M è stata posta pari a 1.33, mentre il rapporto di Poisson è stato assunto pari a 0.33.

2.4 Inizializzazione

2.4.1 Stato tensionale iniziale

Per i campi oggetto dello studio, lo sforzo totale verticale è stato calcolato dal gradiente di overburden definito a partire dai log density eseguiti su 16 pozzi perforati nei 5 campi inclusi nel modello [5] ed è espresso, in funzione della profondità, dalla seguente relazione:

$$\sigma_v(z_{tvdss}) = 9.194 \cdot 10^{-6} (z_{tvdss} - z_{fm})^2 + 0.19654 (z_{tvdss} - z_{fm}) + 10^{-5} \rho_w g z_{fm} \quad (6)$$

dove σ_v è lo sforzo totale verticale (in bar), z_{tvdss} è la profondità riferita al livello medio del mare, z_{fm} è la profondità del fondo mare (77 m), ρ_w è la densità dell'acqua assunta pari a 1030 kg/m^3 e g è l'accelerazione di gravità assunta pari a 9.807 m/sec^2 .

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].

2.4.2 Pressioni iniziali

Per quanto concerne la stima della pressione iniziali sono stati utilizzati i dati, in funzione della profondità, estratti dal modello Eclipse e riportati in Figura 7.

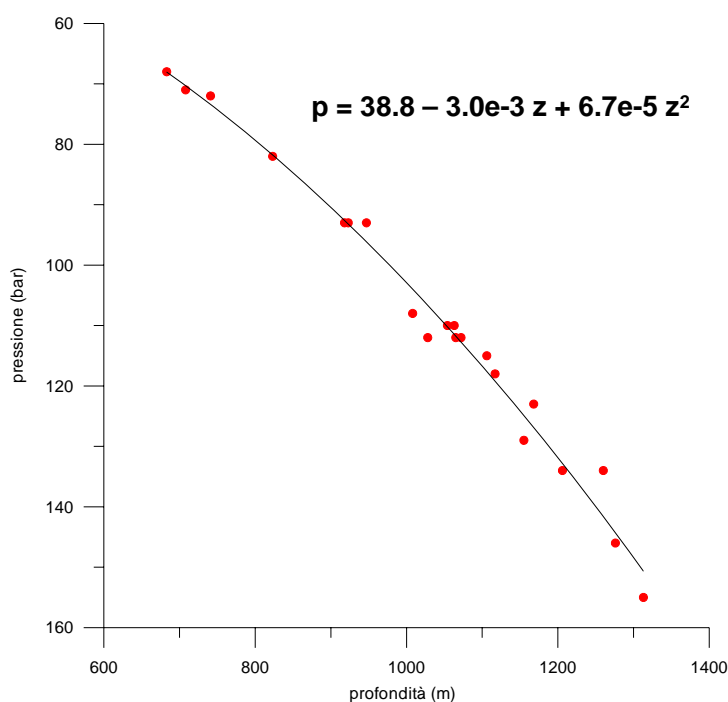


Figura 7 – Pressioni iniziali relative all'insieme dei campi del Clara Complex, Calipso ed Elettra.

I dati di pressione iniziale ottenuti dallo studio Eclipse sono relativi solamente all'intervallo di profondità dei livelli mineralizzati. Per tale intervallo è stata definita la seguente relazione pressione-profondità, anch'essa riportata in Figura 7:

$$p(z) = 38.8 + 0.003z + 0.000067 \cdot z^2 \quad (8)$$

ove z è la profondità sotto il livello del mare in m e p è la pressione dei pori in bar. La relazione (8) non è direttamente utilizzabile nell'overburden, in quanto presenterebbe sovrappressione anche a profondità pari al fondo mare. E' stato quindi utilizzato per l'overburden un gradiente di pressione idrostatico con densità dell'acqua pari a 1030 kg/m^3 . L'insieme di questo gradiente idrostatico e della relazione (8) nella zona più profonda è stato adottato per l'inizializzazione del modello geomeccanico FE nelle zone di overburden, underburden e side-burden, ovvero ove non è possibile importare le pressioni dai risultati delle simulazioni Eclipse.

2.5 Storia di pressione

La distribuzione tridimensionale di pressione e la sua evoluzione temporale, così come calcolata dal modello fluido-dinamico Eclipse, è stata importata nel modello ad elementi finiti. In particolare, le pressioni sono state importate ad intervalli annuali dall'inizio della produzione (2000) fino al 2060.

3 Risultati delle analisi eseguite con il modello elasto-plastico

Le simulazioni effettuate con il modello ISAMGEO, in cui sono stati considerati tre diversi scenari di compressibilità dei materiali, permettono di ottenere una chiara immagine della possibile entità della subsidenza legata alla produzione dei 5 campi oggetto dello studio. I risultati delle previsioni di subsidenza ottenute per tutti gli scenari sono riportati in Tabella 2 per alcuni step temporali significativi durante e dopo la vita produttiva dei campi. Lo studio è stato, infatti, protratto fino al 2060 (a pozzi chiusi) in modo da considerare l'effetto dell'evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero dopo la fine della produzione.

Tabella 2 – Risultati finali: massima subsidenza (espressa in cm) per tutti gli scenari.

Scenario	2011	2017	2028	2060
Cm_Med	44	61	56	54
Cm_Upper	59	83	75	72
Cm_Lower	10	13	13	13

Nel caso ritenuto più probabile (scenario Cm_Med), la subsidenza massima, che si verifica in corrispondenza del campo di Calpurnia, risulta pari a circa 61 cm nel 2017 e si riduce fino ad un valore di circa 54 cm alla fine della simulazione. La banda di confidenza attorno al valore massimo, essenzialmente controllata dalla banda di confidenza dei valori di compressibilità, fornisce una variazione da 13 a 83 cm.

Gli altri campi danno luogo a valori massimi di subsidenza inferiori (per lo scenario di riferimento Cm_Med: 48 cm per Clara Nord, 33 cm per Clara Est, 17 cm per Calipso, 15 cm per Elettra) che si verificano in date diverse, come mostrato nelle mappe di subsidenza riportate nei paragrafi successivi.

La linea di iso-subsidenza dei 2 cm si mantiene, per tutti gli scenari considerati, ad una distanza dalla costa sempre superiore a 32 km.

In Figura 8 è riportato l'andamento temporale della subsidenza, per lo scenario di riferimento, in corrispondenza dei 5 punti di controllo corrispondenti alle piattaforme di produzione. Nel grafico sono anche riportate, per confronto, le misure di subsidenza ottenute tramite GPS in continuo, disponibili su quattro piattaforme (Clara Nord, Clara Est, Calpurnia e Calipso) senza che queste ultime siano state depurate dalla componente di subsidenza naturale. Il confronto tra dati CGPS e previsioni del modello mostra andamenti compatibili. In particolare, è possibile evidenziare quanto segue:

- campo di Calipso e Clara Est: trend misurato leggermente più pronunciato rispetto a quanto previsto dal modello geomeccanico;
- campo di Clara Nord: trend misurato sostanzialmente in accordo con quanto previsto dal modello geomeccanico;
- campo di Calpurnia: trend misurato leggermente più pronunciato rispetto a quanto previsto dal modello geomeccanico.

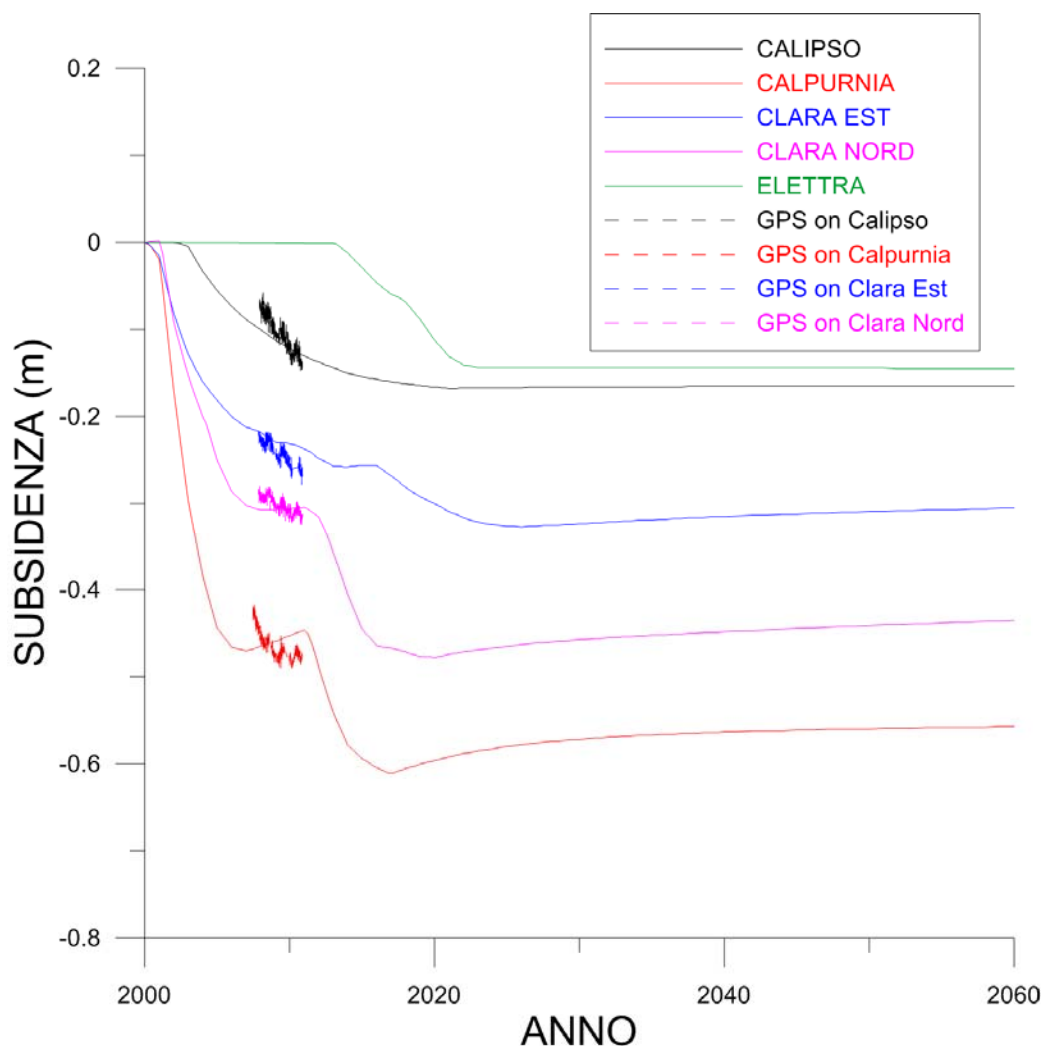


Figura 8 – Andamento temporale della subsidenza prevista nello scenario Cm_Med nei 5 punti di controllo corrispondenti alle piattaforme di produzione. Per Clara Nord, Clara Est, Calpurnia e Calipso le previsioni di subsidenza sono confrontate con le misure di subsidenza ottenute tramite GPS in continuo.

Nei paragrafi successivi vengono riportate le mappe di subsidenza in alcune date significative per tutti gli scenari considerati.

3.1 Scenario di riferimento Cm_Med: mappe di subsidenza

2011

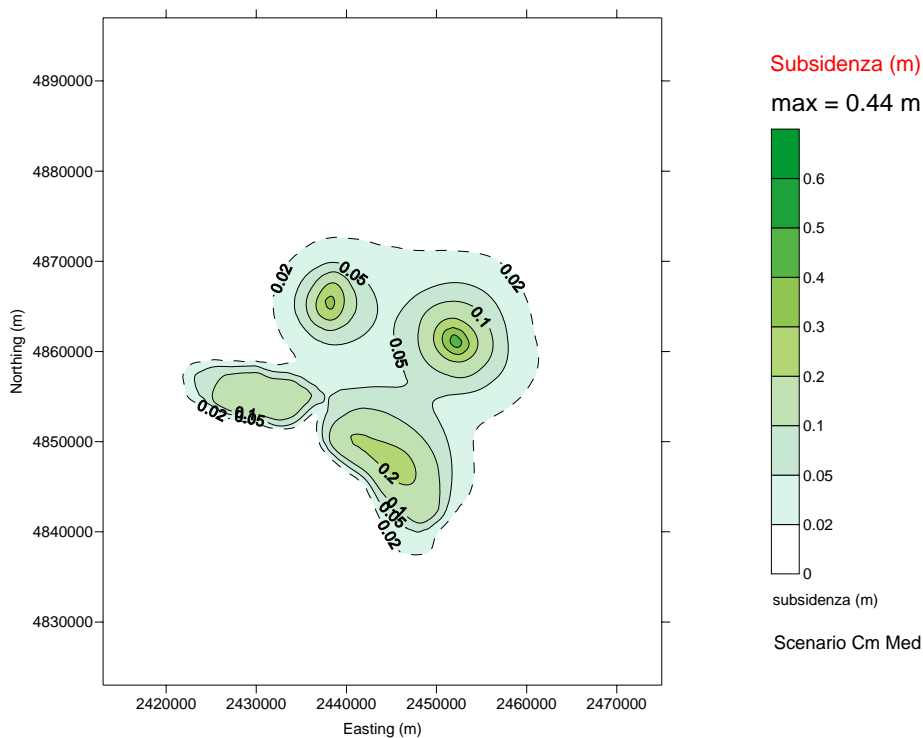


Figura 9 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Cm_Med al 2011.

2017

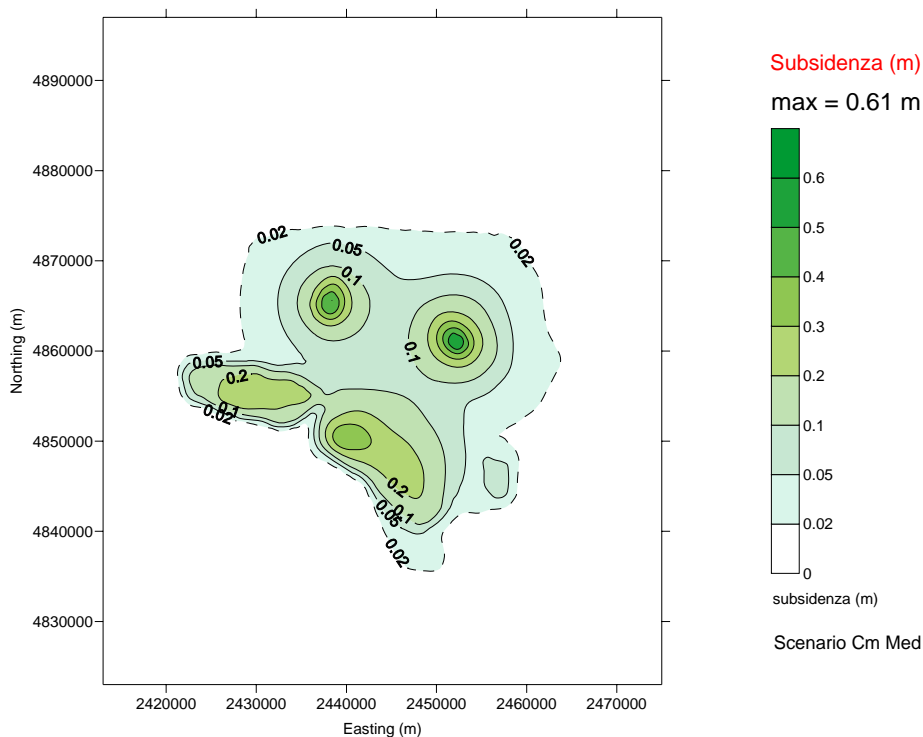


Figura 10 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Cm_Med al 2017.

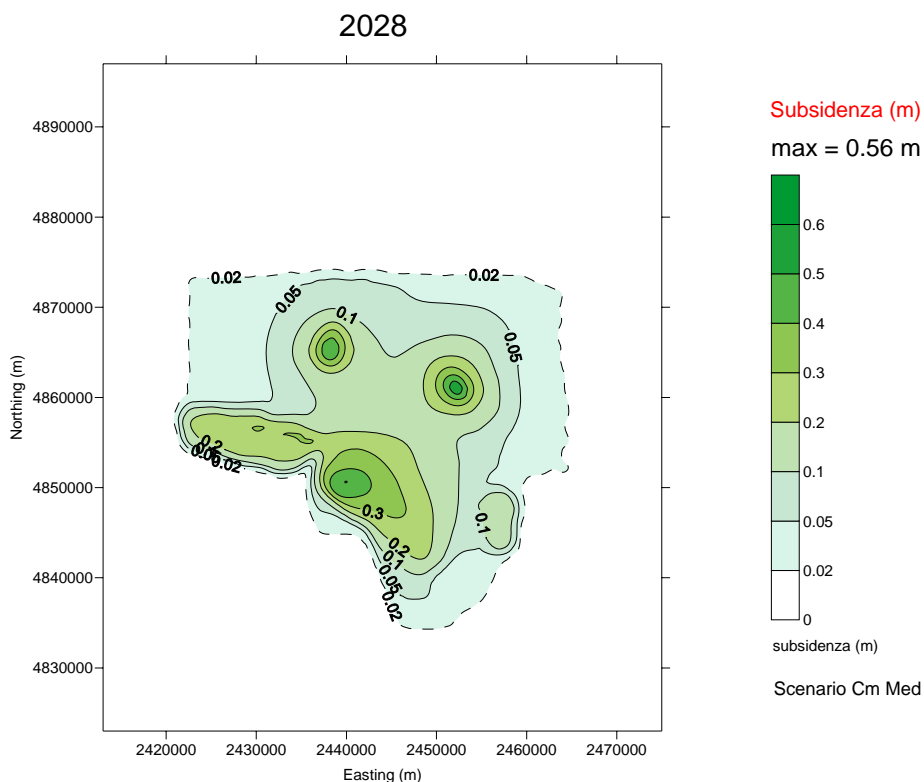


Figura 11 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Cm_Med al 2028.

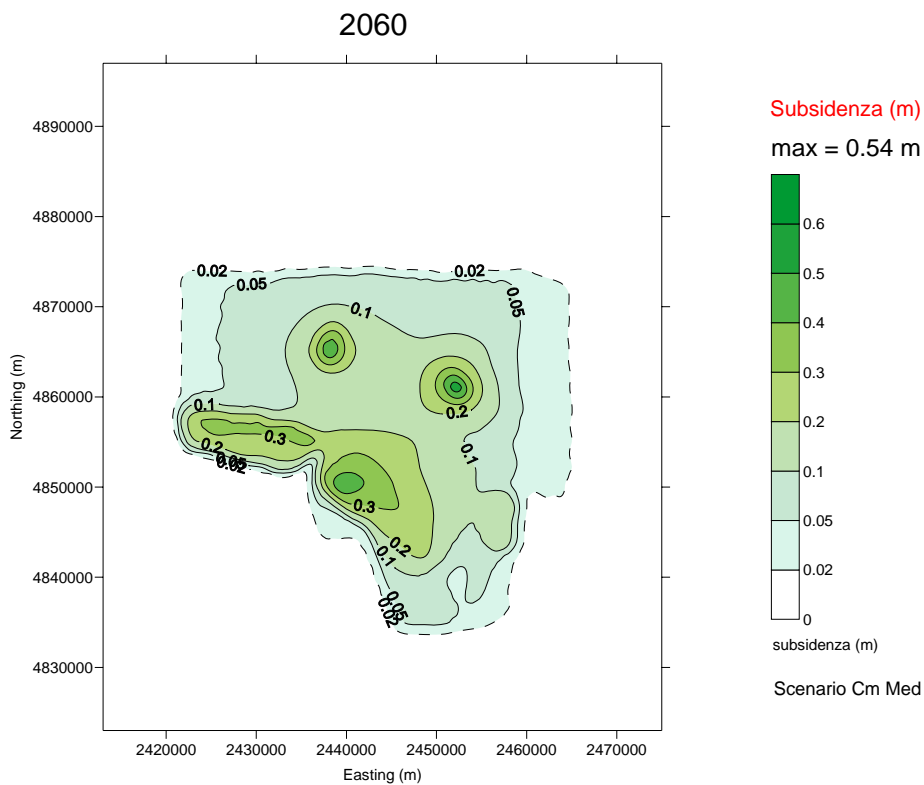


Figura 12 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Cm_Med al 2060.

3.2 Scenario Cm_Upper: mappe di subsidenza

2011

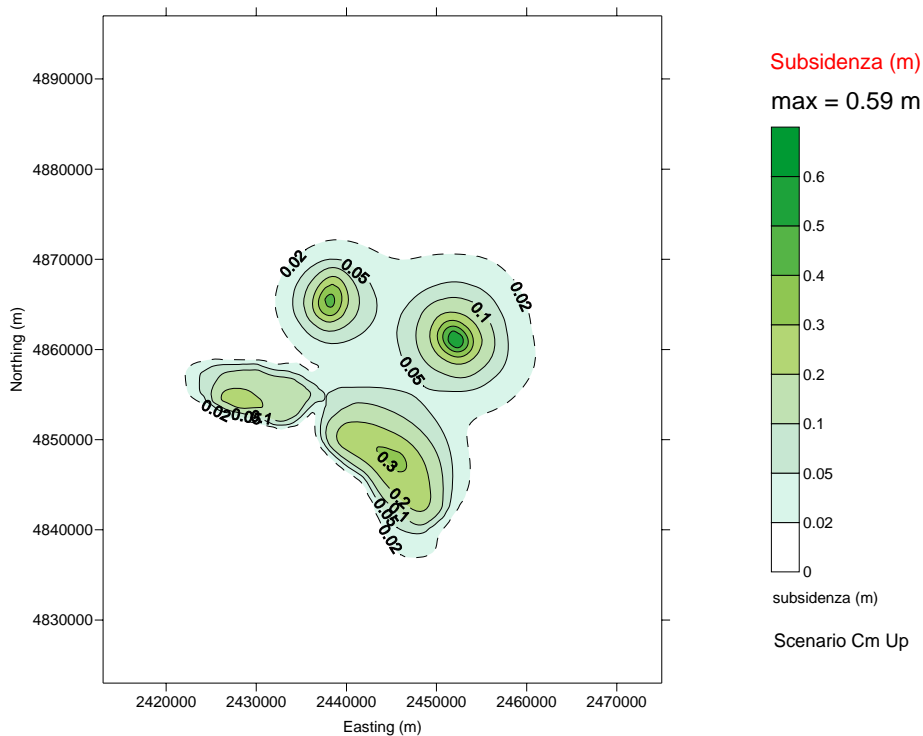


Figura 13 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Cm_Upper al 2011.

2017

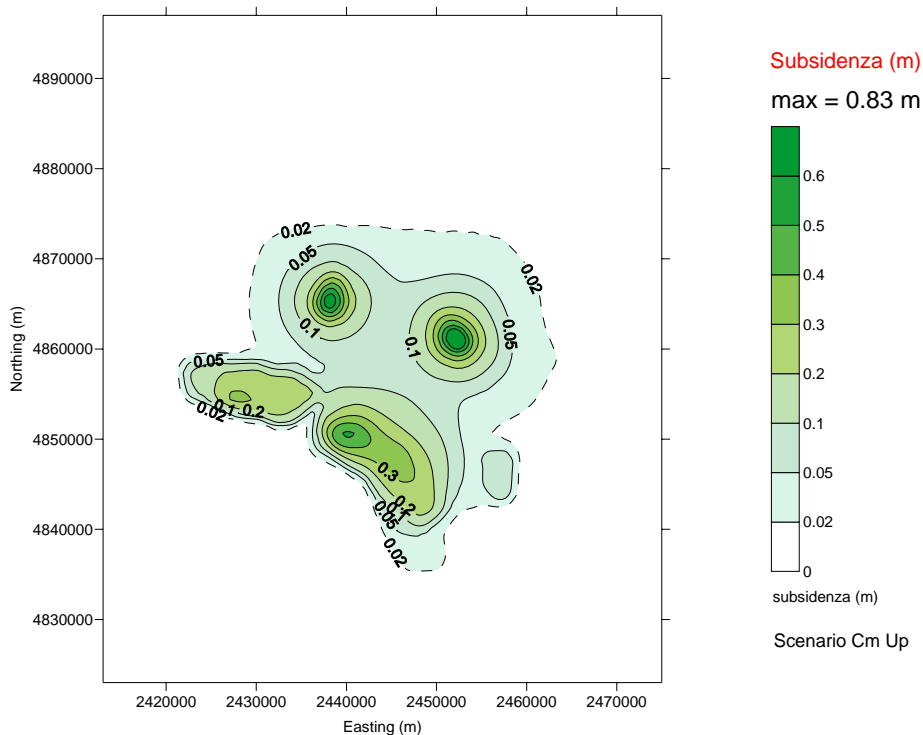


Figura 14 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Cm_Upper al 2017.

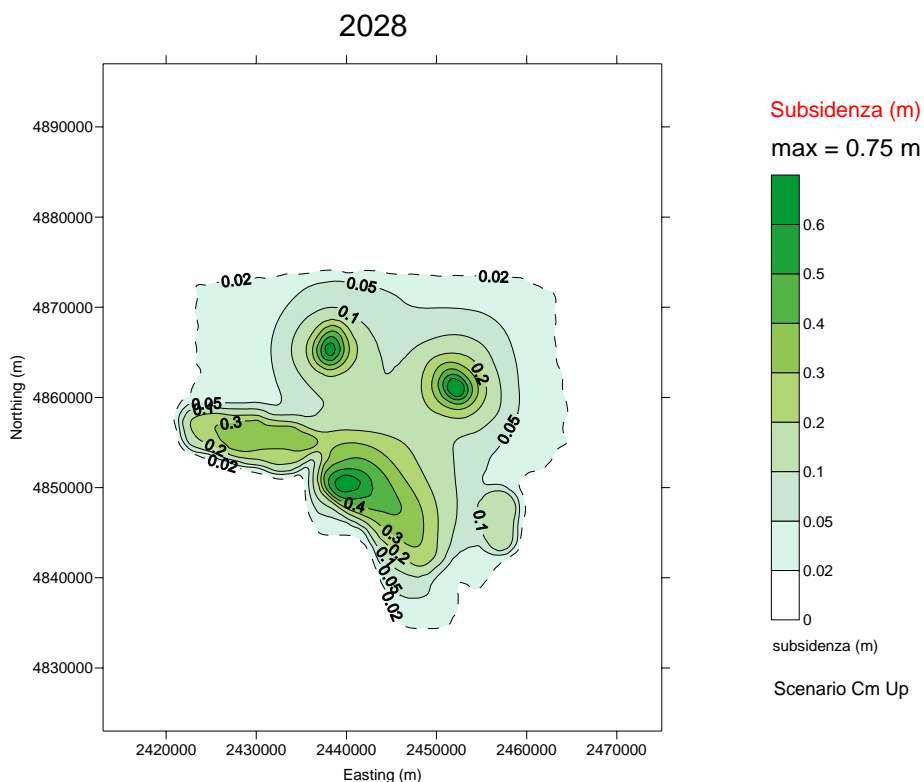


Figura 15 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Cm_Upper al 2028.

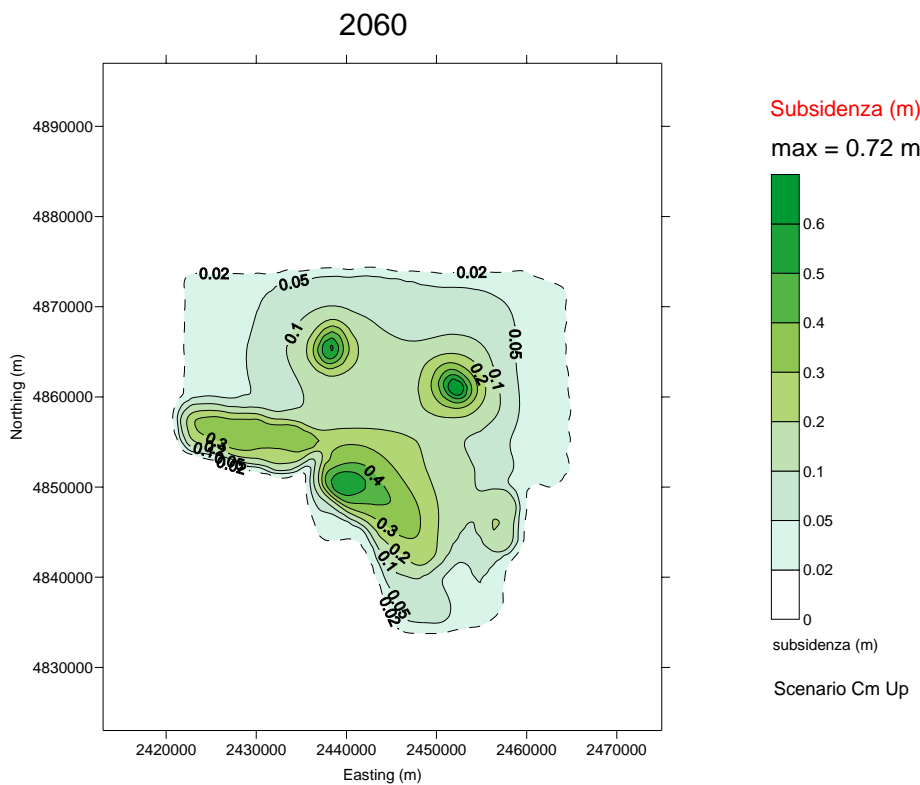


Figura 16 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Cm_Upper al 2060.

3.3 Scenario Cm_Lower: mappe di subsidenza

2011

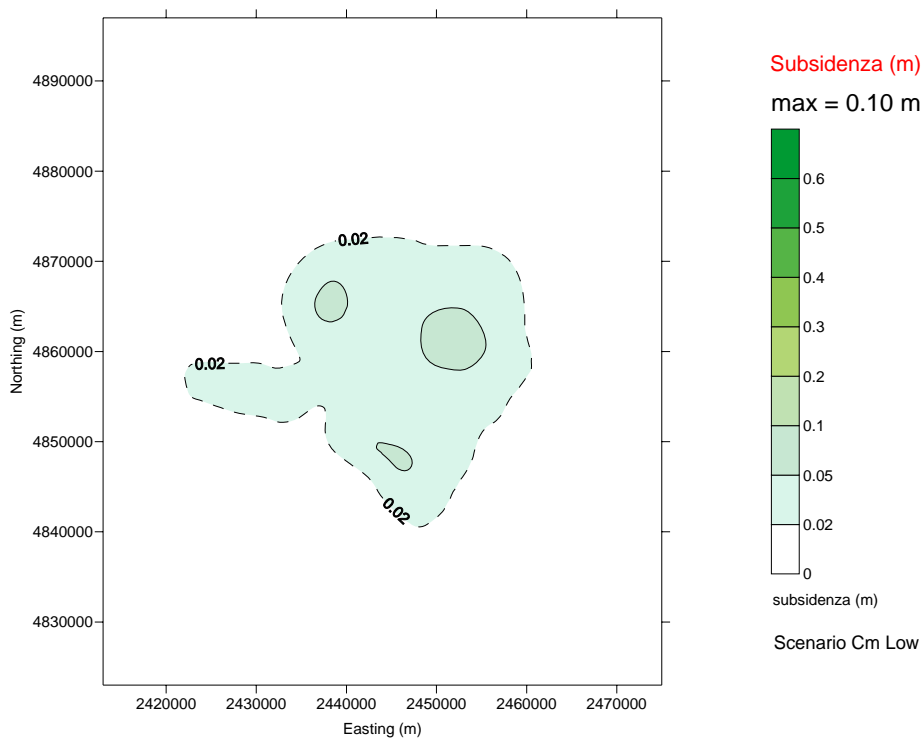


Figura 17 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Cm_Lower al 2011.

2017

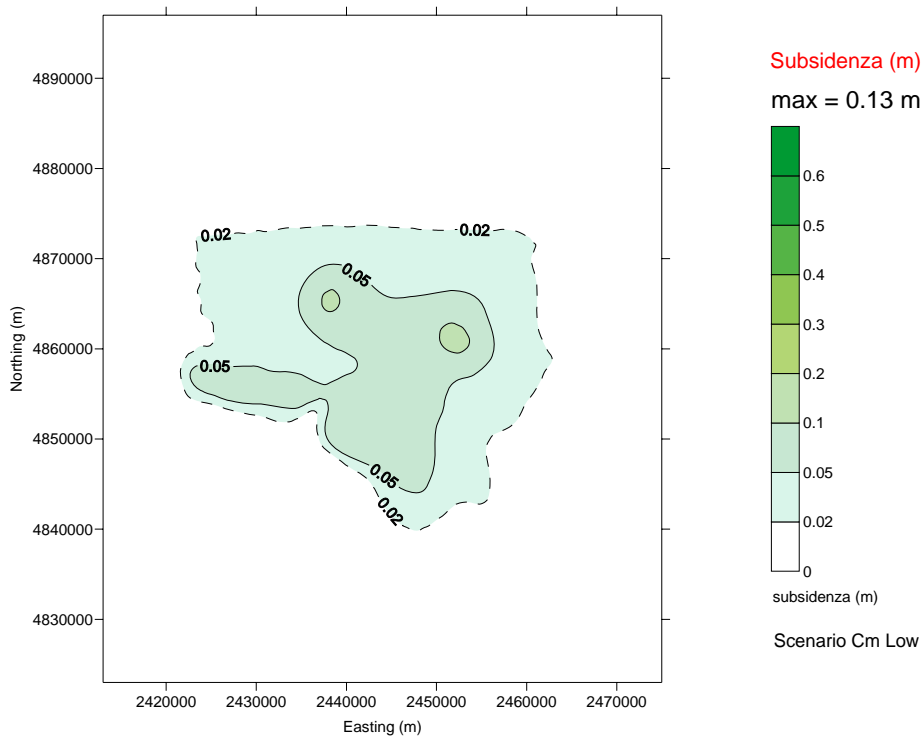


Figura 18 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Cm_Lower al 2017.

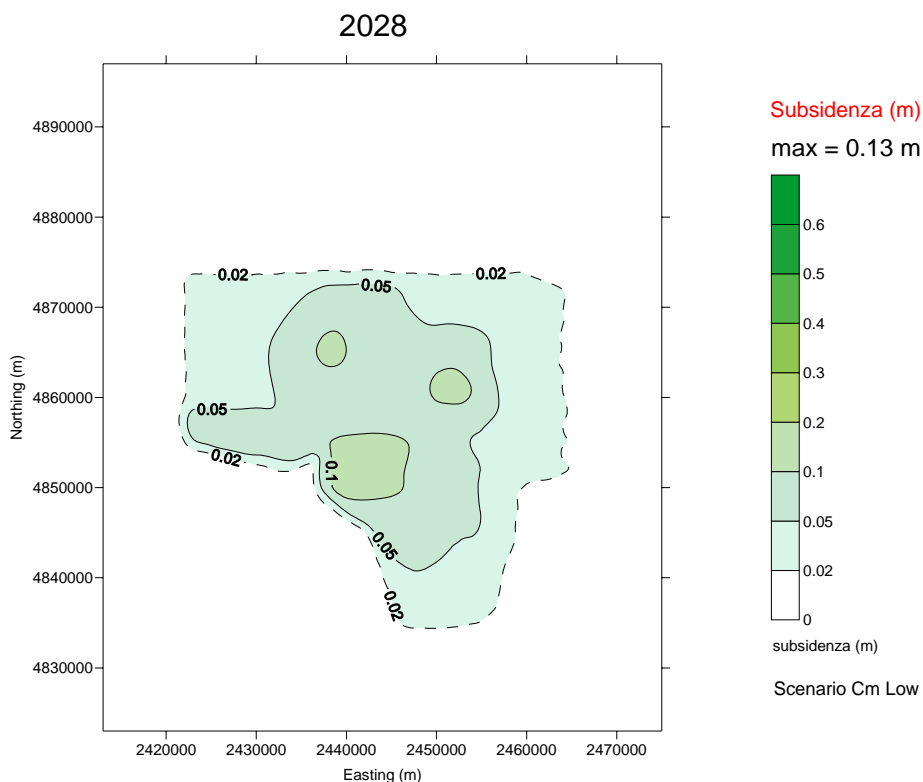


Figura 19 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Cm_Lower al 2028.

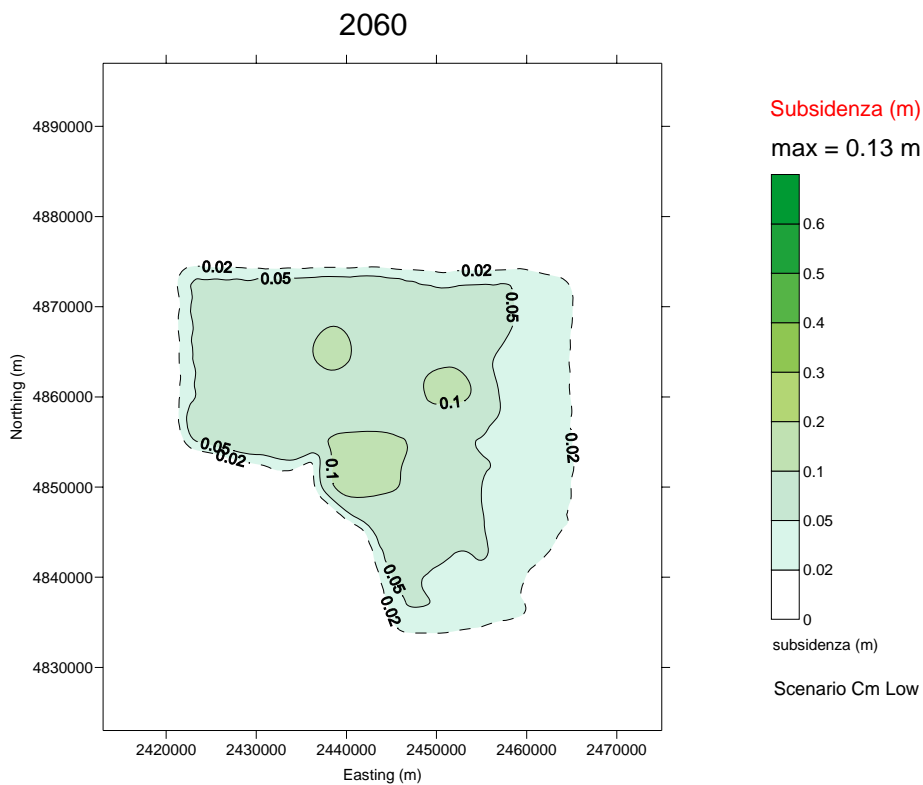


Figura 20 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Cm_Lower al 2060.

Bibliografia

1. Eclipse™, Schlumberger, versione 2009.2.
2. 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.*
3. M. Ferronato, G. Gambolati, P. Teatini and D. Baù: *Interpretation of Radioactive Marker Measurements To Evaluate Compaction in the Northern Adriatic Gas Field*, SPE Evaluation & Engineering, December 2003. D. Baù, M. Ferronato, G. Gambolati and P. Teatini: *Basin-scale compressibility of the northern Adriatic by the radioactive marker technique.* Géotechnique 52, No. 8, 605–616, 2002.
4. D. Baù, M. Ferronato, G. Gambolati and P. Teatini: *Basin-scale compressibility of the northern Adriatic by the radioactive marker technique.* Géotechnique 52, No. 8, 605–616, 2002.
5. Eni-TEOR: *Clara Complex – Definizione delle compressibilità.* Rapporto TEOR n.5/2010, 2010.
6. F.J. Santarelli, M. Brignoli, A. Pellegrino: *La scelta del coefficiente di Poisson per formazioni a grande scala - 04/1996.*