



# Campi del Clara Complex, Calipso ed Elettra

## Modello Elasto-Plastico di Subsidenza

### Management Summary

**LISTA DI DISTRIBUZIONE:**

DPMF

MAGEOD

GEOMAG

**AUTORI**

G. Capasso	TEOR

**Data: 04 Agosto 2010**

0	Rapporto Finale	F. Casolini 	S. Giammetti 
		S. Mantica 	P. Consonni 
<b>AGGIORNAMENTI</b>		<b>CONTROLLATO DA</b>	<b>APPROVATO DA</b>



## Indice

1	Introduzione .....	3
2	Modello Geomeccanico agli Elementi Finiti .....	5
2.1	Approccio metodologico .....	5
2.2	Geometria del modello .....	6
2.3	Proprietà dei materiali .....	7
2.3.1	Compressibilità uniassiale .....	7
2.4	Inizializzazione .....	10
2.4.1	Stato tensionale iniziale .....	10
2.4.2	Pressioni iniziali .....	11
2.5	Storia di pressione .....	12
3	Risultati delle analisi eseguite con il modello elasto-plastico .....	13
3.1	Scenario di riferimento Cm_Med: mappe di subsidenza .....	15
3.2	Scenario Cm_Upper: mappe di subsidenza .....	17
3.3	Scenario Cm_Lower: mappe di subsidenza .....	19
	Bibliografia .....	21

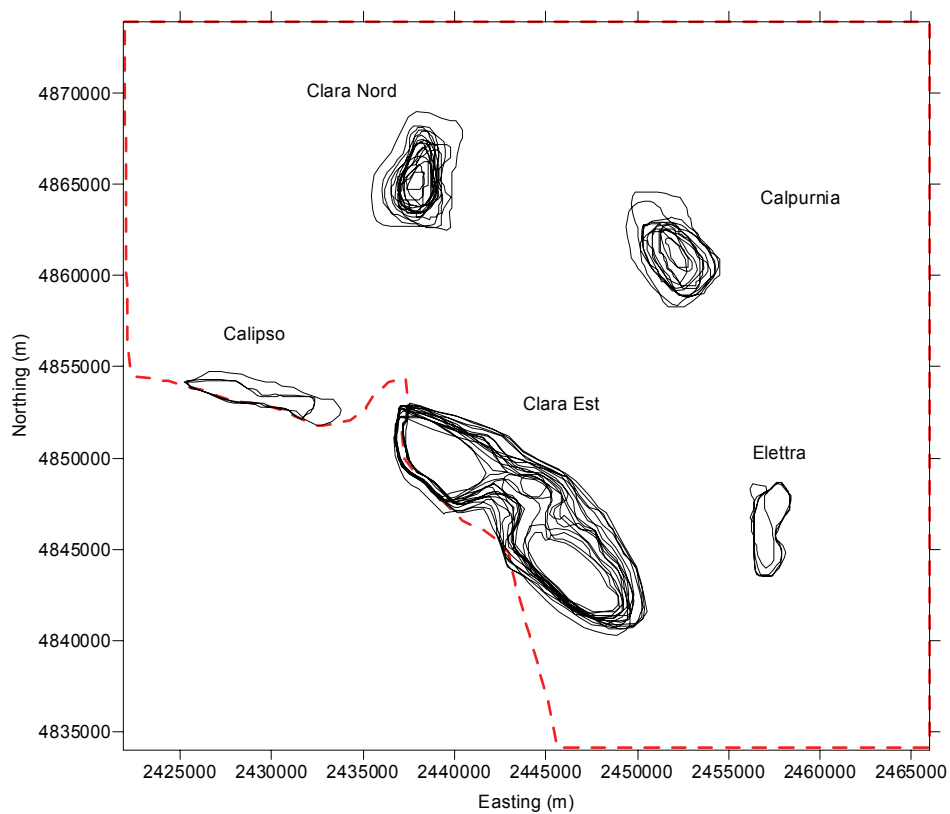
## 1 Introduzione

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.

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.**

## 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 2014 per Clara Nord, nel 2016 per Calpurnia e nel 2021 per Calipso, Clara Est ed Elettra), si prevede un'estrazione di gas complessiva tra  $7.731 \times 10^9 \text{ Sm}^3$  e  $7.770 \times 10^9 \text{ Sm}^3$  a seconda dello scenario considerato. Lo studio fluido-dinamico di giacimento è stato comunque protratto fino al 2054 (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 km<sup>2</sup>, 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 km<sup>2</sup>. 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 3, risulta suddivisa in 82 livelli ed è costituita da 294626 elementi e 946116 nodi per un totale di 2838348 gradi di libertà.

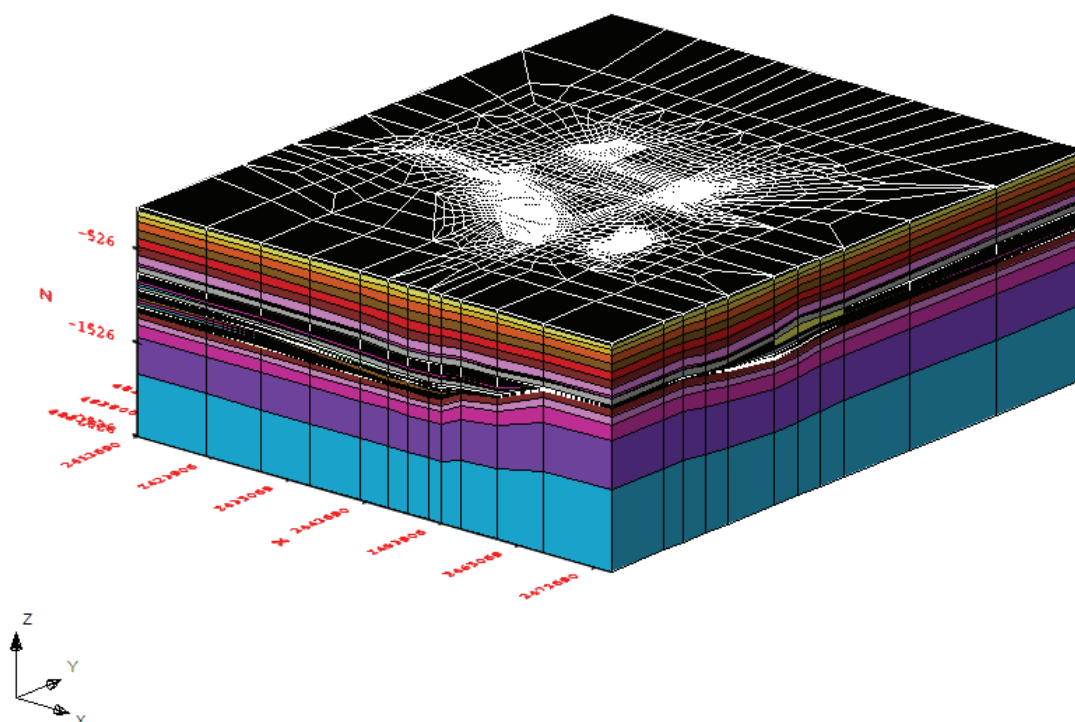


Figura 3 – Griglia di calcolo ad elementi finiti utilizzata nel modello geomeccanico Isamgeo. La scala verticale della rappresentazione è pari a 10 volte quella orizzontale.

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  $\sigma'_v$  è stata proposta da Hueckel *et al.* [2] ed è riportata in Figura 4 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),  $\sigma'_v$  è la tensione efficace verticale espressa in bar e  $c_m$  è il coefficiente di compressibilità edometrica espresso in  $\text{bar}^{-1}$ . In Figura 4 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.

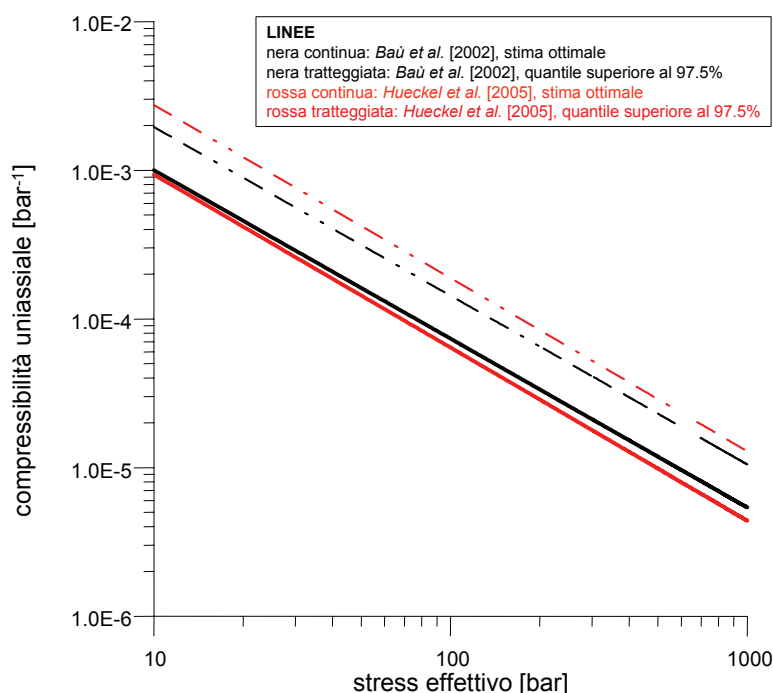


Figura 4 – Correlazione tra la compressibilità uniassiale  $c_m$  e lo stress efficace in situ, derivata da misure su marker nei campi a gas del bacino nord adriatico (da [2]).

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  $\sigma_v$  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  $\sigma_v$  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  $\lambda$  e di scarico-ricarico  $\kappa$  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  $\sigma_v$ , pressione dei pori iniziale  $p$  e tensione verticale efficace iniziale  $\sigma'_v$ .

**Tabella 1 – Proprietà assegnate, regione per regione, per lo scenario di riferimento Cm\_Med.**

Layer name	ECL index	FE layer	$z_m$ (m)	$\sigma_v$ (bar)	$p$ (bar)	$\sigma'_v$ (bar)	$c_m$ (bar <sup>-1</sup> )	$\lambda$	$e_0$	$\kappa(=\lambda/3)$
Overburden		1	91.6	10.6	9.4	1.2	Lineare elastico – E = 1000 bar			
Overburden		2	135.3	19.3	13.9	5.3	3.90E-03	0.03635	0.8110	0.01212
Overburden		3	193.5	30.8	19.9	10.9	1.70E-03	0.03184	0.7998	0.01061
Overburden		4	266.3	45.3	27.4	17.9	9.52E-04	0.02880	0.7750	0.00960
Overburden		5	353.7	62.9	36.4	26.4	6.04E-04	0.02642	0.7417	0.00881
Overburden		6	441.1	80.6	45.4	35.1	4.34E-04	0.02468	0.7079	0.00823





Overburden		7	528.5	98.4	54.4	44.0	3.34E-04	0.02329	0.6744	0.00776
Overburden		8	615.8	116.4	63.4	52.9	2.69E-04	0.02213	0.6418	0.00738
PLQ2-B	1	9	667.1	127.0	66.6	60.3	2.31E-04	0.02140	0.6234	0.00713
	2	10	677.6	129.1	67.5	61.6	2.26E-04	0.02128	0.6196	0.00709
PLQ2-B1	3	11	680.8	129.8	67.8	62.0	2.24E-04	0.02124	0.6184	0.00708
	4	12	684.0	130.5	68.1	62.3	2.22E-04	0.02120	0.6173	0.00707
PLQ2-B2	5	13	716.5	137.2	71.1	66.2	2.08E-04	0.02084	0.6057	0.00695
	6	14	751.1	144.4	74.4	70.1	1.94E-04	0.02049	0.5935	0.00683
PLQ1-A	7	15	800.4	154.8	79.4	75.4	1.78E-04	0.02002	0.5764	0.00667
	8	16	848.6	164.9	84.6	80.3	1.66E-04	0.01960	0.5599	0.00653
PLQ1-B1	9	17	853.2	165.9	85.1	80.8	1.64E-04	0.01956	0.5584	0.00652
	10	18	860.5	167.4	85.9	81.5	1.63E-04	0.01950	0.5559	0.00650
PLQ1-B1a	11	19	878.3	171.2	87.9	83.3	1.59E-04	0.01936	0.5499	0.00645
	12	20	896.8	175.1	90.1	85.0	1.55E-04	0.01921	0.5437	0.00640
PLQ1-C	13	21	907.4	177.3	91.3	86.0	1.53E-04	0.01913	0.5402	0.00638
	14	22	913.9	178.7	92.1	86.6	1.52E-04	0.01908	0.5381	0.00636
PLQ1-C1	15	23	942.5	184.8	95.6	89.2	1.47E-04	0.01887	0.5287	0.00629
	16	24	974.4	191.6	99.6	92.0	1.41E-04	0.01865	0.5183	0.00622
PLQ1-D	17	25	981.1	193.0	100.5	92.5	1.40E-04	0.01860	0.5162	0.00620
	18	26	983.9	193.6	100.8	92.8	1.40E-04	0.01858	0.5153	0.00619
PLQ1-D1	19	27	987.4	194.3	101.3	93.1	1.39E-04	0.01856	0.5142	0.00619
	20	28	991.0	195.1	101.7	93.4	1.39E-04	0.01854	0.5130	0.00618
PLQ1-D2	21	29	994.0	195.7	102.1	93.6	1.39E-04	0.01852	0.5120	0.00617
	22	30	1009.1	199.0	104.1	94.8	1.36E-04	0.01842	0.5072	0.00614
PLQ1-D5	23	31	1026.9	202.8	106.5	96.3	1.34E-04	0.01830	0.5016	0.00610
	24	32	1044.2	206.5	108.9	97.6	1.32E-04	0.01819	0.4961	0.00606
PLQ-A	25	33	1055.2	208.8	110.4	98.5	1.31E-04	0.01813	0.4927	0.00604
	26	34	1041.7	205.9	108.5	97.4	1.32E-04	0.01821	0.4969	0.00607
PLQ-A1	27	35	1058.1	209.4	110.8	98.7	1.30E-04	0.01811	0.4918	0.00604
	28	36	1043.8	206.4	108.8	97.6	1.32E-04	0.01820	0.4963	0.00607
PLQ-B	29	37	1061.7	210.2	111.3	99.0	1.30E-04	0.01809	0.4907	0.00603
	30	38	1045.9	206.8	109.1	97.8	1.32E-04	0.01818	0.4956	0.00606
PLQ-B1	31	39	1064.7	210.9	111.7	99.2	1.30E-04	0.01807	0.4897	0.00602
	32	40	1048.2	207.3	109.4	97.9	1.31E-04	0.01817	0.4949	0.00606
PLQ-C	33	41	1068.6	211.7	112.2	99.5	1.29E-04	0.01804	0.4885	0.00601
	34	42	1050.4	207.8	109.7	98.1	1.31E-04	0.01815	0.4942	0.00605
PLQ-C2	35	43	1072.2	212.5	112.7	99.7	1.29E-04	0.01802	0.4874	0.00601
	36	44	1052.3	208.2	110.0	98.2	1.31E-04	0.01814	0.4936	0.00605
PLQ-D1	37	45	1075.2	213.1	113.2	100.0	1.28E-04	0.01800	0.4865	0.00600
	38	46	1054.6	208.7	110.3	98.4	1.31E-04	0.01813	0.4929	0.00604
PLQ-D2	39	47	1078.7	213.9	113.7	100.2	1.28E-04	0.01798	0.4854	0.00599
	40	48	1056.4	209.1	110.5	98.6	1.30E-04	0.01812	0.4923	0.00604
PLQ-E1	41	49	1081.9	214.6	114.1	100.4	1.28E-04	0.01797	0.4844	0.00599
	42	50	1058.4	209.5	110.8	98.7	1.30E-04	0.01811	0.4917	0.00604

PLQ-E2	43	51	1084.9	215.2	114.5	100.7	1.27E-04	0.01795	0.4835	0.00598
	44	52	1087.4	215.8	114.9	100.8	1.27E-04	0.01793	0.4827	0.00598
PLQ-G1	45	53	1090.1	216.3	115.3	101.0	1.27E-04	0.01792	0.4819	0.00597
	46	54	1095.0	217.4	116.0	101.4	1.26E-04	0.01789	0.4804	0.00596
PLQ-H	47	55	1103.3	219.2	117.2	102.0	1.25E-04	0.01784	0.4778	0.00595
	48	56	1111.8	221.0	118.4	102.6	1.25E-04	0.01779	0.4752	0.00593
PLQ-H1	49	57	1129.5	224.8	121.0	103.8	1.23E-04	0.01769	0.4698	0.00590
	50	58	1153.1	229.9	124.6	105.3	1.21E-04	0.01756	0.4627	0.00585
PLQ-O2	51	59	1161.8	231.8	125.9	105.9	1.20E-04	0.01752	0.4601	0.00584
	52	60	1170.7	233.7	127.3	106.4	1.19E-04	0.01747	0.4574	0.00582
PLQ-O3	53	61	1178.1	235.3	128.4	106.9	1.19E-04	0.01743	0.4552	0.00581
	54	62	1193.8	238.8	130.9	107.9	1.17E-04	0.01735	0.4505	0.00578
PLQ-P	55	63	1199.4	240.0	131.8	108.2	1.17E-04	0.01732	0.4489	0.00577
	56	64	1206.5	241.5	132.9	108.6	1.17E-04	0.01728	0.4468	0.00576
PLQ-P1	57	65	1210.8	242.4	133.6	108.8	1.16E-04	0.01726	0.4455	0.00575
	58	66	1211.8	242.7	133.8	108.9	1.16E-04	0.01726	0.4452	0.00575
PLQ-P2	59	67	1214.6	243.3	134.2	109.1	1.16E-04	0.01724	0.4444	0.00575
	60	68	1220.3	244.5	135.1	109.4	1.16E-04	0.01721	0.4427	0.00574
PLQ-Q	61	69	1223.9	245.3	135.7	109.6	1.15E-04	0.01720	0.4417	0.00573
	62	70	1229.3	246.5	136.6	109.9	1.15E-04	0.01717	0.4401	0.00572
PLQ-R	63	71	1238.5	248.5	138.1	110.4	1.14E-04	0.01712	0.4374	0.00571
	64	72	1250.1	251.0	140.0	111.0	1.14E-04	0.01707	0.4341	0.00569
PLQ-ST	65	73	1259.9	253.1	141.6	111.5	1.13E-04	0.01702	0.4312	0.00567
	66	74	1269.9	255.3	143.3	112.1	1.12E-04	0.01697	0.4283	0.00566
PLQ-Usup	67	75	1274.8	256.4	144.1	112.3	1.12E-04	0.01695	0.4269	0.00565
	68	76	1283.7	258.3	145.6	112.7	1.12E-04	0.01691	0.4244	0.00564
PLQ-Uinf	69	77	1291.3	260.0	146.9	113.1	1.11E-04	0.01687	0.4222	0.00562
	70	78	1265.9	254.4	142.6	111.9	1.13E-04	0.01699	0.4295	0.00566
Underburden		79	1330.6	268.6	153.7	114.9	1.09E-04	0.01670	0.4111	0.00557
Underburden		80	1427.5	290.0	171.3	118.6	1.05E-04	0.01630	0.3844	0.00543
Underburden		81	1686.0	347.8	224.7	123.2	5.03E-05	0.00771	0.2806	0.00257
Underburden		82	2203.1	467.2	358.2	109.0	5.80E-05	0.00717	0.1677	0.00239

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:

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

dove  $\sigma_v$  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),  $\rho_w$  è la densità dell'acqua assunta pari a  $1030 \text{ kg/m}^3$  e  $g$  è l'accelerazione di gravità assunta pari a  $9.807 \text{ m/sec}^2$ .

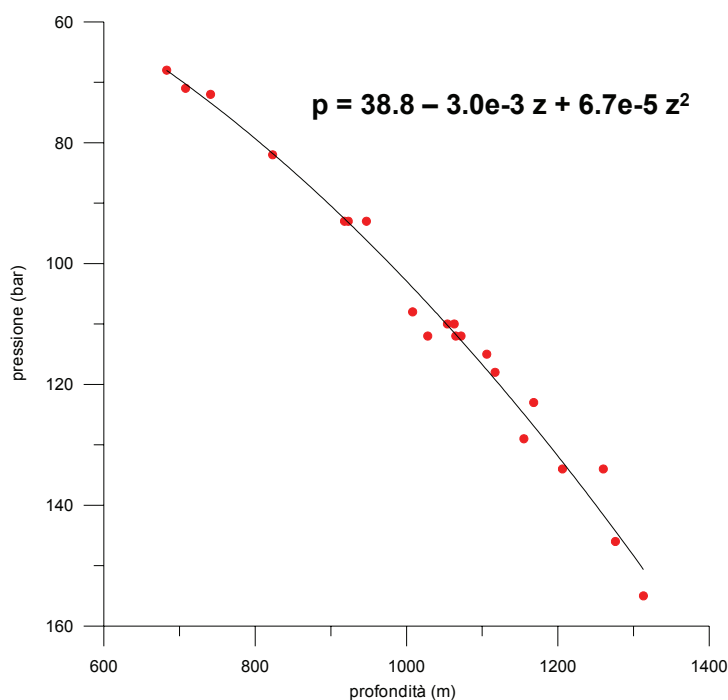
Lo sforzo orizzontale  $\sigma'_h$  è stato inizializzato partendo da condizioni di tipo edometrico definite come:

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

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, forniti da Eni (ed estratti dal modello Eclipse) riportati in Figura 7.



**Figura 5 – 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 5:

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

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  $1030 \text{ kg/m}^3$ . 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 2030, successivamente (fino al 2054) ad intervalli biennali.

### 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 del campo. Lo studio è stato, infatti, protratto fino al 2054 (a pozzi chiusi) in modo da considerare l'effetto dell'evoluzione della pressione nelle regioni mineralizzate e in acquifero dopo la fine della produzione.

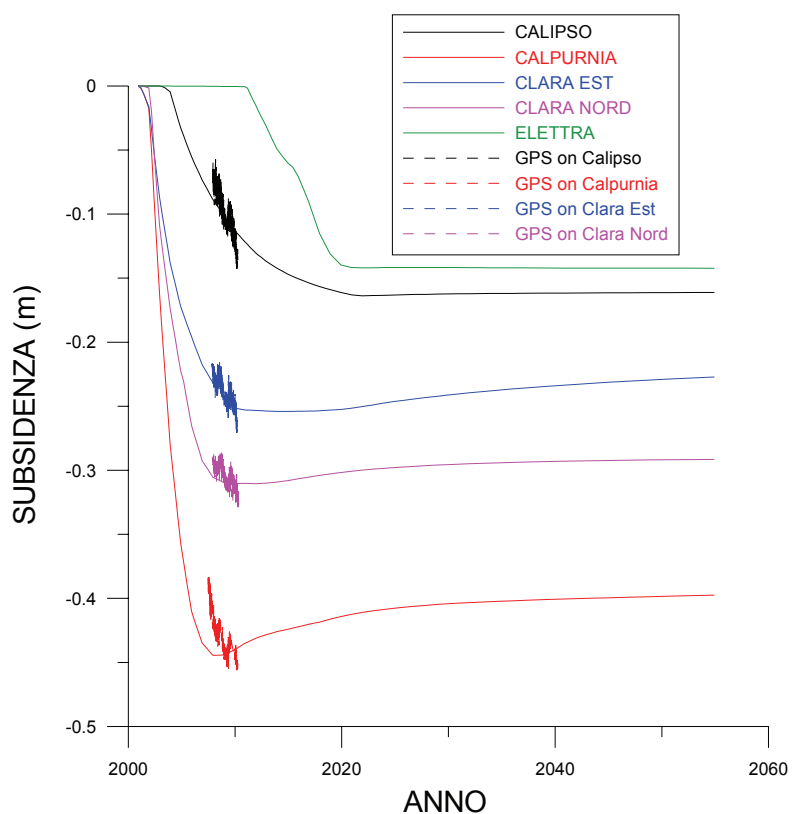
**Tabella 2 – Risultati finali: massima subsidenza (espressa in cm) per tutti gli scenari.**

Scenario	2008	2010	2020	2054
Cm_Med	43	42	40	38
Cm_Upper	58	57	54	51
Cm_Lower	9	9	9	9

Nel caso ritenuto più probabile (scenario Cm\_Med), la subsidenza massima, che si verifica in corrispondenza del campo di Calpurnia, risulta pari a circa 43 cm nel 2008; si tratta quindi di un valore già raggiunto, che risulta ridotto a 42 cm alla data odierna (2010) e si riduce ulteriormente fino ad un valore di circa 38 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 9 a 58 cm.

Gli altri campi danno luogo a valori massimi di subsidenza inferiori (per lo scenario di riferimento Cm\_Med: 32 cm per Clara Nord, 25 cm per Clara Est, 30 cm per Calipso, 16 cm per Elettra) che si verificano in date diverse, come mostrato nelle mappe di subsidenza riportate nei paragrafi successivi.

In Figura 6 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). Si sottolinea tuttavia che, come indicato dall'ente certificatore dei dati (Università degli Studi di Bologna, Dipartimento di Fisica), un dataset inferiore a 36 mesi non può essere considerato sufficientemente attendibile al fine di una verifica del modello previsionale di subsidenza.



**Figura 6 – 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

2008

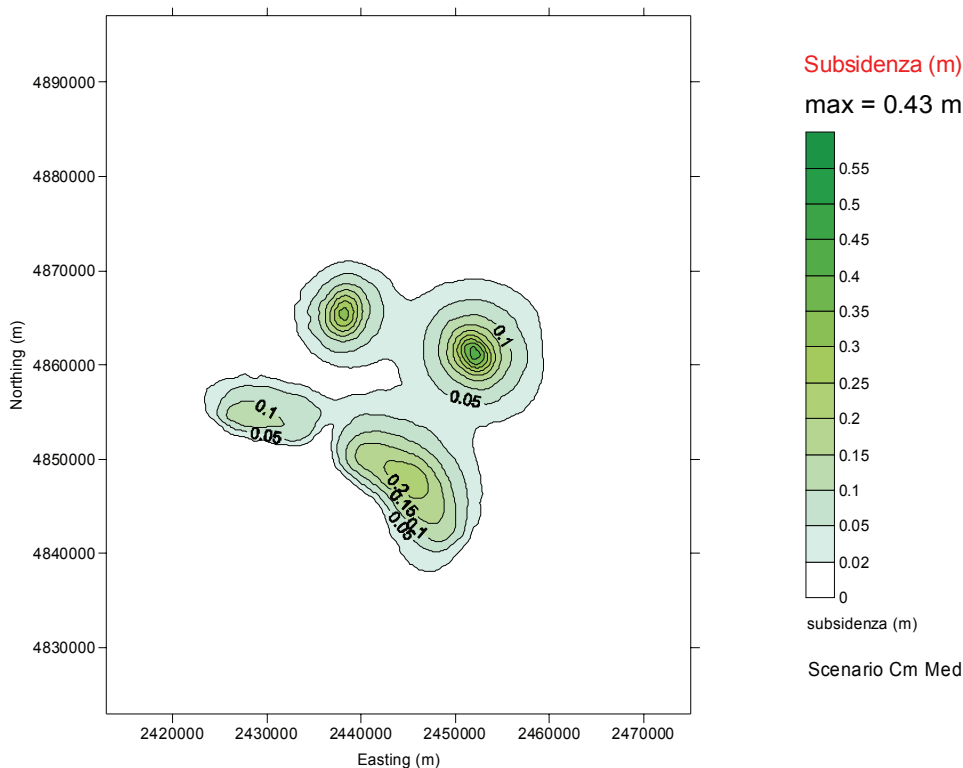


Figura 7 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Cm\_Med al 2008.

2010

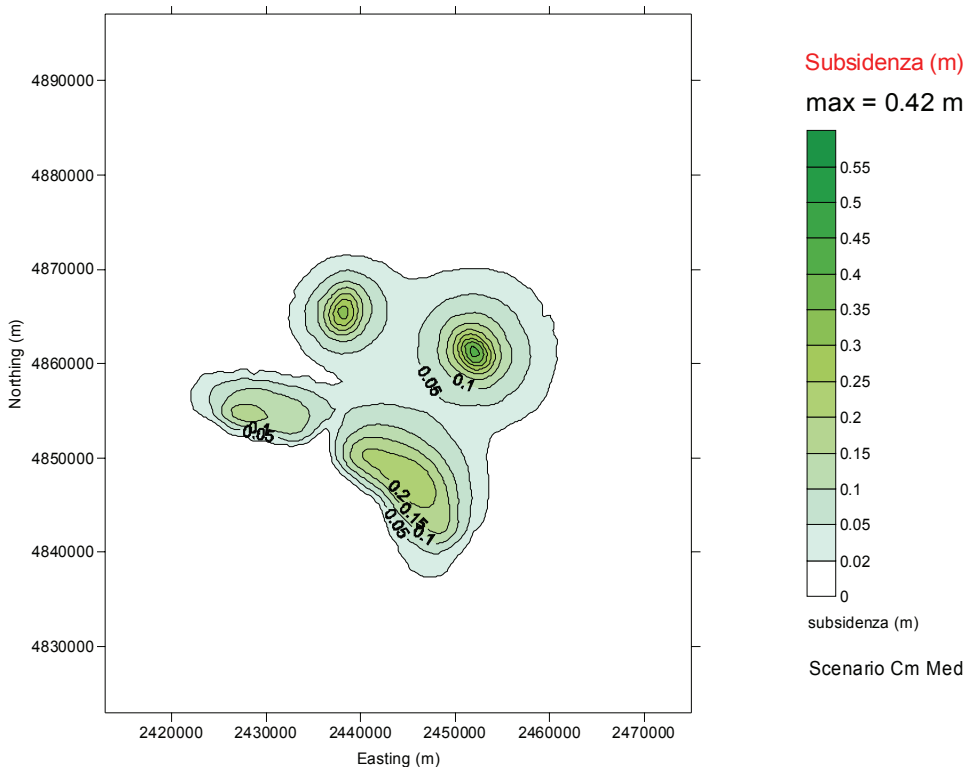


Figura 8 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Cm\_Med al 2010.

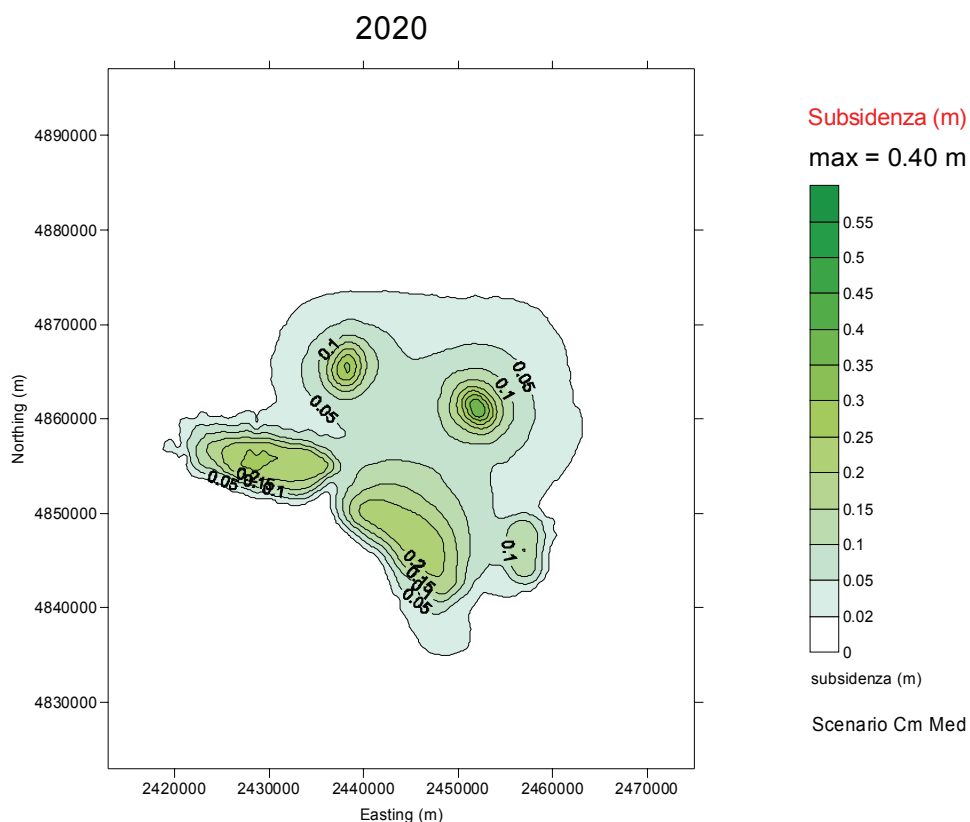


Figura 9 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Cm\_Med al 2020.

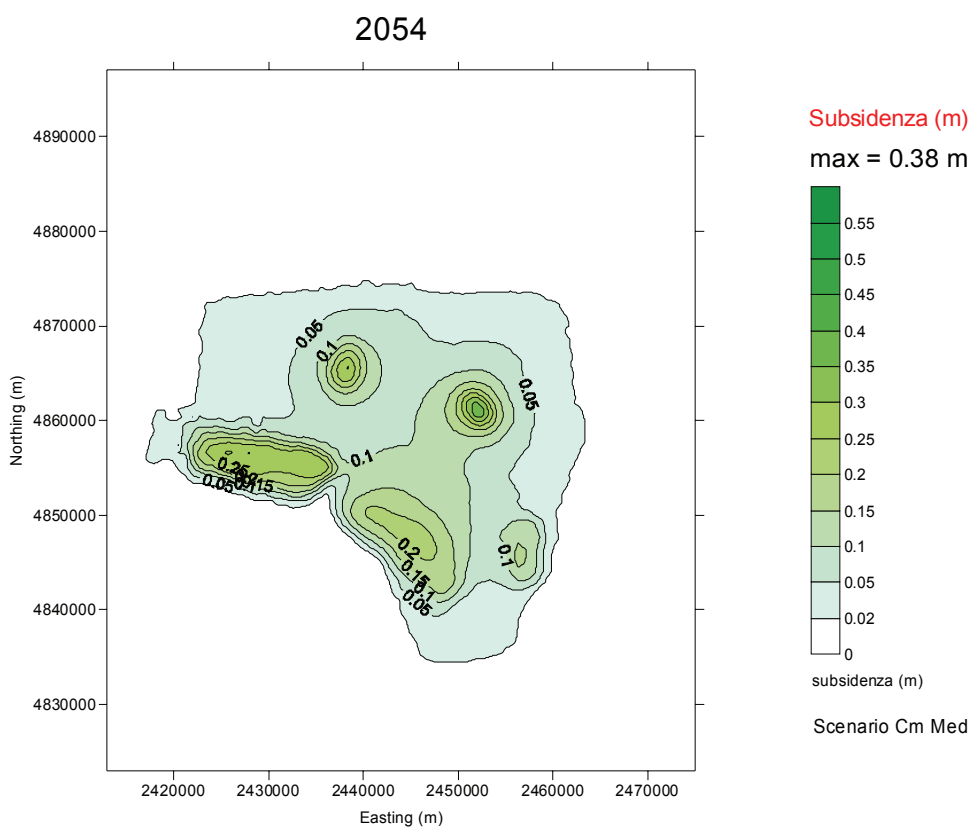


Figura 10 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Cm\_Med al 2054.

### 3.2 Scenario Cm\_Upper: mappe di subsidenza

2008

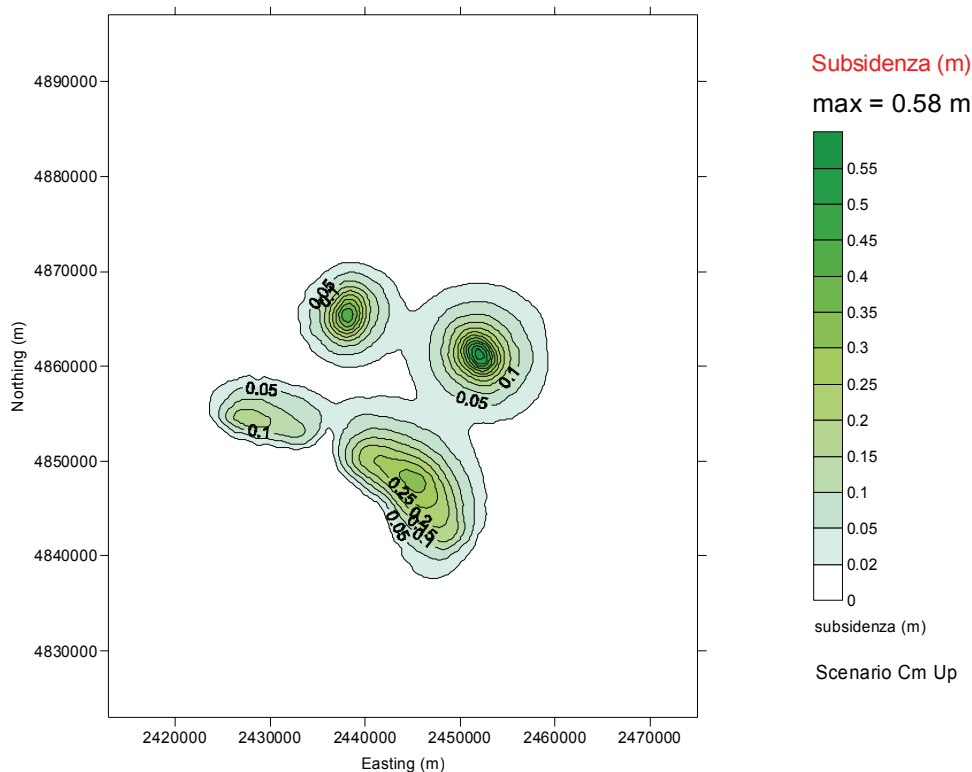


Figura 11 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Cm\_Upper al 2008.

2010

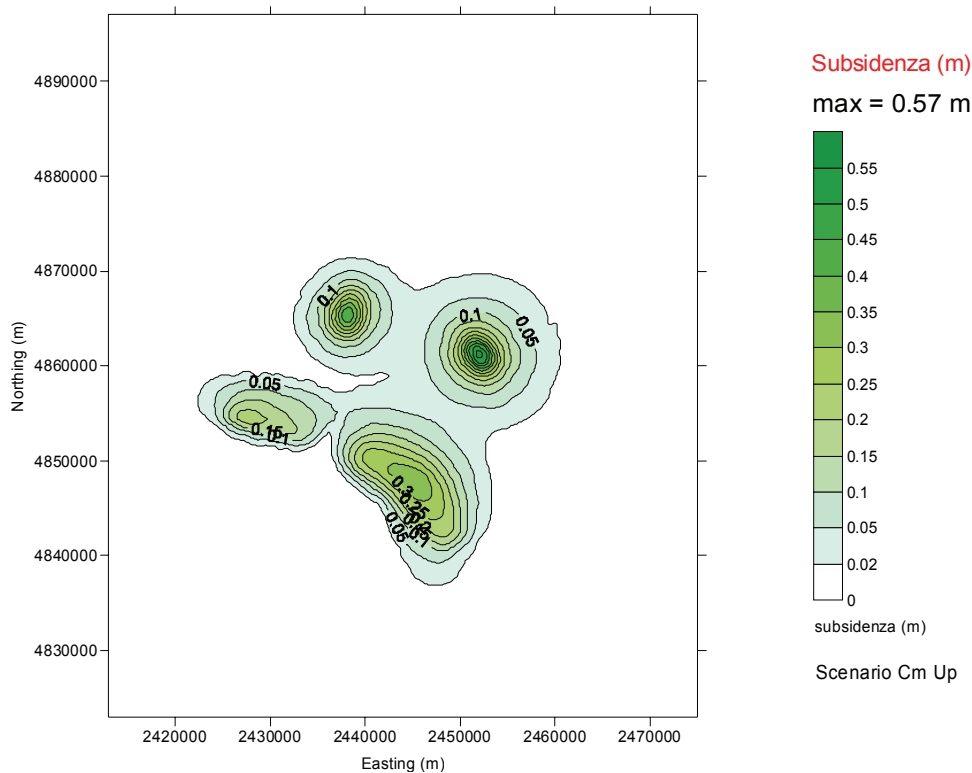


Figura 12 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Cm\_Upper al 2010.

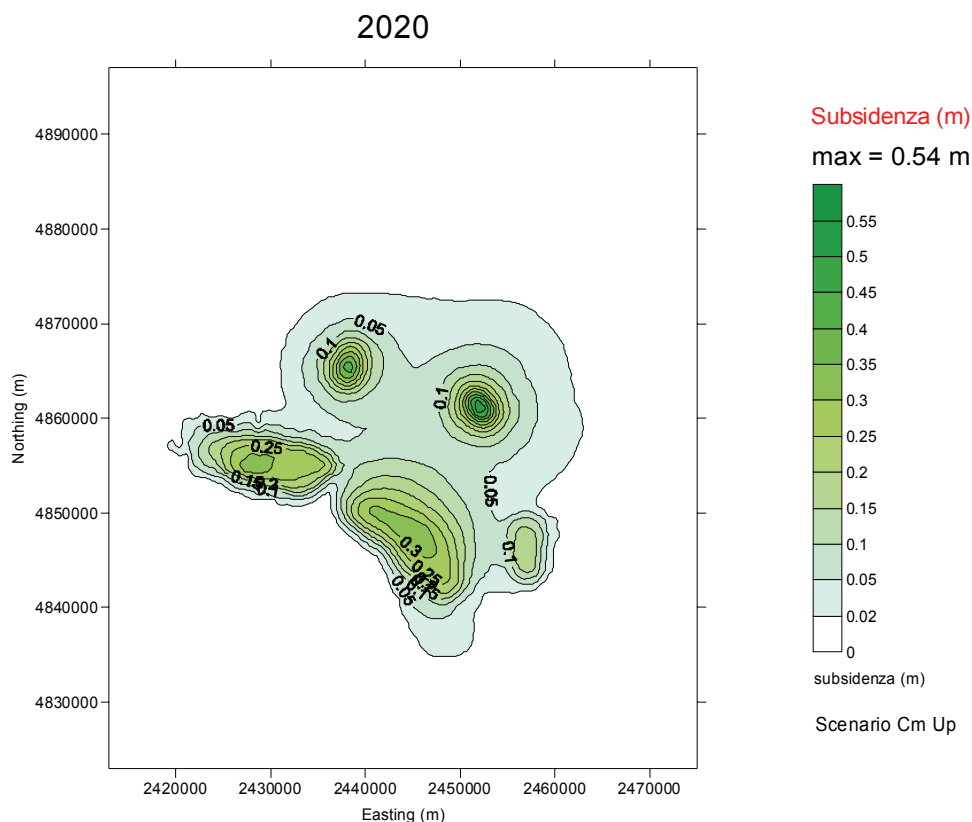


Figura 13 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Cm\_Upper al 2020.

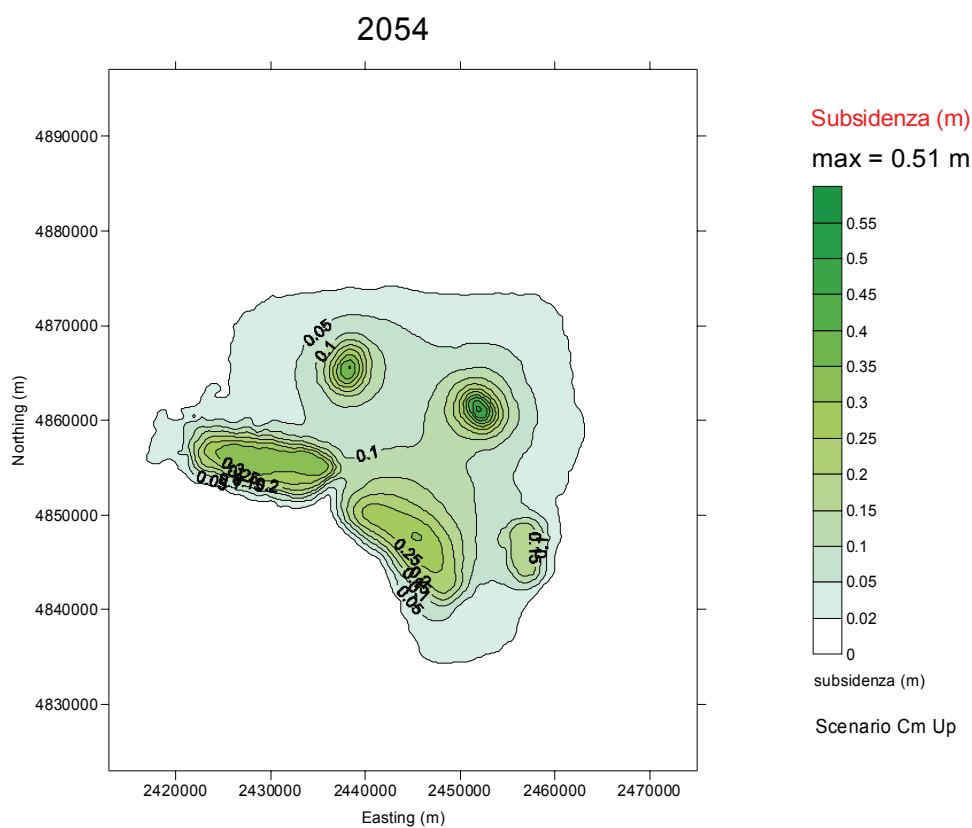


Figura 14 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Cm\_Upper al 2054.

### 3.3 Scenario Cm\_Lower: mappe di subsidenza

2008

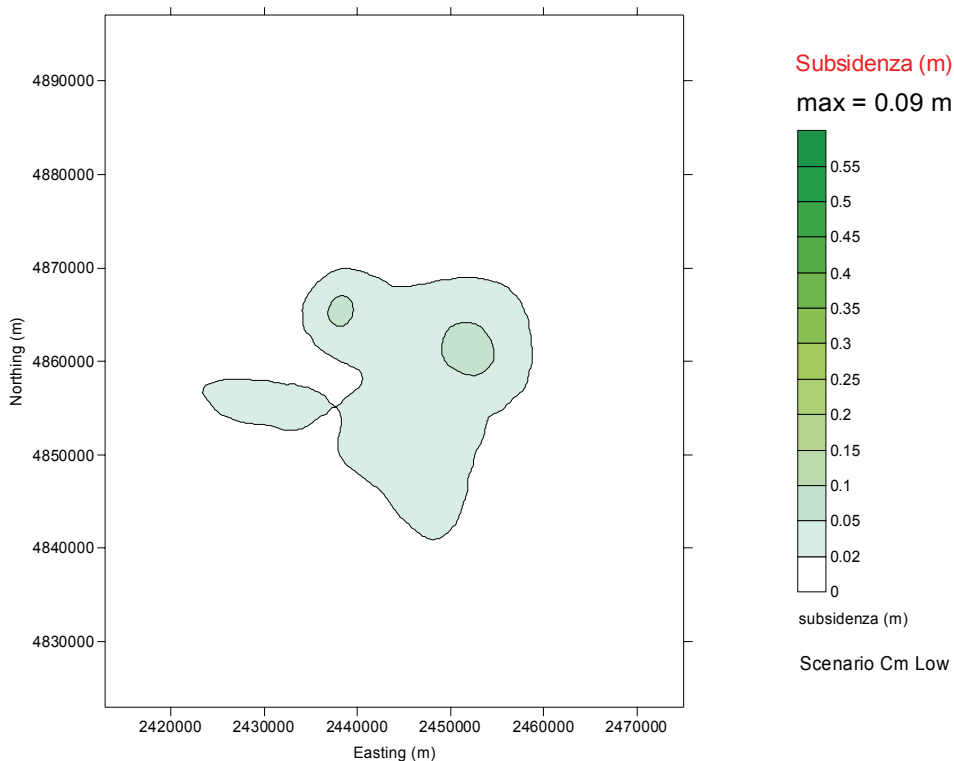


Figura 15 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Cm\_Lower al 2008.

2010

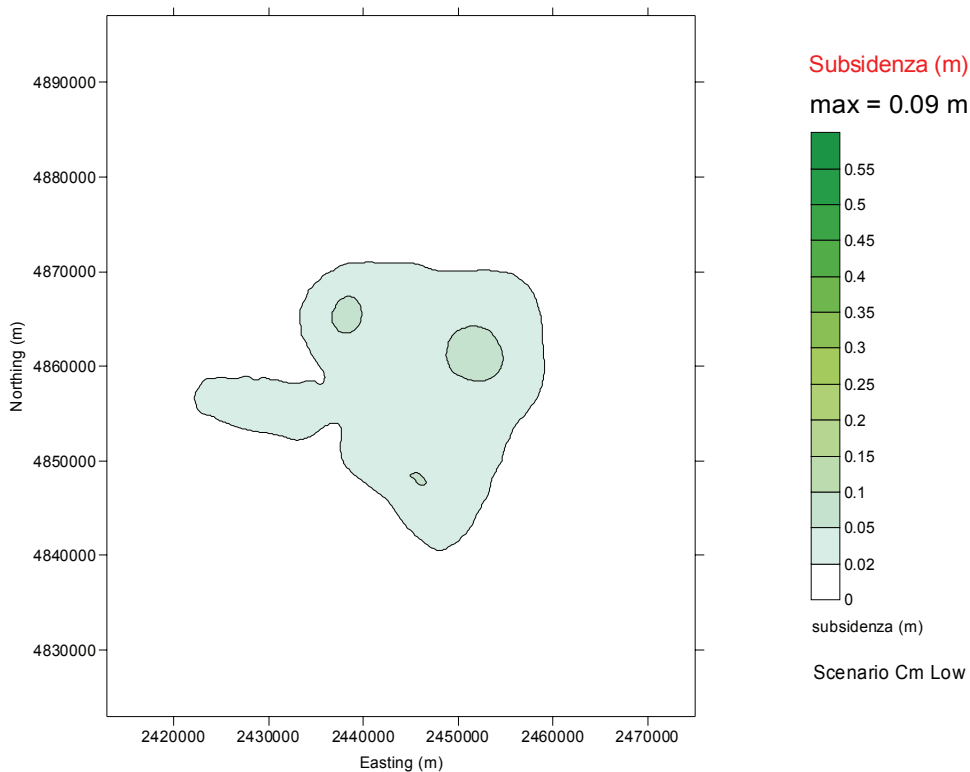
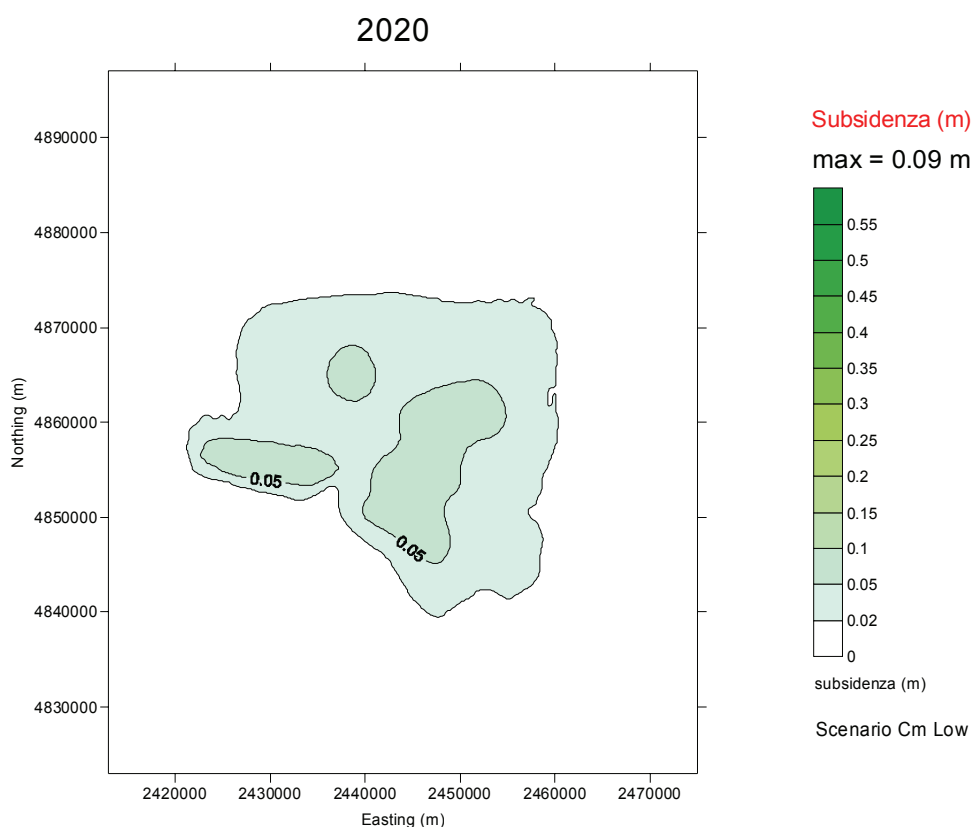
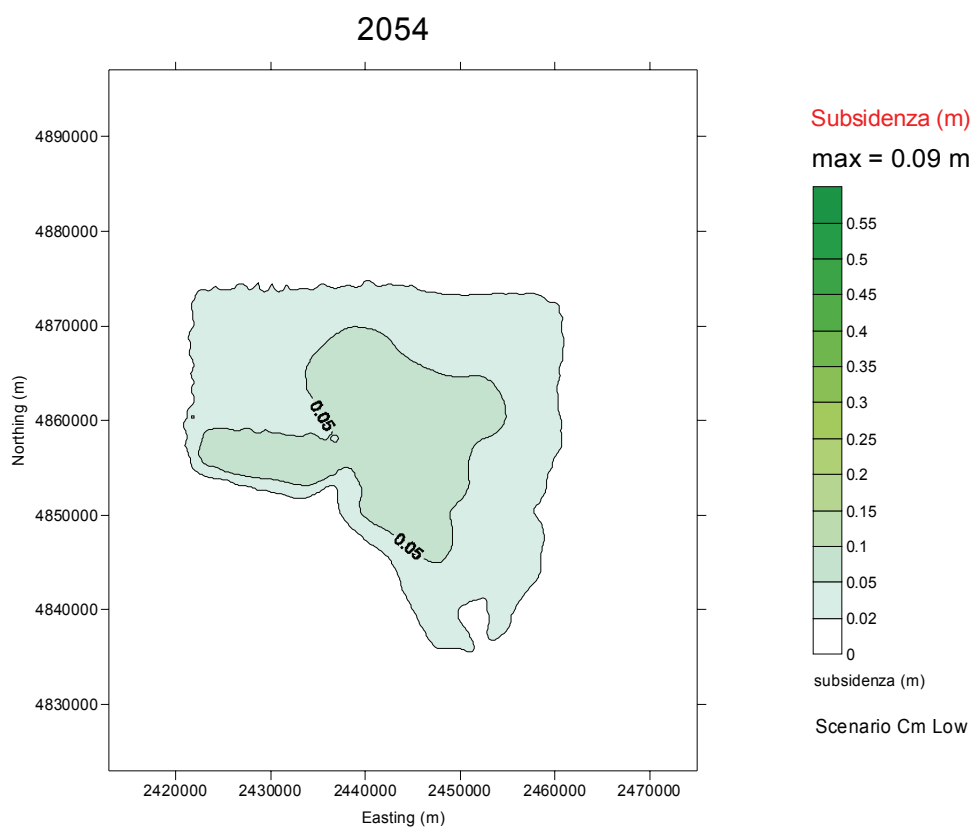


Figura 16 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Cm\_Lower al 2010.



**Figura 17 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Cm\_Lower al 2020.**



**Figura 18 – Curve di iso-subsidenza per lo scenario Cm\_Lower al 2054.**



## 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.*