



eni S.p.A.  
Exploration & Production  
Division

Doc. SICS 195  
Studio di Impatto Ambientale  
Progetto "Bonaccia NW"

Appendice 5

## **Appendice 5**

### **Modello elasto-plastico di subsidenza**



# Campi di Bonaccia, Bonaccia Est e Bonaccia Nord-Ovest

## Modello Elasto-plastico di Subsidenza

### Management Summary

**LISTA DI DISTRIBUZIONE:**

GEOD/CS  
GEOES/CS

**AUTORI**

F. Bottazzi	TEOR
A. Cominelli	MOGI
L. Dovera	MOGI
S. Raniolo	MOGI
C. Topini	TEOR

**Data: 30 settembre 2011**

0	Rapporto Finale	F. Casolini 	F. Italiano 
		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 .....	5
2.3	Proprietà dei materiali .....	7
2.3.1	Densità della roccia .....	7
2.3.2	Peso specifico dei fluidi saturanti .....	8
2.3.3	Comprimibilità dei materiali .....	8
2.4	Inizializzazione .....	10
2.4.1	Stato tensionale iniziale .....	10
2.4.2	Storia di pressione .....	10
3	Principali risultati .....	11
4	Confronto con dati da stazione CGPS .....	16
5	Bibliografia .....	18

## 1 Introduzione

Il presente rapporto illustra lo studio geomeccanico relativo ai campi di Bonaccia, Bonaccia Est e Bonaccia Nord-Ovest [1], effettuato con lo scopo di valutare quantitativamente la subsidenza indotta dalla coltivazione dei giacimenti in seguito alla messa in produzione di Bonaccia Nord-Ovest.

I campi di Bonaccia, Bonaccia Est e Bonaccia Nord-Ovest sono ubicati nel Mare Adriatico, tra l'Italia e la Croazia (Figura 1).

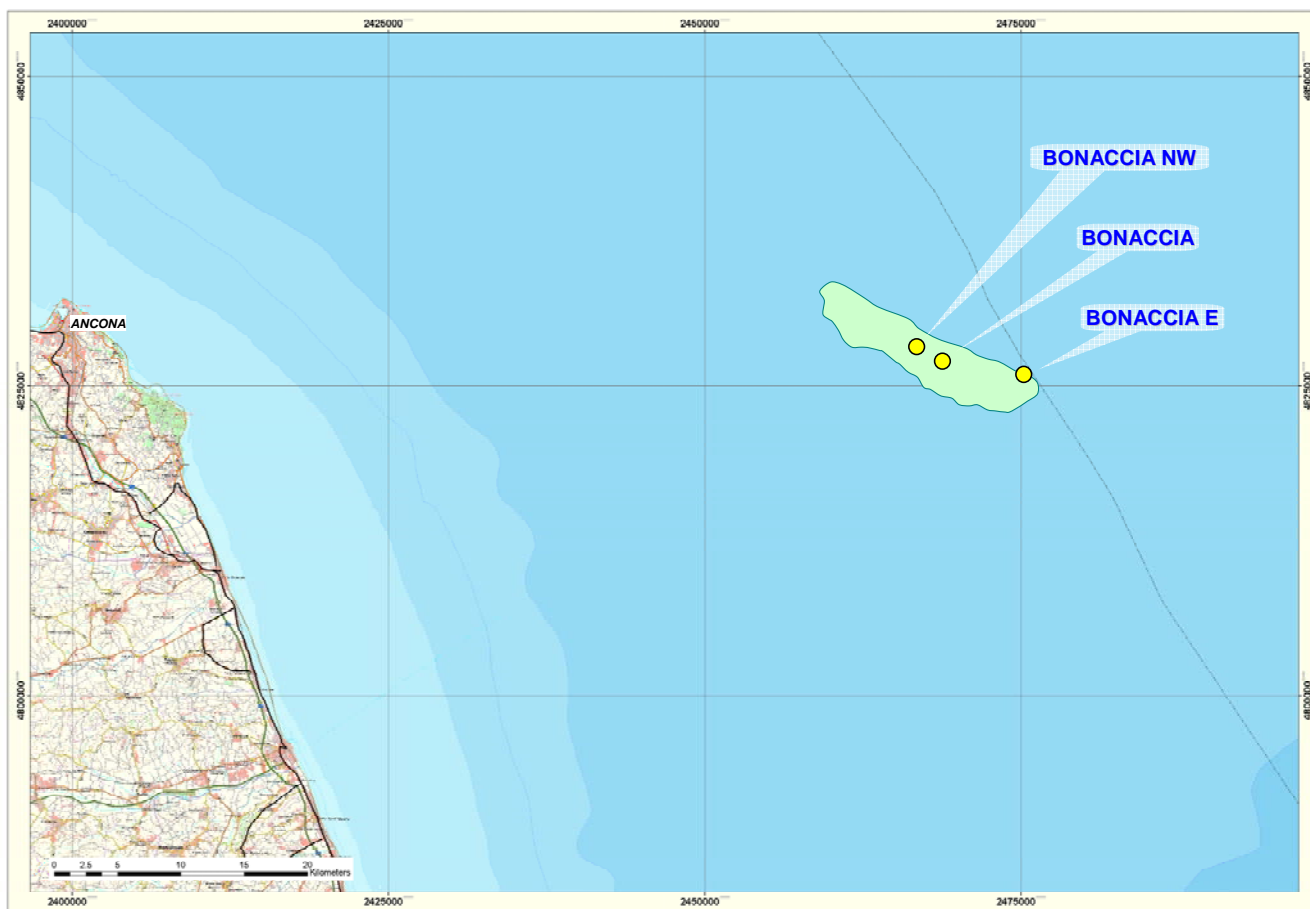


Figura 1 – Posizione dei campi Bonaccia, Bonaccia Est e Bonaccia Nord-Ovest.

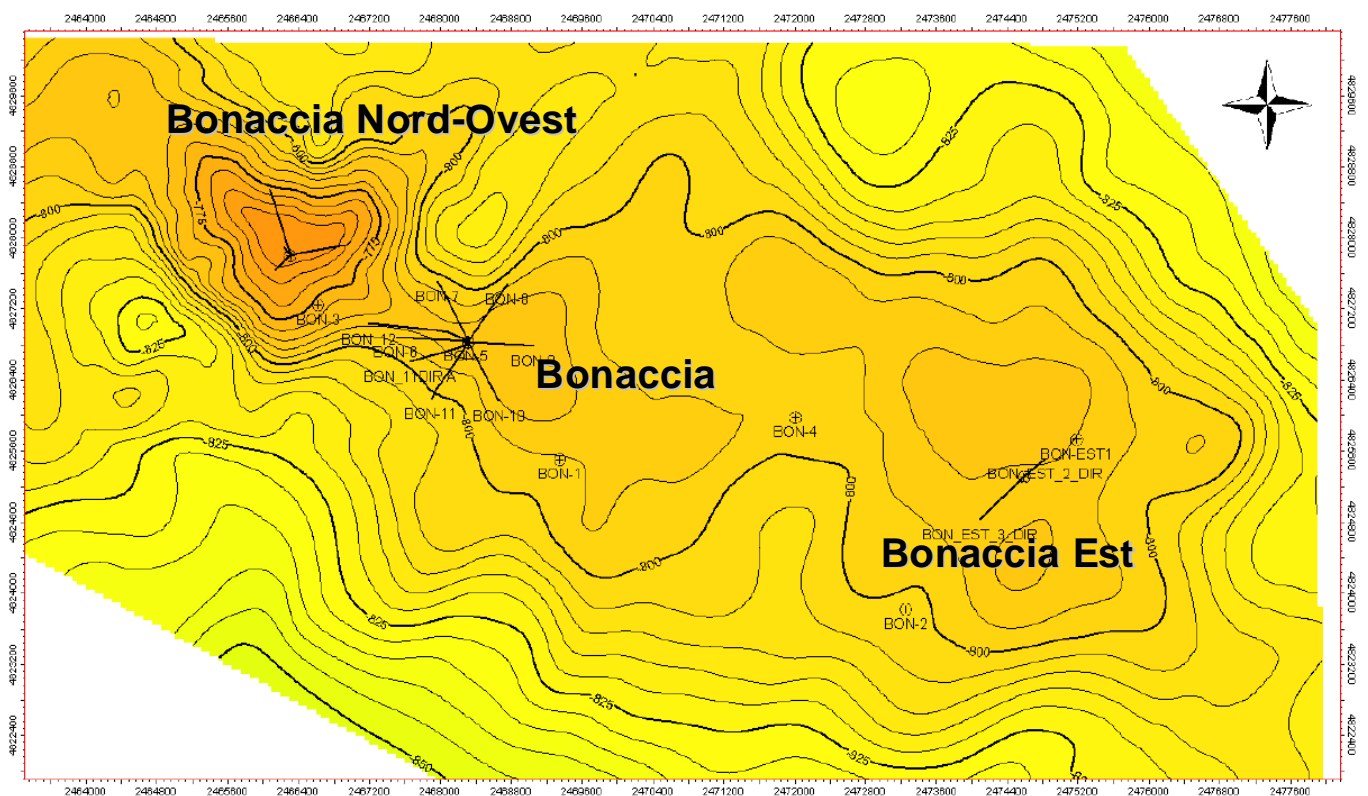
Il campo di Bonaccia è entrato in produzione nel febbraio del 1999. Nel 2002 è stato perforato il pozzo esplorativo Bonaccia Est 1, che ha confermato l'estensione della mineralizzazione nella culminazione di Bonaccia Est. Tale culminazione è stata messa in produzione nel giugno del 2009 con i pozzi Bonaccia Est 2dir e Bonaccia Est 3dir.

Nel presente rapporto sono stati analizzati due scenari di produzione: caso DN (Do-Nothing) e caso 3P (in cui viene messo in produzione anche il campo di Bonaccia Nord-Ovest). La produzione per il caso DN terminerà nel dicembre del 2030 ma lo studio dell'evoluzione delle pressioni è stato protratto, a pozzi chiusi, fino al dicembre 2060 per considerare l'effetto della redistribuzione delle pressioni in giacimento ed in acquifero dopo la chiusura dei pozzi. La produzione per il caso 3P terminerà, invece, nel dicembre del 2040 ma lo studio dell'evoluzione delle pressioni è stato protratto, a pozzi chiusi, fino al dicembre 2070. In totale sono stati, quindi, analizzati due scenari dinamici, cui corrispondono due scenari del modello geomeccanico. I due scenari coincidono per

quanto concerne la fase di history match (che termina al 31 maggio 2011) sia nel modello geomeccanico che in quello dinamico.

Al termine della fase di history match (31 maggio 2011) la produzione cumulativa di gas è pari a  $4.3 \times 10^9 \text{ Sm}^3$ . Lo scenario DN prevede una produzione cumulativa di gas alla chiusura dei campi (31 dicembre 2030) pari a  $7.1 \times 10^9 \text{ Sm}^3$ . Lo scenario 3P, invece, prevede una produzione cumulativa di gas alla chiusura dei campi (31 dicembre 2040) pari a  $9.0 \times 10^9 \text{ Sm}^3$ .

La previsione di subsidenza è stata ottenuta da una serie simulazioni ad Elementi Finiti eseguite con il codice di calcolo Abaqus<sup>TM</sup> [2]. Le informazioni relative alla geometria dei giacimenti, le proprietà petrofisiche e l'evoluzione delle pressioni sono state ottenute dal modello fluido-dinamico [3], realizzato con il software Eclipse<sup>TM</sup> [4], nel quale sono compresi i livelli produttivi di Bonaccia, Bonaccia Est e Bonaccia Nord-Ovest. In Figura 2 è riportata la mappa strutturale del livello PLQ1-A1 in cui sono visibili le diverse culminazioni.



**Figura 2 – Mappa strutturale del livello PLQ1-A1 in cui sono visibili le culminazioni dei campi di Bonaccia, Bonaccia Est e Bonaccia Nord-Ovest.**

## 2 Modello Geomeccanico agli Elementi Finiti

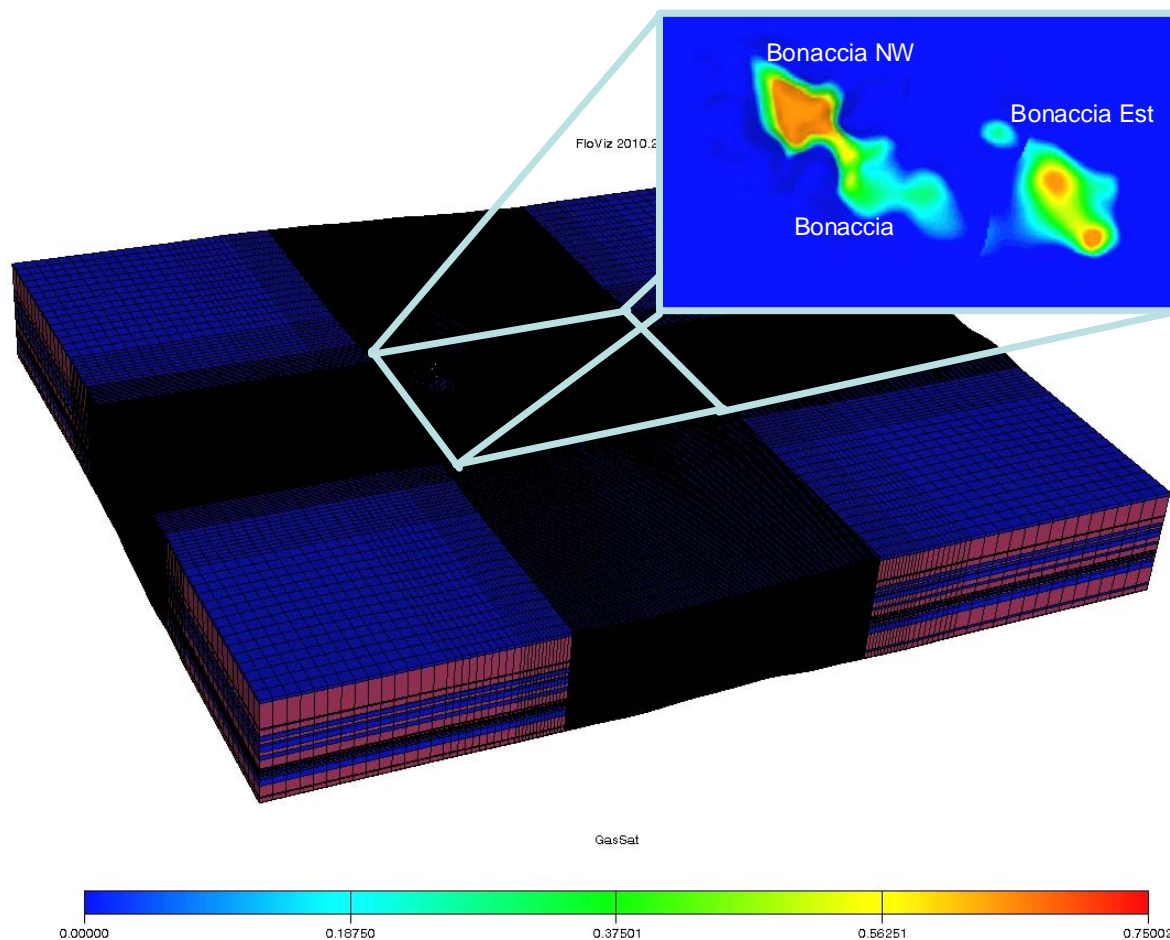
### 2.1 Approccio metodologico

Lo studio geomeccanico di subsidenza è stato condotto utilizzando il codice agli Elementi Finiti (FE) Abaqus<sup>TM</sup>. La costruzione del modello è stata basata sulle seguenti informazioni:

- mappe geologiche dei livelli interessati dal campo, estese in misura tale da descrivere interamente non solo la zona mineralizzata 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<sup>TM</sup>. Lo studio dinamico di giacimento è stato comunque protratto per oltre 30 anni, 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 comprimibilità uniassiale ( $c_m$ ) con lo stress efficace, ma modella accuratamente anche gli eventuali fenomeni di espansione dei sedimenti soggetti a ripressurizzazione;
- calcolo della compattazione dei "livelli mineralizzati + acquiferi connessi" fatto sulla base dello spessore gross degli stessi;
- legge di comprimibilità calibrata in modo da riprodurre mediante il modello FE la subsidenza misurata dal CGPS posto sulla piattaforma di Bonaccia.

### 2.2 Geometria del modello

Il modello fluido-dinamico di Bonaccia, Bonaccia Est e Bonaccia Nord-Ovest è composto da 365x248x29 celle nelle direzioni I, J e K rispettivamente, per un totale di oltre 2 milioni di celle delle quali circa 1.4 milioni sono attive (Figura 3).



**Figura 3 – Campi di Bonaccia, Bonaccia Est e Bonaccia Nord-Ovest: discretizzazione in Eclipse (in rosso le celle inattive). Nel riquadro sono evidenziate le zone mineralizzate del livello PLQ1-C1.**

Considerato che il modello FE deve essere ulteriormente esteso, è stato necessario effettuare un processo di *upscaling* per limitare il numero dei gradi di libertà. Per mantenere la consistenza del modello geomeccanico con il modello dinamico, in modo da assegnare correttamente le proprietà dei materiali e l'evoluzione della pressione, non sono stati accorpati tra loro sub-layer del modello fluido-dinamico. Il processo di *upscaling* è stato attuato esclusivamente in direzione orizzontale, unendo tra loro un differente numero di celle a seconda della distanza dal centro del giacimento e delle dimensioni delle celle stesse.

Il modello fluido-dinamico di Bonaccia, Bonaccia Est e Bonaccia Nord-Ovest interessa un'area di circa 42x36 km<sup>2</sup>. La griglia FE, per non risentire dell'influenza delle condizioni al contorno imposte ai bordi, è stata estesa (side-burden) fino a ricoprire, complessivamente, un'area di circa 84x77 km<sup>2</sup>. Il modello complessivo risulta suddiviso in 39 layer verticali dal fondo mare fino ad una profondità di 5000 m, per un totale di 217152 elementi, 228800 nodi e 823200 gradi di libertà.

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

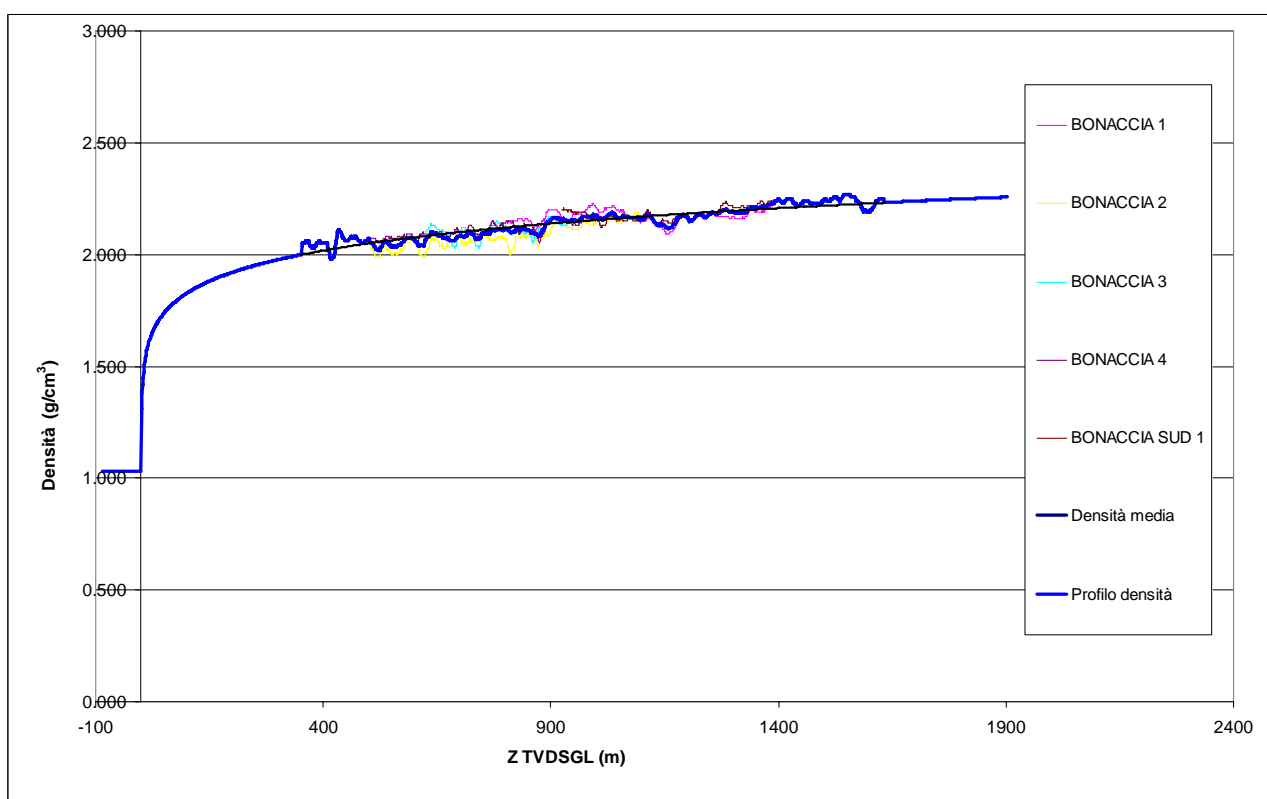
## 2.3 Proprietà dei materiali

### 2.3.1 Densità della roccia

Partendo dai density e sonic log registrati nei pozzi Bonaccia 1, Bonaccia 2, Bonaccia 3, Bonaccia 4 e Bonaccia Sud 1 è stato calcolato un profilo continuo di densità  $\rho$  (Figura 4) interpolato attraverso la seguente relazione:

$$\rho(\text{g/cm}^3) = 1.3126 \cdot Z^{0.0718} \quad (2-1)$$

dove le profondità ( $Z$ ) sono misurate in metri TVDSGL (*True Vertical Depth Sub Ground Level*) con riferimento al fondo marino (assunto pari a 86 m). Al di sopra della profondità di fondo mare la densità è stata assunta pari a  $1030.0 \text{ kg/m}^3$ .



**Figura 4 – Profili dei density log dei pozzi di Bonaccia 1, Bonaccia 2, Bonaccia 3, Bonaccia 4 e Bonaccia Sud 1, densità media da log e profilo di densità interpolato.**

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.

La densità della roccia è stata fornita al modello FE in forma tabulare come funzione della profondità in accordo con la relazione sopra riportata.



### 2.3.2 Peso specifico dei fluidi saturanti

Viene fornito al modello FE il valore del peso specifico dei fluidi saturanti. Per ogni regione idromeccanica tale valore (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 fluido-dinamico.

### 2.3.3 Comprimibilità dei materiali

Il parametro geomeccanico chiave nelle simulazioni di subsidenza è la comprimibilità uniassiale  $c_m$  del materiale. E' oggi comunemente accettato [5] che i valori più attendibili di questo parametro, generalmente funzione non lineare dello stress efficace, siano quelli ottenuti dalle misure *in situ* tramite markers. In assenza di dati specifici da marker sul campo in oggetto, il presente studio è partito da una correlazione regionale basata sul più ampio dataset possibile e relativa alle formazioni del Nord Adriatico. La relazione tra  $c_m$  e tensione verticale efficace  $\sigma'_v$  impiegata inizialmente è stata quella proposta da Hueckel *et al.* [6] con la correzione di Ferronato *et al.* [7]:

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

dove  $z$  è la profondità misurata in metri TVDSS (*True Vertical Depth Sub-Sea Level*) e la tensione verticale efficace  $\sigma'_v$  è stata calcolata tramite:

$$\sigma'_v = \sigma_v - p \quad (2-3)$$

in cui  $\sigma_v$  è la tensione verticale totale e  $p$  la pressione dei pori. Quest'ultima è stata estratta dallo studio dinamico alla profondità di riferimento, mentre la tensione verticale totale  $\sigma_v$  è stata calcolata a partire dalla densità del materiale espressa attraverso le relazioni mostrate nel §2.3.1.

La legge (2-2) che descrive le comprimibilità dei materiali nella regione del giacimento è stata successivamente calibrata affinché i risultati del modello geomeccanico riproducessero le misure di spostamento registrate dalla stazione CGPS. Ciò ha portato a definire la seguente legge di comprimibilità, utilizzata quindi per costruire la soluzione di riferimento:

$$c_m = \begin{cases} 4 \cdot 2 \cdot 0.01367 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} & z < 1500m \\ 0.01367 \cdot (\sigma'_v)^{-1.16434} & z \geq 1500m \end{cases} \quad (2-4)$$

I campi di pressione del modello fluido-dinamico sono stati stimati utilizzando comprimibilità dei pori coerenti con il modello geomeccanico.

In Tabella 1 sono riportati i valori di profondità media ( $z_{media}$ ), tensione verticale totale ( $\sigma_v$ ), pressione dei pori ( $p$ ), tensione verticale efficace ( $\sigma'_v$ ), comprimibilità uniassiale ( $c_m$ ), coefficiente di Poisson ( $\nu$ ), 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) assegnati ai vari livelli per la simulazione geomeccanica. Per le regioni di over-burden, under-burden, side-burden e per gli interlayer di reservoir inattivi nel modello fluido-dinamico è stata assunta una legge costitutiva di tipo elastico-lineare. Per gli interlayer di reservoir inattivi nel modello fluido-

dinamico è stata utilizzata una comprimibilità pari a quella del layer attivo immediatamente superiore.

**Tabella 1 – Proprietà assegnate, regione per regione, fuori e dentro il giacimento.**

Layer	$z_{media}$ (m)	$\sigma_v$ (bar)	$p$ (bar)	$\sigma'_v$ (bar)	$c_m$ (bar <sup>-1</sup> )	$\nu$	$E$ (bar)	$\lambda$	$k$
Overburden 1	159.6	20.7	16.2	4.6	1.84E-02	0.3	40.3	-	-
Overburden 2	306.8	47.8	31.0	16.8	4.09E-03	0.3	181.6	-	-
Overburden 3	454.0	76.3	45.9	30.4	2.05E-03	0.3	362.7	-	-
Overburden 4	601.2	105.6	60.7	44.9	1.30E-03	0.3	570.7	-	-
Overburden 5	748.4	135.6	75.6	59.9	9.29E-04	0.3	799.9	-	-
Reservoir 1	822.0	150.7	84.1	66.6	8.21E-04	0.3	904.8	8.42E-02	2.81E-02
Interlayer 2	822.0	150.7	84.1	66.6	8.21E-04	0.3	904.8	-	-
Reservoir 3	894.8	165.8	91.8	74.1	7.26E-04	0.3	1023.2	8.03E-02	2.68E-02
Interlayer 4	894.8	165.8	91.8	74.1	7.26E-04	0.3	1023.2	-	-
Reservoir 5	913.9	169.8	93.5	76.3	7.01E-04	0.3	1059.5	7.64E-02	2.55E-02
Interlayer 6	913.9	169.8	93.5	76.3	7.01E-04	0.3	1059.5	-	-
Reservoir 7	936.8	174.6	95.4	79.2	6.71E-04	0.3	1106.3	7.71E-02	2.57E-02
Interlayer 8	936.8	174.6	95.4	79.2	6.71E-04	0.3	1106.3	-	-
Reservoir 9	945.9	176.5	96.9	79.6	6.68E-04	0.3	1112.4	7.59E-02	2.53E-02
Interlayer 10	945.9	176.5	96.9	79.6	6.68E-04	0.3	1112.4	-	-
Reservoir 11	957.7	179.0	97.8	81.2	6.52E-04	0.3	1139.5	7.36E-02	2.45E-02
Interlayer 12	957.7	179.0	97.8	81.2	6.52E-04	0.3	1139.5	-	-
Reservoir 13	992.7	186.3	103.6	82.7	6.39E-04	0.3	1163.2	7.04E-02	2.35E-02
Interlayer 14	992.7	186.3	103.6	82.7	6.39E-04	0.3	1163.2	-	-
Reservoir 15	1012.7	190.5	108.4	82.1	6.44E-04	0.3	1153.3	6.96E-02	2.32E-02
Interlayer 16	1012.7	190.5	108.4	82.1	6.44E-04	0.3	1153.3	-	-
Reservoir 17	1023.7	192.8	108.4	84.4	6.23E-04	0.3	1191.4	7.21E-02	2.40E-02
Interlayer 18	1023.7	192.8	108.4	84.4	6.23E-04	0.3	1191.4	-	-
Reservoir 19	1028.1	193.8	108.9	84.9	6.19E-04	0.3	1199.4	7.41E-02	2.47E-02
Interlayer 20	1028.1	193.8	108.9	84.9	6.19E-04	0.3	1199.4	-	-
Reservoir 21	1030.5	194.3	109.1	85.2	6.17E-04	0.3	1203.8	7.30E-02	2.43E-02
Interlayer 22	1030.5	194.3	109.1	85.2	6.17E-04	0.3	1203.8	-	-
Reservoir 23	1045.4	197.4	109.2	88.3	5.92E-04	0.3	1255.0	6.87E-02	2.29E-02
Interlayer 24	1045.4	197.4	109.2	88.3	5.92E-04	0.3	1255.0	-	-
Reservoir 25	1060.2	200.5	112.5	88.0	5.94E-04	0.3	1250.5	6.79E-02	2.26E-02
Interlayer 26	1060.2	200.5	112.5	88.0	5.94E-04	0.3	1250.5	-	-
Reservoir 27	1105.7	210.1	120.6	89.5	5.82E-04	0.3	1276.0	6.68E-02	2.23E-02
Interlayer 28	1105.7	210.1	120.6	89.5	5.82E-04	0.3	1276.0	-	-
Reservoir 29	1117.2	212.6	122.7	89.9	5.79E-04	0.3	1282.6	7.04E-02	2.35E-02
Underburden 1	1505.5	295.9	152.12	143.7	4.20E-05	0.3	17673.5	-	-
Underburden 2	2282.0	467.1	230.58	236.5	2.35E-05	0.3	31560.9	-	-
Underburden 3	3058.6	642.9	309.05	333.8	1.58E-05	0.3	47135.6	-	-
Underburden 4	3835.2	822.0	387.52	434.5	1.16E-05	0.3	64062.2	-	-
Underburden 5	4611.7	1003.8	465.98	537.8	9.04E-06	0.3	82131.7	-	-

## 2.4 Inizializzazione

### 2.4.1 Stato tensionale iniziale

Per i campi di Bonaccia, Bonaccia Est e Bonaccia Nord-Ovest lo sforzo totale verticale è stato calcolato dal gradiente di overburden definito a partire dai density log eseguiti sui pozzi Bonaccia 1, Bonaccia 2, Bonaccia 3, Bonaccia 4 e Bonaccia Sud 1 (come descritto nel paragrafo §2.3.1).

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

$$\sigma'_h = K_0 \cdot \sigma'_v \quad (2-5)$$

dove  $K_0$  rappresenta il coefficiente di spinta a riposo che è stato posto pari a 0.54 [8]

### 2.4.2 Storia di pressione

La distribuzione tridimensionale di pressione e la sua evoluzione temporale, così come calcolata dal modello fluido-dinamico, è stata importata nel modello ad elementi finiti. Le pressioni sono state importate con passo temporale annuale fino alla chiusura dei pozzi e quinquennale successivamente, per un totale di 41 step temporali per il caso DN e 51 step temporali per il caso 3P (in cui viene messo in produzione il campo di Bonaccia Nord-Ovest).

### 3 Principali risultati

I risultati delle simulazioni eseguite per i campi di Bonaccia, Bonaccia Est e Bonaccia Nord-Ovest sono riportati in Tabella 2 e Tabella 3 per diversi step temporali, durante e al termine della vita produttiva del campo.

In particolare, per il caso DN, le previsioni di subsidenza sono riportate alle seguenti date:

- 31/05/2011: termine della fase di history match per il modello dinamico e geomeccanico;
- 31/12/2030: fine della produzione per il caso DN;
- 31/12/2040: fine della produzione per il caso 3P;
- 31/12/2060: fine della simulazione per il caso DN.

Per il caso 3P (in cui viene messo in produzione il campo di Bonaccia Nord-Ovest) sono invece riportate le previsioni di subsidenza alle seguenti date:

- 31/05/2011: termine della fase di history match per il modello dinamico e geomeccanico;
- 31/12/2030: fine della produzione per il caso DN;
- 31/12/2040: fine della produzione per il caso 3P;
- 31/12/2060: fine della simulazione per il caso DN;
- 31/12/2070: fine della simulazione per il caso 3P.

**Tabella 2 – Risultati finali: massima subsidenza ed estensione del fenomeno per il caso DN.**

Date	Massima Subsidenza (cm)	Massima Estensione A (km)	Massima Estensione B (km)
31/05/2011	108	10	3
31/12/2030	127	11	4
31/12/2040	127	12	4
31/12/2060	126	12	4

**Tabella 3 – Risultati finali: massima subsidenza ed estensione del fenomeno per il caso 3P.**

Date	Massima Subsidenza (cm)	Massima Estensione A (km)	Massima Estensione B (km)
31/05/2011	108	10	3
31/12/2030	217	12	5
31/12/2040	245	12	6
31/12/2060	237	12	7
31/12/2070	235	12	7

L'analisi dei risultati consente di osservare che:

- il valore massimo di subsidenza, previsto per il caso DN alla fine della produzione, risulta pari a 127 cm. Tale valore risulta pari a 126 cm al termine della simulazione;

- il valore massimo di subsidenza, previsto per il caso 3P alla fine della produzione, risulta pari a 245 cm. Tale valore risulta pari a 235 cm a fine simulazione;
- il valore di massima subsidenza risulta localizzato nel punto di coordinate 2466315 m E, 4827886 m N<sup>1</sup> per entrambi gli scenari. Tale punto si colloca in corrispondenza della culminazione di Bonaccia Nord-Ovest. In Figura 5 è riportata l'evoluzione nel tempo della subsidenza relativa a tale punto;

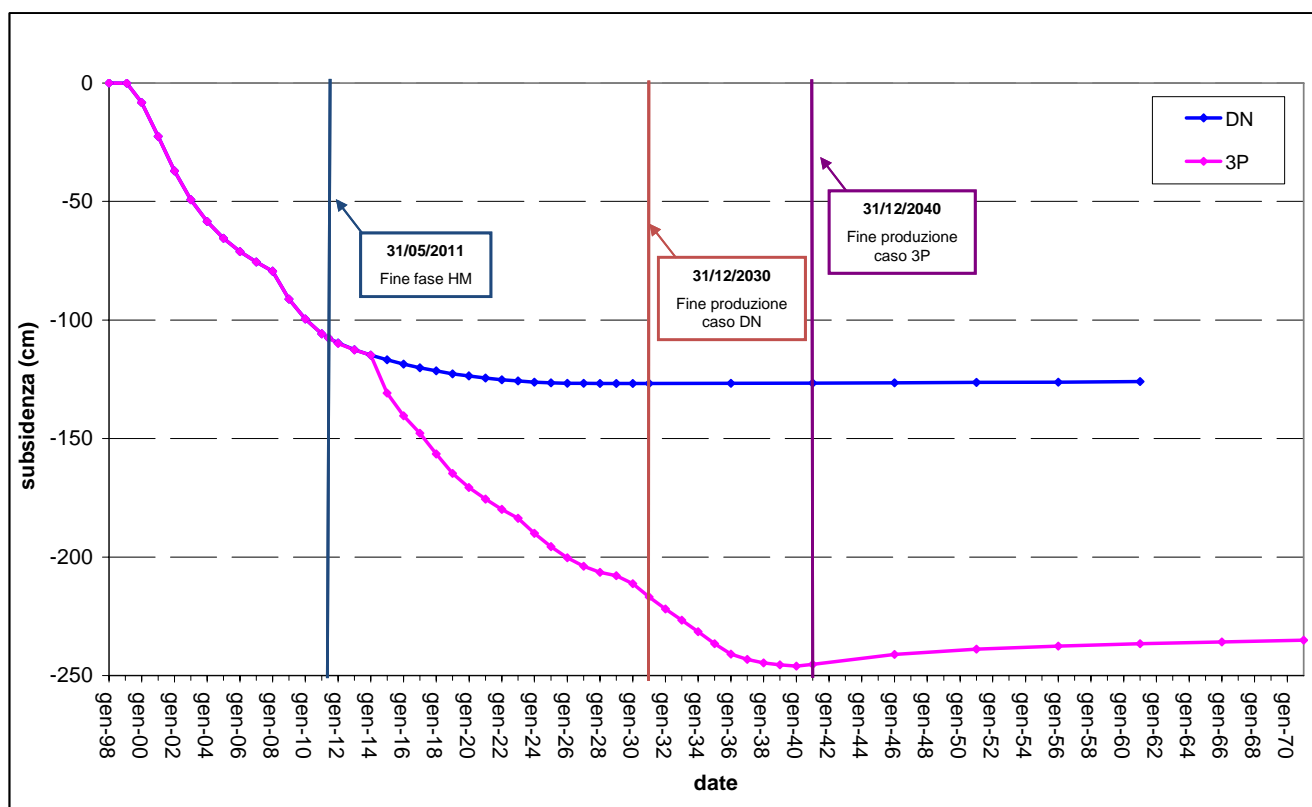


Figura 5 – Evoluzione nel tempo del valore di massima subsidenza.

- per il caso DN, al termine della produzione, la massima estensione del fenomeno, calcolata come distanza dalla linea di iso-subsidenza dei 2 cm dal punto di massima subsidenza, è pari a circa 11 km in direzione Nord Ovest – Sud Est (segmento A, Figura 6) e a circa 4 km in direzione della costa (segmento B, Figura 6);
- per il caso 3P, al termine della produzione, la massima estensione del fenomeno, calcolata come distanza dalla linea di iso-subsidenza dei 2 cm dal punto di massima subsidenza, è pari a circa 12 km in direzione Nord Ovest – Sud Est (segmento A, Figura 7) e a circa 6 km in direzione della costa (segmento B, Figura 7);

<sup>1</sup> Proiezione Gauss Boaga, fuso Est, Ellissoide Internazionale.

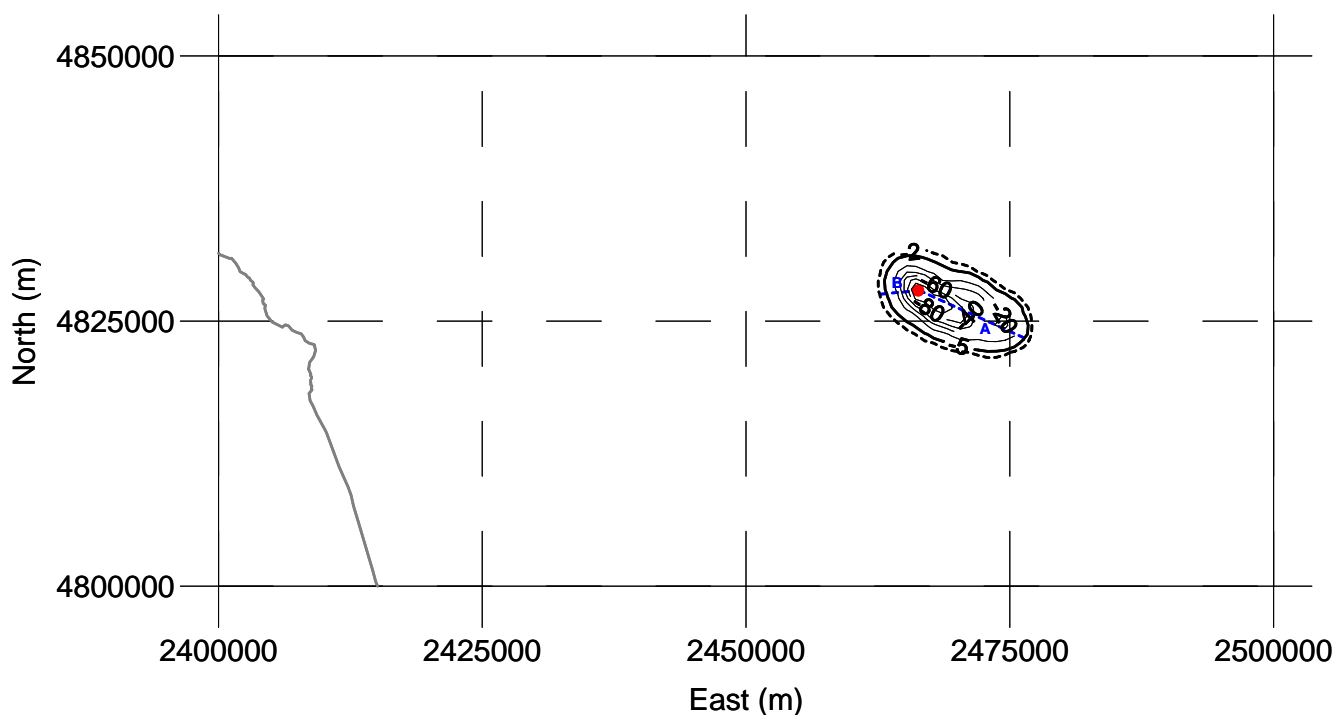


Figura 6 – Caso DN: curve di iso-subsidenza a fine produzione (31/12/2030). I valori di subsidenza sono in cm. In rosso il punto di massima subsidenza.

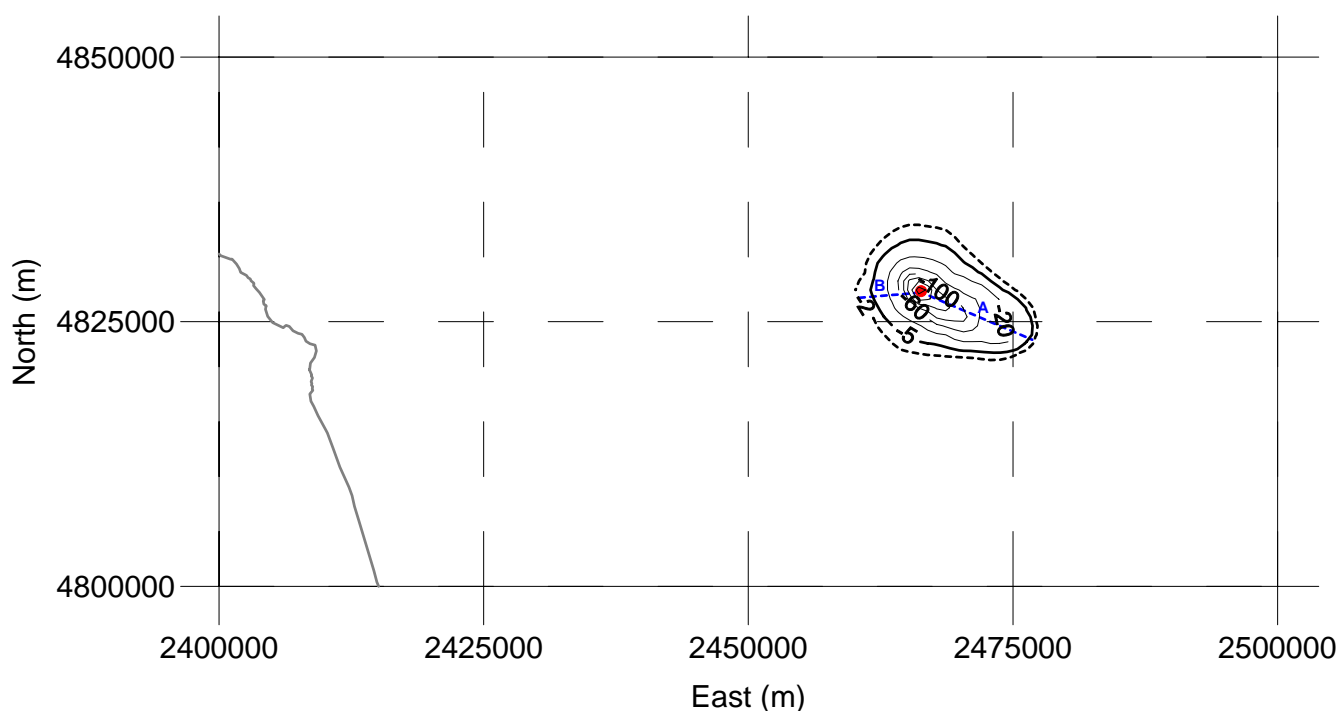


Figura 7 – Caso 3P: curve di iso-subsidenza a fine produzione (31/12/2040). I valori di subsidenza sono in cm. In rosso il punto di massima subsidenza.

- per il caso DN, al termine della simulazione, la massima estensione del fenomeno è pari a circa 12 km in direzione Nord Ovest – Sud Est (segmento A, Figura 8) e a circa 4 km in direzione della costa (segmento B, Figura 8);

- per il caso 3P, al termine della simulazione, la massima estensione del fenomeno è pari a circa 12 km in direzione Nord Ovest – Sud Est (segmento A, Figura 9) e a circa 7 km in direzione della costa (segmento B, Figura 9);

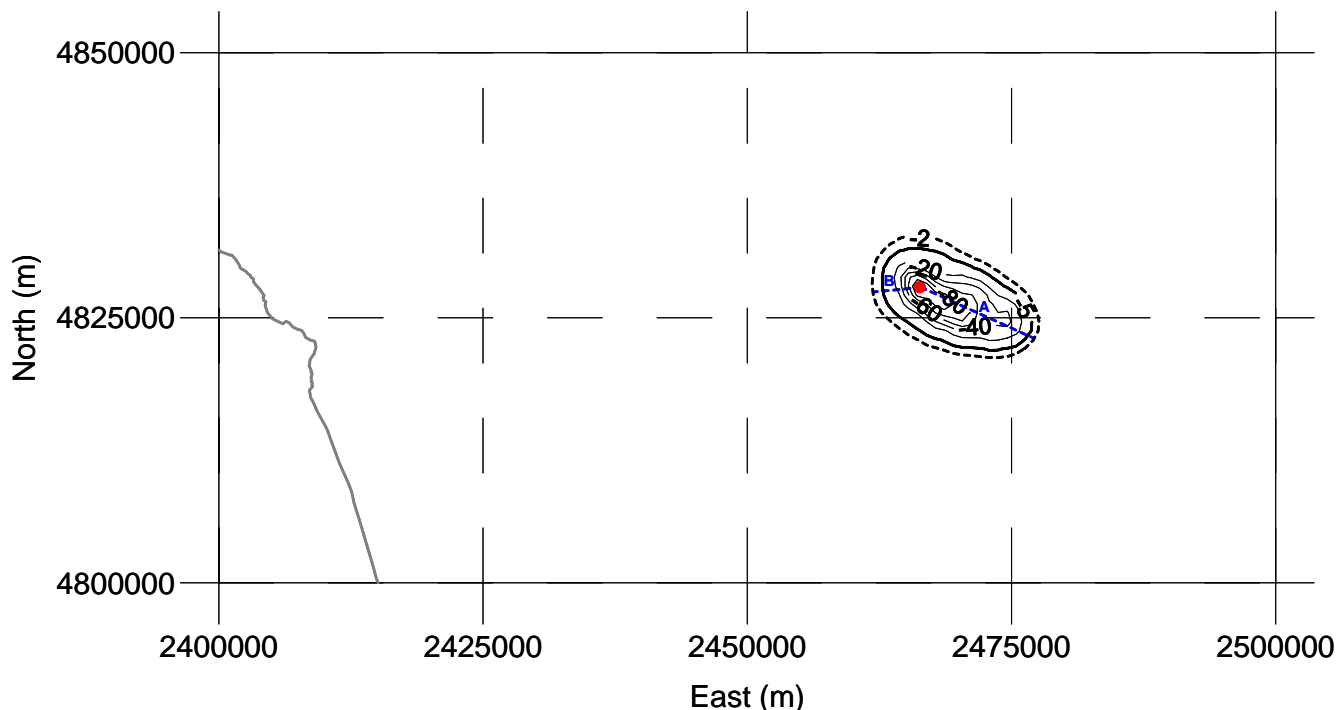


Figura 8 – Caso DN: curve di iso-subsidenza a fine simulazione (31/12/2060). I valori di subsidenza sono in cm. In rosso il punto di massima subsidenza.

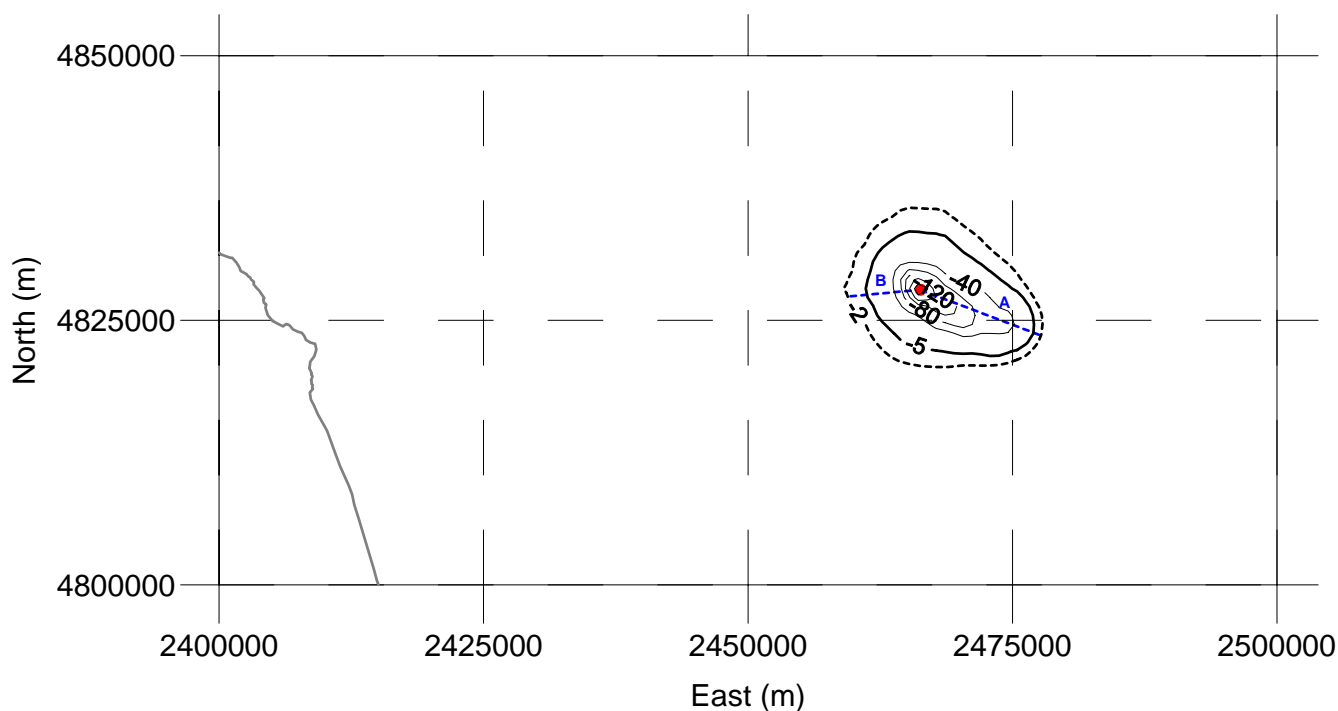


Figura 9 – Caso 3P: curve di iso-subsidenza a fine simulazione (31/12/2070). I valori di subsidenza sono in cm. In rosso il punto di massima subsidenza.

- per il caso DN il fenomeno si esaurisce a circa 53 km dalla linea di costa (Figura 10).
- per il caso 3P il fenomeno si esaurisce a circa 51 km dalla linea di costa (Figura 11).

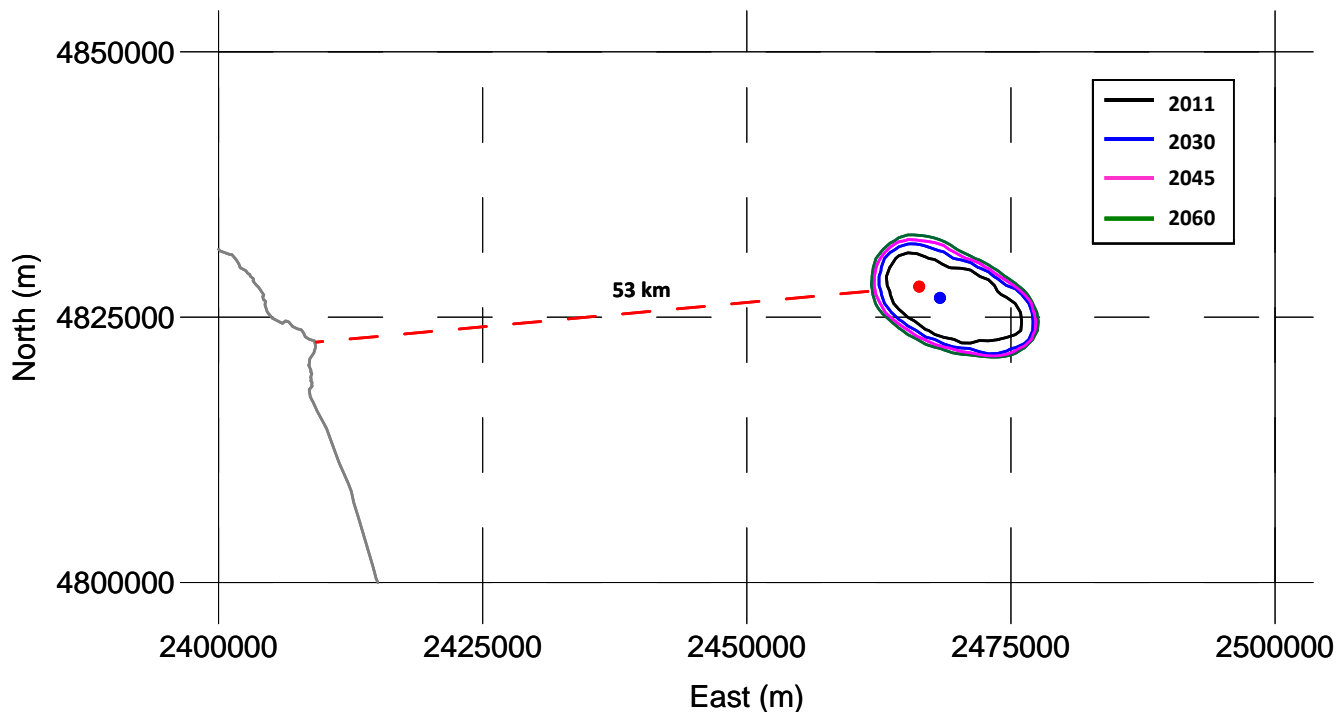


Figura 10 – Caso DN: evoluzione temporale della linea di iso-subsidenza dei 2 cm. In rosso è riportata la posizione del punto di massima subsidenza, in blu la posizione della piattaforma di Bonaccia.

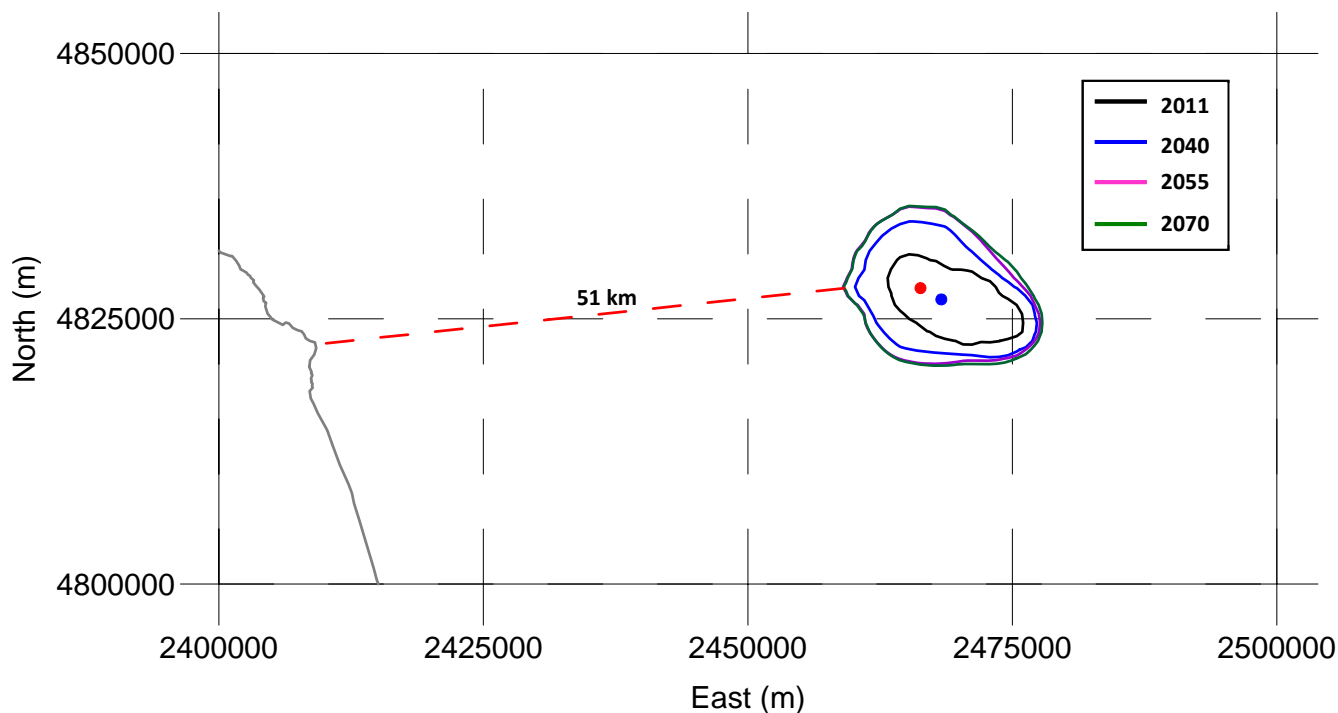


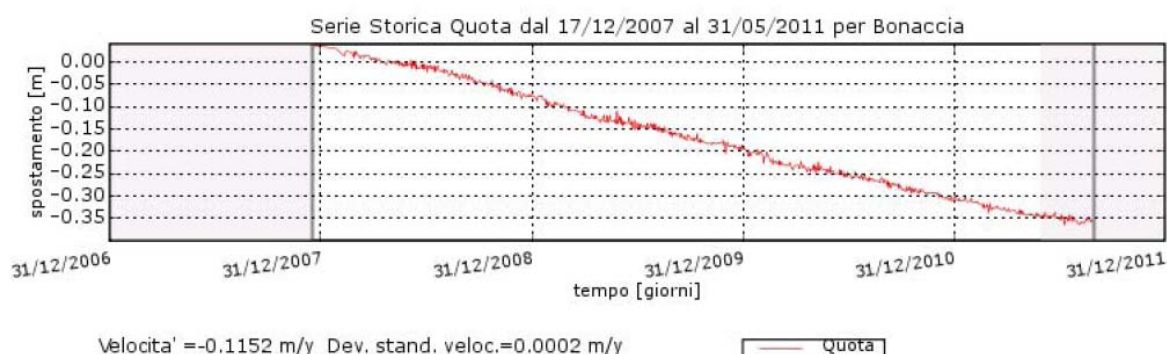
Figura 11 – Caso 3P: evoluzione temporale della linea di iso-subsidenza dei 2 cm. In rosso è riportata la posizione del punto di massima subsidenza, in blu la posizione della piattaforma di Bonaccia.



## 4 Confronto con dati da stazione CGPS

I valori di subsidenza estratti dal modello numerico sono stati confrontati con quelli misurati dalla stazione CGPS installata sulla piattaforma di Bonaccia, in corrispondenza delle coordinate 2468285.8 m E 4826821.7 m N<sup>1</sup>. Il periodo di osservazione va da gennaio 2008 a maggio 2011.

A partire da tali misurazioni, mediante una regressione, è stato possibile calcolare un valore medio di velocità di subsidenza pari a circa 11.52 cm/anno (Figura 12).



**Figura 12 – Misurazioni effettuate dalla stazione CGPS sulla piattaforma di Bonaccia.**

Da modello geomeccanico la velocità media di subsidenza, per la postazione CGPS in corrispondenza del nodo del modello più vicino a tale punto (coordinate 2468279.75 m E, 4826902.00 m N<sup>1</sup>, a circa 80 m dalla stazione CGPS sulla piattaforma Bonaccia), per l'intero periodo è pari a 9.24 cm/anno.

Il confronto tra i risultati del modello geomeccanico in corrispondenza della stazione CGPS e le misurazioni disponibili è riportato in Figura 13.

<sup>1</sup> Proiezione Gauss Boaga, fuso Est, Ellissoide Internazionale.

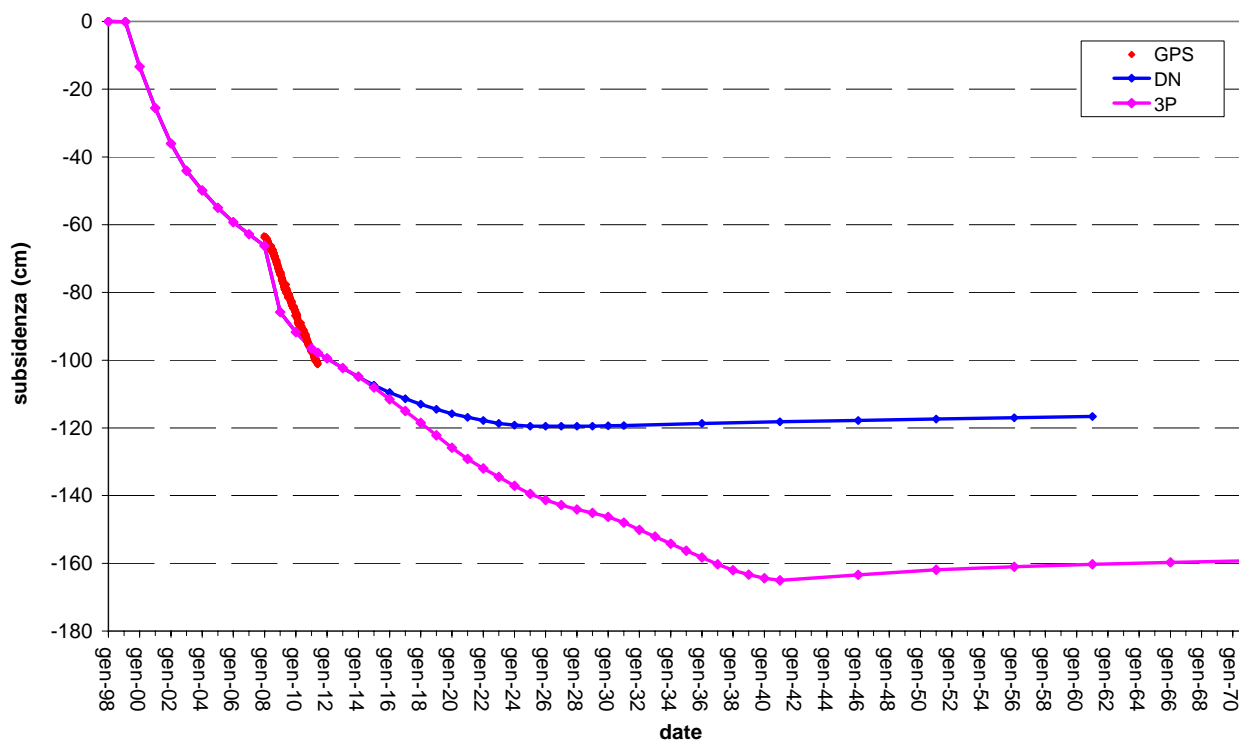


Figura 13 – Spostamento verticale misurato e calcolato per i due scenari analizzati in corrispondenza della stazione CGPS sulla piattaforma Bonaccia.

## 5 Bibliografia

1. *Campi di Bonaccia, Bonaccia Est e Bonaccia Nord-Ovest – Modello Elasto-plastico di Subsidenza - Relazione TERA 12/2011*, 2011.
2. Abaqus<sup>TM</sup>, Simulia, versione 6.11-1.
3. *Campo di Bonaccia – Studio di giacimento – Relazione GISE 09/2011*, 2011.
4. Eclipse<sup>TM</sup>, Schlumberger, versione 2010.2.
5. D. Baù, M. Ferronato, G. Gambolati and P. Teatini: *Basin-scale compressibility of the northern Adriatic by the radioactive marker technique*. Géotechnique 52, No. 8, 605–616, 2002.
6. T. Hueckel, G. Cassiani, J.H. Prévost and D.A. Walters: *Field Derived Compressibility of Deep Sediments of the Northern Adriatic. Land Subsidence, Special Volume, Proc. 7th Int. Symp. on Land Subsidence, Shanghai, 2005*.
7. 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.
8. F. J. Santarelli, M. Brignoli, A. Pellegrino: *La scelta del coefficiente di Poisson per formazioni a grande scala - 04/1996*.