

DIVISIONE EXPLORATION & PRODUCTION



Unità Geografica Italia

INPE – Ingegneria del Petrolio

Campo di GUENDALINA

*Studio di previsioni di subsidenza
Management Summary*

Agosto 2007



ENI Exploration&Production Division
UGIT - Unità Geografica Italia

INPE – Ingegneria del Petrolio

Relazione 088-07

INPE

AGGIORNAMENTI:

0

CAMPO DI GUENDALINA

Studio di previsioni di subsidenza

Management Summary

LISTA DI DISTRIBUZIONE

UNITA'	DESTINAZIONE	N° COPIE
UGIT	Ravenna	1
SAOP	Ravenna	4
EAIM	S.Donato	1

①			
②	Emissione	P.Baraggioli <i>P. Baraggioli</i>	M.C.Dacome <i>M.C. Dacome</i>
	Data : Agosto 2007		G. Fresia <i>G. Fresia</i>
	AGGIORNAMENTI	PREPARATO DA	CONTROLLATO DA
			IL RESPONSABILE



ENI Exploration&Production Division
UGIT/INPE

Campo di Guendalina

Studio di previsione di subsidenza – Management
Summary

Relazione 088-07

Pag. 2 di 22

AGGIORNAMENTI:

0

INDICE

1	INTRODUZIONE	3
2	MODELLO GEOMECCANICO A ELEMENTI FINITI (FEM)	4
2.1	APPROCCIO METODOLOGICO	4
2.2	GEOMETRIA DEL MODELLO	5
2.3	PARAMETRI DI INPUT	11
2.3.1	VALORI DI PRESSIONE	11
2.3.2	VALORI DI COMPRIBIBILITÀ UNIASSIALE	11
2.3.3	GRADIENTE DI OVERBURDEN UTILIZZATO	14
3	PRINCIPALI RISULTATI	15
3.1	SCENARIO MEDIO	15
4	ANALISI DI SENSITIVITÀ	17
4.1	SCENARIO LOWER	17
4.2	SCENARIO UPPER	18
5	CONCLUSIONI	21
6	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	22



ENI Exploration&Production Division
UGIT/INPE

Campo di Guendalina

Studio di previsione di subsidenza – Management Summary

Relazione 088-07
Pag. 3 di 22

AGGIORNAMENTI:

0

1 INTRODUZIONE

L'obiettivo di questo studio è la previsione della possibile subsidenza connessa all'estrazione di gas naturale dal campo di Guendalina (Eni 80%), che è ubicato a circa 47 km al largo della costa ravennate (Fig. 1). Per tale previsione di subsidenza si è utilizzato un modello geomeccanico 3D elasto-plastico ad elementi finiti (FEM) proprietario di Isamgeo Engineering GmbH.

Lo studio si è basato sui risultati del modello statico e dinamico di giacimento (Eclipse 3D) esteso sull'intera area interessata dal giacimento ed acquifero circostante, come descritto nel rapporto "Campo di Guendalina: studio di giacimento. Management summary" (Rel. INPE – N°87-07 del giugno 2007).

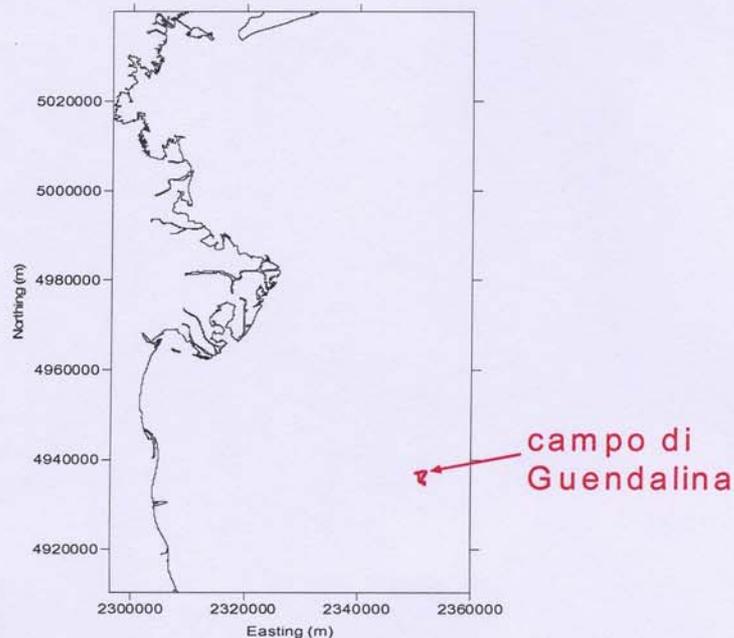


Fig. 1: Ubicazione del campo di Guendalina nell'offshore adriatico

 ENI Exploration&Production Division UGIT/INPE	Campo di Guendalina Studio di previsione di subsidenza – Management Summary	Relazione 088-07 Pag. 4 di 22			
		AGGIORNAMENTI:			
		0			

2 MODELLO GEOMECCANICO A ELEMENTI FINITI (FEM)

2.1 APPROCCIO METODOLOGICO

Lo studio di previsione di subsidenza è stato effettuato con un modello geomeccanico 3D elastico-plastico ad elementi finiti (FEM-Isamgeo), basato su:

- Mappe geologiche dei livelli interessati dal campo, estese in misura tale da descrivere interamente non solo il campo considerato ma anche gli acquiferi laterali ed il basamento carbonatico.
- 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. Tale distribuzione di pressione corrisponde allo Scenario Base di sviluppo (si veda la Rel. INPE – N°87-07 del giugno 2007) che prevede di produrre 631 MSm³ di gas in 6 anni. Le simulazioni con Eclipse sono poi state estese per circa 20 anni dopo la chiusura del campo per seguire nel tempo la propagazione del disturbo di pressione nell'acquifero.
- 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 la profondità e 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 comprimibilità uniassiale ottenuta da misure in situ effettuate nei pozzi equipaggiati con markers nell'offshore adriatico.

 ENI Exploration&Production Division UGIT/INPE	Campo di Guendalina Studio di previsione di subsidenza – Management Summary	Relazione 088-07 Pag. 5 di 22			
		AGGIORNAMENTI:			
		0			

2.2 GEOMETRIA DEL MODELLO

Il modello geomeccanico FEM è stato costruito a partire dalla stessa geometria dei 10 strati mineralizzati e degli strati argillosi di separazione usata in Eclipse, garantendo in tal modo la coerenza fra i due modelli.

I livelli del campo di Guendalina terminano per onlap sull'unconformity miocenica (messiniano) in direzione NE. Il giacimento si trova in una trappola creata dall'onlap stessa, con chiusura in direzione N-NE, ed è connesso con un acquifero come evidenziato in Fig. 2.

La chiusura contro il basamento miocenico impermeabile impedisce che la depressurizzazione dei livelli mineralizzati a causa dell'estrazione del gas si propaghi in direzione nord e nord-est. La depressurizzazione stessa si propaga, invece, verso sud e sud-ovest nell'acquifero, secondo quanto previsto e simulato nel modello 3D di flusso Eclipse.

La griglia di calcolo del modello geomeccanico (circa 30 X 30 Km² rappresentata in Fig. 3) è stata costruita sulla base della distribuzione della depressurizzazione e della saturazione iniziale di gas. In particolare si è realizzato una griglia tale da:

- 1) Rappresentare adeguatamente la distribuzione di pressione calcolata con il modello Eclipse all'interno dei "livelli mineralizzati + acquiferi connessi".
- 2) Definire con accuratezza le discontinuità idrauliche, soprattutto l'unconformity miocenica. In tale modo si è evitato che il disturbo di pressione calcolato con il modello Eclipse fosse erroneamente esteso a volumi di roccia esterni al campo di flusso del gas e dell'acqua.
- 3) Estendere la zona modellata dal punto di vista geomeccanico al di là del perimetro e al di sotto (sino a 5000 m) della zona modellata dal punto di vista fluido-dinamico, al fine di evitare "effetti di bordo" che alterino artificialmente il calcolo degli stress e delle deformazioni nella roccia.

La griglia 3D, generata a partire da quella 2D (Fig. 3), si compone di una fittissima discretizzazione ad elementi finiti del sottosuolo (Fig. 4) fino a 5000 m di profondità e consta di:

- 693,546 nodi ovvero 2,080,638 gradi di libertà totali di cui 2,025,352 effettivamente liberi (55,286 gradi di libertà sono fissati dalle condizioni al contorno);



- 193,610 elementi a 16 o 20 nodi distribuiti su un totale di 38 strati – tra produttivi, strati di separazione, *overburden ed underburden* - di 5,095 elementi ciascuno.

In Fig. 5 è presentata la parte della griglia 3D che rappresenta il substrato roccioso (basamento carbonatico) e in Fig. 6 è mostrata la rappresentazione nella griglia 3D dei livelli produttivi e degli acquiferi connessi.

La correttezza della discretizzazione adottata è stata verificata a posteriori analizzando le caratteristiche della previsione di subsidenza risultante. La griglia è risultata appropriata per tutte le simulazioni di subsidenza descritte in questo rapporto.

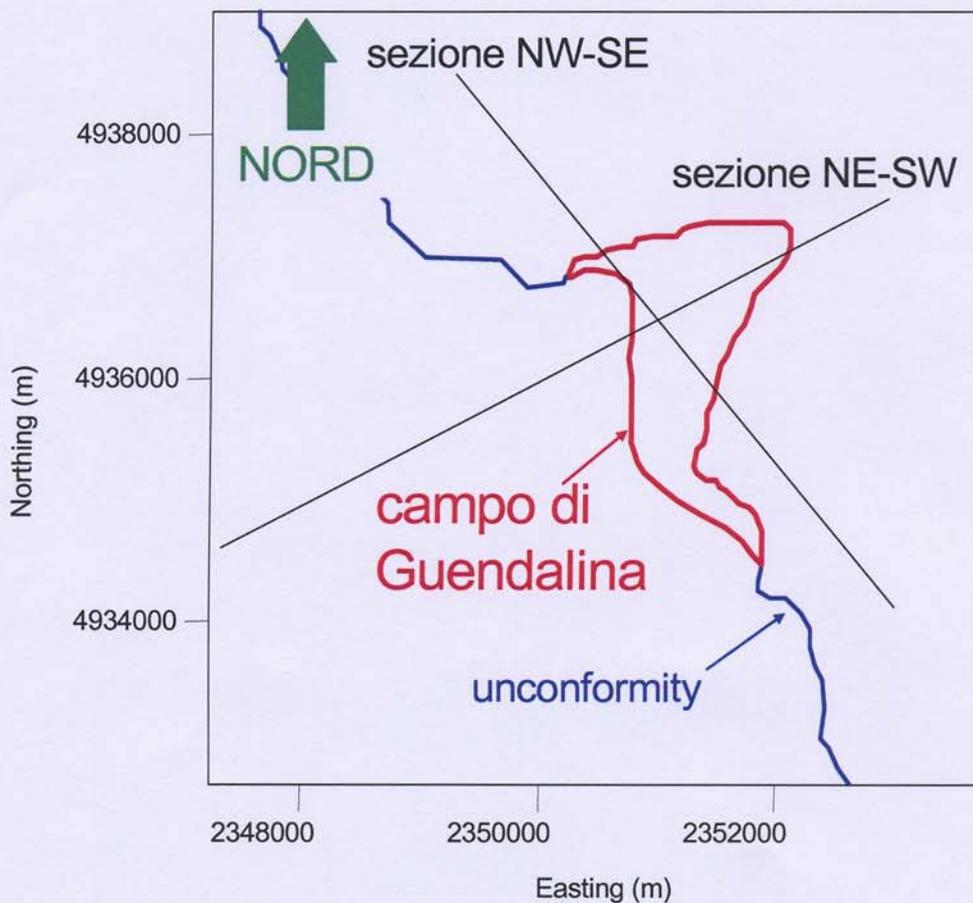


Fig. 2: Vista in pianta del livello PL3-J3 del campo di Guendalina, ove sono evidenziate: in rosso, la zona mineralizzata; in blu la traccia dell'unconformity di contatto con il basamento

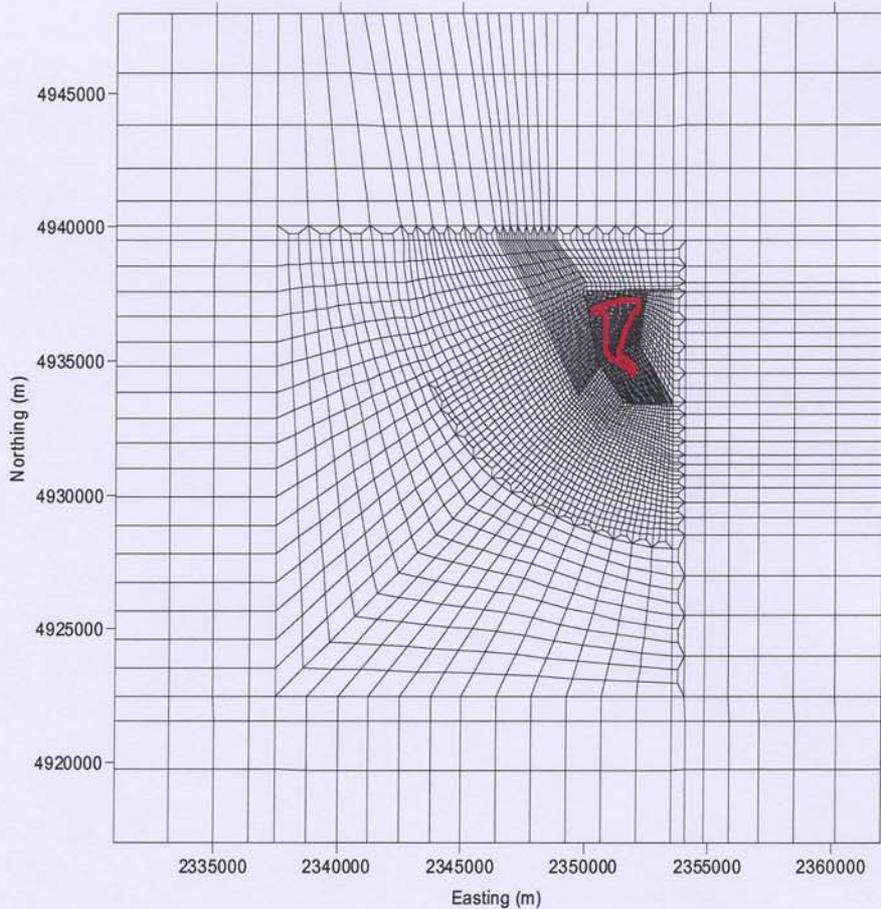


Fig. 3: Pianta della griglia di calcolo FEM utilizzata nel modello per il campo di Guendalina. Ogni elemento rappresentato ha in pianta otto nodi, di cui uno ad ogni vertice ed uno a metà di ogni faccia, per cui la discretizzazione effettiva è più fitta di quanto visibile in figura. Il contorno rosso indica la zona mineralizzata del livello PL3-J3.

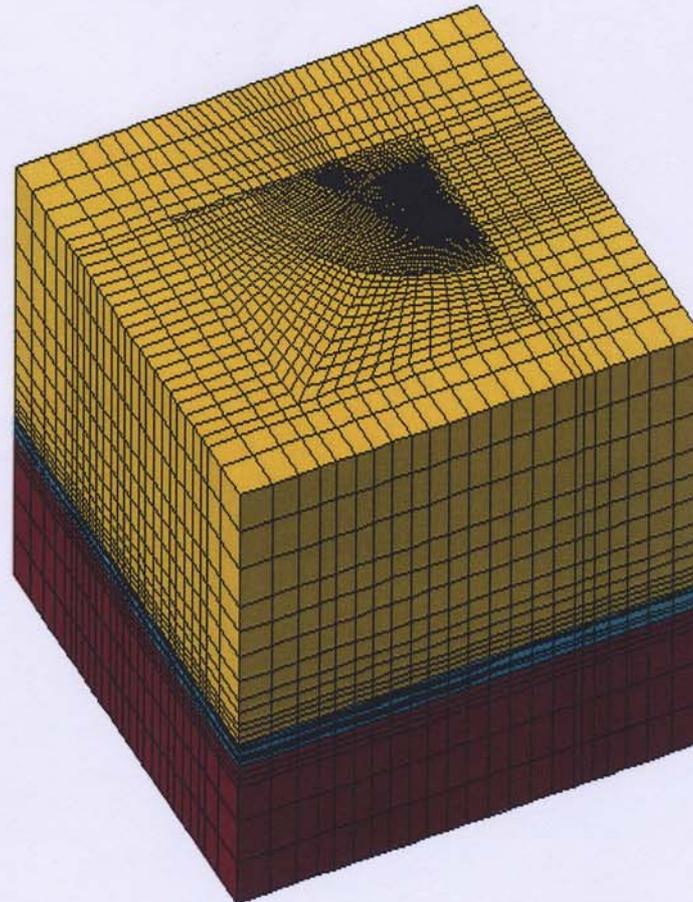


Fig. 4: Griglia di calcolo FEM utilizzata per il campo di Guendalina. La scala verticale del modello è pari a 5 volte quella orizzontale. Gli elementi dei livelli più sottili sono a 16 nodi, ovvero sono ad interpolazione lineare in direzione verticale e quadratica nelle direzioni orizzontali. Gli altri elementi sono a 20 nodi, ovvero quadratici in ogni direzione. Di conseguenza, la discretizzazione effettiva è più fitta di quanto visibile in figura.



ENI Exploration&Production Division
UGIT/INPE

Campo di Guendalina

Studio di previsione di subsidenza – Management
Summary

Relazione 088-07
Pag. 9 di 22

AGGIORNAMENTI:

0

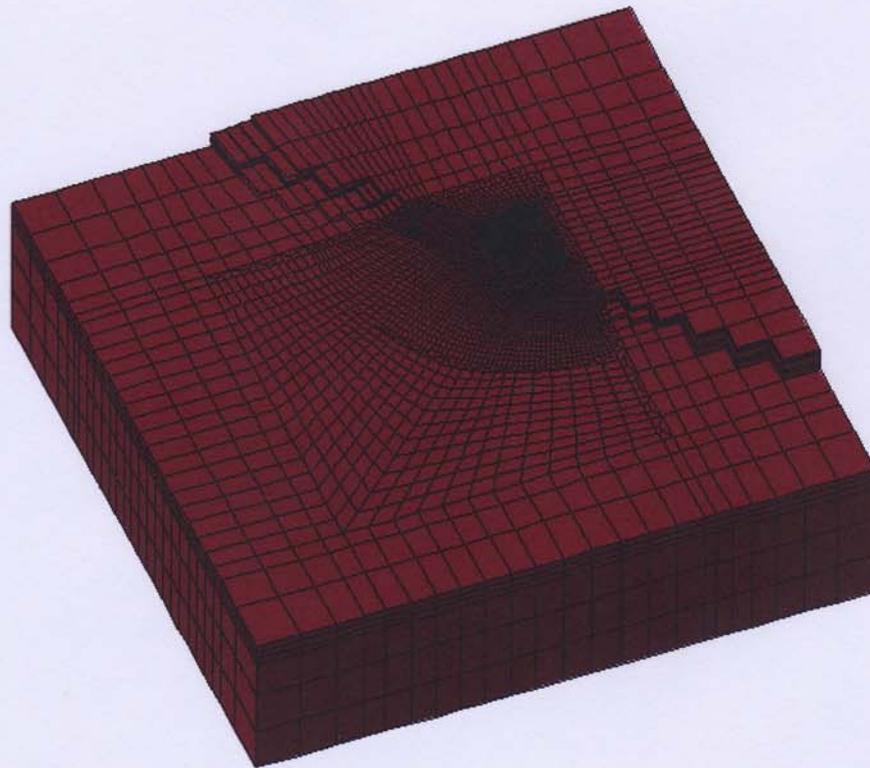


Fig. 5: Parte della griglia di calcolo FEM utilizzata nel modello per il campo di Guendalina, che rappresenta il substrato roccioso calcareo-marnoso. La scala verticale della rappresentazione è pari a 5 volte quella orizzontale.



ENI Exploration&Production Division
UGIT/INPE

Campo di Guendalina

Studio di previsione di subsidenza – Management
Summary

Relazione 088-07

Pag. 10 di 22

AGGIORNAMENTI:

0

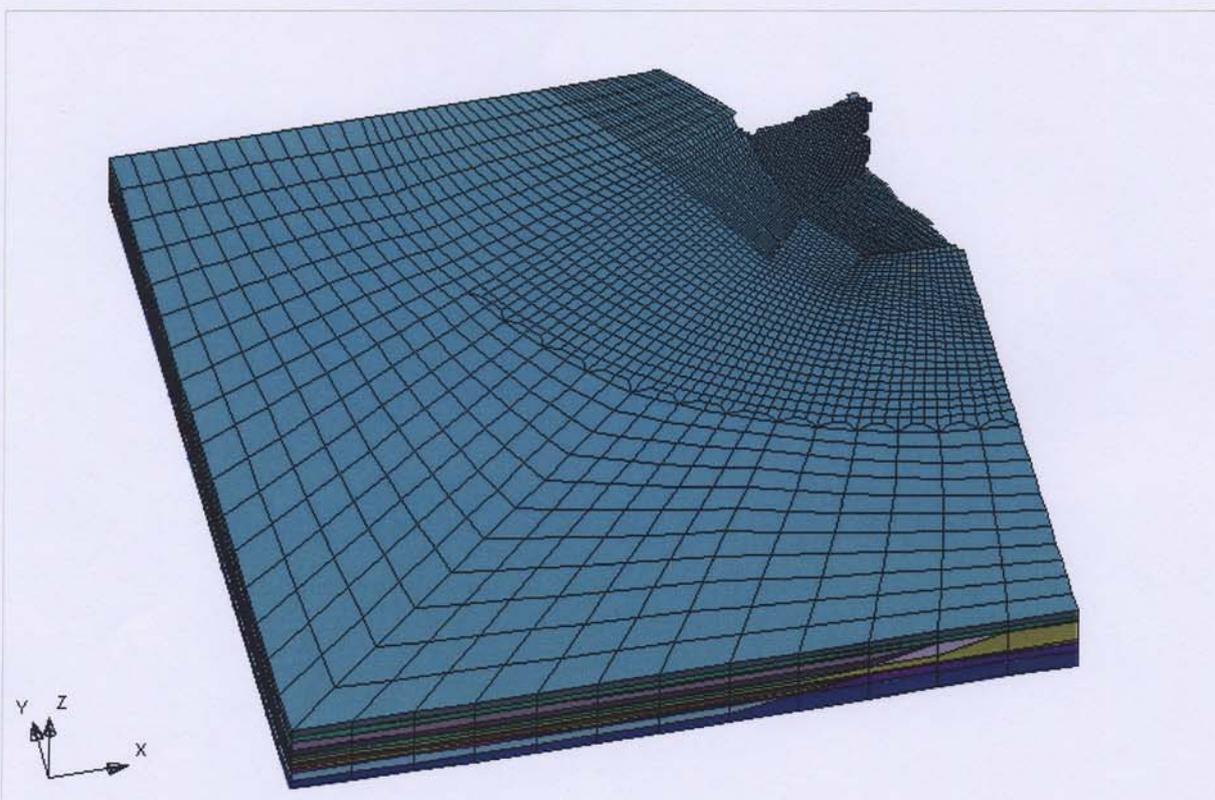


Fig. 6: Parte della griglia di calcolo FEM utilizzata nel modello per il campo di Guendalina, che rappresenta i livelli produttivi e gli acquiferi. La scala verticale della rappresentazione è pari a 5 volte quella orizzontale.

 ENI Exploration&Production Division UGIT/INPE	Campo di Guendalina Studio di previsione di subsidenza – Management Summary	Relazione 088-07 Pag. 11 di 22			
		AGGIORNAMENTI:			
		0			

2.3 PARAMETRI DI INPUT

2.3.1 VALORI DI PRESSIONE

La distribuzione tridimensionale di pressione e la sua evoluzione temporale, così come calcolata dal modello di flusso Eclipse, è stata importata nel modello ad elementi finiti. Le pressioni sono state importate per un totale di 17 step temporali.

2.3.2 VALORI DI COMPRIMIBILITÀ UNIASSIALE

Il parametro geomeccanico chiave nelle simulazioni di subsidenza è la comprimibilità uniaxiale C_m del materiale. E' oggi comunemente accettato [ad. es. Baù *et al.*, 2002] che i valori più attendibili di questo parametro, generalmente funzione non lineare dello stress efficace, siano quelli ottenuti dalle misure in situ tramite markers. Questo è particolarmente vero per sedimenti profondi e poco consolidati, quali quelli considerati in questo studio.

In assenza di dati specifici da markers sul campo di Guendalina, si è utilizzata per la stima della comprimibilità una correlazione regionale basata sul più ampio dataset possibile e relativa alle stesse formazioni del Nord Adriatico. La correlazione di C_m con lo stress efficace σ' impiegata è quella proposta da Hueckel *et al.* [2005] e riportata in Fig. 7, ove sono rappresentate la miglior stima:

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

ed i quantili superiori all'97.5% (media + deviazione standard) ed al 97.5% (media + 2 volte la deviazione standard). La correlazione di [Hueckel *et al.*, 2005], è messa a confronto con quella di Baù *et al.* [2002], e le due appaiono molto simili.

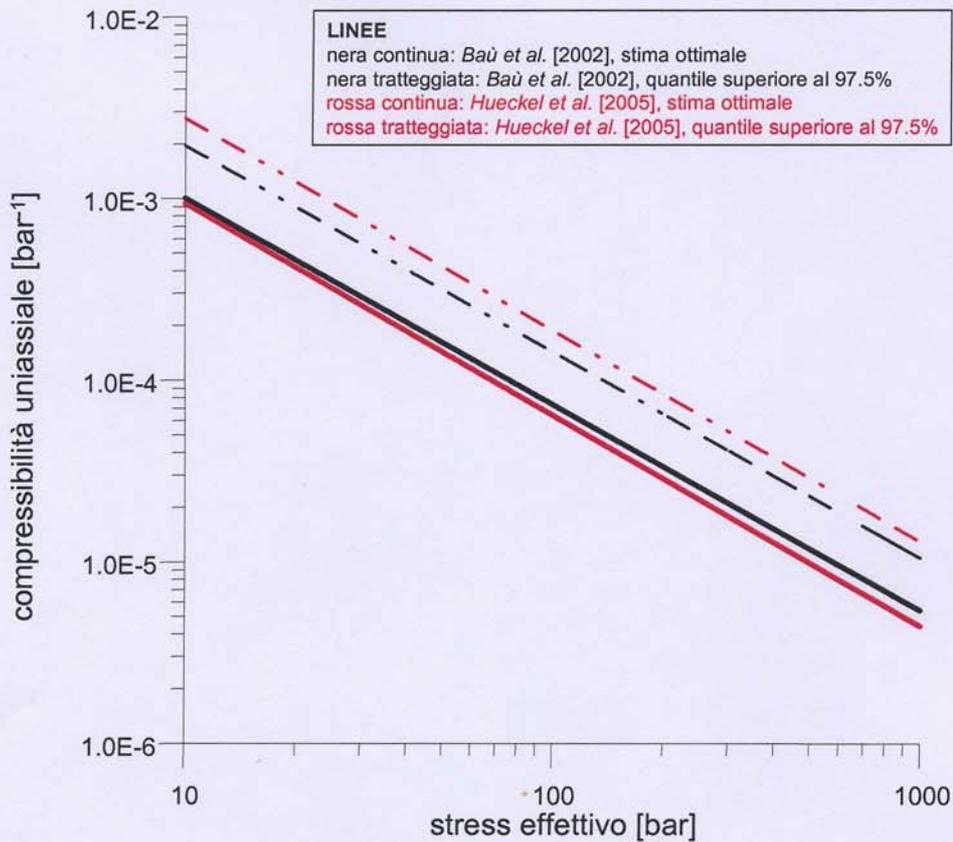


Fig. 7: Correlazione della comprimibilità uniassiale C_m verso stress efficace in situ, derivata da misure su marker nei campi a gas del bacino nord adriatico [da Hueckel *et al.*, 2005].

Si segnala che studi recenti [p.es. Ferronato *et al.*, 2003 e 2004] hanno evidenziato come sia la correlazione di Baù *et al.* [2002], sia quella di Hueckel *et al.* [2005] tendano a sottostimare la comprimibilità 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.* hanno proposto che, in via cautelativa, il valore di C_m ottenuto dalle precedenti correlazioni sia moltiplicato per 2. Tale correzione, però, non si è resa necessaria nel caso del presente studio in quanto i livelli mineralizzati del campo di Guendalina sono posti ad una profondità di circa 3000 m; si è pertanto utilizzata la relazione (1) tranne che per la parte di overburden a profondità inferiore a 1500 m per la quale si è adottata la seguente relazione:

 ENI Exploration&Production Division UGIT/INPE	Campo di Guendalina Studio di previsione di subsidenza – Management Summary	Relazione 088-07 Pag. 13 di 22			
		AGGIORNAMENTI:			
		0			

$$C_m = 2x0.01367 \cdot (\sigma')^{-1.16434} \quad (2)$$

Poiché per il campo di Guendalina non esistono dati di produzione e subsidenza passata (la produzione non è ancora iniziata) su cui calibrare i modelli predittivi, si è effettuata, oltre alla simulazione con il valore di comprimibilità più probabile, anche un'analisi di sensitività. A tale scopo si sono utilizzati comprimibilità superiori ed inferiori rispetto al valore più probabile, scegliendoli opportunamente dalla distribuzione di probabilità della comprimibilità stessa. Sono stati scelti, quindi, i valori seguenti, oltre a quello centrale:

- **Scenario Lower (quantile 2.5%):**

per profondità > 1500 m $c_m = 10^{-0.467} \cdot 0.01367 \sigma_v'^{-1.16434} \quad (3)$

- **Scenario Medio (quantile 50%):**

per profondità > 1500 m $c_m = 0.01367 \sigma_v'^{-1.16434} \quad (1)$

- **Scenario Upper (quantile 97.5%):**

per profondità > 1500 m $c_m = 10^{0.467} \cdot 0.01367 \sigma_v'^{-1.16434} \quad (4)$

I valori di C_m ottenuti dalle relazioni (1), (3) e (4), riassunti in Tab.1, sono stati utilizzati nel modello dinamico Eclipse e per definire i corrispondenti scenari nel modello geomeccanico.

Livelli	Profondità [m]	P rifer [bar a]	Phi media [fract.]	C_m medio [bar ⁻¹]	C_m 97.5% [bar ⁻¹]	C_m 2.5% [bar ⁻¹]
PL3-I	3010	331.0	0.23	7.64 E-05	2.61E-05	2.24 E-04
PL3-J3	3073	339.0	0.23	7.47 E-05	2.55 E-04	2.19 E-04

Tab. 1 – Valori di comprimibilità della roccia per le singole formazioni geologiche

2.3.3 GRADIENTE DI OVERBURDEN UTILIZZATO

Il modello agli elementi finiti richiede che sia specificato il cosiddetto gradiente di overburden (GOV) in funzione della profondità per poter calcolare lo stress totale indotto ad una certa profondità dal peso dei sedimenti sovrastanti. I parametri considerati sono riportati in Tab. 2.

Depth (m)	GOV (bar/m)
225	0.1814
675	0.1995
1800	0.2156
2360	0.2201
2545	0.2213
2815	0.2230
2885	0.2234
2958	0.2238
3011	0.2241
3024	0.2241
3041	0.2242
3053	0.2243
3063	0.2243
3073	0.2244
3079	0.2244
3086	0.2245
3087	0.2245
3092	0.2245
3093	0.2245
3109	0.2246
3121	0.2247

Tab. 2 – Valori del gradiente di overburden per il campo di Guendalina

I valori di questa tabella sono stati utilizzati per ottenere tramite regressione non lineare la seguente relazione per il gradiente di *overburden* da utilizzare per il modello di Guendalina (GOV espresso in [bar/m] e z in [m]):

$$GOV(z) = 0.065015 + 0.017481 \ln(z) \quad (5)$$

 ENI Exploration&Production Division UGIT/INPE	Campo di Guendalina Studio di previsione di subsidenza – Management Summary	Relazione 088-07 Pag. 15 di 22			
		AGGIORNAMENTI:			
		0			

3 PRINCIPALI RISULTATI

3.1 SCENARIO MEDIO

I risultati delle previsioni di subsidenza per lo Scenario Medio, ritenuto il più probabile, sono riportati in Tab. 3 per diversi step temporali durante e dopo la vita produttiva del campo, che, si ricorda, è stata stimata durare 6 anni (Scenario Base di sviluppo).

La data indicata in corrispondenza di tali step temporali consegue dall'ipotesi di avviare la produzione del campo nel gennaio 2010 e, pertanto, è puramente indicativa.

La previsione sino al 2035 è stata effettuata per poter valutare l'estensione del cono di subsidenza nell'acquifero dopo il termine della vita produttiva.

L'analisi dei risultati riportati in Tab. 3 consente di osservare:

Campo	Subsidenza [cm]					Scenario
	2014	2016	2020	2025	2035	
Guendalina	1.2	1.4	1.5	1.5	1.5	Medio

Tab. 3: Valori di subsidenza massima prevista (Scenario Medio) a diversi step temporali

- il valore massimo previsto di subsidenza risulta pari a **1.5 cm**, è raggiunto al 2020 e non s'incrementa negli anni successivi;
- poiché tale valore è inferiore alla soglia minima (pari a 2 cm) considerata significativa negli studi di subsidenza, non è possibile definire un'estensione del cono di subsidenza che, si ricorda, viene fatto corrispondere all'area racchiusa dalla linea di isosubsidenza di 2 cm;
- per esaminare, comunque, l'andamento temporale della subsidenza massima prevista sono stati individuati i due punti di controllo indicati in Fig. 8. Le curve di Fig. 9 mostrano come il massimo di subsidenza non corrisponda al centro planimetrico del giacimento ma risulti spostato in direzione sud-ovest per effetto della depressurizzazione dell'acquifero.



ENI Exploration&Production Division
UGIT/INPE

Campo di Guendalina

Studio di previsione di subsidenza – Management
Summary

Relazione 088-07

Pag. 16 di 22

AGGIORNAMENTI:

0			
---	--	--	--

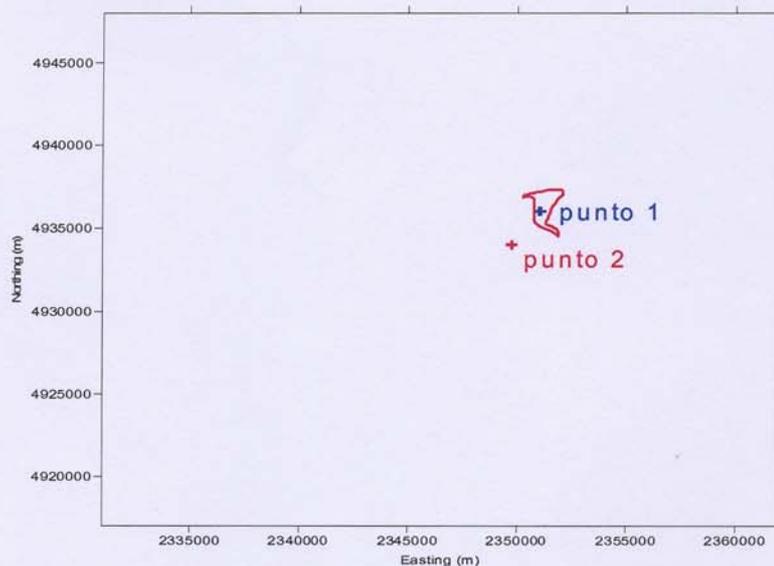


Fig. 8 : Posizione dei 2 punti di controllo di cui è riportato l'andamento temporale della subsidenza in Fig 9.

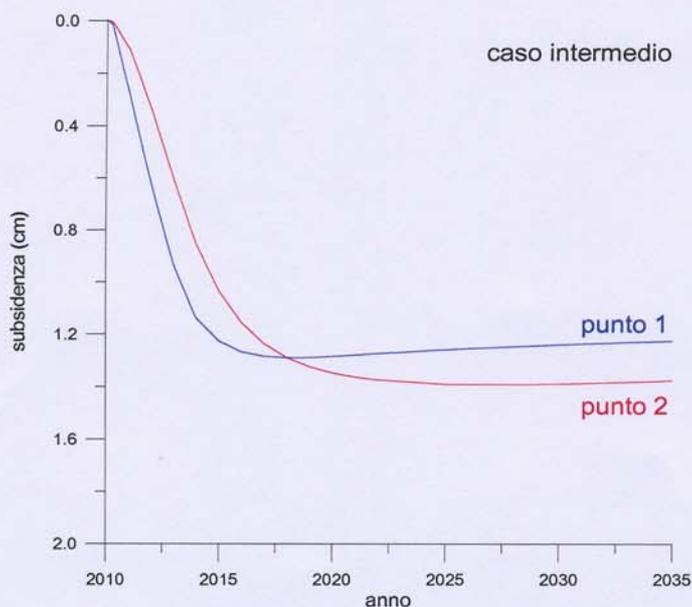


Fig. 9: Subsidenza in cm prevista per lo Scenario Medio nei punti di controllo 1 e 2.

 ENI Exploration&Production Division UGIT/INPE	Campo di Guendalina Studio di previsione di subsidenza – Management Summary	Relazione 088-07 Pag. 17 di 22			
		AGGIORNAMENTI:			
		0			

4 ANALISI DI SENSITIVITÀ

L'analisi di sensitività eseguita sempre con riferimento allo Scenario Base di sviluppo variando il coefficiente di comprimibilità uniassiale secondo quanto specificato al punto 2.3.2.

4.1 SCENARIO LOWER

I risultati delle previsioni di subsidenza per lo Scenario Lower, ovvero considerando un valore di comprimibilità derivante dalla relazione (3) (valore di comprimibilità relativo al quantile del 2,5%), sono riportati in Tab. 4.

Campo	Subsidenza [cm]					Scenario
	2014	2016	2020	2025	2035	
Guendalina	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	Lower

Tab. 4: Valori di subsidenza massima prevista (Scenario Lower) a diversi step temporali

L'analisi di tali risultati consente di osservare:

- a) il valore massimo previsto di subsidenza risulta pari a **0.7 cm**, è raggiunto al 2020 e non s'incrementa negli anni successivi;
- b) poiché tale valore è inferiore alla soglia minima (pari a 2 cm) considerata significativa negli studi di subsidenza, non è possibile definire un'estensione del cono di subsidenza che, si ricorda, viene fatto corrispondere all'area racchiusa dalla linea di isosubsidenza di 2 cm.

 ENI Exploration&Production Division UGIT/INPE	Campo di Guendalina Studio di previsione di subsidenza – Management Summary				Relazione 088-07 Pag. 18 di 22	
	AGGIORNAMENTI:					
	0					

4.2 SCENARIO UPPER

I risultati della previsione di subsidenza per lo Scenario Upper, ovvero considerando un valore di comprimibilità derivante dalla relazione (4) (valore di comprimibilità relativo al quantile del, 97,5 %), sono riportati in Tab. 5.

Campo	Subsidenza [cm]					Scenario
	2014	2016	2020	2025	2035	
Guendalina	2.3	2.6	2.7	2.8	2.7	Upper

Tab. 5: Valori di subsidenza massima prevista (Scenario Upper) a diversi step temporali

L'analisi di tali risultati consente di osservare:

- a) il valore massimo previsto di subsidenza risulta pari a **2.8 cm**, è raggiunto al 2025. Negli anni successivi si registra un trascurabile risollevarimento per effetto della ricomprensione dei livelli depletati da parte dell'acquifero;
- b) il cono di subsidenza (linea di isosubsidenza di 2 cm) risultata estendersi di circa 2 Km verso la costa al termine della simulazione, ovvero al 2035. La distanza della linea di iso-subsidenza di 2 cm dalla costa risulta quindi pari a circa 45 Km (Fig.10).

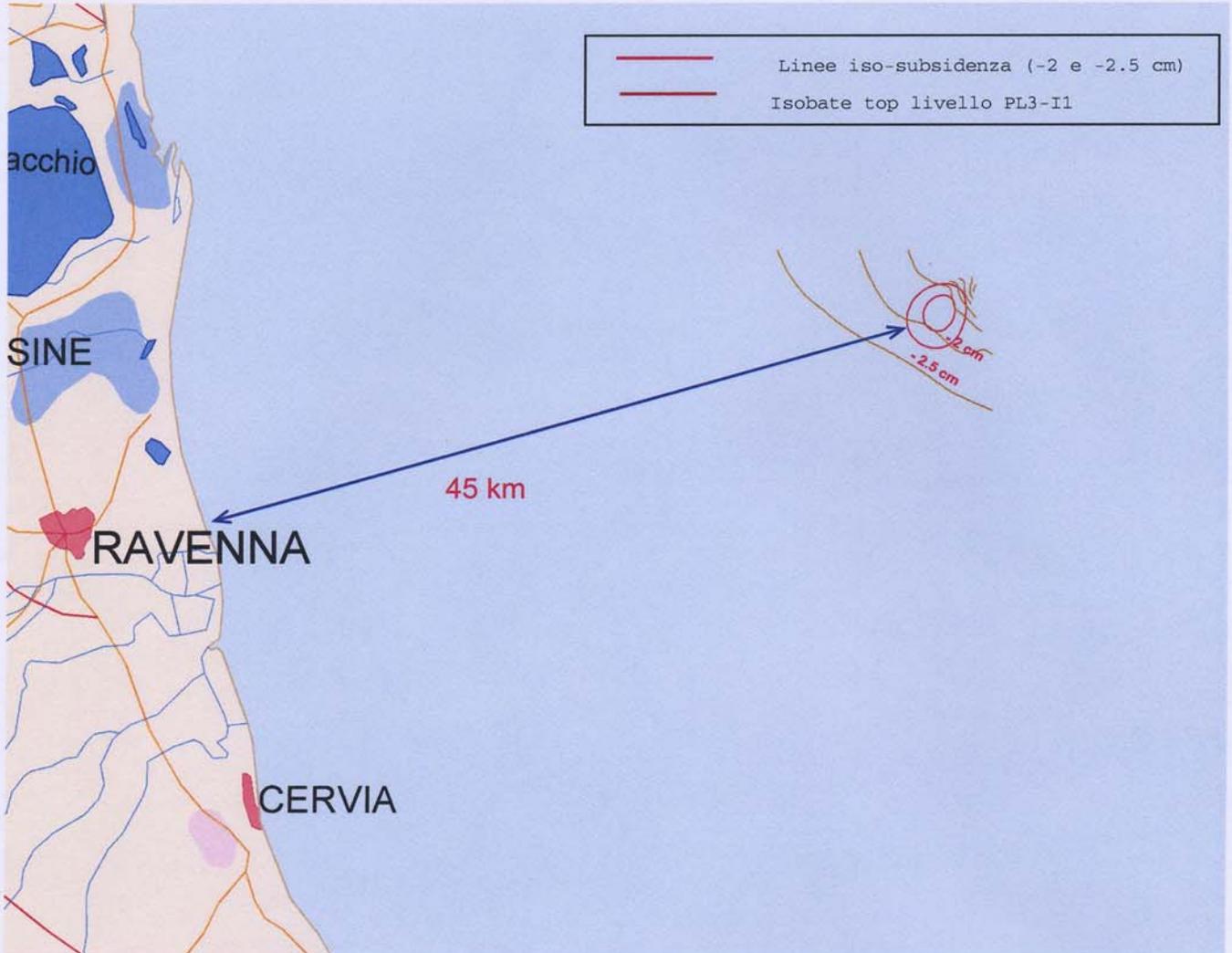


Fig. 10: Cono di subsidenza previsto per lo Scenario Upper al 2035.

A titolo di confronto sono riportati in Fig. 11 gli andamenti nel tempo della subsidenza nel punto di controllo 1 per i tre scenari esaminati.

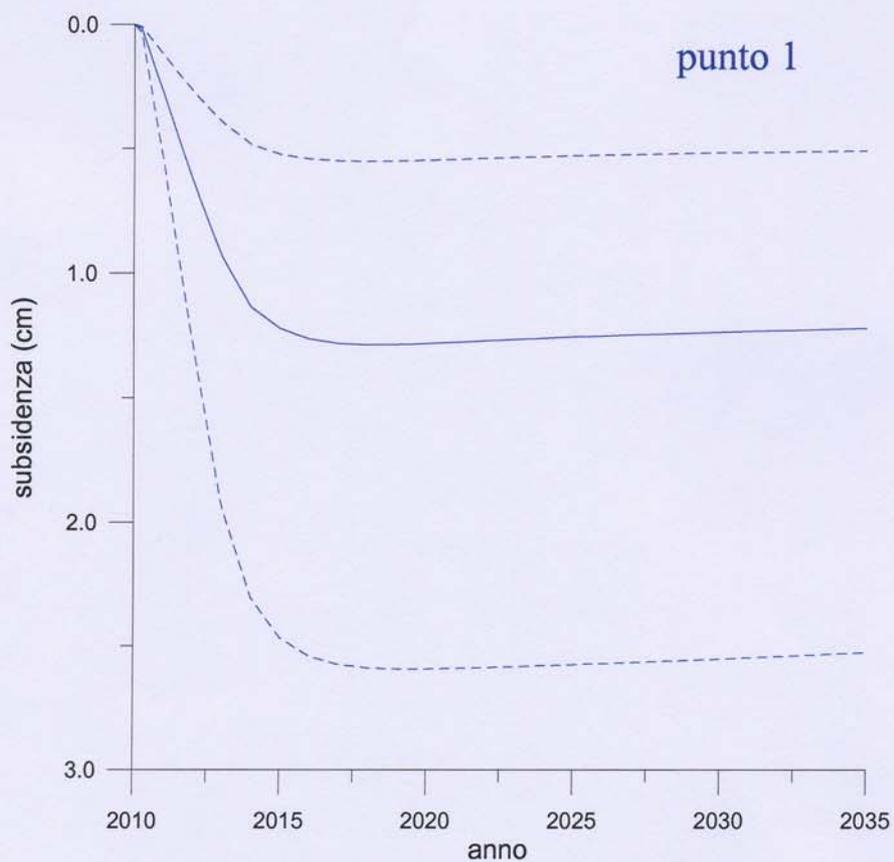


Fig. 11: Andamento temporale della subsidenza prevista in corrispondenza al punto di controllo 1 (vedi Fig. 8), per gli scenari inferiore, intermedio e superiore.

 ENI Exploration&Production Division UGIT/INPE	Campo di Guendalina Studio di previsione di subsidenza – Management Summary	Relazione 088-07 Pag. 21 di 22			
		AGGIORNAMENTI:			
		0			

CONCLUSIONI

I risultati delle previsioni di subsidenza per il campo di Guendalina effettuate con modello geomeccanico FEM consentono di concludere:

- Il valore massimo di subsidenza previsto, nel caso ritenuto più probabile (Scenario Medio), è pari a **1.5 cm**. Tale valore, raggiunto dopo 4 anni dalla fine produzione, rimane invariato negli anni successivi (Tab. 3 - Fig. 9). Il punto di massima subsidenza non corrisponde al centro planimetrico del giacimento, ma risulta spostato a sud-ovest per effetto della depressurizzazione dell'acquifero (Fig. 8).
- L'analisi di sensitività fatta variando il valore di comprimibilità uniassiale mostra che il valore massimo di subsidenza previsto è compreso nell'intervallo da **0.6 cm a 2.8 cm**.
- Solo nel caso dello Scenario Lower (valore massimo del coefficiente di comprimibilità uniassiale considerato nell'analisi di sensitività) è possibile tracciare linea di isosubsidenza di 2 cm e individuare il relativo cono di subsidenza. Tale linea è risultata estendersi di circa **2 Km** verso la costa al termine della simulazione, ovvero al 2035, per cui la distanza del cono di subsidenza dalla costa risulta pari a circa **45 Km** (Fig.10).

 ENI Exploration&Production Division UGIT/INPE	Campo di Guendalina Studio di previsione di subsidenza – Management Summary	Relazione 088-07 Pag. 22 di 22			
		AGGIORNAMENTI:			
		0			

5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Baù D., M. Ferronato, G. Gambolati and P. Teatini, 2002, Basin-scale compressibility of the Northern Adriatic by the radioactive marker technique, *Géotechnique*, 52(8), 605-616.

Hueckel T., G. Cassiani, J. H. Prevost and D. A. Walters, 2005, Field Derived Compressibility Of Deep Sediments Of North Adriatic, in *Land Subsidence (special volume), Proceedings of the Seventh International Symposium on Land Subsidence (SISOLS 2005)*, Shanghai, 23-28 October 2005, p.35-49.

Ferronato M., Gambolati G., Teatini P., Baù D., 2003, Interpretation of radioactive measurements to evaluate compaction in the Northern Adriatic gas fields. *SPE Journal of Reservoir Evaluation & Engineering* 6, 401-411.

Ferronato M., Gambolati G., Teatini P., Baù D., 2004, Radioactive marker measurements in heterogeneous reservoirs: numerical study. *ASCE International Journal of Geomechanics*, 4, 79-92.