

Ministero dell' Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare

GRUPPO DI LAVORO

Commissione per le Valutazioni dell'Impatto Ambientale

Direzione per la Salvaguardia Ambientale - Divisione III

**CONTROLLO E MONITORAGGIO DEI FENOMENI
GEODINAMICI DI CUI AI DECRETI DI COMPATIBILITA'
AMBIENTALE RELATIVI AI PROGETTI DI
COLTIVAZIONE DI IDROCARBURI IN MARE PER I
GIACIMENTI: REGINA, ANNALISA, ANEMONE II FASE,
BARBARA NW, CALPURNIA, CLARA EST, CLARA
NORD, PORTO CORSINI MARE, NAIDE, CALIPSO**

RELAZIONE CONCLUSIVA

Componenti: Marcello Iocca (coordinatore) – CVIA
Carmela Bilanzone – DSA-Div. III
Paola Ceoloni – CVIA
Alvaro Palamidessi – CVIA
Carlo Tersigni – CVIA

Luglio 2007

INDICE

PREMESSA.....	4
1 FINALITA' DELLE ATTIVITA' DEL GRUPPO DI LAVORO	4
1.1 Motivi che hanno portato all'attivazione del Gruppo di Lavoro - La questione del giacimento "Regina".....	4
1.2 Costituzione del Gruppo di Lavoro: finalità, obiettivi e tempistica delle attività	6
1.2.1 Riferimenti amministrativi	6
1.2.2 Stralcio dei giacimenti "Emilio" e "Naomi – Pandora, Irma – Carola"	7
1.2.3 Elenco definitivo dei giacimenti oggetto di verifica da parte del Gruppo di Lavoro .	7
1.3 Prescrizioni relative al monitoraggio dei parametri geodinamici	8
2 APPROCCIO METODOLOGICO E STATO DELL'ARTE DELLE METODOLOGIE PER LA PREVISIONE E IL MONITORAGGIO DEL FENOMENO DELLA SUBSIDENZA.....	10
2.1 Modelli matematici per la previsione di subsidenza	10
2.1.1 Modello statico di giacimento	10
2.1.2 Modelli dinamici di giacimento.....	11
2.1.3 Modelli geomeccanici	13
2.2 Caratterizzazione geomeccanica delle rocce per le previsioni di subsidenza.....	20
2.2.1 Misure di laboratorio.....	20
2.2.2 Misure in situ con marker radioattivi.....	23
2.3 Attuale stato dell'arte delle metodologie di previsione della subsidenza e loro evoluzione.....	25
2.4 Casistica internazionale	27
2.5 Interazione idraulica e meccanica fra giacimenti.....	29
2.5.1 Interazione idraulica	29
2.5.2 Interazione meccanica	29
2.5.3 Utilizzo dei modelli matematici per gli studi d'interferenza	30
3 SISTEMI DI MONITORAGGIO IN-SITU E LUNGO LA COSTA ADRIATICA	31
3.1 Monitoraggi in pozzo	31
3.2 Monitoraggi di superficie	34
4 INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AVANFOSSA PLIO- PLEISTOCENICA PADANO- ADRIATICA.....	42
4.1 Paleogeografia e assetto strutturale.....	42
4.2 Caratterizzazione delle facies deposizionali.....	45
4.2.1 Sistemi bacinali	45
4.2.2 Sistemi di slope e di rampa d'avampaese	47
5 ANALISI DEI MONITORAGGI RELATIVI AI GIACIMENTI	49
5.1 Giacimento Regina.....	49
5.1.1 Dati amministrativi (procedura di VIA e concessione mineraria).....	49
5.1.2 Status coltivazione del giacimento e previsioni di produzione.....	50
5.1.3 Previsioni della subsidenza: ulteriori studi/indagini effettuati e/o previsti	50
5.1.4 Confronto tra le previsioni di subsidenza 1997 (SIA) e 2006	52
5.1.5 Considerazioni del Gruppo di Lavoro	53
5.1.6 Monitoraggi in corso e previsti.....	54
5.2 Giacimento Annalisa	58
5.3 Giacimento Anemone II Fase.....	61
5.4 Giacimento Barbara NW	64
5.5 Giacimento Calipso	67
5.6 Giacimento Calpurnia.....	70
5.7 Giacimento Clara Est	73
5.8 Giacimento Clara Nord.....	76
5.9 Giacimento Naide.....	79
5.10 Giacimento Porto Corsini Mare	82
6 REVISIONE DELLE STIME DELLA SUBSIDENZA: ANALISI E VALUTAZIONI DEGLI SCOSTAMENTI DALLE PREVISIONI INIZIALI.....	85
7 DATI DI SUBSIDENZA DAI MONITORAGGI COSTIERI	89

8	CRITERI UTILIZZATI PER LE VALUTAZIONI DEL GRUPPO DI LAVORO	94
8.1	Motivazioni della scelta del valore di 2 cm per la linea di isosubsidenza	94
8.2	La tecnologia dei markers radioattivi.....	94
8.3	Utilizzazione del GPS in continuo (CGPS) per il monitoraggio della subsidenza	96
8.4	Ruolo della permeabilità nella previsione della subsidenza	97
9	CONCLUSIONI	100
9.1	Metodologia di indagine	100
9.2	Quadro di sintesi dei risultati delle revisioni delle stime	100
9.3	Criteri per la revisione degli studi di previsione della subsidenza	102
9.4	Monitoraggi e controlli	108
9.5	Possibili sviluppi futuri dell'attività del GdL.....	109

Bibliografia

Allegati: Monografie dei campi oggetto di indagine

PREMESSA

La presente relazione costituisce l'elaborato conclusivo delle attività svolte dal "Gruppo di Lavoro" (GdL), istituito presso il Ministero dell'Ambiente, per verificare lo stato dei controlli e dei monitoraggi dei fenomeni geodinamici in relazione all'esercizio delle operazioni di coltivazione di 11 giacimenti di gas naturale ubicati nel Mare Adriatico centrale.

Le attività del GdL, costituito su iniziativa del Presidente della Commissione VIA e che ha visto il coinvolgimento di 4 commissari VIA e di un rappresentante della DSA – Divisione III, si sono sviluppate lungo un arco di tempo sufficientemente ampio, tale da consentire il rispetto del termine per la conclusione degli accertamenti, fissato per il giorno 8 agosto 2007.

Durante tale attività, il GdL si è avvalso del supporto e della consulenza scientifica fornita dal dipartimento Exploration & Production dell'ENI, i cui tecnici hanno fornito al GdL tutto il materiale e la documentazione necessaria per concludere i propri studi e formulare quindi, nei tempi previsti, le proprie considerazioni e valutazioni.

1 FINALITA' DELLE ATTIVITA' DEL GRUPPO DI LAVORO

1.1 Motivi che hanno portato all'attivazione del Gruppo di Lavoro - La questione del giacimento "Regina"

Con decreto n. DEC/VIA/2734 del 04.04.1997 il Ministero dell'Ambiente ha emesso il provvedimento di compatibilità ambientale relativamente al progetto di coltivazione del giacimento "Regina", compreso nell'ambito della concessione mineraria A.C17.AG ubicata nel Mare Adriatico al largo di Rimini. L'efficacia di tale giudizio di compatibilità era condizionato all'osservanza di specifiche prescrizioni indicate nel decreto medesimo. In particolare, quella indicata al punto C2, riguardava l'installazione in pozzo di markers radioattivi per il controllo della compattazione dei livelli mineralizzati ai fini della revisione annuale delle stime riguardanti la subsidenza nell'area di giacimento.

A seguito dell'analisi preliminare della documentazione e dei dati relativi ai fenomeni geodinamici in fase di verifica di ottemperanza alla suddetta prescrizione¹, il gruppo istruttore aveva constatato che le misure di compattazione effettuate e la revisione delle stime modellistiche relative alla possibile evoluzione dei fenomeni geodinamici avevano ampiamente superato quelle indicate nel giudizio di compatibilità ambientale. Infatti, in data 20.10.2006 la stessa società ENI aveva sospeso preventivamente la produzione di gas da detto giacimento, in ottemperanza alla parte finale della medesima prescrizione C2 che prevedeva, nel caso in cui la revisione delle stime modellistiche avessero superato i valori indicati nel SIA, la sospensione delle attività di estrazione di gas naturale. *"... in attesa della valutazione dei rischi ambientali possibili da parte del Ministero dell'Ambiente."*

Si segnala che in merito al ritardo con il quale sono state effettuate le revisioni modellistiche delle stime della subsidenza e il conseguente ritardo con cui tali stime sono state inviate al Ministero dell'Ambiente, con le note DSA-32267 e DSA-32269 del 12.12.2006 inviate dalla Direzione per la Salvaguardia Ambientale rispettivamente all'ENI e al Ministero dello Sviluppo Economico, la DSA comunica agli stessi di ritenere *"che tale circostanza determini di fatto la decadenza giuridica del decreto di compatibilità ambientale n. DEC/VIA/2734 del 04.04.1997, sulla cui base è stato rilasciata da parte di codesto Ministero l'autorizzazione alla coltivazione del giacimento "Regina".*", facendo inoltre presente di riservarsi la facoltà *"... di attivare le ulteriori azioni [da*

¹ forniti con nota n. 1641 del 30.10.2006 – pervenuti in data 08.11.2006, quindi con grande ritardo rispetto ai termini stabiliti nella prescrizione di cui alla lettera C), punto 2 del decreto di compatibilità ambientale DEC/VIA/2734 del 04.04.1997

intraprendere] per accertare gli effetti determinati sull'ambiente a causa dei fenomeni già verificatisi...".

Preso atto di quanto accaduto per il giacimento Regina la DSA ha ritenuto quindi doveroso che fosse accertato "... oltre ogni ragionevole dubbio che, le pur straordinarie condizioni, che hanno determinato per il giacimento "Regina" il mancato rispetto delle previsioni modellistiche sui fenomeni geodinamici, non possano ripetersi per altri giacimenti in corso di coltivazione...". In altre parole la DSA ha affermata l'esigenza che fosse verificata l'eventualità che la problematica insorta per il giacimento "Regina" non potesse essersi verificata anche per altri giacimenti in produzione, ciò anche in considerazione degli argomenti di seguito specificati:

- i modelli geologici utilizzati per la stima della subsidenza per detti giacimenti, sono del tutto analoghi a quello utilizzato per il giacimento "Regina" che si è rivelato essere, in quel caso, non pienamente adeguato a rappresentare la specificità del contesto geologico e stratigrafico;
- nei predetti giacimenti non è sempre utilizzato il sistema di monitoraggio basato sui "markers radioattivi", l'unico che consente di rilevare in modo tempestivo l'insorgere del fenomeno in questione.

I giacimenti in corso di coltivazione cui la DSA fa riferimento sono quelli per i quali il Ministero dell'Ambiente già ha emanato i relativi decreti di compatibilità ambientale. Questi risultano essere:

1 - giacimento "Annalisa"	DEC/VIA/3547 del 07.10.1999;
2 - giacimento "Anemone II Fase"	DEC/VIA/2979 del 3.3.1998;
3 - giacimento "Barbara NW"	DEC/VIA/3477 del 15.12.1998;
4 - giacimento "Calpurnia"	DEC/VIA/4170 del 15.11.1999;
5 - giacimento "Clara Est"	DEC/VIA/4470 del 7.2.2000;
6 - giacimento "Clara Nord"	DEC/VIA/4470 del 7.2.2000;
7 - giacimento "Naomi – Pandora, Irma – Carola"	DEC/VIA/5369 del 4.10.2000;
8 - giacimento "Emilio"	DEC/VIA/5222 del 31.7.2000;
9 - giacimento "Porto Corsini Mare"	DEC/VIA/6132 del 24.5.2002;
10 - giacimento "Naide"	DEC/VIA/7486 del 22.7.2002;
11 - giacimento "Calipso"	DEC/VIA/7078 del 22.3.2002.

Con la citata nota del 12.12.2006, preso atto che l'ENI aveva già provveduto di propria iniziativa a sospendere a partire dal 20.10.2006, le attività di coltivazione del giacimento Regina, la Direzione Salvaguardia Ambientale ha quindi ritenuto necessario, in via cautelativa, invitare la stessa ENI a valutare l'opportunità di sospendere, o quantomeno ridurre al minimo indispensabile, la produzione anche per i giacimenti elencati nella tabella sopra riportata, per un periodo indicato in 6 mesi, al fine di dar modo al Ministero dell'Ambiente di poter acquisire ulteriori dati ed effettuare i necessari approfondimenti tecnici in relazione a tali giacimenti.

L'invito rivolto all'ENI a ridurre per un periodo di 6 mesi la produzione dei giacimenti di cui all'elenco precedente, è stato comunicato anche al Ministero per lo Sviluppo Economico (MISE) per i seguiti di competenza.

In conseguenza di ciò, il MISE, con successiva nota del 14.02.2007 (acquisita agli atti con prot. DSA5209 del 20.02.2007) ha trasmesso al Ministero dell'Ambiente il provvedimento cautelativo direttoriale prot. 2554 del 9 febbraio 2007 riguardante la produzione di gas naturale dai giacimenti sopra citati.

Nel trasmettere alla Commissione VIA il citato provvedimento dirigenziale del 9 febbraio 2007, la DSA sottolinea come le azioni cautelative poste in essere dal Ministero dello Sviluppo Economico non possano protrarsi oltre sei mesi dalla data di emissione del provvedimento medesimo.

L'attività del "GdL Subsidenza" è stata perciò organizzata e condotta nella parte di studio e approfondimento tecnico, tenendo conto del limite temporale esistente, il quale fissa al 8 agosto 2007 la scadenza dei sei mesi indicata dal MISE.

1.2 Costituzione del Gruppo di Lavoro: finalità, obiettivi e tempistica delle attività

1.2.1 Riferimenti amministrativi

Con nota del 2 marzo 2007 (CVIA-1055), il Presidente della Commissione VIA ha istituito il GdL formato dai Commissari M. Iocca, P. Ceoloni, A. Palamidessi e C. Tersigni con il compito di riferire al Presidente in merito ai sistemi di monitoraggio in relazione al fenomeno della subsidenza.

Successivamente, con la nota CVIA 1200 del 13.3.2007, l'arch. Carmela Bilanzone della Divisione III della Direzione Generale per la Salvaguardia Ambientale è stata inclusa nel GdL ed è stato affidato al Dr. M. Iocca l'incarico di coordinare le attività del gruppo stesso.

Con la nota DSA-7732 del 14.03.2007 la DSA ha fatto pervenire alla Commissione VIA la documentazione pregressa sulla base della quale il Presidente ha ritenuto necessario procedere all'attivazione del GdL. I riferimenti di detta documentazione sono riportati nella tabella seguente:

1. nota DSA-2006-0032267 del 12.12.2006;
2. nota DSA-2006-0032269 del 12.12.2006;
3. nota del Ministero dello Sviluppo Economico n. 0000102 del 04.01.2007 (prot. DSA-2007-0000490 del 10.01.2007);
4. provvedimento dirigenziale del 09.02.2007 a firma del Direttore Generale della Direzione per l'Energia e le Risorse Minerarie (prot. DSA-2007-0005209 del 20.02.2007);
5. nota UGIT prot. N. 076 LS/mm del 23.01.2007 (prot. DSA-2007-002727 del 30.01.2007)
➤ due copie fascicoli allegati nota sopra citata UGIT prot. N. 076 LS/mm del 23.01.2007 contenente oltre a corrispondenza tra ENI e Ministero Ambiente anche:
➤ relazione del prof. Enzo Boschi e altri dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia;
➤ Relazione del prof. Paolo Colantoni dell'Università di Urbino;
➤ Linee Guida per lo Studio dei fenomeni di subsidenza nell'ambito di progetti di sviluppo sostenibili dei campi ad olio e gas" DMMMSA dell'Università di Padova;
➤ aggiornamento modelli predittivi e altro;
➤ situazione delle stringhe all'1 gennaio 2007 e relative problematiche;
➤ tabella sullo stato di coltivazione dei giacimenti

Inoltre, sempre con la stessa nota viene trasmesso alla Commissione VIA l'elenco dei giacimenti, riportati nella tabella alla pagina precedente, già oggetto di pronuncia di compatibilità ambientale, da sottoporre a verifica da parte del GdL.

Il gruppo di lavoro si è riunito formalmente 6 volte. Alle riunioni formali hanno sempre partecipato i rappresentanti dell'ENI con i quali il GdL ha approfondito in maniera esaustiva i vari aspetti tecnici della questione. Nel corso degli incontri sono stati inoltre predisposti e discussi i risultati degli studi aggiuntivi che il GdL ha richiesto che venissero svolti.

Le riunioni del GdL hanno avuto luogo nelle seguenti date:

23 marzo 2007, prima riunione - (convocazione prot. CVIA/2007/1397 del 13.3.2007);

3 aprile 2007 - (convocazione prot. CVIA/2007/1617 del 29.3.2007);

7 maggio 2007 - (convocazione prot. CVIA/2007/2119 del 24.04.2007);

6 giugno 2007 - (convocazione prot. CVIA/2007/2522 del 22.5.2007);

15 giugno 2007 - (convocazione prot. 2875 del 15.6.2007);

27 giugno 2007 si è tenuta l'ultima riunione con Eni presso la Sede del Ministero dell'Ambiente e Tutela del Territorio e del Mare.

Oltre agli incontri sopra indicati il GdL si è riunito informalmente più volte al fine di analizzare i dati tecnici e le informazioni rese disponibili, effettuare le valutazioni del caso e formulare le proprie conclusioni.

1.2.2 Stralcio dei giacimenti “Emilio” e “Naomi – Pandora, Irma – Carola”

Giacimento di EMILIO

Come ricordato nella nota del MISE prot. 102 del 04.01.2007 (DSA-490 del 10.01.2007) e sulla base di quanto riportato nel decreto di compatibilità ambientale DEC/VIA/5222 del 31.7.2000 relativo al progetto di coltivazione del giacimento Emilio: *“Date le caratteristiche geo-meccaniche del sottosuolo (scarsissima comprimibilità delle rocce calcaree che costituiscono il reservoir) e la notevole distanza della piattaforma dalla costa, è escluso qualsiasi fenomeno di subsidenza riconducibile all’attività di produzione. Non è previsto pertanto nessun piano di monitoraggio al riguardo;”* lo sfruttamento del giacimento Emilio non può essere causa di fenomeni di subsidenza del fondo marino e pertanto lo stesso giacimento è stato escluso dall’elenco di quelli sottoposti alla verifica da parte del GdL.

Giacimenti di NAOMI–PANDORA e IRMA– CAROLA

Sempre nella nota del MISE prot. 102 del 04.01.2007 (DSA-490 del 10.01.2007), viene fatto presente che il giacimento Irma/Carola non è più economicamente coltivabile ed è stato da tempo rinunciato dall’ENI senza che sia stato estratto neanche un metro cubo di gas, mentre il giacimento di “Naomi/Pandora” si trova attualmente, in blocco produttivo per ordine della Magistratura. Pertanto anche i sopra citati giacimenti sono stati esclusi dall’elenco di quelli sottoposti alla verifica da parte del G.L.

1.2.3 Elenco definitivo dei giacimenti oggetto di verifica da parte del Gruppo di Lavoro

A seguito della citata nota del Ministero dell’Ambiente DSA-32269 del 12.12.2006 con la quale si rappresentava al Ministero dello Sviluppo Economico l’opportunità che nelle more (stimate dal MATTM in circa 6 mesi) della conclusione delle attività del GdL lo stesso MISE provvedesse a sospendere o a ridurre al minimo indispensabile le produzioni dei giacimenti indicati nell’elenco, il Ministero dello Sviluppo Economico ha emesso il provvedimento direttoriale prot. n. 0002554 del 9 febbraio 2007 con il quale viene disposta la riduzione della produzione nei vari giacimenti in misura non inferiore a quanto indicato nella tabella seguente:

TITOLO MINERARIO	GIACIMENTO	RIDUZIONE DELLA PRODUZIONE
A.C32.AG	Annalisa	20%

A.C8.ME	Anemone II Fase	35%
A.C7.AS	Barbara NW	35%
B.C22.AG	Calpurnia	20%
B.C13.AS	Clara Est	30%
B.C13.AS	Clara Nord	20%
B.C3.AS	Emilio	15%
Porto Corsini Mare	Porto Corsini	20%
A.C21.AG	Naide	30%
B.C14.AS	Calipso	25%

Le riduzioni sopra indicate sono riferite alle produzioni mensili preventivate dall'ENI per l'anno 2007 secondo i programmi annuali di produzione approvati dai competenti Uffici territoriali dell'UNMIG e sono valide per sei mesi.

I criteri con cui sono state stabilite le percentuali di riduzione della produzione prevista tengono conto della necessità, da parte dell'amministrazione statale, di tutelare i giacimenti ed il loro buon governo in quanto appartenenti al patrimonio indisponibile dello Stato, come disposto dal D.P.R. n. 128/1959, e del fatto che, in funzione del grado di depletamento dei singoli giacimenti, si debba ridurre la loro attuale produzione nella misura massima tecnicamente compatibile con l'opportunità di evitare, per quanto possibile, il danneggiamento dei giacimenti che potrebbe impedire o rendere difficile l'eventuale ripresa della loro coltivazione.

1.3 Prescrizioni relative al monitoraggio dei parametri geodinamici

Le prescrizioni finalizzate al monitoraggio dei parametri geodinamici e all'aggiornamento delle stime della subsidenza, contenute nei decreti di compatibilità ambientale relativi ai giacimenti in questione, sono caratterizzate da una certa variabilità riconducibile a diverse cause quali soprattutto la differente metodologia utilizzata per la stima della compattazione effettuata in sede di SIA e alle condizioni al contorno quali la distanza dalla costa.

Dall'esame delle prescrizioni, raggruppate per tipologia nella tabella seguente, si evidenzia che sia l'aggiornamento delle stime di subsidenza che il monitoraggio del territorio costiero antistante i giacimenti non sono sistematicamente prescritti in tutti i decreti.

GIACIMENTO		1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	
		ANEMONE II	ANNALISA	BARBARA NW	CALYPSO	CALPURNIA	CLARA EST	CLARA NORD	NAIDE	PORTO CORSINI MARE	REGINA	
Decreto VIA		n. 2979 del 3.3.1998	n.3547 del 7.1.1999	n.3477 del 15.12.1998	n.7078 del 22.3.2002	n.4170 del 15.11.1999	n.4470 del 7.2.2000	n.4470 del 7.2.2000	n.7486 del 22.7.2000	n.6132 del 24.5.2001	n.2734 del 4.4.1997	
PRESCRIZIONI	Prelievo carote di parete per prove di compressibilità da utilizzare nei modelli previsionali per la stima della subsidenza				X	X			X	X		
	Stima dei valori massimi di subsidenza del fondo marino attesi con l'utilizzo di modelli predittivi del tipo utilizzato dal medesimo proponente per la coltivazione del campo a gas "Regina", ed eventualmente di altri modelli predittivi giudicati più evoluti ed opportunamente giustificati; le stime dovranno riguardare i punti in corrispondenza del culmine del giacimento e la distanza di esaurimento del fenomeno	X										
	Determinazione del "punto zero" prima dell'inizio della coltivazione, secondo i criteri definiti dalla C.G.I. mediante campagna di livellazione di alta precisione nel tratto di costa antistante la nuova piattaforma, ripetuta con cadenza annuale. Tale determinazione dovrà essere ripetuta con cadenza annuale ed i relativi dati dovranno essere trasmessi, oltre che all'U.N.M.I.G., al Ministero dell'Ambiente ed alle Regioni interessate dal tratto di costa prospiciente	X	X					X	X			X
	Intensificare e migliorare il sistema di alta precisione sulla costa Adriatica					X						
	Taratura, in corso di produzione, del modello predittivo già elaborato per la stima di valori massimi di subsidenza del fondo marino per il giacimento in esame o di altri modelli predittivi giudicati più evoluti ed opportunamente giustificati; le stime dovranno riguardare i punti in corrispondenza del culmine del giacimento e la distanza di esaurimento del fenomeno		X									
	Prelievo di campioni della serie dei terreni attraversati in corso di realizzazione dei pozzi e installazione di "markers radioattivi" secondo i criteri più idonei alla rilevazione e misurazione della subsidenza degli strati sottostanti il fondo marino, con specifico riferimento ai livelli mineralizzati; qualora i pozzi previsti non fossero idonei, si realizzerà nel medesimo sito uno specifico pozzo finalizzato alla caratterizzazione dei sedimenti ed all'analisi della subsidenza mediante markers. I criteri tecnici ed i sistemi di rilevazione dovranno corrispondere alle migliori tecniche disponibili allo stato attuale delle conoscenze e verranno esplicitati in una apposita relazione che verrà inoltrata al Servizio V.I.A. del Ministero dell'Ambiente. I risultati delle misurazioni sopraindicate dovranno essere trasmessi all'U.N.M.I.G. e al Ministero dell'Ambiente, ed utilizzati dal proponente per la calibrazione e l'aggiornamento del modello. Il modello stesso, i software relativi, gli aggiornamenti del modello e la base dati dovranno essere altresì messi a disposizione degli organismi competenti al controllo d	X										X (le stime del modello dovranno essere trasmesse annualmente all'U.N.M.I.G. ed al Ministero dell'Ambiente)
	Taratura, durante la fase di produzione, con le migliori tecniche al momento disponibili del modello predittivo già elaborato per la stima di valori massimi di subsidenza del fondo marino per il giacimento in esame o di altri modelli predittivi giudicati più evoluti ed opportunamente giustificati; il modello dovrà anche tener conto degli eventuali effetti cumulativi rispetto alla subsidenza indotta dai vicini campi di attività; le stime dovranno riguardare i punti in corrispondenza del culmine del giacimento e la distanza di esaurimento del fenomeno; il programma di taratura dovrà essere predisposto prima dell'inizio dei lavori e trasmesso al Ministero dell'Ambiente. I dati così ottenuti dovranno essere tenuti a disposizione del Ministero dell'Ambiente e di altri soggetti pubblici eventualmente interessati.							X	X			
RACCOMANDAZIONI	Inserire la piattaforma nel programma di monitoraggio della subsidenza attualmente in corso in molti giacimenti dell'Adriatico				X				X			
	Monitoraggio nell'area vasta del giacimento recuperando, laddove possibile, le serie storiche delle migrazioni altimetriche e planimetriche delle piattaforme, al fine di produrre uno scenario complessivo degli effetti indotti dalle attività di sfruttamento degli idrocarburi nell'off-shore di Ravenna. Tale attività di monitoraggio, in corso di definizione nell'ambito dei lavori del protocollo d'intesa Assomineraria- Ministero Ambiente, deve essere condotta in continuo e di concerto con le attività di monitoraggio già in essere e previste dalla Regione Emilia Romagna										X	

2 APPROCCIO METODOLOGICO E STATO DELL'ARTE DELLE METODOLOGIE PER LA PREVISIONE E IL MONITORAGGIO DEL FENOMENO DELLA SUBSIDENZA

2.1 Modelli matematici per la previsione di subsidenza

La metodologia attualmente seguita a livello internazionale per effettuare gli studi di previsione della subsidenza è strutturata in un flusso di lavoro che prevede l'esecuzione di tre distinti studi, in ciascuno dei quali è costruito uno specifico modello matematico del sistema "giacimento + acquiferi"; in particolare, si tratta, di:

- *uno studio geologico* finalizzato alla realizzazione del **modello statico** (o modello geologico);
- *uno studio dinamico* finalizzato alla realizzazione del **modello dinamico** (o modello di flusso);
- *uno studio geomeccanico* finalizzato alla realizzazione del **modello geomeccanico**.

2.1.1 Modello statico di giacimento

Il modello statico consiste in una dettagliata ricostruzione 3D della struttura del giacimento e degli acquiferi connessi, e nella caratterizzazione, sempre a scala tridimensionale, delle loro proprietà petrofisiche (es. porosità, permeabilità, rapporto net pay/gross pay, ecc.).

Tale ricostruzione è articolata nelle seguenti fasi:

- Revisione/Interpretazione della sismica 2D/3D acquisita nell'area.
- Acquisizione/Interpretazione dei dati di pozzo. Oltre ai dati statici (es. log, carote, misure di laboratorio, ecc.) e dinamici (pressione, prove di produzione, ecc.) acquisiti nei pozzi dell'area in esame, sono raccolte ed elaborate anche informazioni relative ai pozzi esplorativi perforati in acquifero nelle zone circostanti il giacimento. Ciò al fine di disporre del maggior numero possibile di informazioni necessarie per controllare l'andamento delle geometrie e delle proprietà dei corpi geologici.
- Ricostruzione sismico-strutturale 2D/3D di dettaglio. La ricostruzione sismico-strutturale è di norma molto più ampia dell'area effettivamente ricoperta dal giacimento studiato non solo per includere gli acquiferi ad esso connessi, ma anche per individuare quei lineamenti strutturali del bacino, quali faglie e/o sovrascorrimenti, che possono alterare o modificare la propagazione del disturbo di pressione indotto dalla produzione d'idrocarburi.
- Modello sedimentologico delle varie sequenze di livelli porosi presenti nell'area in studio per il controllo regionale delle correlazioni stratigrafiche. Ciò al fine di garantire che gli orizzonti d'interesse del giacimento in esame siano correlati con quelli analoghi dei giacimenti limitrofi e ottenere così una corretta caratterizzazione areale degli acquiferi idraulicamente connessi ai livelli produttivi. Anche in questo caso è importante individuare quegli eventi (es. variazioni di facies) che possono alterare o modificare la propagazione del disturbo di pressione indotto dalla produzione d'idrocarburi.
- Revisione e omogeneizzazione dei parametri petrofisici in conformità alle dinamiche di sedimentazione e alle facies riconosciute dal modello sedimentologico. Questa fase include anche una verifica degli studi petrofisici eseguiti su carote per i pozzi dell'area, con particolare attenzione alle analisi di laboratorio effettuate a condizioni di giacimento (es. curve di capillarità, permeabilità relative, ecc.).

- Creazione finale del modello statico 3D con strumenti software del tipo SEM (Shared Earth Model) allo stato dell'arte (es. Petrel™) che permettono la modellazione e visualizzazione tridimensionale di geometrie anche molto complesse, integrando tutti i dati disponibili alle diverse scale (Fig. 2.1). Con tale modello si ottiene la valutazione quantitativa degli idrocarburi inizialmente in posto (es. GOIP) nel giacimento, ed è anche possibile l'estrapolazione dei parametri petrofisici alle zone poco controllate da dati di pozzo (es. per l'acquifero) integrando le informazioni provenienti dal modello sedimentologico.

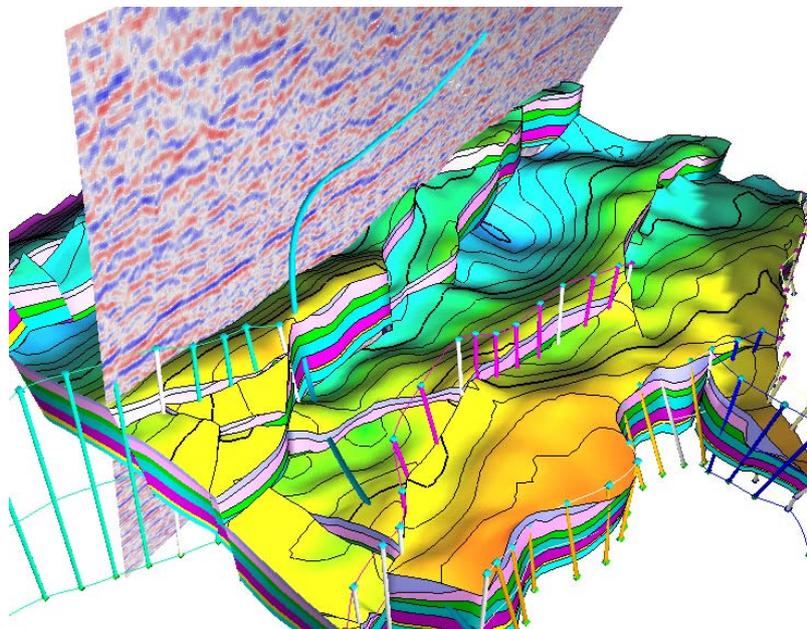


Fig. 2.1 – Modello SEM realizzato con Petrel™

2.1.2 Modelli dinamici di giacimento

I modelli dinamici sono utilizzati negli studi d'ingegneria del petrolio per pianificare lo sviluppo di un giacimento e per individuare, in fase di coltivazione, le azioni necessarie ad ottimizzare il recupero d'idrocarburi dallo stesso.

Il loro impiego negli studi di subsidenza riveste particolare importanza in quanto, in relazione ad un determinato profilo di produzione, consentono di prevedere:

- le variazioni di pressione e saturazione indotte in giacimento;
- le variazioni di pressione indotte in acquifero;
- le eventuali interazioni idrauliche fra giacimenti vicini;
- la ripressurizzazione del giacimento e/o degli acquiferi in caso d'iniezione di fluidi (es. acqua).

Lo stato dell'arte attuale contempla la possibilità d'impiegare due tipi fondamentali di modelli dinamici, ovvero:

- modelli dinamici 3D;
- modelli monocella.

Modelli dinamici 3D

I modelli dinamici 3D rappresentano attualmente lo strumento più evoluto e più completo per lo studio del comportamento di un giacimento e, quindi, per calcolare la distribuzione spaziotemporale della pressione e delle saturazioni dei fluidi (olio, gas, acqua) in esso presenti [ad es. Aziz e Settari, 1979].

Nell'industria petrolifera è ormai standardizzato l'uso di modelli 3D (es. Eclipse™) alle differenze finite (FD) che fanno uso di griglie per risolvere ad intervalli di tempo discreti i campi di pressione e di saturazione che s'instaurano nel giacimento con la produzione.

Nel caso di modelli dinamici 3D finalizzati a studi predittivi di subsidenza, tali griglie sono costruite in modo tale da includere al loro interno, oltre ovviamente al giacimento, anche una larga parte dell'acquifero circostante. Tale parte deve essere sufficientemente ampia da evitare che nel corso delle simulazioni il disturbo di pressione generato dalla produzione possa raggiungere il bordo esterno della griglia stessa, alterando così artificiosamente il calcolo del campo di pressione.

Nel costruire ed estendere la griglia all'acquifero si deve sempre verificare se nell'area in esame siano presenti discontinuità strutturali (es. faglie sealing) e/o variazioni di litologia tali da rappresentare una barriera alla propagazione del disturbo di pressione. In questo caso si è in presenza di un evidente "limite fisico" del campo di moto dei fluidi oltre il quale non ha alcun significato estendere la griglia.

La griglia prescelta è sovrapposta al modello statico 3D del sistema "giacimento + acquifero" generando celle o blocchi che costituiscono l'unità fondamentale del calcolo. A ciascuna di tali celle sono attribuiti valori dei parametri geometrici (es. profondità, spessore gross) e petrofisici (es. porosità, permeabilità, rapporto spessore net/spessore gross, ecc.) dedotti dal sopraccitato modello statico.

Lo stato iniziale (i.e. non perturbato dalla produzione) del sistema "giacimento + acquiferi" è riprodotto con il modello imponendo ai fluidi (es. gas ed acqua) presenti nel sistema stesso una condizione d'equilibrio idraulico che rispetti le pressioni iniziali e le quote iniziali dei contatti (es. gas-acqua) misurate ai pozzi.

Se il giacimento è già stato aperto alla produzione, la sua storia passata viene riprodotta con il modello fissando da un lato le portate storiche degli idrocarburi prodotti e dei fluidi iniettati, e modificando dall'altro i parametri ritenuti più incerti del modello statico (es. permeabilità, quote dei contatti, ecc.) in modo da calcolare un andamento temporale delle pressioni e dei rapporti gas/acqua (o olio/acqua e gas/olio a seconda dei casi) che sia in accordo con i valori misurati ai pozzi per tali parametri.

Con questo procedimento, noto come calibratura o *history match*, si valida il modello statico e si assicura che il campo di pressione calcolato dal modello sia il più possibile coerente con la reale distribuzione della pressione nei livelli in produzione. E' da sottolineare che nella fase di *history match* sono da considerare tutti i pozzi, anche i non produttivi, per i quali siano disponibili misure di pressione che possano permettere una migliore definizione del campo di depressurizzazione all'interno delle regioni di acquifero.

Dopo la fase di calibratura, il modello dinamico è impiegato per prevedere il comportamento futuro del giacimento in relazione a differenti scenari e vincoli di produzione (fase di *forecast*). I risultati che si ottengono in tale fase sono i cosiddetti "profili di produzione" ad ognuno dei quali è associato un determinato campo di depressurizzazione del sistema "giacimento + acquiferi".

Nel caso di modelli dinamici 3D finalizzati a studi di subsidenza è importante che le simulazioni della fase di forecast siano estese oltre (es. 20-30 anni) il termine della vita produttiva del giacimento al fine di valutare per un adeguato periodo di tempo come si propaga il disturbo di pressione nell'acquifero.

Nel caso di progetti di sviluppo di nuovi giacimenti, non è ovviamente possibile calibrare il modello dinamico 3D. In tale situazione può essere opportuno effettuare "sensitivity tests" sui quei parametri geometrici o petrofisici del modello statico (es. permeabilità, quote dei contatti gas-acqua, ecc.) che si ritengono affetti da maggior incertezza.

Modelli dinamici monocella

L'approccio più semplice per simulare la produzione di un giacimento d'idrocarburi è rappresentato dai cosiddetti modelli monocella o *material balance*.

Il giacimento è schematizzato come un singolo serbatoio di roccia porosa nel quale sono contenuti i fluidi adeguatamente caratterizzati da un punto di vista termodinamico. S'ipotizza, inoltre, che la pressione assuma uno stesso valore, pari al valor medio, in ogni punto di detto serbatoio e che tale valore vari solo nel tempo. Il modello non simula perciò il moto dei fluidi all'interno del giacimento, ma calcola unicamente gli effetti di espansione/compressione del sistema fluidi/roccia serbatoio conseguenti ai processi di produzione e/o iniezione. Il contributo degli acquiferi in comunicazione idraulica con gli intervalli produttivi è introdotto mediante espressioni analitiche.

In definitiva, il modello monocella consente di calcolare solo l'andamento della pressione media del giacimento nel corso della sua vita produttiva, storica e futura, e non fornisce una distribuzione spaziale della pressione stessa all'interno del giacimento e dell'acquifero eventualmente comunicante.

Il modello monocella, pur essendo molto meno sofisticato di quelli 3D, è tuttora largamente impiegato a scala internazionale per studi di giacimento, in quanto consente d'avere rapidamente una visione d'insieme dei meccanismi fisici che controllano la produzione.

Per gli studi dinamici finalizzati alla previsione di subsidenza può ancora trovare impiego in quei casi in cui i dati geologici e geofisici siano così limitati da non consentire la costruzione di un dettagliato modello statico, ovvero in quei casi in cui l'obiettivo principale dello studio sia una previsione del valore massimo della subsidenza e non interessi definire l'andamento del cono di subsidenza.

2.1.3 Modelli geomeccanici

I modelli geomeccanici sono impiegati per prevedere le variazioni dello stato tensionale e le conseguenti deformazioni indotte sia nella roccia serbatoio che nelle rocce delle formazioni circostanti dalle variazioni di pressione che si hanno nel sistema "giacimento + acquiferi" per effetto della produzione. Costituiscono, pertanto lo strumento principale per effettuare previsioni della subsidenza indotta dall'estrazione di fluidi dal sottosuolo.

La pratica corrente dell'industria petrolifera, ovvero lo stato dell'arte attuale, vede l'impiego di uno dei tre seguenti modelli geomeccanici:

- modello di Geertsma analitico;
- modello di Geertsma semianalitico;
- modello ad elementi finiti (FEM).

Modello di Geertsma analitico

Il problema del calcolo della subsidenza generata da una depressurizzazione in strati porosi e permeabili è stato risolto per la prima volta da *Geertsma* [1973]. Dal lavoro di *Mindlin e Cheng* [1950], Geertsma ha mutuato il concetto di nucleo di deformazione, inteso come una porzione elementare di materiale poroso che per depressurizzazione subisce una variazione di volume. Quest'ultima, a sua volta, si trasmette in superficie con modalità che dipendono sia dalla geometria del sistema, sia dalle caratteristiche meccaniche delle rocce delle formazioni sovrastanti (*overburden*) e sottostanti (*underburden*) dando luogo alla subsidenza.

Geertsma fornisce le equazioni che permettono di calcolare gli spostamenti di un punto qualsiasi (in superficie o in profondità) dovuti alla variazione di volume del nucleo di deformazione. Le ipotesi fondamentali della teoria richiedono che il nucleo appartenga a un semi-spazio infinito,

che il materiale deformantesi sia omogeneo, isotropo e che abbia proprietà meccaniche del tipo elastico-lineare. Queste ultime sono completamente definite da soli due parametri: la comprimibilità uniassiale C_m e il coefficiente di Poisson ν .

Sulla base delle precedenti ipotesi ed utilizzando il principio di sovrapposizione degli effetti, Geertsma ha calcolato poi per via analitica la subsidenza indotta dalla depressurizzazione uniforme di un giacimento a forma cilindrica (Fig. 2.2).

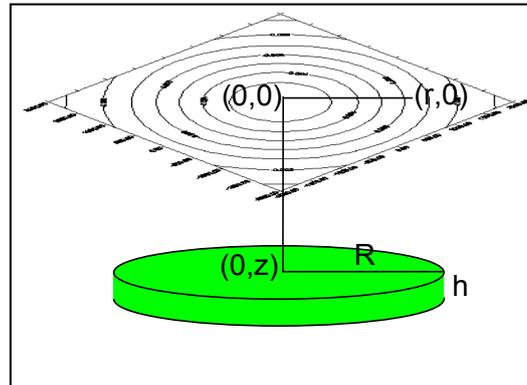


Fig. 2.2 – Schema del modello di Geertsma analitico

Nel modello analitico il valore massimo di subsidenza u_{max} si ha ovviamente in corrispondenza dell'asse del cilindro ed è espresso da:

$$u_{max} = -2(1-\nu) \left(1 - \frac{c/R}{\sqrt{1+(c/R)^2}} \right) c_m h \Delta p$$

ove:

c = profondità del top del cilindro;

h = spessore del cilindro;

R = raggio del cilindro;

Δp = abbassamento di pressione nel cilindro (i.e. giacimento).

Nel caso di giacimenti costituiti da più livelli mineralizzati in produzione, si assimila ognuno di questi ad un cilindro, che, pertanto, può essere di raggio e spessore diversi da livello a livello, e con il modello analitico se ne calcola la subsidenza indotta. Sommando il contributo dei singoli livelli si ottiene la subsidenza complessiva relativa a tutto il giacimento.

E' importante sottolineare che nell'applicazione di tale procedimento si devono usare valori dei parametri C_m e ν uguali per tutti i livelli. A tale proposito, particolarmente importante è la scelta del coefficiente C_m , che viene normalmente fatta attribuendo - in via cautelativa - a tutti i livelli il valore determinato in corrispondenza del livello meno profondo (ovvero il valore di C_m massimo) purché questi abbia uno spessore ed una depressurizzazione significativi.

Stante le ipotesi che ne sono alla base, il modello analitico ha dei limiti teorici che ne limitano il campo d'applicazione pratica, quali:

- a) l'assimilazione della reale geometria del giacimento a un cilindro equivalente. Ciò porta a calcolare un cono di subsidenza a sezione circolare con il centro posto in corrispondenza dell'asse del cilindro-giacimento; tale forma non è sempre rappresentativa della reale distribuzione degli spostamenti in superficie;

- b) l'ipotesi che il comportamento meccanico della roccia serbatoio e delle formazioni ad esso sovrastanti e sottostanti sia elastico-lineare con valori dei coefficienti C_m e ν costanti. Si trascurano così fenomeni quali la possibile variazione del C_m con la profondità e l'eventuale contributo alla subsidenza della deformazione plastica delle rocce;
- c) l'impossibilità, nel caso di acquiferi estesi, di calcolare il contributo alla subsidenza causato dalla depressurizzazione degli stessi.

Modello di Geertsma semi-analitico

Il modello di Geertsma semi-analitico è stato sviluppato per superare i limiti connessi alla geometria cilindrica di quello analitico (si vedano in proposito i precedenti punti a) e c)), pur basandosi sempre sia sull'ipotesi di un comportamento meccanico delle rocce del tipo elastico-lineare, sia sulla teoria del nucleo di deformazione.

Per poter trattare casi a geometria molto più complessa del semplice cilindro, è necessario disporre di un modello dinamico 3D del sistema "giacimento + acquiferi" le cui celle sono considerate come singoli nuclei di deformazione che si compattano ed inducono in superficie una subsidenza calcolabile con il modello analitico di Geertsma (Fig. 2.3).

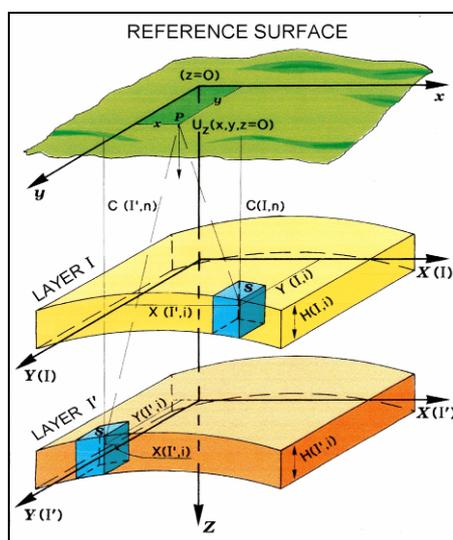


Fig. 2.3 – Schema del modello di Geertsma semi-analitico

La sommatoria dei contributi di tutte le celle del modello dinamico (i.e. sovrapposizione degli effetti) permette il calcolo della subsidenza complessiva che tiene così conto sia della effettiva geometria del sistema "giacimento + acquiferi", sia di una più realistica distribuzione spaziale della depressurizzazione nel sistema stesso. La ripetizione del calcolo per ognuno degli intervalli di tempo con cui è stata fatta la simulazione dinamica 3D consente inoltre di seguire nel tempo sia la propagazione del cono di subsidenza, che il variare del valore massimo della subsidenza stessa.

Nel caso di giacimenti costituiti da più livelli mineralizzati in produzione, la subsidenza complessiva si ottiene seguendo lo stesso procedimento descritto per il modello analitico, salvo impiegare per ogni livello il relativo modello dinamico 3D.

Il modello semianalitico, pur consentendo calcoli predittivi più affinati di quello analitico, presenta anch'esso dei limiti teorico-applicativi. L'ipotesi di comportamento meccanico elastico-lineare, in particolare, comporta la completa reversibilità delle deformazioni e, quindi, della compattazione e della subsidenza in caso di ripressurizzazione naturale o artificiale del sistema "giacimento + acquiferi". Tale reversibilità è da considerare un "artefatto" del calcolo in quanto è ben noto che la subsidenza è un fenomeno in larga misura irreversibile.

Modelli a Elementi Finiti (FEM)

La metodologia più completa, ma anche più complessa da un punto di vista teorico e applicativo rispetto a quanto descritto nei punti precedenti, attualmente impiegata in campo internazionale per gli studi predittivi di subsidenza si basa su modelli geomeccanici 3D ad elementi finiti (ad es. Abaqus™, Isamgeo™). Questi, infatti, consentono di prevedere le variazioni di stato tensionale e le deformazioni di corpi geologici (es. giacimenti, acquiferi) a geometria anche molto complessa, costituiti da rocce con proprietà meccaniche eterogenee da un punto di vista spaziale, anisotrope, non-lineari e suscettibili di fenomeni di creep.

Come nel caso dei modelli analitici e semi-analitici, anche per l'utilizzo di modelli 3D FEM negli studi di subsidenza è necessario conoscere preliminarmente il campo di pressione che s'instaura nel sistema "giacimento + acquiferi" a seguito della produzione. Tale informazione si ottiene dagli studi eseguiti con i modelli dinamici, che di norma sono 3D (es. Eclipse™) ma possono anche essere monocella.

A tale proposito si segnala che la metodologia seguita da Eni E&P [Consonni *et al.*, 2006] nell'utilizzo dei modelli FEM per studi di subsidenza prevede l'abbinamento di questi ultimi solo con modelli dinamici 3D e si colloca, quindi, nella fascia di più alto livello dell'attuale stato dell'arte.

Tale metodologia è articolata nelle seguenti fasi:

- a) *costruzione della griglia 3D FEM*
 - b) *inizializzazione del modello geomeccanico 3D FEM;*
 - c) *simulazioni con il modello geomeccanico 3D FEM.*
- a) *Costruzione della griglia 3D FEM*

La griglia di simulazione utilizzata per il modello FEM viene costruita a partire da quella del modello dinamico 3D. Le due griglie, infatti, pur avendo geometrie diverse in quanto relative a metodi matematici concettualmente differenti (FEM vs. FD), devono comunque essere fra loro del tutto consistenti, non solo perché vengono applicate allo stesso modello statico, ma soprattutto perché devono consentire un corretto trasferimento delle pressioni calcolate dal modello dinamico a quello FEM. Nella Fig. 2.4 è mostrato l'esempio di un caso reale dell'ottima consistenza raggiunta fra il campo di pressione riprodotto all'interno del modello geomeccanico e quello originato dal modello di flusso.

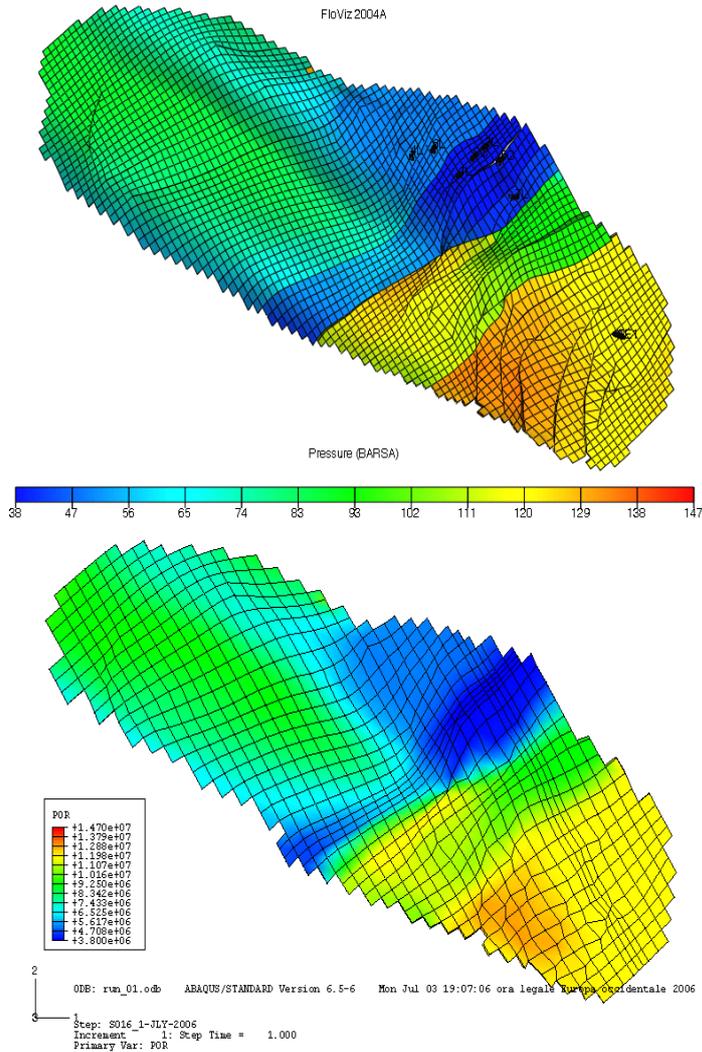


Fig. 2.4 – Campo di pressione nel modello di flusso (sopra) e geomeccanico (sotto) per la sola regione del giacimento

Caratteristica peculiare della griglia FEM, inoltre, è di essere sempre molto più ampia in senso orizzontale e verticale di quella del modello dinamico. Viene estesa, infatti, non solo a tutte le formazioni sovrastanti (*overburden*) il sistema “giacimento + acquiferi” per poter calcolare la subsidenza, ma anche a quelle sottostanti (*underburden*) per “evitare “effetti numerici” di bordo che alterino artificialmente il calcolo dello stato tensionale e delle deformazioni. Per lo stesso motivo la griglia FEM è anche estesa orizzontalmente in misura maggiore di quella impiegata nei modelli dinamici 3D (Fig. 2.5).

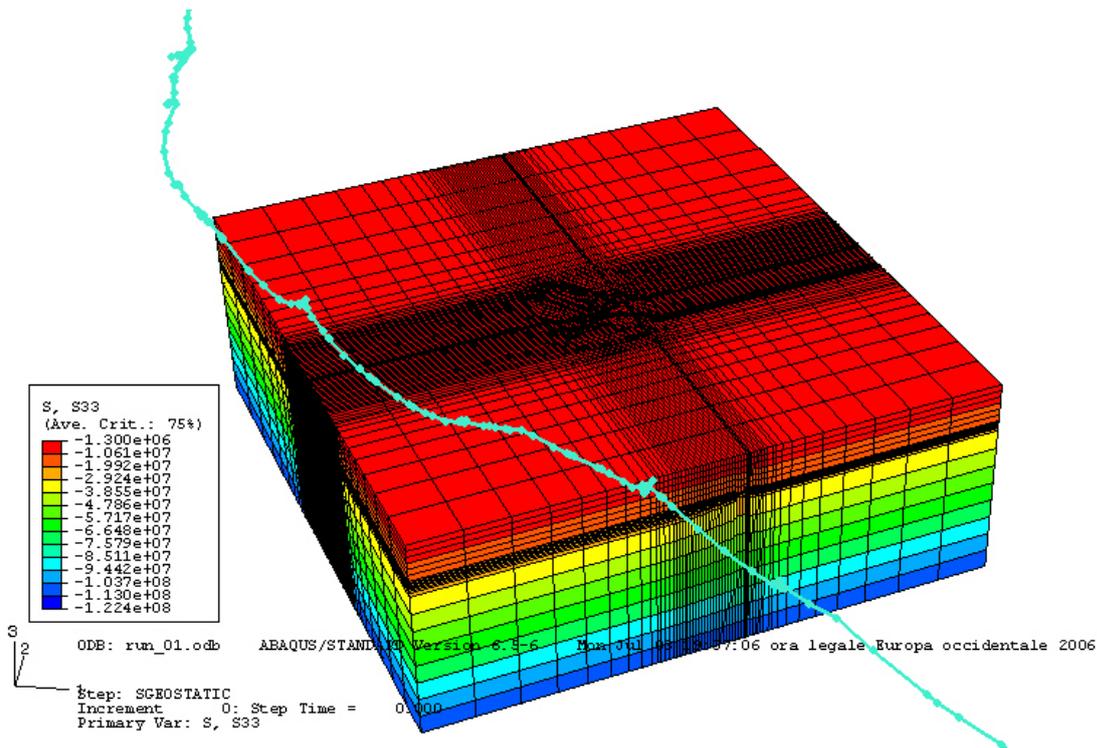


Fig. 2.5 – Griglia di un modello FEM. La coordinata Z è stata amplificata di un fattore 3

b) Inizializzazione del modello geomeccanico 3D FEM

Una volta costruita la griglia ed assegnate le pressioni iniziali, si procede all'inizializzazione del modello FEM attribuendo alle singole celle le proprietà della roccia in funzione della posizione che occupano nello spazio.

Si assegnano, in particolare, le densità ricavate dai log, il peso specifico dei fluidi saturanti, l'indice dei vuoti e la legge costitutiva che normalmente è del tipo elasto-plastico (es. Cam Clay modificato).

Il campo di stress iniziale viene quindi calibrato per riprodurre i valori di stress orizzontale dedotti da misure in pozzo (es. leak-off test, minifrac, analisi dei break-out e dei log di immagine).

Le condizioni al contorno assegnate al modello consistono in spostamenti nulli alla base della griglia e spostamenti orizzontali impediti sui lati esterni. L'estensione orizzontale e verticale della griglia di cui si è detto al punto precedente garantisce il rispetto di queste le condizioni al contorno e, quindi, l'aderenza alla realtà fisica del fenomeno.

c) Simulazioni con il modello geomeccanico 3D FEM

Con il modello FEM inizializzato si eseguono simulazioni per valutare la compattazione del sistema "giacimento + acquiferi" e l'eventuale subsidenza indotta dalla produzione. I calcoli sono effettuati normalmente per passi di tempo regolare (es. 5 anni) a partire dall'inizio della coltivazione del giacimento, e sono prolungati ben oltre la fine della vita produttiva del giacimento per periodo di tempo identico a quello considerato nel modello dinamico 3D (es. 20-30 anni) al fine soprattutto di prevedere l'estensione temporale del cono di subsidenza. Come già detto in precedenza, i dati di pressione necessari per i calcoli con il modello FEM ai diversi passi di tempo sono estratti da quello dinamico.

Come per i modelli dinamici, la metodologia di studio della subsidenza si differenzia a seconda che il giacimento abbia una storia di produzione e siano disponibili misure di compattazione e/o di subsidenza, ovvero che il giacimento stesso non abbia mai prodotto o manchino tali misure. Nel primo caso si procede ad una fase di calibratura (*history match*) del modello FEM seguita da

una serie di forecast corrispondenti ai diversi scenari di sviluppo del campo. Nel secondo caso, si eseguono test di sensitività per tener conto della possibile variabilità delle caratteristiche meccaniche della roccia.

c-1) Simulazioni con il modello geomeccanico 3D FEM in presenza di dati misurati

Se sono disponibili misure di compattazione e/o di subsidenza, il modello FEM viene calibrato modificando le proprietà geomeccaniche - in particolare il coefficiente di comprimibilità C_m - all'interno di un campo di valori fisicamente accettabili per la roccia considerata, in modo da riprodurre le misure stesse. Qualora dette variazioni di C_m superino una soglia d'accettabilità, è necessario rivedere anche il campo di pressione calcolato con il modello dinamico 3D.

A tale scopo si esaminano le ipotesi alla base dell'*history match* di tale modello dinamico modificando i parametri più incerti così da ottenere una nuova calibratura dello stesso. Sulla base di quest'ultima si effettua una nuova simulazione geomeccanica i cui risultati sono a loro volta nuovamente confrontati con i dati misurati.

Di fatto si segue una procedura per "*trial and error*" che viene ripetuta fino ad ottenere un match di tutti i dati misurati che sia soddisfacente e dal punto di vista del modello dinamico e di quello geomeccanico. In Fig. 2.6 è mostrato un esempio di match dei dati di compattazione da marker.

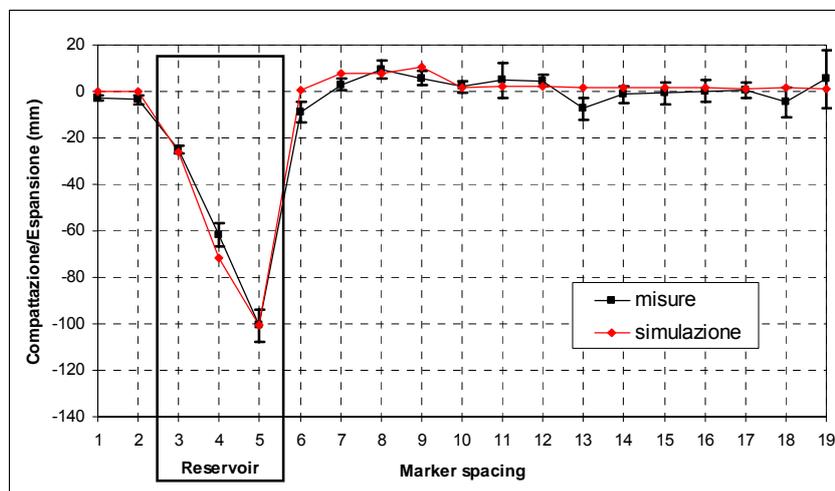


Fig. 2.6 – Esempio di match dei dati di compattazione

Una volta ottenuto il match, si procede alla simulazione dei vari scenari di sviluppo fino a definire l'andamento nel tempo del fenomeno della subsidenza in termini di valore massimo ed estensione del cono che si assume corrispondere alla linea di iso-subsidenza di 2 cm.

c-2) Simulazioni con il modello geomeccanico 3D FEM in assenza di dati misurati

In assenza di dati misurati di compattazione e/o di subsidenza il modello FEM è utilizzato direttamente in modalità predittiva. Stanti, però, le incertezze che normalmente si hanno per i valori delle proprietà geomeccaniche ed in particolare per il coefficiente C_m , è buona norma effettuare test di sensitività su tale coefficiente.

A tale scopo si procede definendo una legge di distribuzione di probabilità per il C_m in funzione dello stress efficace, utilizzando dati da misure dirette, se disponibili, o dati da giacimenti analoghi, od ancora sulla base delle caratteristiche delle rocce (es. sabbie non consolidate, arenarie, calcari, ecc.) del bacino in cui si trova il giacimento in esame. Successivamente si effettuano tre diverse simulazioni FEM, utilizzando il valore di C_m più probabile, e quelli corrispondenti agli estremi dell'intervallo 5%-95%. Si otterrà così sia la stima del valore atteso (i.e. più probabile) della subsidenza massima ed il range di confidenza in cui tale valore ricade.

Analoghe considerazioni valgono per l'estensione massima del cono di subsidenza (linea di iso-subsidenza di 2 cm).

2.2 Caratterizzazione geomeccanica delle rocce per le previsioni di subsidenza

Nella precedente descrizione dei modelli geomeccanici (analitico, semi-analitico, FEM) impiegati per le previsioni di subsidenza si è visto che il loro impiego richiede la caratterizzazione delle proprietà geomeccaniche della roccia, ed in particolare la determinazione del coefficiente di comprimibilità uniassiale C_m , che è definito come:

$$C_m = -\frac{1}{h} \frac{\Delta h}{\Delta \sigma_e} \quad [1]$$

ove:

h = spessore dello livello che si compatta,

$\sigma_e = \sigma_t - p$ è lo sforzo o tensione efficace,

σ_t = sforzo o tensione totale dovuto al peso dei sedimenti sovrastanti il livello,

p = pressione dei pori del livello.

Altri parametri, quale ad esempio il coefficiente di Poisson, rivestono un ruolo di solito non critico nei calcoli di previsione di subsidenza.

Il coefficiente C_m non è in generale una quantità costante, ma varia con lo stato tensionale della roccia e, quindi, con la profondità cui la stessa si trova. Dipende, altresì, dalla litologia, dalla composizione mineralogica e dalla porosità della roccia nonché dalla storia geologica cui la stessa è stata sottoposta.

Il coefficiente C_m può essere misurato attraverso:

- prove di laboratorio (ad es. prove edometriche);
- misure in situ (usando marker).

2.2.1 Misure di laboratorio

Il metodo più semplice e più impiegato in laboratorio per la misura della comprimibilità uniassiale è la prova edometrica (Fig. 2.7). Per questo tipo di test è necessario disporre di carote di fondo della formazione da studiare, dalla quale si prelevano piccoli campioni che sono compressi in un contenitore cilindrico sufficientemente rigido da impedire la loro dilatazione laterale.

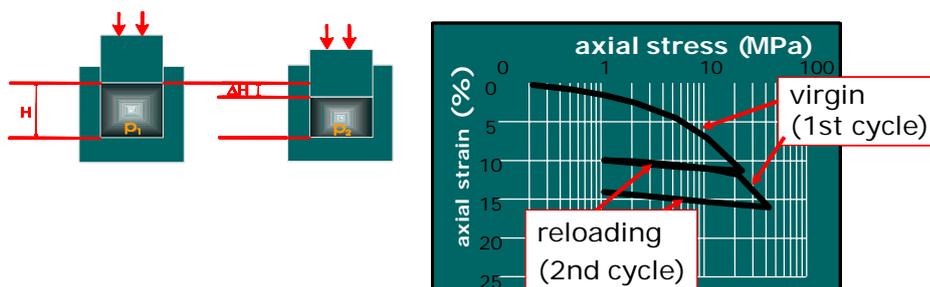


Fig. 2.7 Schema e risultato di una prova edometrica.

La comprimibilità uniassiale è calcolata secondo la relazione [1] come rapporto fra la deformazione assiale nell'edometro e l'incremento di sforzo assiale necessario a produrla. Dato che la rigidità del campione aumenta in genere al crescere dello sforzo assiale applicato, si avrà una parallela diminuzione del coefficiente C_m .

Le misure di C_m ottenute da prove edometriche di laboratorio presentano, però, alcuni aspetti critici, quali:

- il disturbo arrecato ai campioni di roccia nel corso delle operazioni di carotaggio, recupero e immagazzinamento che indebolisce la struttura della roccia stessa e ne limita, quindi, la rappresentatività;
- il carico sul campione che non è indotto da una diminuzione della pressione dei pori, come avviene nella realtà, ma attraverso una variazione della tensione efficace applicata dall'esterno;
- sono completamente trascurati gli effetti del tempo e dell'invecchiamento dei campioni.

Per contro, i vantaggi nell'uso di prove di laboratorio sono:

- un miglior controllo dell'accuratezza delle misure;
- una ben definita corrispondenza fra tensione efficace applicata e deformazione;
- la possibilità di esplorare un intervallo molto ampio di deformazioni.

L'interpretazione classica dei test edometrici si basa sulla determinazione del valore dello sforzo massimo cui il campione di roccia in esame è stato sottoposto nel corso della sua storia geologica. A tale valore corrisponde una transizione da un comportamento elastico del campione a un comportamento plastico dello stesso per effetto di sforzi superiori a quello massimo subito nel passato. Quest'ultimo comportamento è quello che il materiale esibirà in giacimento per effetto della depressurizzazione indotta dalla produzione d'idrocarburi.

Se lo stress in corrispondenza a questa transizione uguaglia lo stato di stress attuale in situ, si parla di condizioni di consolidamento normale. In tali condizioni, il valore di comprimibilità rappresentativo della condizione del campione in situ dovrebbe essere il valore di 1° ciclo di carico del test edometrico, ovvero il valore di comprimibilità in condizioni plastiche.

Nella realtà, però, si è visto che il 1° ciclo di carico delle tradizionali prove edometriche non rappresenta adeguatamente il comportamento effettivo delle rocce a condizioni di giacimento, e che le misure fatte con il 2° ciclo di carico sono più prossime al comportamento delle rocce stesse osservato in campo.

Per descrivere la differenza fra 1° e 2° ciclo di carico si consideri la Fig. 2.8. La comprimibilità da 1° ciclo di carico si ottiene mettendo nell'edometro un campione tal quale prelevato dalla carota e sottoponendolo ad un carico crescente sino al valore indicato dal punto A, corrispondente allo stress efficace in situ. Tale processo di carico provoca una certa deformazione permanente che è visualizzata nella Fig. 8 dalla curva di "scarico" tracciata dal punto A al punto B. In tale figura è anche evidenziata la comprimibilità del 1° ciclo come reciproco della pendenza della curva di carico nel punto A. Nel 2° ciclo, dopo lo scarico fino al punto B, il campione è di nuovo caricato sino a riportarlo allo stato tensionale indicato dal punto A. La comprimibilità del 2° ciclo nel punto A è chiaramente inferiore a quella del 1° ciclo. Ciò è causato dalla deformazione permanente che contribuisce al "risanamento" del campione, eliminando almeno in parte il danneggiamento subito dal campione stesso durante il suo prelievo.

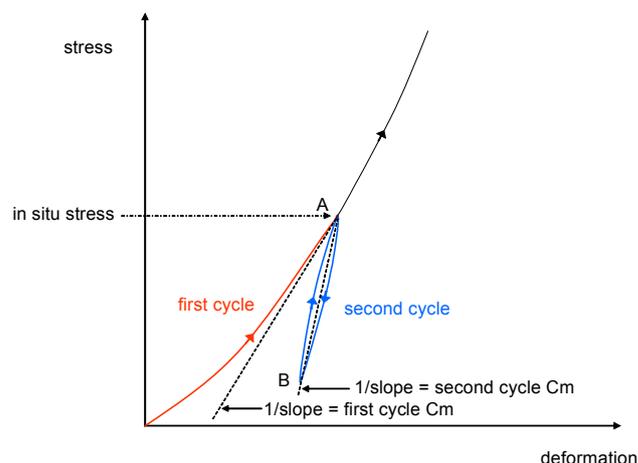


Fig. 2.8 Cicli di carico, scarico e ricarico

A partire dalla metà degli anni '80, l'uso della comprimibilità da curve di 1° ciclo di carico non è più stato seriamente considerato come opzione per il calcolo della subsidenza per giacimenti profondi. Infatti, sia gli ambienti scientifici [Brighenti e Fabbri, 1982, Holt et al., 1998] che professionali, incluse società quali Shell, NAM, e ConocoPhillips, hanno iniziato a sostenere l'inadeguatezza e la non rappresentatività del coefficiente di comprimibilità misurato nel "1° ciclo di carico" delle prove edometriche a causa del danneggiamento subito dal campione durante le operazioni di carotaggio, prelievo e immagazzinamento.

Diversi lavori scientifici hanno sottolineato, invece, come l'uso del 2° ciclo di carico, o di comprimibilità comprese tra il 1° ed il 2° ciclo di carico, fossero preferibili in quanto più prossime ai valori osservati in campo o con misure in situ (Dusseault and van Domselaar, 1982; Gambolati et al., 1991).

Quanto sopra riportato è ben esemplificato dalle esperienze fatte tra gli anni '80 ed inizio anni '90 nello studio della subsidenza di due importanti campi a gas europei: **Groningen** (Olanda) e **Ravenna Terra** (Italia).

Nel caso di **Groningen** la società NAM (Nederlandse Aardolie Maatschappij, joint venture fra Exxon and Shell) aveva fatto negli anni '70 una previsione di subsidenza basandosi su un valore di comprimibilità C_m ottenuto come media fra le misure di 1° e 2° ciclo edometrico eseguite su più di 500 campioni di roccia. Secondo tale previsione la subsidenza massima al 1990 avrebbe dovuto essere di circa **60 cm** [Geertsma and van Opstal, 1973]. Livellazioni di precisione eseguite nel 1989 hanno dato invece come massimo un valore di **18 cm** [Doornhof, 1992], un terzo circa di quanto inizialmente stimato. Misure in situ fatte con marker installati nel campo negli anni '80 hanno portato a stimare per la roccia serbatoio di Groningen un coefficiente C_m pari circa il 1/3-1/2 di quello inizialmente derivato dalle prove di laboratorio, in linea con la subsidenza massima effettivamente misurata.

Del tutto analogo è il caso del campo di **Ravenna Terra**. Una speciale Commissione Scientifica nominata dal Comune di Ravenna ha studiato alla fine degli anni '80 la subsidenza indotta dalla produzione di gas di questo campo. Utilizzando un modello geomeccanico FEM e valori di C_m intermedi fra il 1° e 2° ciclo misurati su campioni di carote prelevate in un pozzo perforato ad hoc, gli esperti di tale Commissione hanno stimato che la subsidenza massima dovuta alla produzione di gas fosse di circa **65 cm** [Gambolati et al., 1991]. Dall'analisi di misure di livellazione fatte dal Comune di Ravenna è risultato invece che la subsidenza massima attribuibile all'estrazione di gas è di circa **10 cm** [Bertoni et al., 2005] (Fig. 2.9). Anche in questo caso si è osservato che la subsidenza misurata è risultata essere consistente con i valori di C_m misurati in situ con marker installati nei pozzi Eni dell'Alto Adriatico a fine anni '90.

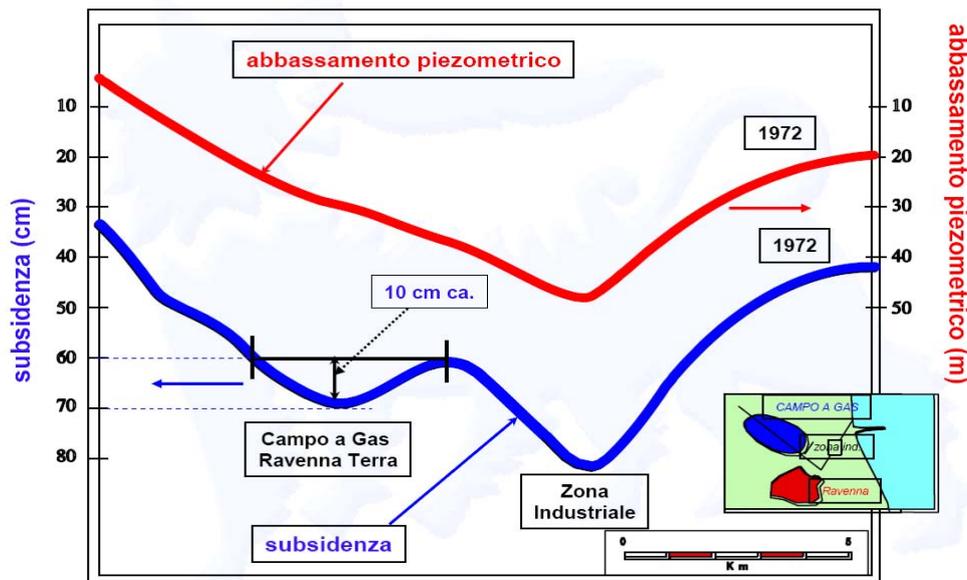


Fig. 2.9 Subsidenza misurata nell'area del giacimento di Ravenna Terra (periodo 1949-1972)

I limiti sperimentali dei test edometrici possono essere superati modificando in parte il procedimento di misura. E' stato, infatti, dimostrato che il disturbo indotto dalle operazioni di carotaggio e preparazione dei campioni può essere almeno parzialmente cancellato sottoponendo i campioni stessi ad un periodo di "invecchiamento" in laboratorio.

L'invecchiamento si ottiene sottoponendo nell'edometro - per un periodo limitato di tempo (tipicamente due settimane) - i campioni a condizioni di stress efficace pari a quelli in situ. Durante tale periodo, il campione subisce una compressione secondaria, ovvero si compatta a condizioni di stress costante. Questa compattazione porta ad una ricostruzione, almeno parziale, della struttura del materiale danneggiata per effetto del carotaggio, preparazione ecc. L'invecchiamento riproduce quindi a scala di laboratorio, e quindi in tempi ridotti, i processi geologici cui i sedimenti reali sono sottoposti in situ per migliaia o milioni d'anni.

Dopo periodi d'invecchiamento relativamente brevi, anche i valori di comprimibilità da prove edometriche risultano molto più prossimi a quelli ottenuti in situ con misure su marker [Hueckel et al. 2001]. L'invecchiamento può essere, pertanto, il solo meccanismo che spiega, in aggiunta al danneggiamento dei campioni, la discrepanza fra la (reale) comprimibilità in situ e i risultati di laboratorio che hanno fatto uso soltanto del 1° ciclo di carico.

2.2.2 Misure in situ con marker radioattivi

Si è visto in precedenza per i casi di Groningen e Ravenna Terra come misure in situ con marker colgano con buona precisione il comportamento meccanico reale delle rocce nel loro stato naturale.

La loro applicazione si è, quindi, diffusa negli anni '90 (es. i campi ad olio di Ekofisk e Valhall nel Mare del Nord, campi a gas del Golfo del Messico, campi a gas dell'Adriatico, ecc.) ed è divenuta prassi standard a livello internazionale. Maggiori dettagli sull'impiego di questa tecnologia sono riportati nella sezione 3.6 del presente rapporto dedicata ai monitoraggi.

In linea di massima si può dire che le misure in situ con marker presentano i seguenti vantaggi:

- non è necessario alcun prelievo di campione, ovvero il campione è sottoposto a prova nel suo ambiente naturale (Fig. 2.10);
- nelle prove in situ la dimensione verticale di un campione è di circa 10 metri (i.e. distanza fra 2 marker consecutivi), perciò si ottiene in modo naturale una misura di comprimibilità

equivalente a quella di 500 ipotetici campioni, di porosità variabile, sottoposti a prove edometriche;

- l'estensione della possibile zona disturbata intorno al pozzo è molto più piccola della dimensione del campione;
- non sussiste alcuna necessità di fare assunzioni sulle condizioni iniziali cui sottoporre il provino in laboratorio. Il metodo dell'utilizzo dei marker consente di seguire il comportamento del materiale durante un lungo periodo della sua storia di carico.

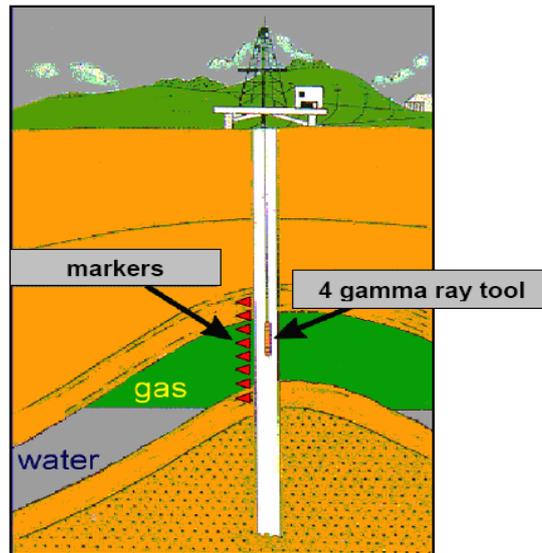


Fig. 2.10 Schema di pozzo equipaggiato con marker

Per contro anche l'uso dei marker presenta alcune criticità, quali:

- il calcolo della comprimibilità a partire dalle misure con marker richiede una stima accurata della pressione in situ e della sua evoluzione nel tempo: tale stima va di solito effettuata tramite monitoraggio delle condizioni del giacimento ed interpretazione dei dati spesso per mezzo di modelli matematici;
- la misura dello spostamento dei marker va effettuata tramite sonde calibrate che operano nelle difficili condizioni tipiche di pozzi profondi.

Le stime di comprimibilità uniassiale derivate da marker radioattivi sono dunque le più attendibili. Le misure effettuate con i marker hanno un costo elevato a causa soprattutto della necessità di perforare pozzi parzialmente o totalmente dedicati a questo tipo di misura. ENI tende perciò, in un'analisi costi-benefici, a limitare il ricorso a questa tecnica alle situazioni di particolare sensibilità ambientale.

Di fatto non è necessario prevedere e attrezzare pozzi con marker radioattivi in ogni giacimento: è sufficiente dedicare alcuni pozzi, ben posizionati e monitorati regolarmente all'interno dello stesso bacino, per garantire la definizione di una relazione "regionale" di comprimibilità uniassiale.

Nel corso dei propri lavori la Commissione Scientifica Internazionale nominata da Eni nel 2002 ha rivisto e interpretato le misure di compattazione effettuate sino al Giugno 2003 nei pozzi attrezzati con marker dei campi a gas del Nord Adriatico.

In particolare la Commissione ha utilizzato tali misure per elaborare la seguente correlazione fra la comprimibilità uniassiale e la tensione efficace:

$$C_m = 0.01367 (\sigma_e)^{-1.16434} \quad [2]$$

ove:

C_m = comprimibilità uniassiale (bar^{-1}),

$\sigma_e = \sigma_t - p$ è lo sforzo o tensione efficace (bar),

σ_t = sforzo o tensione totale (bar),

p = pressione dei pori (bar).

L'insieme dei dati disponibili è stato, inoltre, sufficientemente ampio da consentire alla Commissione stessa di definire una legge di distribuzione di probabilità (5%-95%) associata alla sopracitata correlazione [Hueckel *et al.*, 2005 – Fig. 2.11].

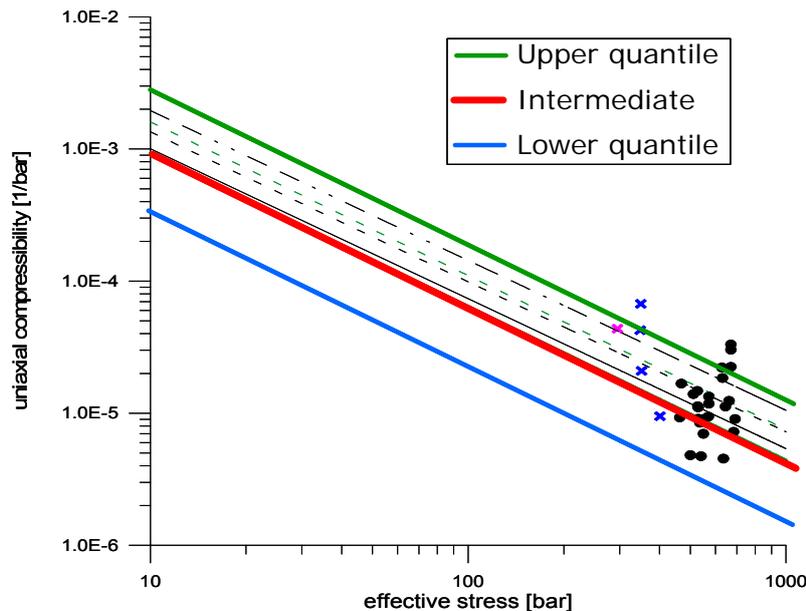


Fig. 2.11 Legge di compressibilità per il bacino dell'Alto Adriatico. Hueckel *et al.*, 2005

Le stesse misure da marker sono state oggetto di una approfondita analisi anche da parte di altri esperti che non solo hanno elaborato una correlazione del tutto equivalente a quella soprariportata [Baù *et al.*, 2002], ma hanno anche osservato che la correlazione stessa tende sottostimare la comprimibilità C_m per bassi valori dello sforzo efficace, ovvero a profondità relativamente basse. E' stato, quindi, raccomandato che in via cautelativa, per profondità orientativamente inferiori a 1500 m, i valori di C_m calcolati con la [2] siano corretti moltiplicandoli per 2 [Ferronato *et al.*, 2003].

2.3 Attuale stato dell'arte delle metodologie di previsione della subsidenza e loro evoluzione

Secondo a quanto si è potuto stabilire dagli studi condotti ad oggi nell'ambito, o comunque correlati all'attività svolta dal GdL, i modelli matematici quali quelli descritti in precedenza nella sezione 2.1, sono internazionalmente accettati come lo strumento migliore e più completo per valutare correttamente l'entità della subsidenza indotta dall'estrazione di fluidi dal sottosuolo.

L'accuratezza predittiva di tali modelli di subsidenza, però, dipende strettamente sia dalla qualità e quantità dei dati disponibili per la loro costruzione e per la loro calibratura, sia dalla corretta comprensione dei fenomeni fisici – fluidodinamico e geomeccanico – che si devono simulare.

La complessità della formulazione matematica che sta alla base di un dato modello non è, quindi, di per sé garanzia di qualità dei risultati. Ad esempio, se la ricostruzione geologico-strutturale del sistema "giacimento + acquifero" è lacunosa o molto incerta per mancanza di dati, l'uso di un

modello geomeccanico 3D FEM che incorpori sofisticate leggi costitutive non dà certo risultati più accurati di un semplice modello del tipo Geertsma semi-analitico.

Ciò premesso, le metodologie correntemente impiegate in campo internazionale per le previsioni di subsidenza, ovvero lo stato attuale dell'arte, sono le seguenti:

A) La costruzione del **modello statico 3D** del sistema “giacimento + acquifero” deve essere fatta integrando tutti i dati disponibili alle diverse scale (es. sismica 2D o 3D, geologia di bacino, dati di pozzo, ecc.) mediante strumenti software del tipo SEM (Shared Earth Model) allo stato dell'arte (es. Petrel™) che permettono la modellazione e visualizzazione tridimensionale di geometrie anche molto complesse. Particolare cura deve essere posta nell'individuare nell'area in esame quelle eventuali discontinuità strutturali (es. faglie sealing) e litologiche (es. variazioni di facies) che possono arrestare o, comunque, modificare in modo significativo, la propagazione del disturbo di pressione indotto dalla produzione del giacimento.

Si sottolinea, ancora una volta, che la qualità e l'accuratezza del modello statico condizionano fortemente l'attendibilità delle previsioni di subsidenza fatte con modelli matematici.

B) Il **modello dinamico 3D** del sistema “giacimento + acquifero” deve essere realizzato impiegando simulatori allo stato dell'arte (es. Eclipse™). Il modello stesso va calibrato con i dati storici di produzione (es. portate di gas e di acqua, misure di pressione statica, ecc.), se disponibili. Le previsioni di comportamento futuro del giacimento (i.e. profili di produzione) dovranno essere fatte considerando i principali scenari di sviluppo del giacimento. E', inoltre, opportuno che tali previsioni siano estese oltre (es. 20-30 anni) il termine della vita produttiva del giacimento al fine di valutare per un adeguato periodo di tempo come si propaga il disturbo di pressione nell'acquifero.

Nel caso non sia possibile calibrare il modello dinamico 3D e/o sussistano significative incertezze su determinati parametri geometrici o petrofisici del modello statico (es. estensione e permeabilità dell'acquifero, spessori gross, “tenuta idraulica” di faglie, ecc.) può essere necessario effettuare “sensitivity tests” variando i valori degli stessi in un range ritenuto fisicamente accettabile.

C) Le **proprietà geomeccaniche**, ed in particolare il coefficiente C_m , dei livelli del sistema “giacimento + acquifero” che si prevede di depressurizzare con la produzione, vanno caratterizzate avendo cura di stabilirne non solo il valore atteso, ma anche possibilmente il range di variabilità per effettuare eventuali “sensitivity tests”. A tale scopo vanno utilizzate misure dirette ottenute sia in laboratorio che in situ. Tale range di variabilità può essere sensibilmente ridotto se è possibile calibrare il modello geomeccanico su misure di campo della compattazione e/o della subsidenza.

In situazioni, come ad esempio nella fase preliminare di sviluppo di un campo, in cui non sono disponibili misure dirette si possono utilizzare dati “regionali” ottenuti da misure di laboratorio o in situ eseguite per giacimenti analoghi presenti nello stesso bacino, o dati di letteratura scelti sulla base delle caratteristiche litologiche e petrofisiche delle rocce (es. sabbie non consolidate, arenarie, ecc.) delle formazioni in cui si trova il giacimento in esame. In questa situazione è necessario tener conto dell'incertezza da cui è affetto il valore di C_m scelto, stimandone il relativo intervallo in funzione dello stress efficace ed effettuando test di sensitività in corrispondenza degli estremi dello stesso (tipicamente 5%-95%).

Con lo sviluppo del giacimento si potrà ridurre l'incertezza sul C_m tramite misure dirette eseguite in laboratorio su campioni prelevati da carote di fondo (si veda il punto 2.2.1) o misure in situ, equipaggiando nuovi pozzi con marker radioattivi.

D) I modelli geomeccanici 3D impiegati per il calcolo della compattazione e per la previsione della subsidenza possono essere del tipo ad **elementi finiti (FEM)** o **Geertsma semi-analitico**.

Il primo tipo, ovvero il modello 3D FEM, è quello attualmente preferito e più largamente impiegato negli studi geomeccanici in quanto consente di:

modellare con grande accuratezza non solo la geometria e le proprietà del “sistema + acquifero”, ma anche quelle delle formazioni circostanti (overburden, underburden e sideburden), tenendo conto delle complessità strutturali e delle variazioni di litologia che quasi inevitabilmente sono presenti nei grandi volumi di roccia che vengono studiati (ad es. nello studio geomeccanico eseguito nel 2006 per il campo di Regina, la griglia FEM impiegata è estesa 42 Km x 40 Km in senso orizzontale, e 5000 m in quello verticale);

incorporare leggi costitutive del tipo elasto-plastico (es. Cam Clay modificato) per descrivere il reale comportamento “isteretico” delle rocce, quando queste siano soggette a cicli di depressurizzazione-ripressurizzazione;

tener conto della variabilità in senso orizzontale e verticale delle proprietà meccaniche delle rocce (giacimento, acquifero e formazioni circostanti) modificando opportunamente i parametri della legge costitutiva.

Il modello di Geertsma semi-analitico può essere ancora impiegato (ed è tuttora impiegato), soprattutto per valutazioni preliminari di subsidenza, qualora:

si tratti di giacimenti di piccola estensione e spessore totale limitato;

si abbia una limitata variabilità sia in senso orizzontale che verticale delle proprietà meccaniche delle rocce costituenti il sistema “giacimento + acquifero + formazioni circostanti”, ovvero che il volume di roccia da modellare sia sostanzialmente omogeneo ed isotropo;

il comportamento meccanico di tali rocce possa essere descritto da una legge costitutiva del tipo elastico-lineare e non si verificano importanti fenomeni di ripressurizzazione in giacimento (ad es. seguito d’iniezione d’acqua).

2.4 Casistica internazionale

Nell’ambito dell’attività svolta, il GdL ha ritenuto opportuno svolgere anche una breve analisi riguardo come e con quali metodologie fosse affrontata nei paesi maggiormente sviluppati la problematica della stima della subsidenza connessa all’attività di coltivazione di giacimenti di idrocarburi.

A titolo esemplificativo di quale sia l’attuale stato dell’arte per gli studi di subsidenza, si riporta di seguito una breve sintesi delle metodologie utilizzate da tre delle principali compagnie petrolifere internazionali (ExxonMobil, Shell e ConocoPhillips) per gli studi predittivi di subsidenza eseguiti nell’ambito delle valutazioni d’impatto ambientale relative allo sviluppo di campi a gas ubicati nel NW del Canada, nel delta del fiume Mackenzie.

Si segnala che i livelli mineralizzati di tali campi sono formati da sabbie sciolte ed appartengono a sequenze litologiche formate da “sabbie-argille” simili a quelle che s’incontrano nei giacimenti a gas dell’Alto Adriatico.

1) Campo di Taglu operato da ExxonMobil

Previsione eseguita nel 2004 direttamente da ExxonMobil [*Haeberle et al.*, 2004; *Haeberle et al.*, 2005] con il seguente approccio:

dettagliato modello statico 3D per il giacimento ed acquifero connesso;

modello dinamico 3D per le previsioni di produzione (SW proprietario di ExxonMobil)

legge costitutiva del tipo elastico-lineare. Il coefficiente di comprimibilità C_m e il coefficiente di Poisson sono stati considerati variabili con la profondità e stimati a partire dai risultati di prove triassiali di laboratorio su campioni prelevati da carote di fondo. Le argille intercalate nei livelli

sabbiosi mineralizzati sono state assunte compattarsi come le sabbie (i.e. compattazione del gross pay);

modello geomeccanico 3D FEM per il calcolo della compattazione e subsidenza (SW proprietario di ExxonMobil).

eseguiti 5 casi di previsione di subsidenza variando i parametri geomeccanici ed il grado di depressurizzazione nei layers in cui è stato suddiviso il modello dinamico 3D. Per tutti i 5 casi la previsione è stata fatta per un periodo di 30 anni, corrispondenti alla sola vita produttiva del giacimento.

2) Campo di Niglintgak operato da Shell Canada.

Previsione eseguita nel 2002 direttamente da Shell e NAM [Dudley et al., 2005] con il seguente approccio:

Il rapporto non da dettagli sullo studio statico;

non è stato utilizzato uno studio di giacimento eseguito con modello dinamico 3D. Shell assume che l'acquifero connesso al giacimento non sia attivo e, pertanto, considera solo il valore massimo di depressurizzazione che si può raggiungere nel giacimento stesso ed in una piccola porzione dell'acquifero. Tale approccio, che è equivalente ad impiegare un modello dinamico monocella, è considerato dalla stessa Shell come cautelativo;

legge costitutiva del tipo elastico-lineare. Il coefficiente di comprimibilità C_m e il coefficiente di Poisson sono stati considerati variabili con la profondità e stimati a partire dalla composizione mineralogica delle sabbie tramite una correlazione "proprietaria" della Shell. Si è tenuto conto dell'intervallo d'incertezza del C_m stimando il valore atteso e quelli più probabile e meno probabile. Le argille intercalate nei livelli sabbiosi mineralizzati sono state assunte compattarsi come le sabbie (i.e. compattazione del gross pay);

modello geomeccanico 3D FEM per il calcolo della compattazione e subsidenza (SW GEOMECH proprietario di Shell);

eseguiti 7 casi di previsione di subsidenza variando i parametri geomeccanici ed il grado di depressurizzazione in giacimento. Per tutti i 7 casi la previsione è stata fatta per un periodo di tempo corrispondente alla sola vita produttiva del giacimento.

3) Campo di Parsons Lake operato da ConocoPhillips.

Previsione eseguita nel 2004 direttamente da ConocoPhillips [Nagel, 2004] con il seguente approccio:

- Il rapporto non da dettagli sullo studio statico;

non è stato utilizzato uno studio di giacimento eseguito con modello dinamico 3D. ConocoPhillips assume che l'acquifero connesso al giacimento non sia attivo e, pertanto, considera solo il valore massimo di depressurizzazione che si può raggiungere nel giacimento stesso. Tale approccio, che è equivalente ad impiegare un modello dinamico monocella, è considerato dalla stessa ConocoPhillips come cautelativo;

legge costitutiva del tipo elastico-lineare. Il coefficiente di comprimibilità C_m e il coefficiente di Poisson sono stati considerati costanti con la profondità e stimati integrando dati ottenuti a partire prove triassiali su campioni prelevati da carote di fondo e logs di pozzo. Nei calcoli di compattazione ConocoPhillips considera di norma il net pay (i.e. le argille intercalate non si compattano);

- modello geomeccanico del tipo Geertsma analitico (i.e. il giacimento è schematizzato come un cilindro) utilizzando sia la formulazione originale sviluppata dallo stesso Geertsma che una variante del modello stesso sviluppata dal Norwegian Geotechnical Institute (NGI);

presentati 6 casi di previsione di subsidenza variando il grado di depressurizzazione del giacimento, lo spessore del net pay e valutando il possibile contributo alla compattazione delle argille intercalate (nella misura del 50% del loro spessore) nei livelli sabbiosi. Per tutti i 6 casi la previsione è stata fatta per un periodo di tempo corrispondente alla sola vita produttiva del giacimento.

Da questa breve analisi si può dedurre che gli studi sinora condotti dall'ENI, sono in linea con quanto viene fatto a livello internazionale.

2.5 Interazione idraulica e meccanica fra giacimenti

Se due o più giacimenti si trovano ad una distanza tale per cui possano sussistere interazioni di tipo idraulico o meccanico fra gli stessi, è necessario considerare tale interazione negli studi predittivi di subsidenza.

Per interazione idraulica s'intende l'esistenza di una comunicazione tra i giacimenti tale che la depressurizzazione causata dalla produzione in uno di essi è "trasmessa" ad alcuni o tutti gli altri. Tale situazione può verificarsi quando uno o più livelli, in continuità geologica e dinamica tra più giacimenti, sono messi in produzione in almeno due di essi.

Per interazione meccanica s'intende invece l'effetto per cui, prescindendo dall'eventuale interazione idraulica, in uno stesso punto si sovrappongono le deformazioni provocate dalla depressurizzazione di due o più giacimenti.

E' opportuno precisare che l'interazione idraulica è sempre accompagnata da interazione meccanica; al contrario l'interazione meccanica può sussistere anche in assenza d'interazione idraulica.

2.5.1 Interazione idraulica

Per stabilire l'esistenza di un'eventuale interazione idraulica tra due giacimenti, in comunicazione tramite gli acquiferi connessi alle zone mineralizzate, occorre:

- verificare la continuità idraulica tra i livelli comuni con analisi di tutti i dati geologici e geofisici disponibili per accertare o escludere la presenza di eventuali discontinuità strutturali (es. faglie sealing) e/o litologiche (es. variazioni di facies) che possano agire da barriera alla propagazione del disturbo di pressione;
- analizzare le misure di pressione statica in pozzo per accertare eventuali scostamenti, indotti dalla produzione nei campi limitrofi, rispetto al profilo vergine. Dovranno essere presi in esame sia i pozzi nei vari livelli mineralizzati del giacimento, sia quelli nelle zone di acquifero.

2.5.2 Interazione meccanica

Per stabilire l'esistenza di un'eventuale interazione meccanica tra due giacimenti si deve verificare se le deformazioni causate dalla produzione nei giacimenti stessi si sovrappongono in zone comuni. In linea di principio è, quindi, necessario costruire modelli di subsidenza separati per ogni singolo giacimento, e analizzare le distribuzioni areali della subsidenza in ognuno di essi per accertare l'eventuale reciproca influenza.

In generale, però, un'analisi preliminare delle caratteristiche geologiche, meccaniche e di produzione di giacimenti prossimi può permettere di stabilire a priori l'opportunità di realizzare un modello geomeccanico globale dell'area in esame.

2.5.3 Utilizzo dei modelli matematici per gli studi d'interferenza

L'eventuale interazione – idraulica e/o meccanica – fra diversi giacimenti può essere adeguatamente studiata e prevista con i modelli matematici descritti nella sezione 2.1.

Ciò può essere fatto in due modi:

- a) Costruendo modelli 3D (statici, dinamici e geomeccanici) separati per ogni giacimento e che comprendano una porzione sufficientemente ampia di acquifero intorno ad ognuno di essi. In questo caso, la subsidenza complessiva è ottenuta sovrapponendo (i.e. sommando) i coni di subsidenza previsti per ogni giacimento. Si ritiene che questo procedimento sia sufficientemente preciso in caso di piccole deformazioni come ad esempio nelle zone più lontane dai giacimenti stessi, ovvero dove la depressurizzazione non sia troppo elevata.
- b) Costruendo un modello (regionale) che includa al suo interno tutti i giacimenti e relativi acquiferi: in questo modo le interazioni – idraulica e/o meccanica - sono considerate automaticamente. A questo scopo, il procedimento di calcolo più completo ed avanzato prevede la realizzazione, con le modalità precedentemente descritte ai punti 2.1.1, 2.1.2 e 2.1.3, di:
 - un unico modello statico 3D per tutti giacimenti e gli acquiferi circostanti opportunamente estesi, che tenga conto anche delle eventuali discontinuità strutturali e/o litologiche individuate nella parte di bacino studiata;
 - un unico modello dinamico 3D, calibrato sui dati storici di produzione dei giacimenti, se esistenti, ed utilizzato per prevedere l'evoluzione temporale del campo di depressurizzazione nell'area in esame;
 - un unico modello geomeccanico 3D FEM anch'esso calibrato su dati di compattazione e/o di subsidenza dell'area in esame, se disponibili, per prevedere i valori massimi di subsidenza e l'evoluzione temporale dell'estensione del relativo cono (assunta sempre in corrispondenza dell'isolinea di 2 cm).

E' da segnalare che mentre il secondo procedimento è concettualmente più solido, il primo garantisce comunque di non sottostimare la subsidenza complessivamente generata dalla produzione di tutti i giacimenti.

3 SISTEMI DI MONITORAGGIO IN-SITU E LUNGO LA COSTA ADRIATICA

Eni E&P utilizza per il monitoraggio della subsidenza offshore in Adriatico e lungo l'intero tratto di costa antistante ai propri giacimenti, tutte le tecniche più avanzate e universalmente riconosciute come le più efficaci per lo studio del fenomeno.

Le dimensioni del fenomeno stesso in quest'area, che presenta movimenti verticali limitati in valore assoluto, se confrontati con altre aree nel mondo in cui l'ordine di grandezza delle variazioni altimetriche è tale da consentire l'utilizzo anche di una sola di queste tecniche, ci ha da sempre spinto ad affrontare il problema servendosi in modo integrato quando e dove possibile di tutte le opportunità offerte dalle moderne tecnologie, aggiornate continuamente allo stato dell'arte.

Tali tecnologie infatti sono complementari tra loro e attraverso l'utilizzo integrato di tutte si può raggiungere una elevata precisione delle misurazioni ed un'affidabilità generale dei dati tale da rendere confidente il successivo step di interpretazione e di sintesi dei dati stessi.

Nel campo dei monitoraggi si è registrato nell'ultimo decennio un notevole progresso tecnologico che consente di pianificare, contestualmente al programma di coltivazione del giacimento, un efficace programma di monitoraggio degli effetti ambientali connessi alle estrazioni.

In particolare, in relazione alla problematica della subsidenza, si dovrebbe prevedere la misurazione di:

- pressioni di strato nelle formazioni geologiche da cui avviene la coltivazione, sia in giacimento che nell'acquifero;
- compattazione degli strati del giacimento;
- spostamenti verticali della superficie del terreno (subsidenza/rebound).

Per poter distinguere tra subsidenza antropica indotta dalla coltivazione di idrocarburi e subsidenza naturale e/o antropica per estrazione d'acqua dolce dalle falde superficiali è necessario che il monitoraggio degli spostamenti verticali della superficie del suolo interessi un'estensione areale sufficientemente ampia rispetto alla dimensione del giacimento e che siano eseguite misure di compattazione degli strati superficiali dai quali ha luogo l'estrazione d'acqua.

È altresì importante che il controllo della subsidenza venga avviato prima dell'inizio della coltivazione, si prolunghi per tutta la vita produttiva del giacimento e si estenda oltre per alcuni anni al fine di registrare l'eventuale subsidenza residua e/o il parziale *rebound* generati dal naturale riequilibrarsi delle pressioni di strato.

Altre tipologie di monitoraggio che possono risultare utili nell'ambito di uno studio di sostenibilità ambientale connesso allo sfruttamento della risorsa naturale sotterranea sono i rilievi altimetrici e batimetrici (per campi a mare o sottocosta).

3.1 Monitoraggi in pozzo

Monitoraggi in pozzo: misura della compattazione in giacimento tramite marker radioattivi

Nel monitoraggio dei fenomeni di compattazione e subsidenza assumono grande importanza le misure di compattazione in situ, che consentono di valutare l'effettivo comportamento delle rocce nelle loro condizioni naturali. Negli ultimi anni è stata sviluppata una tecnica di misura comunemente nota come tecnica dei marker radioattivi. Ne esistono principalmente due versioni sviluppate da società contrattiste diverse: FSMT (Formation Subsidence Monitoring Tool) di Schlumberger e CMI (Compaction Monitoring Instrument) di Baker Atlas.

I due tipi di strumento sul mercato – FSMT e CMI – sono i principali e, all’atto pratico, i soli disponibili per un servizio completo. Lo FSMT (Formation Subsidence Monitoring Tool) è stato realizzato dalla società Schlumberger all’inizio degli anni ‘70. La Baker Atlas ha sviluppato il CMI (Compaction Monitoring Instrument), basato in larga misura sugli stessi principi dello FSMT.

Le procedure d’impiego, la calibrazione, e l’elaborazione dei dati sono più importanti che non lo specifico strumento utilizzato. Negli ultimi anni si è formata una notevole esperienza nell’uso di entrambi gli strumenti e si sono rispettate procedure rigorose durante le acquisizioni per assicurare corrette condizioni di misura.

E’ da notare che il mantenere il più possibile invariata da una misura a quella successiva la procedura di acquisizione permette una buona valutazione di come evolve nel tempo la deformazione.

L’industria considera entrambi gli strumenti (FSMT e CMI) come efficienti e maturi.

La tecnica dei marker misura accuratamente la distanza fra due proiettili (marker), leggermente radioattivi, sparati nella parete del pozzo al termine della perforazione e prima del tubaggio. La compattazione indotta dalla depressurizzazione della roccia serbatoio in un certo intervallo di tempo è data, poi, dalla misura della variazione della distanza fra due marker.

Per il controllo della compattazione dei livelli profondi, si posizionano di solito alcune decine di marker, spazati fra loro di circa 10.5 m, in modo tale da ricoprire completamente lo spessore di roccia da monitorare. In taluni casi sono stati sparati marker anche nella zona sovrastante il livello direttamente investigato per controllare la deformazione degli strati di copertura.

Il posizionamento di marker a distanze verticali minori di 10.5 m, ad esempio ogni 5 m, può essere talvolta fatto per avere una maggiore densità di punti di controllo; occorre, però, ricordare che la compattazione viene sempre misurata rispetto a due marker spazati inizialmente di circa 10.5 m.

Le Società contrattiste si sono date adeguate procedure operative per la calibrazione degli strumenti e il post-processing delle registrazioni in pozzi.

Per utilizzare con la massima efficacia la tecnica dei markers è opportuno adottare le seguenti procedure:

- per quanto possibile devono essere utilizzati pozzi dedicati. Questi devono essere verticali o verticalizzati in corrispondenza dell’intervallo o degli intervalli in cui saranno posizionati i marker;
- il numero di marker e la loro posizione vanno scelti con attenzione, tenendo conto sia della litologia dei livelli interessati, sia dell’entità della depressurizzazione prevista. I marker vanno messi in posto con accuratezza, controllandone la posizione al termine delle operazioni;
- è raccomandato di utilizzare la stessa Compagnia di servizio e lo stesso tipo di sonda per le misure sullo stesso pozzo; la sonda va mossa in pozzo a bassa velocità e devono essere effettuati almeno quattro passaggi indipendenti della stessa.

L’obiettivo della ripetizione dei passaggi nello stesso pozzo è di ottenere un elevato numero di misure della distanza fra i diversi marker alla stessa data e consentire una elaborazione statistica dei dati sperimentali;

- va effettuata un’accurata calibrazione del sistema di misura, che includa il post-processing relativo agli effetti del verricello, del cavo e della temperatura;
- personale specializzato di Eni E&P deve supervisionare le relative operazioni.

Una questione importante per il monitoraggio con marker riguarda la **frequenza delle misure**. Da un lato l’intervallo di tempo fra due registrazioni consecutive dovrebbe essere il maggiore possibile per ridurre l’effetto degli errori di misura, essendo maggiore la depressurizzazione e

quindi lo spostamento atteso dei marker. Dall'altro, le misure devono avere una frequenza sufficiente a cogliere comportamenti non lineari dei sedimenti. La maggior parte dell'industria utilizza periodi di tempo fissi (ad esempio Shell/NAM con 5 anni) scelti in relazione alla litologia dei livelli da monitorare e all'evoluzione temporale della pressione negli stessi.

La misura di compattazione con marker è operativamente complessa, soprattutto per la necessità di disporre di un pozzo dedicato adeguatamente preparato e attrezzato. Tali misure vanno pertanto previste soprattutto per le situazioni in cui si prevedano compattazioni e subsidenze significative.

Di fatto non è necessario prevedere e attrezzare pozzi con marker radioattivi in ogni giacimento: è sufficiente dedicare alcuni pozzi, ben posizionati e monitorati regolarmente all'interno dello stesso bacino, per garantire la definizione di una relazione "regionale" di comprimibilità uniassiale.

L'utilizzo dei markers radioattivi, nonostante la provata e riconosciuta affidabilità come metodo di misura della compattazione in situ, potrebbe incontrare in futuro delle difficoltà di ordine logistico e gestionale (cfr. paragrafo 7.2.3).

Monitoraggi in pozzo: misure di pressione statica

Misure di pressione in giacimento

I dati ottenuti con i rilievi in pozzi attrezzati con marker radioattivi devono essere integrati dalla contemporanea misura della pressione statica dei vari livelli produttivi investigati. Tali misure di pressione statica possono essere fatte con diverse tipologie di strumenti.

In fori scoperti è possibile eseguire misure di pressione vs. profondità (ad es. RFT, MDT) lungo il profilo del pozzo in corrispondenza dei diversi livelli d'interesse. In condizioni d'equilibrio idrostatico dal profilo pressione/profondità è inoltre possibile determinare le quote degli eventuali contatti gas-olio, olio-acqua e gas-acqua.

In fori tubati è possibile eseguire delle misure di pressione statica sui livelli completati.

In pratica, previa sospensione della produzione per un adeguato periodo di tempo, è possibile calare in pozzo una sonda PTS (Pressure Temperature Sonde) al fine di registrare un profilo di pressione e temperatura nel tubing e di fronte all'intervallo sparato.

I misuratori impiegati sono del tipo a strain gauge (precisione 0.1 % del fondo scala) oppure a quarzo piezoelettrico (precisione 0.025 %).

Il profilo di pressione dà indicazioni sui gradienti dei fluidi presenti in pozzo (provenienti dai livelli eroganti) e consente di calcolare - utilizzando un adeguato datum di riferimento - la pressione statica della formazione stessa.

Le misure di pressione così ottenute sono riferite a un punto nello spazio e nel tempo. Tali punti non coincidono in generale con le posizioni dei pozzi ove sono posizionati marker radioattivi. Una stima di pressione è in genere necessaria proprio in corrispondenza di questi pozzi, nel momento della misura con sonda FSMT e CMI. Per ottenere tale stima è necessario "interpolare" nello spazio i dati di pressione disponibili. Il metodo più attendibile e concettualmente più valido per fare questa interpolazione è quello di calibrare su questi dati un modello di giacimento 3D, ed utilizzare la pressione prevista dal modello in corrispondenza dei pozzi con marker al momento della misura come dato per calcolare la comprimibilità a partire dalle misure con marker.

Misure di pressione in acquifero

Durante la perforazione di nuovi pozzi sia esplorativi sia di sviluppo, è opportuno eseguire misure delle pressioni statiche (ad esempio tipo MDT) negli acquiferi laterali e di fondo idraulicamente connessi agli strati produttivi. Tali misure sono essenziali per una corretta valutazione dell'entità e dell'estensione della propagazione del disturbo di pressione causato dalla produzione.

Gli strumenti e le tecniche per la misura delle pressioni in acquifero sono gli stessi che si utilizzano per i livelli produttivi di giacimento e brevemente discussi nel paragrafo precedente.

Monitoraggi in pozzo: misura della compattazione superficiale tramite assestimetri

E' effettuata installando assestimetri, che misurano la compattazione degli strati superficiali attraverso la fuoriuscita dal terreno di una barra metallica ancorata a fondo pozzo. Tale strumentazione, ovviamente, può essere installata solamente in pozzetti dedicati, ubicati in terra ferma .

Gli assestimetri misurano, con la precisione del millimetro, la compattazione che ha luogo tra la superficie del suolo e la profondità di 350-500 metri (profondità entro la quale sono compresi gli acquiferi soggetti normalmente a più intenso emungimento idrico).

Oltre alla misura della componente superficiale (naturale e/o antropica) della subsidenza, l'accoppiamento dell'assestimetro con uno o più piezometri permette il monitoraggio delle variazioni della quota piezometrica nei livelli acquiferi maggiormente emunti. Sono registrate anche, per controllare la precisione delle misure e l'interpretazione dei dati, misure barometriche e termometriche.

L'opportunità di installare postazioni di monitoraggio assestimetrico dipende, oltre che dalle litologie superficiali e dalla presenza di emungimento idrico delle falde in esse contenute, dalla presenza ed entità del fenomeno della subsidenza naturale, laddove sia necessario quantificarne il contributo.

L'assestimetro fornisce indicazioni locali: per una visione corretta del fenomeno della subsidenza in un quadro regionale è necessario ubicare, in corrispondenza degli assestimetri, capisaldi di livellazione o sistemi di misurazione satellitare.

3.2 Monitoraggi di superficie

Monitoraggio altimetrico: livellazioni

La livellazione geometrica ripetuta nel tempo rappresenta il metodo tradizionale e normalmente più usato per controllare le variazioni altimetriche del territorio.

Eni E&P, a partire dal 1968, ha dato importanza sempre maggiore a tale metodo, tanto da giungere ad effettuare campagne di misura di notevole impegno (circa 1500 chilometri rilevati sulle reti attualmente sotto monitoraggio). A partire dal 1998 Eni E&P rileva periodicamente anche la rete di livellazione del Comune di Ravenna.

Le misure sono effettuate in corrispondenza di punti materializzati in maniera particolare, detti capisaldi, generalmente distanti tra di loro circa 1 km, la cui stabilità nel tempo è fondamentale per la qualità delle misure stesse.

Eni E&P ha da sempre adottato quale metodologia di rilievo, le livellazioni geometriche e, tra i vari tipi di queste, la livellazione geometrica dal mezzo. Attualmente la distanza massima di battuta è pari a 60 m e la linea di mira ha altezza dal suolo non inferiore e superiore a 1 m.

Ciascuna serie di misure al livello digitale è formata da almeno 6 letture; il numero di letture viene aumentato qualora lo scarto quadratico medio delle stesse superi 0.15 mm fino al raggiungimento di tale limite di precisione. Le livellazioni devono in genere essere effettuate in standard di alta precisione.

La strumentazione di monitoraggio deve essere costituita da livelli digitali e stadie in invar; la relativa affidabilità è garantita attraverso controlli periodici per le stadie (con certificazione di collaudo) e controlli almeno settimanali (da effettuarsi immediatamente prima di ogni sessione di rilievo ed alla fine della giornata) del livello con rettifica dello stesso attraverso la procedura

cosiddetta della "battuta a 1/3". La periodicità del rilievo dipende dall'entità della subsidenza misurata e dovrebbe essere comunque compresa tra 2 e 5 anni. Le specifiche Eni E&P prevedono che le misure debbano essere effettuate in andata e ritorno. Dal punto di vista teorico, le misure dei due dislivelli, misurati in andata e ritorno, dovrebbero coincidere, ma gli errori casuali di misura in realtà rendono quasi impossibile che ciò si verifichi.

Tali misure sono accettate quando la differenza tra i due dislivelli rientra nella tolleranza ammissibile, detta precisione. Le specifiche Eni E&P (più restrittive rispetto agli standard normalmente accettati tipo IGM), fissano tale tolleranza in $\pm 3\sqrt{L}$ per la livellazione di precisione, e in $\pm 2\sqrt{L}$ per la livellazione d'alta precisione, dove L rappresenta la lunghezza del tratto misurato espressa in chilometri e il risultato è espresso in millimetri. Gli standard IGM sono meno restrittivi, in quanto prevedono $\pm 5\sqrt{L}$ per la livellazione di precisione, e $\pm 2,5\sqrt{L}$ per le livellazioni di alta precisione (Specifiche Tecniche, Disciplinare B, Intesa Stato, Regioni, Enti Locali 26/9/96 Gruppo di Lavoro Reti Plano-Altimetriche edito da IGM – Direzione Geodetica, Capit. Liv. Reti locali) .

Fino all'anno 2003 i rilievi effettuati da Eni E&P sono stati parte in standard di precisione, parte in standard di alta precisione. Con la definitiva adozione della strumentazione elettronica, che accorcia sensibilmente i tempi dei rilievi, a partire dall'anno 2004 è raccomandato di effettuare tutte le livellazioni in standard di alta precisione.

Geometria e configurazione delle reti di monitoraggio altimetrico tramite livellazione di precisione vanno decise in funzione dell'entità presente ed attesa dei fenomeni geodinamici, e della presenza e ubicazione di capisaldi di riferimento (origine della livellazione) aventi caratteristiche tali da poter essere ritenuti "stabili" nel tempo sotto il profilo altimetrico, o quantomeno soggetti a variazioni minime, per l'area presa in considerazione.

Allo scopo di verificare quest'assunzione di stabilità, la configurazione ideale prevede l'aggancio delle livellazioni a punti controllabili attraverso misure "assolute", quali ad esempio quelle ottenibili con l'utilizzo di gravimetri di precisione associati a misure GPS in continuo.

Tutti i dati provenienti dalle livellazioni, in considerazione della loro importanza come strumento di monitoraggio del fenomeno subsidenza, vengono controllati e certificati da qualificati Enti di certificazione esterni alla Società.

Monitoraggio altimetrico: rilievi satellitari GPS in continuo (CGPS)

Le tecniche di rilievo altimetrico tramite livellazione, non applicabile naturalmente offshore, sono state sostituite da tecniche di rilevamento satellitare, quali il GPS, installate sulle piattaforme di produzione. Tale tecnica, inizialmente di tipo statico, è stata successivamente, a causa di scarsa affidabilità e discontinuità delle misure, sostituita dal sistema CGPS (Continuous Global Positioning System) a volte con rilevamento dati in remoto.

Il sistema viene ora utilizzato anche onshore come punto di ancoraggio, a volte insieme con monitoraggio SAR, di capisaldi origine o in punti di particolare rilevanza.

Il GGPS utilizza i segnali di 24 satelliti NAVSTAR (Navigation Satellite with Time and Ranging) che ruotano attorno alla Terra ad altezze di circa 25.000 km, con un periodo orbitale di circa 12h . Tali satelliti trasmettono continuamente su due frequenze distinte, denominate L1 e L2, sulle quali sono modulate informazioni binarie contenenti tutti i parametri per la determinazione della loro orbita.

Il sistema consente la determinazione delle coordinate (posizione plano-altimetrica) di un punto con elevata precisione, di conseguenza possono essere determinati con altrettanto elevata precisione anche i movimenti plano-altimetrici del sito monitorato rispetto ad una rete di riferimento (EUREF o ITRF2000).

L'elaborazione dei dati ottenuti consente di determinare movimenti relativi con elevata precisione, rilevando quindi, nel nostro caso, le velocità di movimento espresse in mm/anno.

L'osservazione ripetuta per lunghi periodi consente di determinare un grafico di movimento del punto, in grado di delineare un trend. Perché l'informazione finale assuma valore statistico significativo è necessario che i rilevamenti siano effettuati per un periodo non inferiore a 12 mesi.

La configurazione ottimale della rete di monitoraggio deve essere tale da consentire l'utilizzazione dei dati rilevati dalle stazioni di riferimento EUREF o ITRF2000, contemporaneamente alla stazione oggetto di monitoraggio. E' richiesta l'acquisizione di almeno 4 stazioni di riferimento.

E' da prevedersi almeno un'installazione per campo per tutti i nuovi sviluppi offshore, dato che il CGPS è attualmente l'unica tecnica di monitoraggio della subsidenza disponibile per le attività di produzione a mare.

Utilizzato per le operazioni a terra, il metodo si presta a rendere più affidabili ed assolute, le misure effettuate attraverso altri metodi (livellazioni, SAR), fornendo la taratura assoluta e l'eventuale inquadramento di dati anomali nell'ambito delle variazioni stagionali riscontrabili su questo dato "continuo".

Come per i dati di livellazioni, anche i dati CGPS vengono controllati e certificati da qualificati Enti di certificazione esterni alla Società.

Monitoraggio altimetrico: rilievi satellitari SAR

Il monitoraggio si basa sull'elaborazione d'immagini multi-temporali satellitari Radar con tecniche interferometriche e studio dei diffusori permanenti. E' possibile ricostruire l'evoluzione temporale di un dato fenomeno, quale la subsidenza, anche per periodi passati (fin dal 1992) e su aree estese. La precisione è millimetrica. I dati necessitano di aggancio ad una rete di riferimento.

Negli ultimi anni hanno assunto particolare rilievo i sistemi radar satellitari di tipo SAR (Synthetic Aperture Radar - Radar ad Apertura Sintetica) le cui applicazioni, per il monitoraggio ambientale e, in generale, per l'acquisizione di dati d'interesse geografico sono molteplici.

Per lo studio delle variazioni altimetriche sono normalmente utilizzati i dati rilevati dai satelliti ESA (European Space Agency): ERS-1 ed ERS-2 (periodo di attività 1992-2001) e dai satelliti canadesi della serie Radarsat a partire dal 2003. Il radar montato a bordo di questi satelliti è un SAR operante nel dominio delle microonde alla frequenza di 5.3 GHz, quindi con una lunghezza d'onda λ pari a 5.66 cm.

I satelliti ERS seguono orbite eliosincrone lievemente inclinate rispetto ai meridiani, illuminando una striscia di terreno larga circa 100 km (swath) da una quota attorno a 780 km. La direzione parallela all'orbita è detta azimuth e coincide approssimativamente con la direzione nord-sud. La risoluzione in azimuth, ovvero la capacità di riconoscere come distinti due bersagli, è di circa 5 m.

La Tecnica dei Diffusori Permanenti (Permanent Scatterers, PS) si basa sull'analisi della fase dei segnali retrodiffusi, su di un elevato numero di immagini ed è stata sviluppata e brevettata presso il Politecnico di Milano e concessa in licenza esclusiva alla società T.R.E. S.r.l. nel 2000.

È importante precisare che le misure SAR sono strutturalmente in grado di rilevare il movimento solo lungo la direzione individuata dalla congiungente satellite-bersaglio radar (linea di vista, Line of Sight, LOS). Nel caso dei sensori ERS, la LOS è quasi verticale (l'angolo d'incidenza è di circa 23°). Di conseguenza, l'analisi PS fornisce sostanzialmente misure di deformazione verticale, anche se eventuali movimenti significativi lungo la direzione est-ovest presentano una componente non trascurabile lungo la LOS e vengono, di conseguenza, rilevati dal sistema.

Un altro aspetto fondamentale da sottolineare è che i dati interferometrici di movimento sono per propria natura sempre relativi ad un punto dell'immagine assunto come riferimento. I trend di deformazione sono quindi da intendersi come velocità rispetto ad un riferimento supposto implicitamente fermo (qualora esso sia affetto a sua volta da movimento, le velocità assolute sono da correggere sommando alle velocità relative il trend assoluto del PS di riferimento).

La stima dei movimenti del suolo risulta tanto più affidabile quanto maggiore è il numero di acquisizioni utilizzate.

I risultati dell'analisi PS possono essere ottimizzati in diversi modi:

- Utilizzo dei dati RADARSAT, satellite canadese equipaggiato con sensori SAR ma con caratteristiche di acquisizione differenti rispetto a ERS. La differente geometria di acquisizione di RADARSAT rispetto a ERS porta maggiori informazioni sulle velocità di deformazione (riferite sempre alla direzione sensore-bersaglio) e, quindi, una più vasta conoscenza del fenomeno in atto. Questo satellite acquisisce ogni 24 giorni indipendentemente dalla geometria di acquisizione; avere a disposizione sia dataset acquisiti con ERS sia dataset RADARSAT vuol dire, pertanto, monitorare la zona di interesse circa una volta la settimana.
- Utilizzo di riflettori artificiali in corrispondenza di particolari edifici o altri bersagli che nell'analisi preliminare non risultano essere coperti da un numero adeguato di PS. Questa tecnica è particolarmente utile in caso di monitoraggio di aree di limitata estensione, permettendo infatti di avere a disposizione informazioni precise sempre dello stesso punto, con possibilità di confronto con dati di altra natura, ad esempio un GPS in continuo installato solidalmente al retrodiffusore.

Il vantaggio principale di questa tecnica è quello di consentire una visione sinottica e contemporanea del fenomeno su vaste aree, a costi contenuti. La disponibilità di dati storici d'archivio, a partire dal 1992, consente l'analisi dell'andamento altimetrico di un territorio anche in assenza di dati di altra natura. Se associata a livellazioni di precisione e rilievi GPS in continuo, rappresenta la migliore soluzione per lo studio di aree onshore di vaste dimensioni.

Ove necessario l'analisi SAR da PS può essere condotta come studio di base in ogni area d'attività, allo scopo di ricostruire, attraverso l'utilizzo di dati dal 1992 ad oggi, l'andamento della subsidenza storica a scala regionale.

Sono da prevedersi, poi, aggiornamenti annuali del monitoraggio, pianificando, in anticipo e per tempo, l'acquisizione delle immagini. La politica d'acquisizione delle immagini è, infatti, cambiata negli ultimi anni e i nuovi dati sono acquisiti solamente *on demand*, a fronte di richieste specifiche del potenziale cliente. Una mancata programmazione delle acquisizioni attraverso la prenotazione del servizio può compromettere la possibilità di eseguire studi in caso di necessità.

Rilievi geomorfologici onshore

Questo genere di rilievi comprende due tipi di acquisizione: i rilievi definiti airborne laser, e le restituzioni fotogrammetriche di precisione da foto aeree.

I rilievi laser da aereo servono essenzialmente alla ricostruzione di modelli digitali del terreno o DEM (Digital Elevation Model) e DSM (Digital Surface Model) con la massima precisione attualmente disponibile.

I DEM sono utilizzati per vari scopi ingegneristici ed urbanistici, tra i quali quello di mettere a punto modelli di carico degli edifici in aree densamente edificate allo scopo di quantificare il contributo dei cedimenti delle fondazioni alla subsidenza antropica.

I rilievi aereofotogrammetrici forniscono un documento storico insostituibile per la ricostruzione e l'aggiornamento dell'evoluzione geomorfologica ed antropica di un'area, e vanno quindi studiati sistematicamente laddove problemi legati ad un'elevata sensibilità ambientale ne consiglino l'uso.

Rilievi geomorfologici offshore (batimetrie)

I rilievi batimetrici vengono normalmente usati allo scopo di monitorare i profili topografici del fondo marino; possono essere usati per lo studio dell'abbassamento del suolo dovuto alla subsidenza solo in assenza di processi di sedimentazione e/o di erosione, o con un confronto diretto con zone limitrofe non affette da subsidenza.

Questi tipi di rilievi vengono eseguiti utilizzando battelli provvisti di sonar. Recentemente è stato introdotto l'uso del laser (unico requisito una bassa torbidità e fondali non eccedenti 80 metri) che

può essere usato anche da aerei. I rilievi airborne laser, oltre ad accorciare sensibilmente i tempi, permettono di acquisire dati anche in prossimità della costa con sui bassi fondali.

L'utilizzo delle misure batimetriche in aree prossime alla linea di costa non è però un mezzo appropriato per la valutazione della subsidenza, a causa della limitata accuratezza del metodo in rapporto al dinamismo dell'ambiente costiero, dominato da processi di erosione-sedimentazione, a loro volta condizionati dalla opere di difesa costiera e dai cambiamenti nell'evoluzione del trasporto solido dei fiumi che sfociano a mare.

Nuovi possibili sviluppi.

A queste tecnologie, già ampiamente utilizzate dall'Eni E&P a partire dagli anni '70 (livellazioni), '90 (Radar, CGPS, Assestimetri, Markers, Batimetrie) e 2000 (lidar per altimetrie-batimetrie), Eni E&P ha aggiunto un forte ed originale impegno per individuare e sviluppare nuove metodologie di monitoraggio mirate ad estendere la precisione delle misure utili alla quantificazione della subsidenza indotta dalla produzione di idrocarburi anche in offshore. A tale scopo è stato sviluppato un sistema denominato SPG (Seabed Pressure Gauge, o Sensori di Pressione a Fondomare), che sarà presto sperimentato in campo in una delle piattaforme presenti in quest'area, individuata attraverso la collaborazione di Enti Universitari con specifiche competenze in merito alla dinamica dell'Adriatico (Bologna-Ravenna, Urbino), e che permetterà di estendere l'analisi dell'andamento verticale del terreno al di sopra del giacimento non solo sulle piattaforme di produzione (come è ora attraverso l'installazione di CGPS), ma anche radialmente ad esse, fino ad una distanza di 2.5 km, con una precisione che potrà essere inferiore al cm.

Per migliorare infine il processo di taratura dei dati radar-satellitari, agganciandoli a dati assoluti, è stato messo a punto da Eni E&P un nuovo sistema denominato SSU (Satellite Survey Unit), formato da due Corner Reflectors e da un'antenna CGPS, montati solidalmente su una base di calcestruzzo indeformabile, in modo che le misure risultino direttamente confrontabili, riferendosi sicuramente allo stesso punto a terra.

Per quanto riguarda il settore interessato dalla presente relazione si allegano inoltre delle mappe che mostrano ubicazione, distribuzione e limiti geografici della strumentazione di monitoraggio e delle aree interessate dai rilievi.

In particolare:

Fig. 3.1 Rete di livellazione di alta precisione

Fig. 3.2 Aree monitorate attraverso analisi interferometrica da dati radar-satellitari

Fig. 3.3 Postazioni assestimetriche

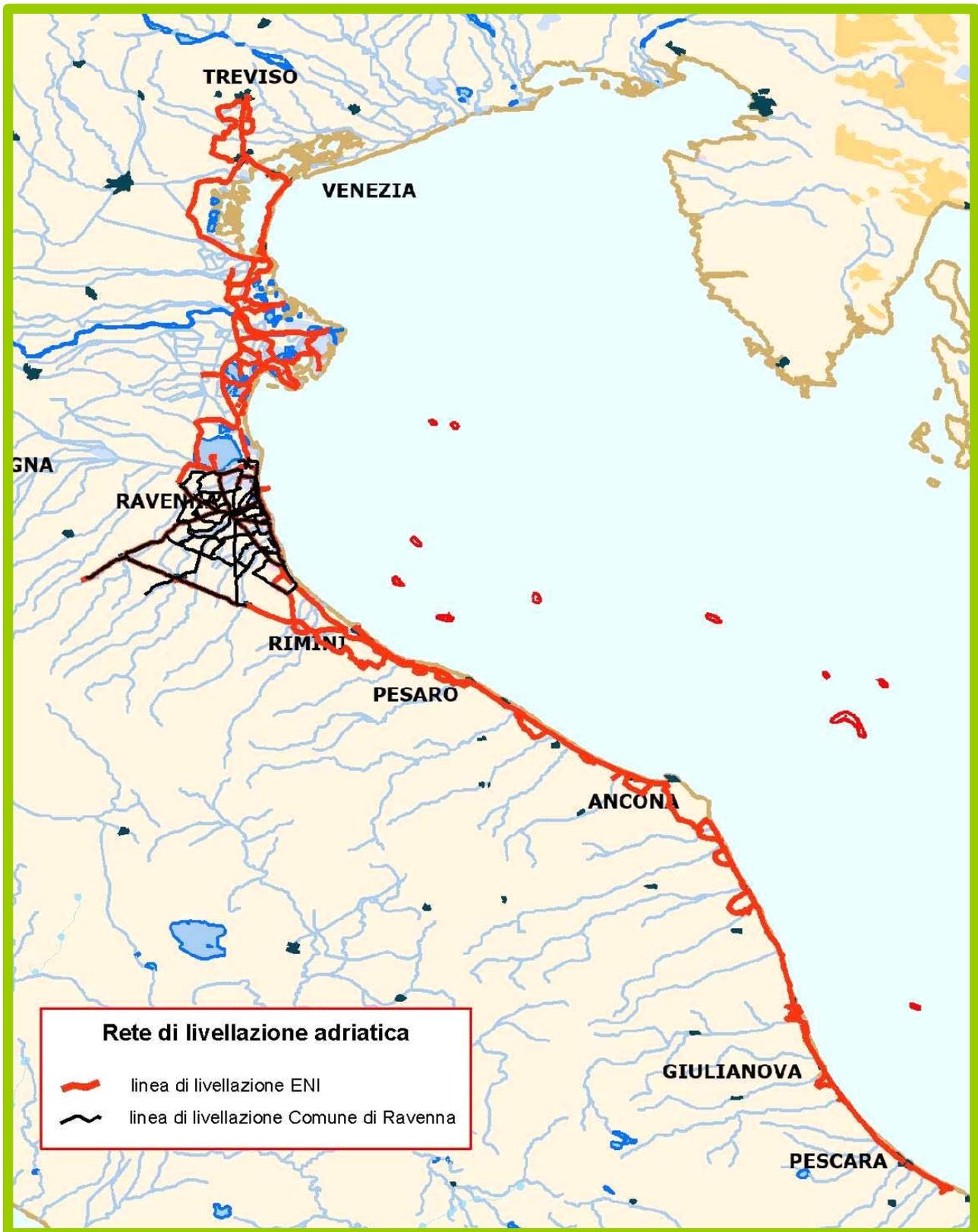


Fig. 3.1 Rete di livellazione di alta precisione

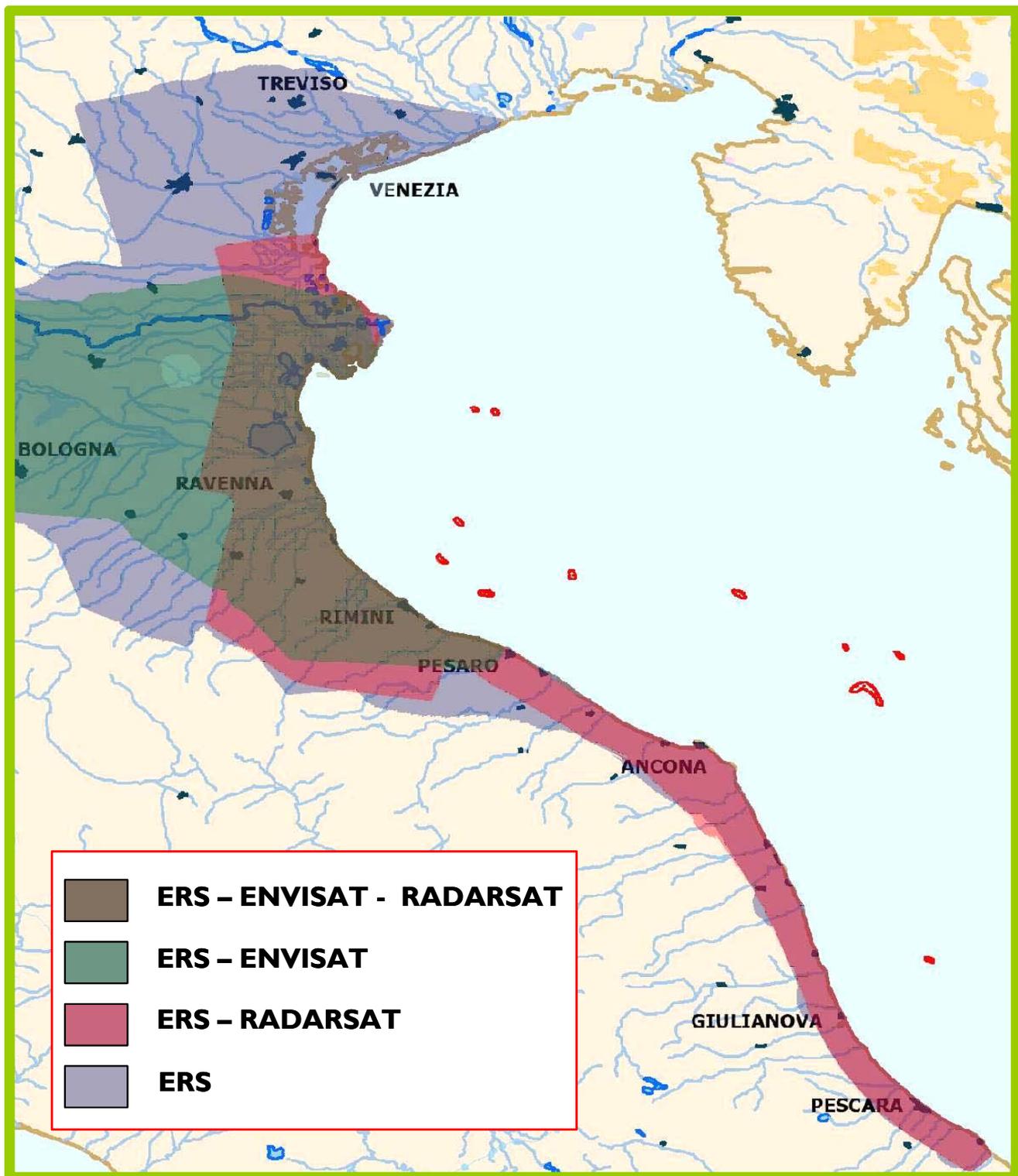


Fig. 3.2 Aree monitorate attraverso analisi interferometrica da dati radar-satellitari



Fig. 3.3 Postazioni assestometriche

4 INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AVANFOSSA PLIO- PLEISTOCENICA PADANO-ADRIATICA

I giacimenti oggetto della verifica sono tutti localizzati nel medesimo bacino sedimentario, il bacino di avanfossa corrispondente all'area oggi coperta dalla Pianura Padana e dall'Adriatico centro-settentrionale, che si è colmato in età pliocenica e pleistocenica. Di seguito è riportata una descrizione sintetica dei maggiori elementi, sedimentologici, litostratigrafici e strutturali che caratterizzano detto bacino sedimentario.

4.1 Paleogeografia e assetto strutturale

L'avanfossa Padano-Adriatica, che nel Pliocene inferiore e parte del medio si estendeva dalla Monoclinale Mantovana attraverso l'Emilia Romagna fino all' Adriatico Settentrionale, subisce una rilevante trasformazione paleogeografica durante il Pliocene medio-superiore, quando il sollevamento delle Pieghe Ferraresi, in più fasi deformative, porta ad una sua notevole riduzione. L'avanfossa rimane limitata da allora in poi all'area veneta e all'Adriatico settentrionale .

Il bacino d'avanfossa pleistocenico, allungato in senso Nord-Ovest - Sud-Est, parallelamente alla catena appenninica in sollevamento, mostra una sezione trasversale cuneiforme, fortemente asimmetrica, con un margine interno ripido, adiacente ai fronti di accavallamento ed un margine esterno con geometrie meno inclinate ed una più graduale diminuzione della profondità verso l'avampaese. Questo tipo di morfologia condiziona in modo fondamentale la distribuzione dei flussi torbiditici, responsabili della deposizione dei sedimenti di riempimento dell' avanfossa. Viene infatti favorito il trasporto assiale e le porzioni maggiormente subsidenti del bacino, a ridosso delle falde in accavallamento, fungono da aree depocentrali di richiamo per la sedimentazione dei depositi sabbiosi. Verso il margine esterno i sedimenti torbiditici mostrano geometrie convergenti e variazioni di facies verso termini da sabbioso-pelitici a prevalentemente pelitici, dovute allo "sfrangiamento" dei corpi arenacei sulla rampa d' avampaese.

L'avanfossa pleistocenica Padano-Adriatica rappresenta l'ultimo stadio di migrazione di un complesso sistema di bacini orogenici che, fin dall'Eocene superiore, si origina al fronte della catena appenninica in sollevamento. Con il procedere verso Est - Nord-Est della deformazione tettonica infatti i bacini orogenici, formati per flessura della litosfera antistante le falde in accavallamento, vengono progressivamente coinvolti dalla crescita della catena e nuove aree depocentrali, caratterizzate da elevati tassi di subsidenza, si originano in posizione via via più esterna. L'accavallamento delle falde orogeniche ed il basculamento del margine esterno del bacino di avanfossa sotto il loro carico, fa sì che si instaurino le condizioni necessarie per lo sviluppo di sistemi torbiditici, e cioè un progressivo ringiovanimento del rilievo, che contribuisce a fornire materiale elastico al bacino ed una rapida subsidenza, che crea spazio per la sedimentazione dei sistemi torbiditici. Dal punto di vista paleogeografico, l'area dell'avanfossa Pleistocenica rappresenta fino alla sommità del Messiniano l'area marginale esterna dell' avanfossa appenninica, in corrispondenza della quale si registra una sedimentazione pelitica di rampa d'avampaese con intervalli carbonatico-arenacei di piattaforma.

A partire dal Pliocene inferiore, l'area adriatica inizia ad essere interessata dalla sedimentazione di torbiditi, con l'instaurarsi dell'avanfossa dell'unità Porto Corsini prima e Porto Garibaldi poi, riferibili rispettivamente al Pliocene inferiore ed al Pliocene medio superiore / Pleistocene inferiore.

Nel Pleistocene inferiore, una nuova fase deformativa in corrispondenza della base della sequenza Q2a segna l'ultimo evento di significativo riassetto del bacino d'avanfossa, con la ripresa di una consistente sedimentazione sabbiosa: Formazione Carola (figura 3.1). La base dell'unità Carola poggia su un intervallo prevalentemente pelitico di alcune decine di metri di spessore, indicante la disattivazione pressoché completa dei sistemi torbiditici della sottostante unità Porto Garibaldi.

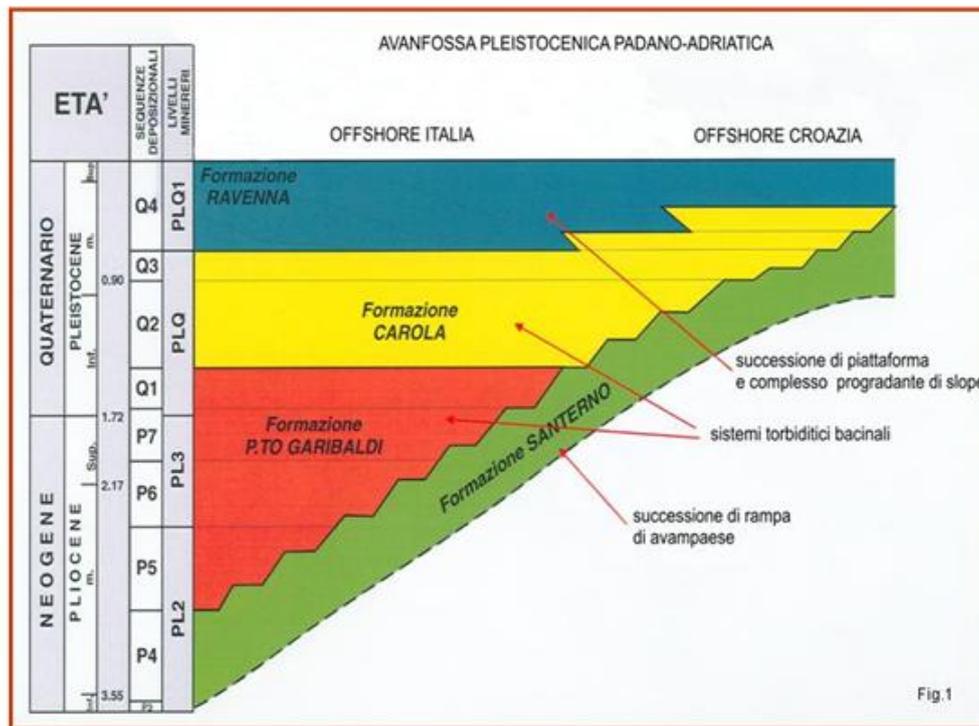
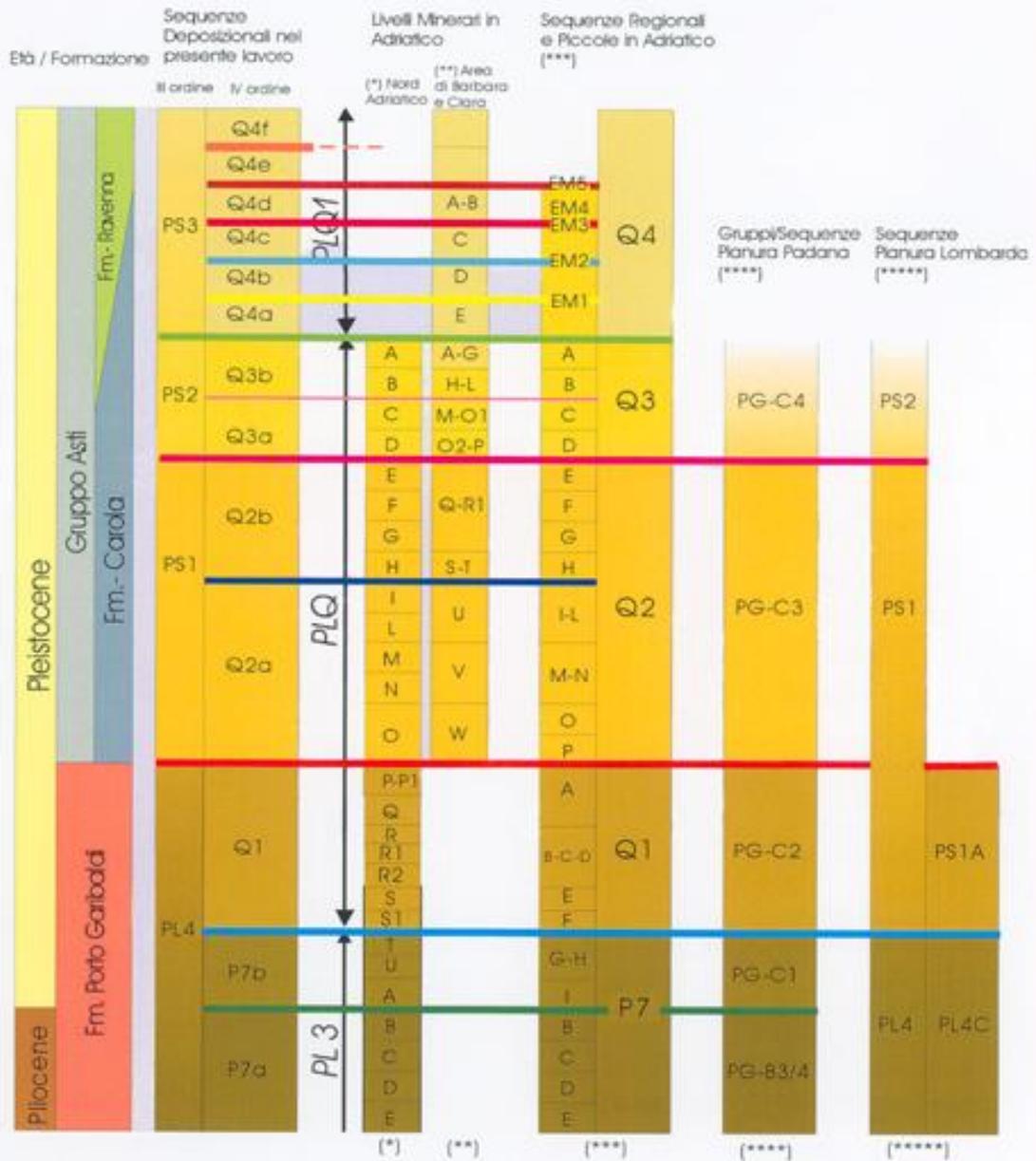


Figura 4-1 Schema semplificato dei rapporti stratigrafici

La sedimentazione della successione Pleistocenica al di sopra del limite di sequenza Q2a costituisce l'ultima fase di riempimento dell' Avanfossa Padano-Adriatica, che, sotto l'azione di fasi tettoniche compressive prima ed eventi climatico-eustatici poi, si realizza attraverso la deposizione di 10 sequenze di 4° ordine (Q2a, Q2b, Q3a, Q3b, Q4a, Q4b, Q4c, Q4d, Q4e, Q4f) raggruppabili in tre sequenze di ordine maggiore: PS 1, PS2 e PS3 (figura 3.2).

Avanfossa Pleistocenica Padano-Adriatica

Sintesi delle zonazioni stratigrafico-minerarie



- (*) Livelli minerali in Adriatico settentrionale. I pozzi di riferimento considerati sono Nacini 1 e Adole 1, quest'ultimo valido da PLQ2 verso il basso.
- (**) Livelli minerali in Adriatico settentrionale. I pozzi di riferimento sono Clara R1 per l'intervallo PLQ, ed Elettra 1 per l'intervallo PLQ1.
- (***) L'Avanfossa della Porto Garibaldi, 1997, Bettazzi e Viserini, L'Avanfossa Pleistocenica Nord Adriatica. Evoluzione e modello deposizionale, 1994, Dalla.
- (****) Studio Stratigrafico-Sedimentologico dell'Area Padana, 1998, Del Campana, Ghismini e Rossi.
- (*****) Studio sedimentologico-stratigrafico della successione Messiniano-Pleistocenica della Pianura Lombarda, 2004, Amore et al.

Fig.2

Figura 4.2 Schema della zonazione stratigrafico-mineraria

I sistemi torbiditici pleistocenici dell'unità Carola terminano in onlap al margine esterno dell'avanfossa sull'avampaese basculato (fig. 3.3), poggiando direttamente sull'evidente

unconformity di età messiniana o sulle peliti di età perlopiù pliocenica, deposte sulla rampa d'avampaese (formazione Argille di Santerno). Nell'area orientale del bacino, in territorio croato, tali rapporti di onlap sono piuttosto complessi e mal definiti a causa dell'interdigitazione di successioni coeve di slope che progradano dal margine esterno.

Al margine interno dell' avanfossa e nella zona apicale i sistemi torbiditici bacinali terminano in onlap sui complessi progradanti di slope che si interdigitano ai primi con un'alta frequenza, dando luogo a relazioni geometriche non sempre facilmente risolvibili in sismica.

AVANFOSSA PLEISTOCENICA PADANO-ADRIATICA

Schema dello stacking pattern delle sequenze deposizionali

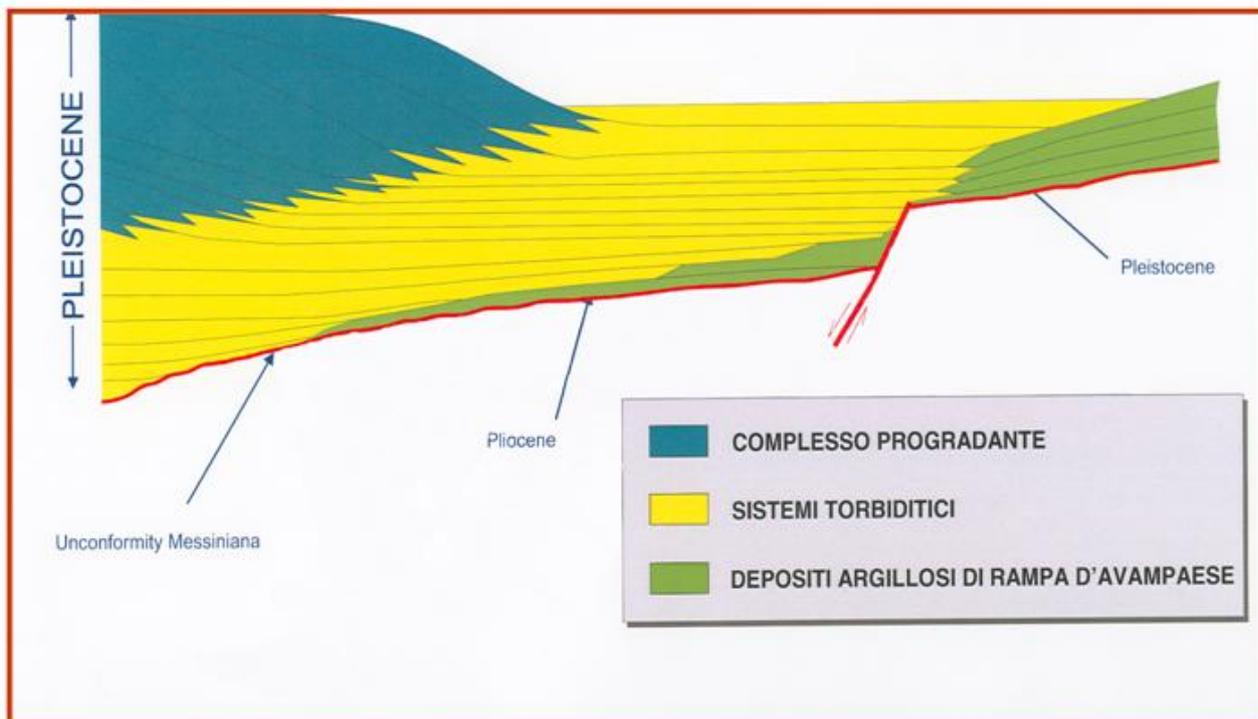


Fig.3

Figura 4.3 Sezione schematica delle principali unità tettono-stratigrafiche

Al margine interno dell' avanfossa e nella zona apicale i sistemi torbiditici bacinali terminano in onlap sui complessi progradanti di slope che si interdigitano ai primi con un'alta frequenza, dando luogo a relazioni geometriche non sempre facilmente risolvibili in sismica.

4.2 Caratterizzazione delle facies deposizionali

4.2.1 Sistemi bacinali

La successione sedimentaria dell' Avanfossa Padano-Adriatica è costituita perlo più da sistemi torbiditici di tipo I (Mutti, 1985), caratterizzati da estensione laterale a scala di bacino e geometria tabulare. Durante la loro deposizione, la progressiva perdita di energia sottocorrente provoca la perdita di competenza dei flussi gravitativi, con la conseguente deposizione di sedimenti a granulometria progressivamente inferiore su distanze di decine di chilometri. E' stato pertanto possibile distinguere quattro differenti associazioni di facies che, procedendo dalle aree prossimali fino ai limiti esterni dell'avanfossa, descrivono l'evoluzione sottocorrente dei sistemi torbiditici deposti in bacino: a) lobi torbiditici prossimali sabbiosi, b) lobi torbiditici distali sabbioso-pelitici, c) frange di lobo torbiditico, d) argille bacinali torbiditiche ed emipelagiche.

a) Lobi torbiditici prossimali sabbiosi. Si tratta della facies più prossimale dei lobi torbiditici, caratterizzata da strati di sabbie quarzo se da decimetrici a metrici, con frequenti fenomeni di amalgamazione nelle aree più interne, altrimenti separati da intercalazioni centimetriche o decimetriche di argille. Il rapporto N/G è generalmente superiore a 0,7. Le sabbie, da grossolane a fini, sono solitamente massive, con una rapida gradazione limitata alla porzione sommitale dello strato, che può presentare laminazione piano-parallela o incrociata da ripple:

facies F8 (Mutti, 1992) passante ad F9b al tetto dello strato. Indizi di bypass sono molto diffusi.

Questa associazione di facies viene depositata da flussi torbiditici ad alta densità, che danno origine a corpi sabbiosi tabulari ad elevata continuità laterale di diverse decine di km.

b) Lobi torbiditici distali sabbioso-pelitici. Questa associazione di facies rappresenta la porzione distale dei lobi torbiditici s.s. E' costituita da strati di sabbia quarzosa, da media a finissima, con spessore dai 10 fino ai 100 cm, alternati a livelli di simile spessore di argille, contenenti straterelli centimetrici sabbioso/siltitici. Il rapporto N/G oscilla intorno allo 0,5 progressivamente decrescente allontanandosi dalle aree depocentrali. Gli strati sabbiosi sono frequentemente gradati, caratterizzati da sabbie massive alla base (F8, partizione Ta della sequenza di Bouma) e strutture da trazione/decantazione (F9b, partizioni Tb-c della sequenza di Bouma) al tetto. Più raramente presentano sequenze di Bouma complete (Ta-e).

Gli strati più sottili sono solitamente laminati con lamine sia piano-parallele, che convolute, che oblique a piccola scala (F9b, Tb-e).

Questa facies è depositata da flussi torbiditici evoluti, ma ancora ricchi in frazione sabbiosa.

c) Frange di lobo torbiditico. Questi depositi, distribuiti esternamente ai depositi di lobo s.s., sono rappresentati da argille fittamente laminate, intercalate a frequenti straterelli di sabbie fini/molto fini, ben gradati, di spessore da centimetrico a decimetrico. I livelli più spessi sono caratteristicamente costituiti da un intervallo basale a laminazione parallela, uno intermedio a laminazione incrociata da ripple e una porzione sommitale siltitica a laminazione parallela (F9B, Tb-e). Il rapporto N/G ha valori intorno allo 0,3/0,4, via via più bassi verso le aree più distali o approssimandosi ad ostacoli fisiografici, quali la rampa d'avampaese o alti strutturali intrabacinali, che causano locali perdite di energia dei flussi torbiditici e la deposizione delle porzioni più fini del flusso. La deposizione delle frange di lobo è dovuta a flussi a bassa densità ed alta efficienza che raggiungono le aree distali del bacino.

d) Argille bacinali torbiditiche ed emipelagiche. La facies delle argille bacinali torbiditiche è rappresentata da argille sottilmente laminate, con rare intercalazioni centimetriche di sabbie molto fini e silt. Queste ultime costituiscono la porzione più grossolana dei flussi prevalentemente pelitici che raggiungono le aree più distali del bacino.

L'effetto di correnti trattive agenti su questi sedimenti è testimoniato ancora da laminazione incrociata da ripple, mentre la genesi di lamine piano-parallele nella porzione più fine è imputabile a decantazione. In termini di sequenza di Bouma gli intervalli più rappresentati sono Te-e, Td-e, tipici di flussi molto diluiti che costituiscono le code delle stesse correnti torbiditiche responsabili della sedimentazione delle grandi quantità di sabbie nelle aree depocentrali localizzate sopracorrente.

Nei log elettrici le argille torbiditiche sono solo raramente distinguibili dalle argille emipelagiche. Le argille emipelagiche si depositano estesamente in bacino durante fasi ricorrenti di disattivazione dei sistemi torbiditici, durante le quali i sedimenti grossolani vengono accumulati in aree di piattaforma e raggiungono solo in minima parte le aree bacinali. In bacino tali intervalli, pur rappresentando dei considerevoli lassi di tempo, a causa del bassissimo tasso di sedimentazione, presentano spessori piuttosto ridotti, al massimo di qualche metro. La loro

elevata continuità laterale, a scala dell'intera avanfossa, rende agevole la correlazione delle sequenze deposizionali di cui costituiscono la porzione sommitale.

e) Facies di transizione canali/lobi. Una quinta associazione di facies è stata riconosciuta nella parte alta della successione Pleistocenica, a partire dalla sequenza Q4a e distribuita nelle aree prossimali del bacino, al piede dei complessi progradanti di slope, dove sistemi torbiditici canalizzati e piccoli lobi frontali e di overspill si intercalano a lobi sabbiosi tabulari. Tale associazione di facies, indicata in questo studio come facies di transizione canali/lobi, si estende all'interno del bacino su distanze fino a circa 100 km dalla base dello slope.

La risposta elettrica sui log di potenziale spontaneo, resistività e sonic, utilizzati per le correlazioni all'interno dell'avanfossa, è molto simile a quella delle facies prossimali di lobo a causa dell'elevato valore del rapporto sabbie/argille, molto maggiore di 1. Per poter identificare da log tale facies è necessario utilizzare log elettrici a maggiore risoluzione verticale come EATT e log di microresistività, in associazione con l'interpretazione dipmeter.

Il riconoscimento della facies di transizione canali/lobi soltanto nella porzione superiore della successione pleistocenica, a partire dalla sequenza Q4a, suggerisce un mutamento nei caratteri dei

sistemi deposizionali bacinali (Mavilla 2004), peraltro coincidente con il termine delle importanti modificazioni tettoniche del bacino ed il conseguente prevalere degli eventi glacio-eustatici come fattore principale nella regolazione degli apporti elastici all'interno dell' avanfossa.

L'identificazione di queste facies ricopre un'importanza notevole sia in ambito esplorativo che di produzione poiché, pur trattandosi di facies prevalentemente sabbiose, la presenza di sistemi torbiditici canalizzati aumenta notevolmente l'anisotropia del sistema, con la possibilità di occorrenza di barriere di permeabilità sia in senso orizzontale che verticale.

Infatti a pacchi di strati di sabbie massive di spessore da decimetrico a metrico, caratteristiche dei lobi torbiditici, si alternano corpi sabbiosi a limitata estensione laterale e caratterizzati da limiti di permeabilità interni legati ad intervalli di sedimenti a granulometria più fine, la cui deposizione risulta da variazioni nella geometria del sistema deposizionale come migrazioni ed avulsioni dell'asse dei canali. Nella tarda fase della loro evoluzione i canali torbiditici possono inoltre essere caratterizzati da sottili intervalli di sedimenti eterolitici con valori minori del rapporto N/G.

4.2.2 Sistemi di slope e di rampa d'avampaese

I sistemi torbiditici bacinali sono limitati al margine interno e nell'area apicale da successioni progradanti di slope e a quello esterno da successioni pelitiche di rampa d'avampaese.

Lo slope rappresenta in generale un'area di bypass dei flussi gravitativi a causa dei gradienti piuttosto elevati. La sedimentazione è pertanto solitamente dominata da depositi pelitici o siltitici. Ciò è vero in particolare per lo slope al margine interno dell' Avanfossa Padano-Adriatica, dove l'assenza di sistemi fluviali di dimensioni rilevanti, dà luogo allo sviluppo di sistemi deposizionali, che, pur se alimentati dalla catena appenninica in sollevamento, progradano lentamente e sono costituiti da depositi prevalentemente pelitici.

Nella zona apicale dell'avanfossa il sistema fluviale del paleo-Po e dei suoi affluenti forma invece una vasta pianura alluvionale, attraverso la quale notevoli quantità di sabbie vengono portate verso la piattaforma e lo slope. Come conseguenza lo slope che prograda in senso assiale all'interno dell'avanfossa è formato da facies piuttosto ricche in sabbie.

I sistemi progradanti e le torbiditi bacinali sono fittamente interdigerati, con le torbiditi che terminano per onlap sulle clinostratificazioni dello slope. Tali rapporti geometrici sono spesso poco visibili, data la stretta compenetrazione dei due sistemi lungo la direzione dell'asse dell'avanfossa, mentre risultano più evidenti verso il margine interno.

In genere nei bacini perisuturali i sistemi di piattaforma-slope sono particolarmente sviluppati al margine interno e nelle aree apicali dove l'orogene in sollevamento, fa sì che il tasso di apporto di sedimenti ecceda lo spazio di accomodamento disponibile, dando origine ad evidenti complessi progradanti. Al contrario al margine esterno si ha una generalizzata starvazione della sedimentazione, con deposizione di una successione pelitica principalmente per decantazione su cui poggiano in onlap i sistemi torbiditici depositati all'interno dell'avanfossa. Questi ultimi sfrangiano verso il margine esterno passando progressivamente a facies pelitiche depositate dalle code fini dei flussi torbiditici. Le successioni di rampa d'avampaese sono pertanto costituite da argille o marne caratterizzate da forte condensazione. Solo localmente nell'Avanfossa Padano-Adriatica sono stati osservati dei sistemi canalizzati provenienti dal margine croato che possono indicare l'ingresso di apprezzabili quantità di sedimenti elastici grossolani nell'area di rampa d'avampaese.

Limitatamente alla porzione sommitale della successione pleistocenica si osservano geometrie progradanti provenienti dalla piattaforma croata che si interdigitano con le torbiditi bacinali.

L'area di margine nord-occidentale del bacino registra un'evoluzione deposizionale da condizioni di margine esterno a condizioni di margine interno.

Tale processo è dovuto alla rapida progradazione deltizia padana che si estende da ovest verso est fino a ricoprire il margine di avampaese veneto per poi proseguire assialmente verso sud-est.

5 ANALISI DEI MONITORAGGI RELATIVI AI GIACIMENTI

Vengono di seguito descritti gli studi e le analisi effettuate per i singoli giacimenti, eseguiti dall'ENI con il coordinamento e la supervisione del Gruppo di Lavoro. L'attività condotta comprende:

- l'analisi dei risultati dei monitoraggi eseguiti;
- l'esecuzione delle nuove stime della subsidenza;
- il confronto delle stesse con le previsioni considerate nella fase *ante operam*.

Una descrizione maggiormente articolata ed espansa è stata dedicata al giacimento Regina in quanto è stato il valore anomalo della subsidenza registrato in questo giacimento che ha determinato l'esigenza di studiarne approfonditamente le cause e quindi, di estendere la stessa verifica dei monitoraggi dei parametri geodinamici anche nei confronti degli altri giacimenti per i quali le stime della subsidenza erano state effettuate utilizzando gli stessi criteri e metodi già impiegati per le previsioni del campo Regina.

Per tale motivo la metodologia di indagine scaturita dagli studi condotti per il campo Regina, i cui principi fondamentali sono descritti nei capitoli 2 e 3 della presente relazione, è stata applicata anche agli altri giacimenti.

Per comodità di consultazione, nei capitoli successivi, oltre alla descrizione degli studi attinenti il campo Regina, per ogni giacimento vengono riportate le informazioni generali e una scheda di sintesi nella quale sono indicati i risultati degli accertamenti eseguiti. La descrizione delle analisi effettuate per ogni singolo giacimento, sono invece riportate nell'allegato alla presente relazione, dove sono inseriti gli studi originali scaturiti dall'attività del GdL.

5.1 Giacimento Regina

Localizzazione: offshore Adriatico circa 17 km a E di Rimini (Fig. 5.1) ad una profondità d'acqua di circa 20 m

Dimensioni del giacimento: circa 6 Km² ;

Caratteristiche geologiche del giacimento (Figg. 5.2-5.3): anticlinale asimmetrica orientata NW-SE, delimitata verso Nord e verso Est da una variazione laterale di facies ed a Sud-Ovest da una faglia con direzione NW-SE. La serie mineralizzata è compresa tra i 980 e 1250 mslm e interessa 3 livelli principali della serie PL1 (livelli KLX, PX e R della formazione dell'alto di Canopo); la revisione del modello geologico eseguita nel 2006 ha evidenziato che tali livelli sono costituiti da banchi di sabbie grossolane amalgamate, di diversi metri di spessore e con buone caratteristiche petrofisiche (permeabilità superiori ai 200 mD) che non trovano corrispondenza in nessuno dei giacimenti della serie pliocenica adriatica.

5.1.1 Dati amministrativi (procedura di VIA e concessione mineraria)

Procedura VIA aprile 1996 per la perforazione e coltivazione di un massimo di 6 nuovi pozzi da una piattaforma BEAF e posa del relativo sealine di collegamento;

Decreto VIA n. 2374 del 4.4.1997 positivo con prescrizioni:

aggiornamento del modello di subsidenza presentato con il SIA con cadenza annuale

installazione e survey markers radioattivi con cadenza annuale;

livellazioni a terra con cadenza annuale

Tutti i dati dovevano essere trasmessi annualmente al MATTM e all'UMIG

Concessione mineraria

CONCESSIONE	SCADENZA	OPERATORE	TITOLARI	QUOTA	REGIONE
A.C17.AG	26/05/2017	ENI	ENI	75%	EMILIA ROMAGNA
			EDISON	25%	

5.1.2 Status coltivazione del giacimento e previsioni di produzione

Coltivazione: è stato realizzato lo sviluppo del campo con la perforazione di 3 pozzi (Regina 3D, 4D e 5D) da una piattaforma di tipo BEAF; il campo è entrato in produzione nell'agosto del 1997 con 4 pozzi (3 nuovi pozzi + Regina 1 già esistente) con una portata iniziale di circa 1500 KSm³/g; completamento del programma di coltivazione approvato con perforazione di ulteriori 3 pozzi (Regina 6, 7 e 8) e intervento di workover sul pozzo Regina 4 (ottobre 2003-maggio 2004); Produzione cumulativa al 31/12/2006: 3399 Msm³ (pari all' 85% del totale delle riserve stimate con modello Eclipse 3D).

Previsioni di produzione SIA: dallo studio statico e dinamico di giacimento (modello monocella-Agosto 1995) previste riserve a vita intera pari a 2503 MSm³ producibili al 2006 (fine riserve) con un picco di produzione giornaliera di 1200 KSm³/g;

Aggiornamento previsioni di produzione: Nel settembre 2006 è stata effettuata un' ulteriore revisione dello studio statico e dinamico di giacimento con modello Eclipse 3D che ha portato ad una migliore taratura del meccanismo di produzione evidenziando sia un ridotto contributo degli acquiferi idraulicamente connessi ai livelli produttivi al sostegno di pressione degli stessi, sia l'esistenza di barriere a parziale trasmissibilità (faglie) che interessano il livello PL1-PX comportando:

un aumento dei GOIP dei livelli del campo (GOIP studio statico dell'agosto 1995 pari a 3114 MSm³, GOIP revisione studio statico del settembre 2006 pari a 4709 MSm³);

un aumento delle riserve a vita intera producibili dal campo pari a circa il 36%; il nuovo profilo di produzione prevede, infatti, il recupero in 18 anni di 3986 MSm³ e fine produzione nel 2014 a fronte della produzione stimata nel SIA con modello monocella di 2503 MSm³ e fine produzione nel 2006;

5.1.3 Previsioni della subsidenza: ulteriori studi/indagini effettuati e/o previsti

- **Previsioni della subsidenza (SIA):** valutata con modello geomeccanico del tipo Geertsma cilindrico, pari a 7.2 cm (in corrispondenza del culmine del giacimento) dopo 10 anni dall'inizio produzione stimati con valore di Compressibilità uniassiale $C_m = 0.612 \cdot 10^{-4} \text{ bar}^{-1}$ e Coefficiente di Poisson $\nu = 0.25$; alla stessa data il cono di subsidenza (linea di iso-subsidenza di 2 cm) si estendeva per circa 2 Km verso la costa (distanza minima 11 km dalla costa tra Rimini e Riccione)
- **Markers radioattivi:** in ottemperanza alle prescrizioni del DEC/VIA/2374/1997 il pozzo Regina 3D, è stato equipaggiato nel 1997 nella parte più profonda (tra 998 e 1218 m) con 22 markers (2 spacing marker nel livello PLX ed un spacing marker nel livello R); eseguite nel luglio e ottobre 1997 i rilievi iniziali di compattazione sui markers; i successivi controlli dei markers sono stati eseguiti nel settembre 2002 e ottobre 2003 (***cinque anni dopo i rilievi iniziali mentre la prescrizione del decreto prevedeva monitoraggi annuali***). Le misure ottenute mostravano una compattazione della parte bassa del livello PLX e del livello R, non venivano ritenute attendibili perché apparentemente non coerenti/rappresentativi con la litologia dei livelli e per il limitato numero di misure a disposizione; successivo survey dei marker eseguito nell'ottobre 2005, che ha mostrato dati coerenti con quelli dei rilievi precedenti;
- **Modello geologico del giacimento:** nel 2006 è stato effettuato un nuovo modello geologico del giacimento e dell'acquifero connesso sulla base delle più recenti

interpretazioni sismiche dell'area e delle informazioni acquisite con la perforazione dei pozzi di sviluppo;

- **Aggiornamento previsioni della subsidenza:** sulla base dei risultati del nuovo studio di giacimento (Eclipse 3D) si è proceduto ad aggiornare le previsioni di subsidenza, utilizzando il codice ad elementi finiti Abaqus ed una legge costitutiva di tipo elasto-plastico (CCM Cam-Clay Modificato) per caratterizzare il comportamento meccanico dei livelli in produzione. Tale legge costitutiva è stata calibrata con le misure di compattazione in situ dei marker effettuata a Luglio 2005:

Livelli mineralizzati	Compressibilità uniaassiale C_m
Livelli KLX, PX_1 e PX_2	$3.00 \cdot 10^{-4} \text{ bar}^{-1}$
Livello PX_3	$2.09 \cdot 10^{-4} \text{ bar}^{-1}$
Livello R	$2.81 \cdot 10^{-4} \text{ bar}^{-1}$

La produzione è iniziata nel 1997 e terminerà nel 2014 ma la simulazione dinamica è stata prolungata a pozzi chiusi fino al 2040 in modo da considerare gli effetti di depressurizzazione nell'acquifero e l'eventuale recupero di pressione in giacimento.

Sulla base del nuovo profilo di produzione ed adottando i parametri geomeccanici (C_m) sopra citati è stata prevista una subsidenza massima di 154 cm alla fine del periodo di simulazione (anno 2040); sempre alla stessa data il cono di subsidenza (linea di iso-subsidenza di 2 cm) è stato previsto estendersi di circa 5.5 Km verso la costa. La distanza minima della linea di iso-subsidenza di 2 cm dalla costa risulta pari a circa 11 Km (Fig. 4.4).

Data	Subsidenza max al centro del giacimento (cm)	Estensione del cono - limite linea isosubsidenza -2cm dal centro del giacimento (km)
7/2006	120	5.0
1/2015 (fine produzione)	149	5.5
1/2020	151	5.5
1/2030	154	5.5
1/2040	154	5.5

Si prevede un valore massimo di 149 cm alla fine della produzione (1 Gennaio 2015) e l'estensione prevista del fenomeno a questa data è di circa 5.5 km; alla fine del periodo di simulazione (2040) la subsidenza massima prevista dal modello geomeccanico è di 154 cm per una estensione di circa 5.5 km.

L'analisi dell'evoluzione delle linee di iso-subsidenza di 2 cm evidenzia una situazione di stabilità dopo la fine della produzione: la propagazione della depressurizzazione all'interno degli acquiferi idraulicamente connessi agli strati produttivi induce uno spostamento del punto di massima subsidenza dopo la chiusura del giacimento, ma non porta ad una estensione areale del fenomeno, in particolare verso la costa; la subsidenza di 2 cm indotta dalla coltivazione del giacimento di Regina si mantiene sempre ad una distanza dalla costa superiore a circa 12 km.

5.1.4 Confronto tra le previsioni di subsidenza 1997 (SIA) e 2006

A seguito dell'aggiornamento del modello geomeccanico si assiste ad un incremento del valore massimo di subsidenza previsto da 7,2 cm (SIA 1997) a 154 cm per effetto:

dell'aumento (nella zona dell'acquifero) dello spessore gross dei livelli che si compattano;

della depressurizzazione dell'acquifero di piccole dimensioni connesso al giacimento;

di una maggiore comprimibilità (C_m) delle sabbie costituenti la roccia serbatoio del giacimento.

- La previsioni 2006 confermano sostanzialmente la previsione del 1997 relativamente all'estensione del fenomeno rispetto alla linea di costa. La linea di isosubsidenza di 2 cm, infatti, dopo il 2005 è stabile nel tempo, ed al 2040 (25 anni dopo la cessazione della produzione) rimane a 13 Km circa dalla costa.
- La subsidenza del campo di Regina stimata nel 2006, se pur di entità maggiore di quella prevista nel 1997, risulta un fenomeno arealmente limitato che rimane circoscritto al giacimento e al piccolo acquifero connesso. Le attività di monitoraggio svolte da Eni E&P non mostrano nel tratto di costa antistante il giacimento di Regina incrementi della velocità media di subsidenza totale e confermano, in accordo con la previsione del 1997, che la subsidenza del giacimento di Regina si esaurisce molto al largo della costa.

La previsione di subsidenza del 1997 (SIA) è stata effettuata:

- sulla base dell'ipotesi di sviluppo dei livelli mineralizzati rinvenuti dal pozzo Regina 1 D;
- considerando una vita produttiva del giacimento di ca. 10 anni (1997-2006);
- utilizzando il modello geomeccanico cilindrico di Geertsma nei due due casi relativi allo spessore net e gross dei livelli mineralizzati;
- considerando trascurabile il contributo dell'acquifero di piccole dimensioni connesso al giacimento;
- assumendo per la comprimibilità uniassiale C_m un valore di $C_m = 0.612 \cdot 10^{-4} \text{ bar}^{-1}$ in linea con i valori di C_m ottenuti da prove di laboratorio (comprimibilità di 2° ciclo da prove edometriche) per formazioni a sabbia non cementata dei campi del Nord Adriatico.

La previsione di subsidenza del 2006 è stata effettuata:

- costruendo un nuovo modello geologico del giacimento e dell'acquifero connesso sulla base delle più recenti interpretazioni sismiche dell'area, e delle informazioni acquisite con la perforazione dei pozzi di sviluppo;
- costruendo un modello dinamico di giacimento 3D (differenze finite) calibrato sulla storia passata di produzione (dati disponibili sino a luglio 2006);
- costruendo un modello geomeccanico 3D a elementi finiti, nel quale si è considerato solo lo spessore gross dei livelli depressurizzati;
- tenendo conto della depressurizzazione dell'acquifero di piccole dimensioni connesso al giacimento;
- assumendo un comportamento elasto-plastico della roccia. La relativa legge costitutiva (Cam-Clay modificato) è stata calibrata con le misure in situ di compattazione (marker) eseguite al pozzo Regina 3D.

La differenza tra i risultati del modello di subsidenza derivante dallo studio statico e dinamico di giacimento in fase di SIA (modello monocella) dell'agosto 1995 ed il modello Eclipse 3D del settembre 2006 è da imputarsi principalmente a:

1. **Differenza nei valori di C_m utilizzati per la stima della subsidenza:** i dati di C_m derivanti da markers radioattivi in situ hanno evidenziato valori di oltre un ordine di

grandezza superiori rispetto a quelli assunti nello SIA in base a valori di C_m ottenuti da prove di laboratorio (2° ciclo) per formazioni a sabbia non cementata dei campi del Nord Adriatico; la peculiarità e la significatività di tale dato (reale e non stimato) trova riscontro anche nei risultati dell'aggiornamento dello studio geologico effettuato nel 2006 che ha messo in evidenza una particolare situazione geologico-strutturale del giacimento Regina in cui i livelli mineralizzati KLX e PX della formazione dell'Alto di Canopo risultano intercalati (probabilmente sovrascorsi per movimenti tettonici compressivi come evidenziato dal sistema di faglie inverse in cui è compreso il giacimento) nella Formazione Porto Corsini (PL1); i livelli KLX e PX sono costituiti da sabbie grossolane ad elevata permeabilità (fino a 250 mD) inseriti nella serie del PL1 (permeabilità di ca. 50 mD) e pertanto molto più comprimibili rispetto alle sabbie della serie pliocenica.

2. **Migliori conoscenze della geometria del giacimento e dell'acquifero circostante** e delle sue proprietà durante la produzione (in particolare la storia di pressione): in base allo studio statico e dinamico effettuato con modello monocella per lo SIA, impostato in assenza di dati di produzione pregressi, il gross pay considerato per le sole zone mineralizzate a gas è risultato pari a 35,3 m mentre con lo studio statico e dinamico di giacimento effettuato nel 2006 con modello Eclipse 3D, calibrato sulla storia passata di produzione sino a luglio 2006, il gross pay è risultato pari a 90 m per la zone mineralizzate a gas + relativo acquifero; tale differenza ha comportato dal punto di vista produttivo ad un aumento del GOIP e delle riserve e conseguentemente a profili di produzione che col modello monocella si esaurivano in circa 10 anni di coltivazione con 2500 MSm³ mentre col modello Eclipse 3D si esauriscono in circa 18 anni con 3986 MSm³.

5.1.5 Considerazioni del Gruppo di Lavoro

Dall'esperienza del "Caso Regina" emergono le seguenti importanti considerazioni:

- La misura del C_m in situ tramite marker radioattivi, tecnologia utilizzata su scala mondiale dalle più qualificate compagnie petrolifere, rappresenta l'unico dato che con certezza riproduce l'andamento della compattazione dei livelli mineralizzati durante la coltivazione del giacimento e conseguentemente rappresenta l'unico dato affidabile per la stima della subsidenza: come evidenziato infatti dal "caso Regina" la variazione tra C_m misurati in situ da markers e C_m stimati, rappresenta uno degli elementi chiave che ha determinato la significativa variazione nelle stime dei valori assoluti di subsidenza;
- la variazione dei valori di C_m (valore stimato vs valore misurato da markers) rappresenta un elemento "indicatore" di variazioni delle caratteristiche geologiche dei giacimenti e/o petrografiche dei livelli mineralizzati che comportano conseguenti variazioni nelle caratteristiche geomeccaniche del giacimento e nelle stime della subsidenza;
- la conoscenza dettagliata delle caratteristiche geologiche del giacimento sulla base di dati sismici e delle informazioni desumibili dalle perforazioni dei pozzi di sviluppo rappresenta il primo "step" su cui impostare una corretta modellazione dinamica e geomeccanica del giacimento;
- attualmente sono equipaggiati con markers radioattivi 6 pozzi nei giacimenti del Nord Adriatico ed i dati elaborati dal DMMSA-Univ. di Padova e CSI, nominata da ENI, hanno portato all'individuazione di correlazioni a carattere regionale per la stima del C_m utilizzate per le previsioni di subsidenza relative ai giacimenti del Nord Adriatico;
- in relazione alla geometria del giacimento e dell'acquifero, l'andamento dei profili di pressione, di produzione e delle riserve, rispetto alle stime originarie rappresenta un elemento "indicatore" di possibili variazioni delle caratteristiche dinamiche del giacimento; tale elemento, può indurre pertanto alla necessità di aggiornare il modello geomeccanico del giacimento al fine di ottenere nuove stime del valore atteso di subsidenza.

5.1.6 Monitoraggi in corso e previsti

Monitoraggi on shore (in corso): a partire dai primi anni '70, Eni E&P ha progettato e realizzato lungo la costa adriatica (Dorsale Adriatica TV-Pesaro) una rete di livellazione geometrica che, su richiesta degli Enti di Controllo a livello regionale e nazionale (Regione Emilia Romagna, Provincia di Ravenna, Comune di Ravenna e Ministero dell'Ambiente), rilevata da oltre un decennio con cadenza annuale le variazioni altimetriche lungo la linea di livellazione.

Le attività di monitoraggio sono state integrate con altri dati altimetrici disponibili nell'area, per arrivare ad una descrizione il più possibile vicina alla realtà dell'andamento delle variazioni altimetriche del territorio. In particolare i dati oggetto di integrazione sono:

- livellazioni di alta precisione
- rilievi interferometrici radar-satellitari con la tecnica PS (Permanent Scatterers)
- rilievi CGPS (Continuous Global Positioning System)

Le attività di monitoraggio svolte da Eni E&P non mostrano nel tratto di costa antistante i giacimenti in esame, alcun incremento della velocità media di subsidenza totale confermano quindi che, eventuali fenomeni di subsidenza connessi alla produzione dei campi a gas offshore si esauriscono molto al largo della costa

Monitoraggi off shore e on shore (previsti): nel corso del 2007 sono previsti:

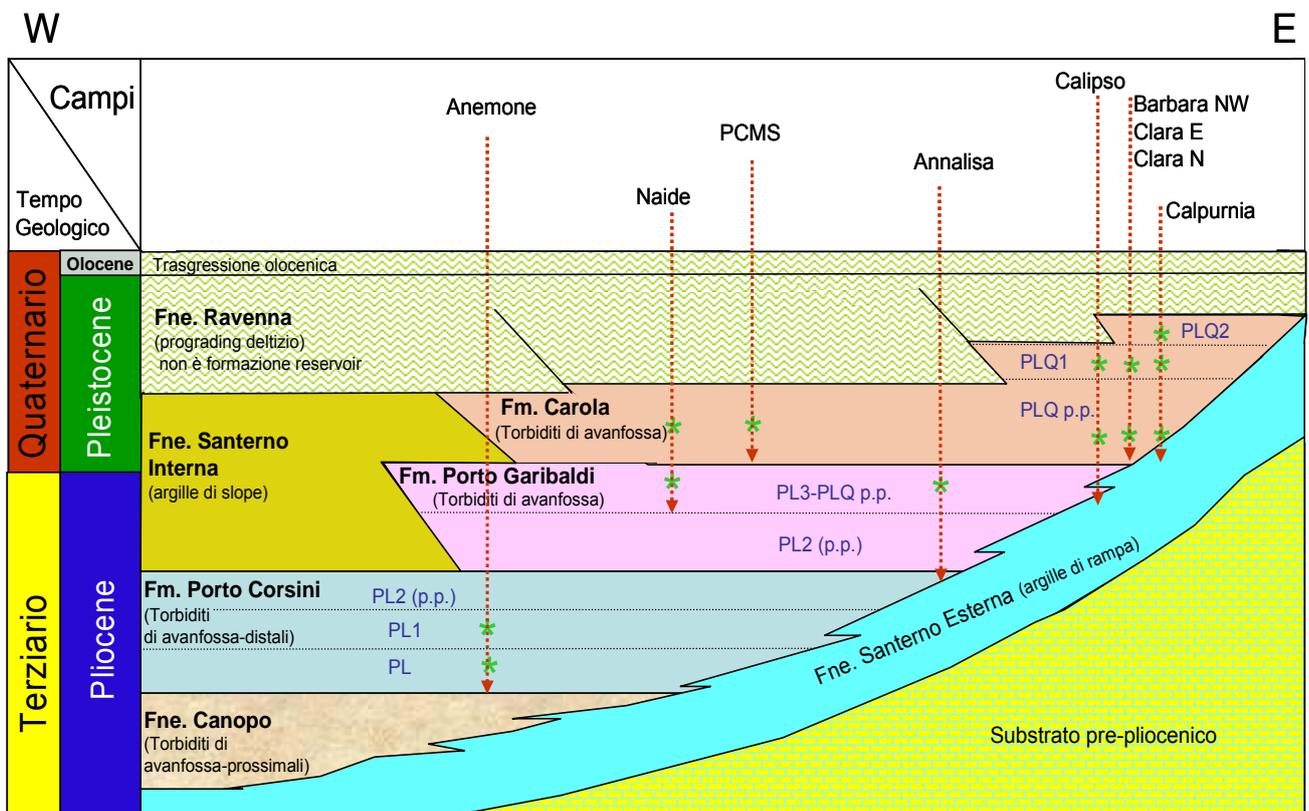
- installazione di un CGPS sulla piattaforma Regina e presso la centrale di Rubicone per la misurazione in continuo delle variazioni altimetriche off shore e on shore;
- installazione di un assestometro e di una Stazione SSU (Satellite Survey Unit) come caposaldo per le misure altimetriche;
- ENI ha in corso un progetto di ricerca e sviluppo per la misura di compattazione del fondale marino il cui prototipo già realizzato sarà a breve installato per la sperimentazione.

I dati di sintesi del giacimento Regina sono riportati nella Tabella 1.

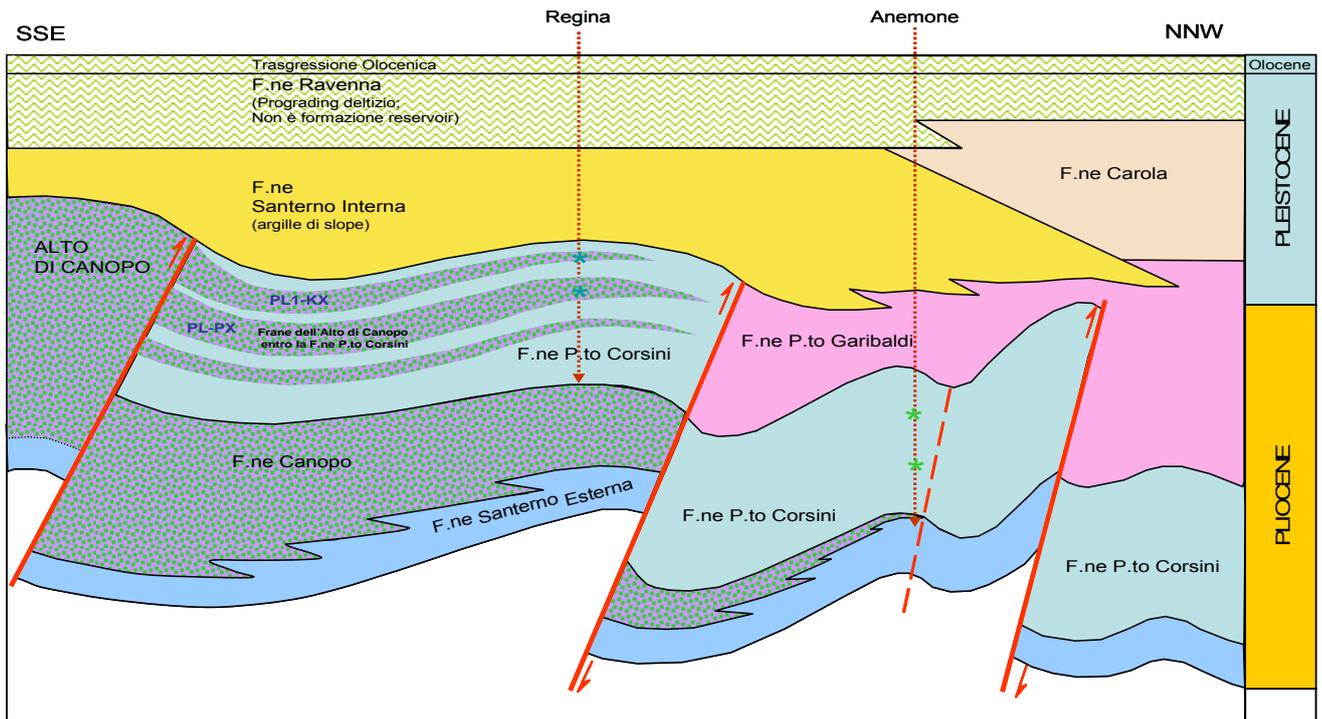


Figura 5.1

Figura 5.2



Bacino Adriatico: schema dei rapporti stratigrafici e dei principali reservoir (*) sviluppati dai campi



Bacino Adriatico: schema dei rapporti stratigrafico-strutturali dei campi Anemone e Regina

Figura 5.3

Campo di Regina Area giacimento e linee iso-subsidenza

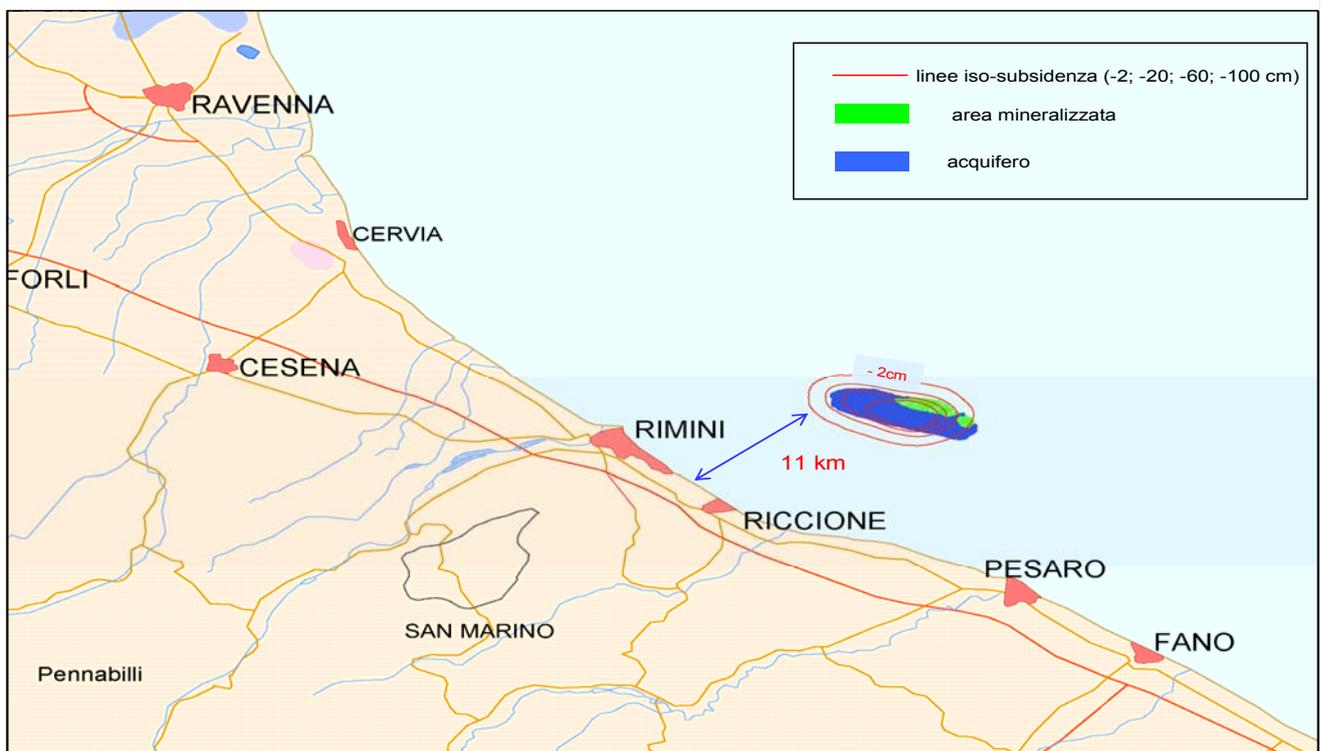


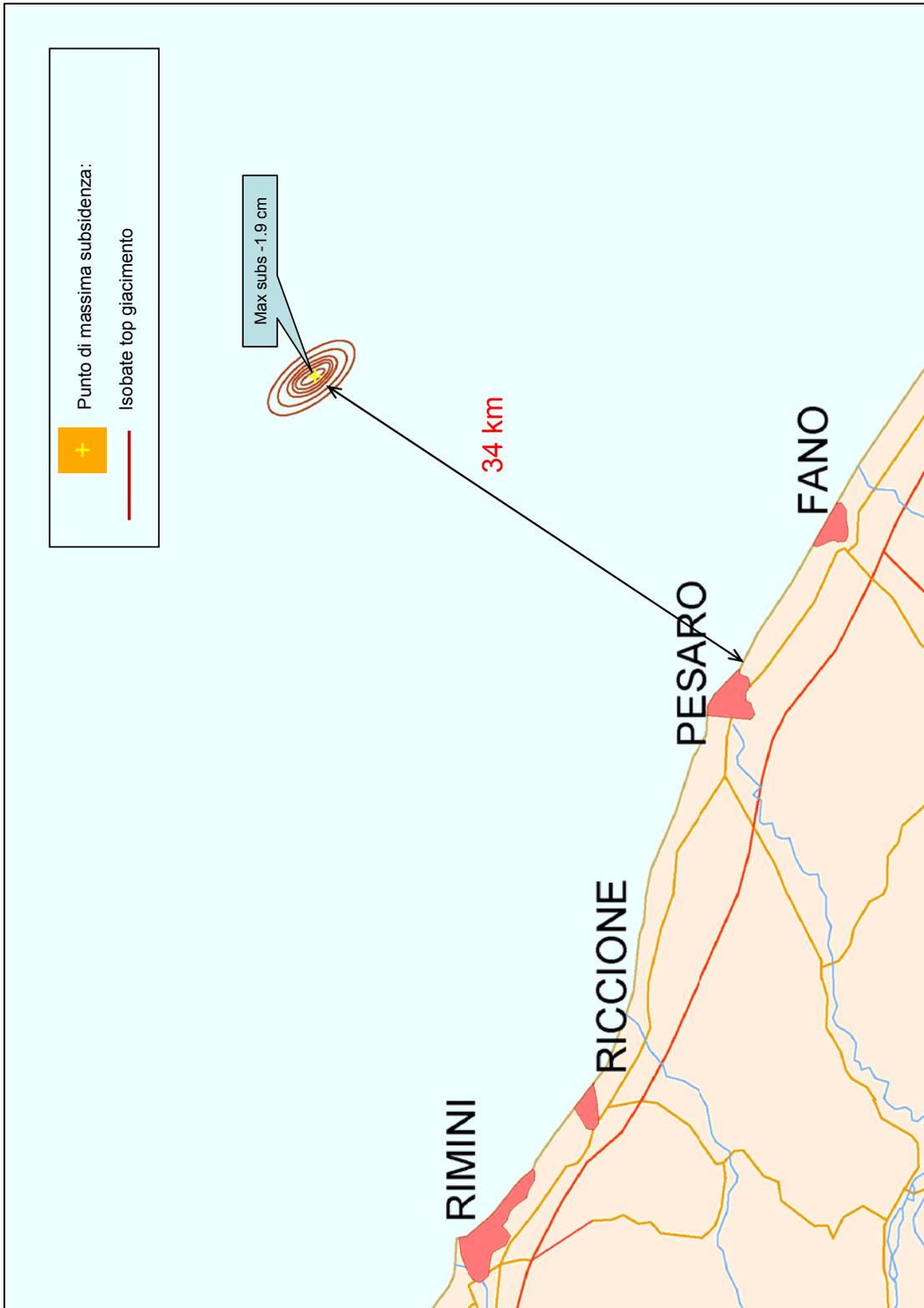
Figura 5.4

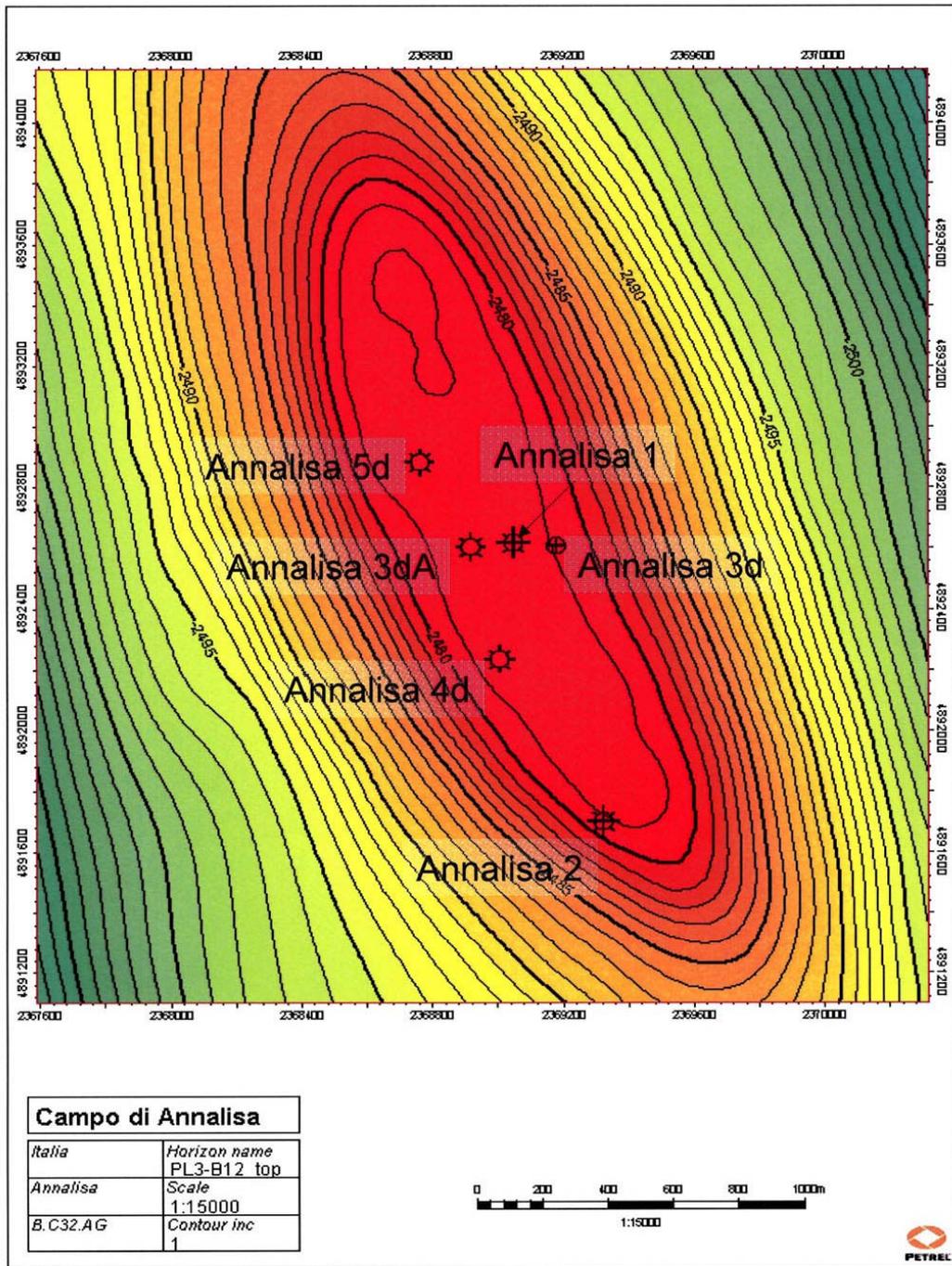
campo REGINA (J.V. Eni 75% operatore - Edison Gas 25%)	
DECRETO VIA n. 2734 del 4 aprile 1997 -	
DATI DI CAMPO	
UBICAZIONE	offshore - 17 Km a Est di Rimini
PROFONDITA' FONDALE	20 m
LITOLOGIA	sabbie grossolane
FORMAZIONE RESERVOIR	alio Canopo
ZONA MINERARIA	PL1 - PL
PROFONDITA' RESERVOIR	980-1250 (TVDSS)
TIPO DI PIATTAFORMA	BEAF
CARATTERISTICHE GEOLOGICHE	campo compartimentato da faglie
CONCESSIONE	D.M @ apr'97 @ 31 dic 2006
DATA SCADENZA CONCESSIONE	AC17.AG 26/05/2017
N. POZZI	6+1 (MonoT) 6+1 (MonoT)
RISERVE TECNICHE	2503 3986
A VITA INTERA (MSm3)	
START UP PRODUZIONE	Feb-98
FINE PRODUZIONE PREVISTA	2014
GAS PRODOTTO (MSm3)	3399
% RISERVE PRODOTTE	85%
PROGRAMMA PROD. 2007 (MSm3)	180.8
PRESCRIZIONI	
1) AGG. MODELLO SUBSIDENZA PRESENTATO CON IL SIA invio AGG. a : MATT e UNMIG / cadenza annuale	STATUS DELLE OTTEMPERANZE inviato a MATT: 30 ottobre 2006 / inviato a MISE e UNMIG: 22 dicembre 2006.
2) INSTALLAZIONE E SURVEY DEI MARKERS RADIOATTIVI invio DATI a : MATT e UNMIG / cadenza annuale	MARKERS SU REGINA 3D ULTIMO SURVEY: settembre 2006 eseguiti survey: lug.1997, ott.1997, sett. 2002, ott. 2003, luglio2005, sett.2006
3) LIVELLAZIONI invio DATI a : MATT e UNMIG / cadenza annuale	inviati dati livellazioni anni 1998-2005
MODELLI DI SUBSIDENZA	
STUDIO DI GIACIMENTO RISERVE (MSm3)	SIA MOD.STATICO E DINAMICO MONOCELLA "AGO 95" 2503 3986 ULTIMO AGGIORNAMENTO
MOD. GEOMECCANICO	CILINDRICO ELEMENTI FINITI
MAX SUBS AL CENTRO (cm)	7,2 (dopo 10 anni) 154 @ 2040
MAX DIST. CULMINE (Km)	2 (dopo 10 anni) 5,5 @ 2040
STATUS ATTUALE DEI MONITORAGGI E PREVISIONE AGGIORNAMENTI	
LIVELLAZIONI	PROCEDE IL RILIEVO CON CADENZA ANNUALE DELLA "Dorsale Adriatica (TV-Pesaro)" NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE IL GIACIMENTO ULTIMO SURVEY SETT. 2006
MARKERS	
MODELLO SUBSIDENZA	AGGIORNATO MODELLO DI SUBSIDENZA (FEM) SETTEMBRE 2006
CGPS	PREVISTA, NEL 2007, NUOVA INSTALLAZIONE SULLA PIATTAFORMA E NELLA CENTRALE RUBICONE (ONSHORE)
SAR	ACQUISITA COPERTURA SAR (1992-2006) DEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LA PIATTAFORMA PER ANALISI INTEGRATA DEI DATI ALTIMETRICI E PER L'INSERIMENTO DELLA P.MA REGINA NEL PROGRAMMA DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA ATTUALMENTE IN CORSO IN MOLTI GIACIMENTI DELL'ADRIATICO

Tabella 1

5.2 Giacimento Annalisa

Per quanto riguarda il giacimento Annalisa, le analisi e le valutazioni sono riportate nel file allegato:





Campo di Annalisa MappaTop Livello PL3-B12

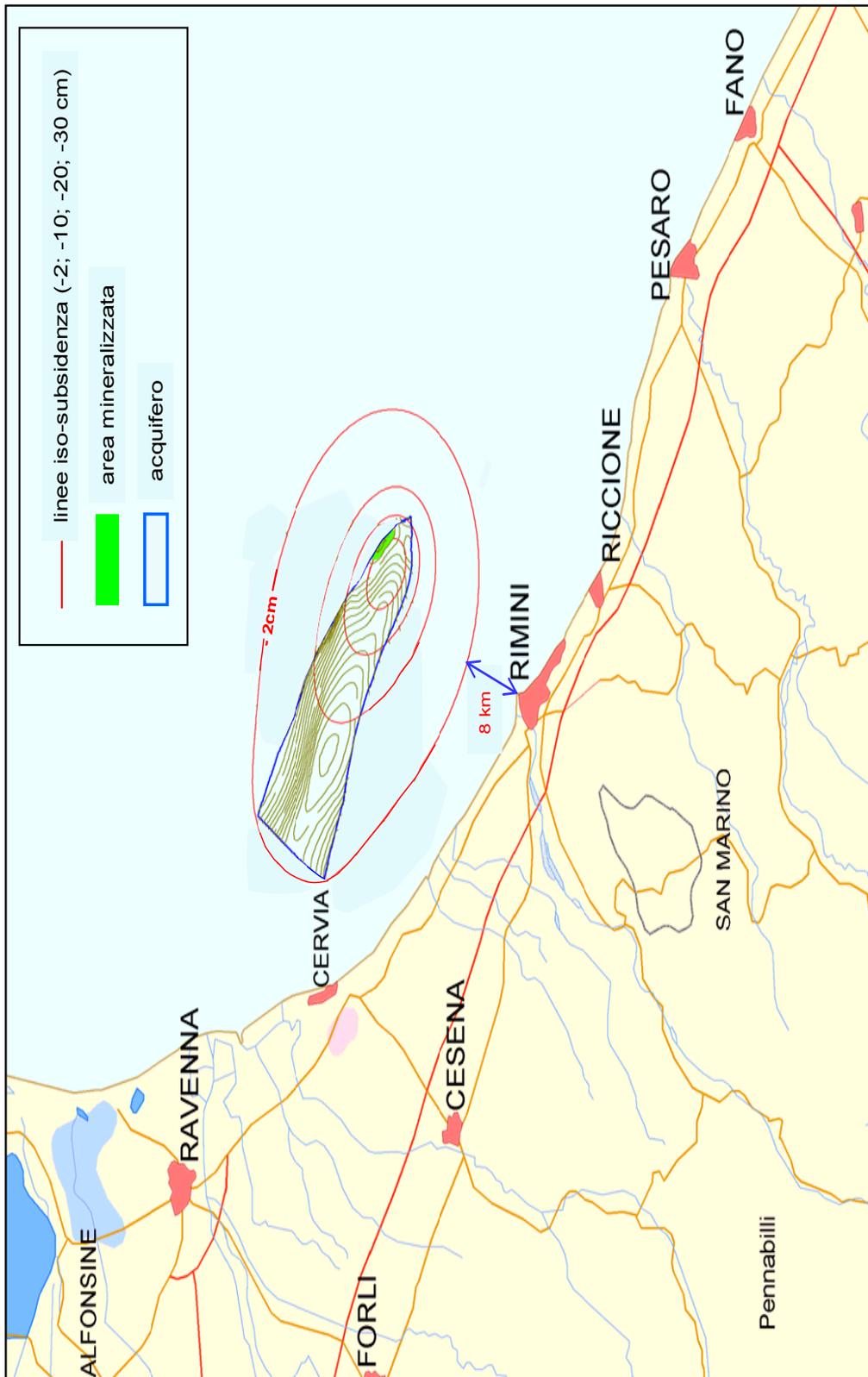
campo ANNALISA (Eni 100%)

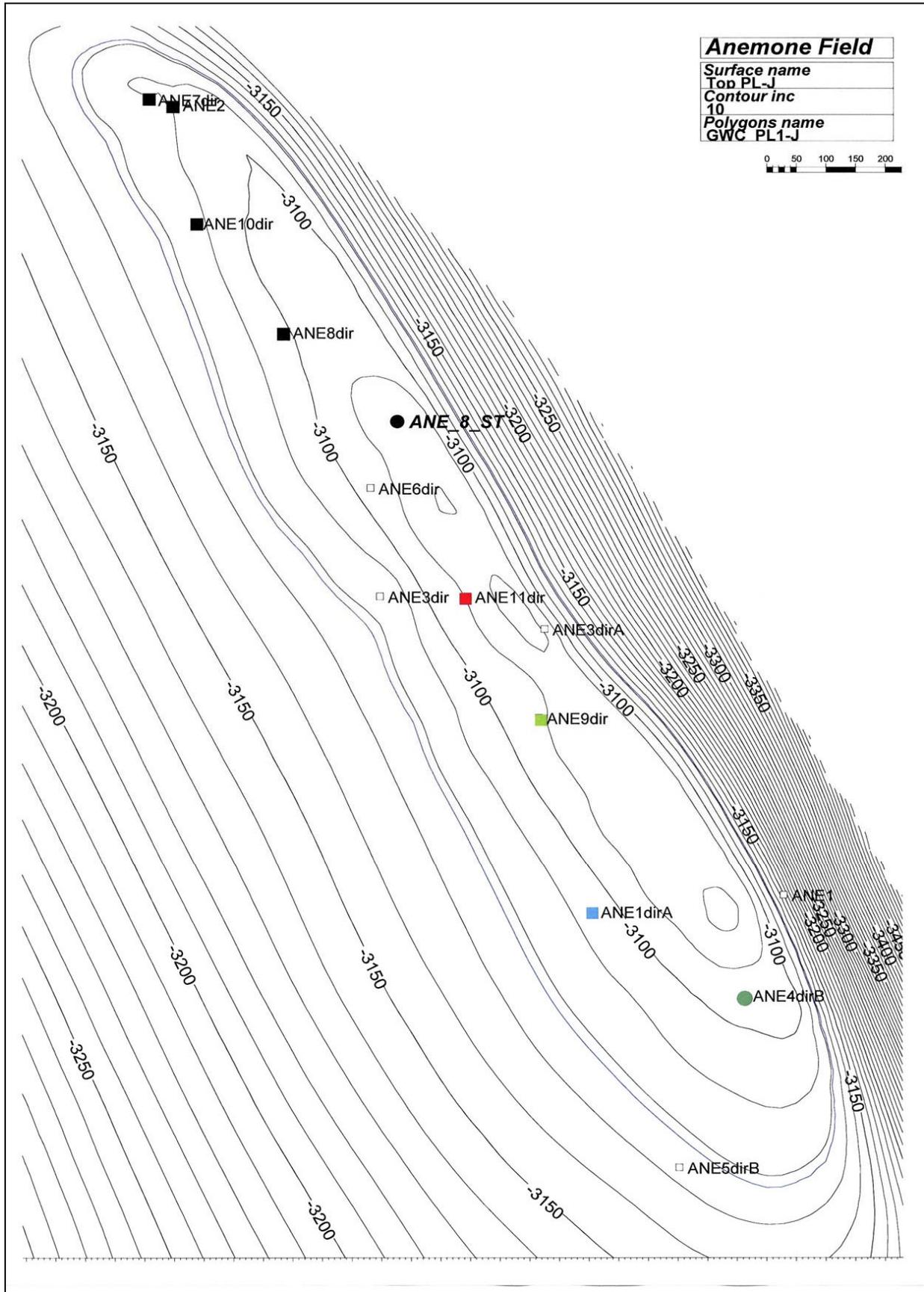
DATI DI CAMPO		DECRETO VIA n. 3547 del 7 gennaio 1999	
UBICAZIONE PROFONDTA' FONDALE	offshore - 34 Km a NE di Pesaro 55 m	PRESCRIZIONI	STATUS DELLE OTTEMPERANZE
LITOLOGIA FORMAZIONE RESERVOIR ZONA MINERARIA PROFONDTA' RESERVOIR TIPO DI PIATTAFORMA CARATTERISTICHE GEOLOGICHE	sabbie fini Porto Garibaldi PL3 2300-3400 (TV/DSS) BEAF blanda anticlinale	1) AGG. E TARATURA MODELLO SUBSIDENZA	Invio nuovo aggiornamento del modello a MATT: 17 GIUGNO 2005. In data 20 luglio 2006 inoltrata a MATT breve nota esplicativa sul modello di subsidenza già presentato.
		3) LIVELLAZIONI Invio DATI a : MATT e UNMIG / cadenza annuale	Inviati dati livellazioni anni 1998-2005
		#	#
MODELLI DI SUBSIDENZA			
		SIA	ULTIMO AGGIORNAMENTO
STUDIO DI GIACIMENTO	MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "MARZO 97"	MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "APRILE 05"	
RISERVE (MSm3)	1659	890	
MOD. GEOMECCANICO	CILINDRICO	SEMIANALITICO	
MAX SUBS AL CENTRO (cm)	3,2 (dopo 10 anni)	1,9 @ 2011	
MAX DIST. CULMINE (Km)	1,6 (dopo 10 anni)	NON SIGNIFICATIVA	
STATUS ATTUALE DEI MONITORAGGI E PREVISIONE AGGIORNAMENTI			
LIVELLAZIONI	PROCEDE IL RILIEVO CON CADENZA ANNUALE DELLA "Dorsale Adriatica (TV-Pesaro)" NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE IL GIACIMENTO		
MARKERS	NON PRESCRITTI		
MODELLO SUBSIDENZA	AGGIORNATO MODELLO DI SUBSIDENZA (Semianalitico) APRILE 2005		
CGPS	PREVISTA, NEL 2007, NUOVA INSTALLAZIONE SULLA PIATTAFORMA E NELLA CENTRALE FANO (ONSHORE)		
SAR	ACQUISITA COPERTURA SAR (1992-2006) DEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LA PIATTAFORMA PER ANALISI INTEGRATA DEI DATI ALTIMETRICI E PER L'INSERIMENTO DELLA P.MA ANNALISA NEL PROGRAMMA DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA ATTUALMENTE IN CORSO IN MOLTI GIACIMENTI DELL'ADRIATICO		

5.3 Giacimento Anemone II Fase

Per quanto riguarda il giacimento Anemone II Fase, le analisi e le valutazioni sono riportate nel file allegato:

Campo di Anemone
Area del giacimento e linee iso-subsidenza





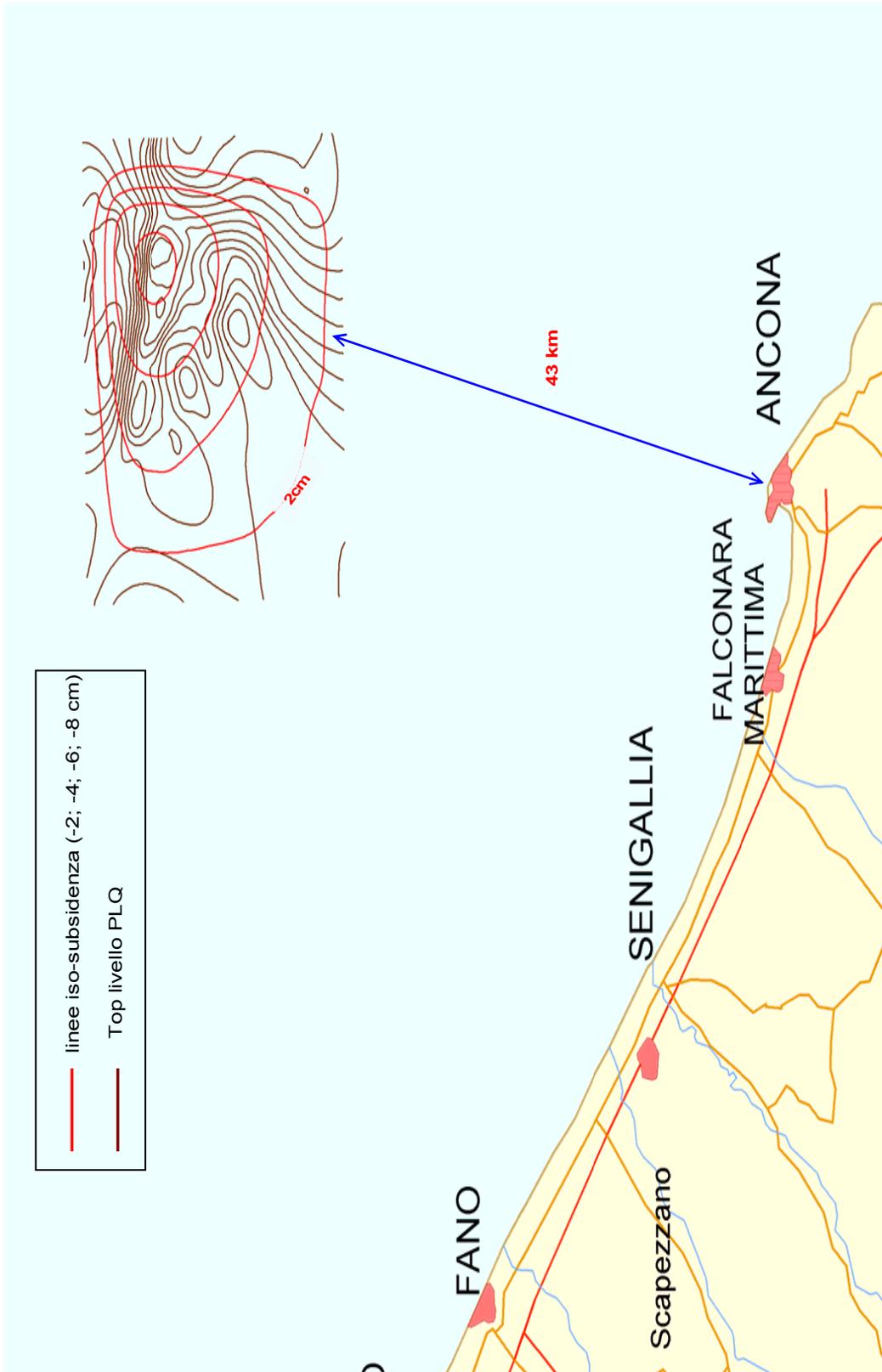
campo ANEMONE II^a FASE - piattaforma Anemone B - (J.V. Eni 81% operatore - Edison Gas 19%)

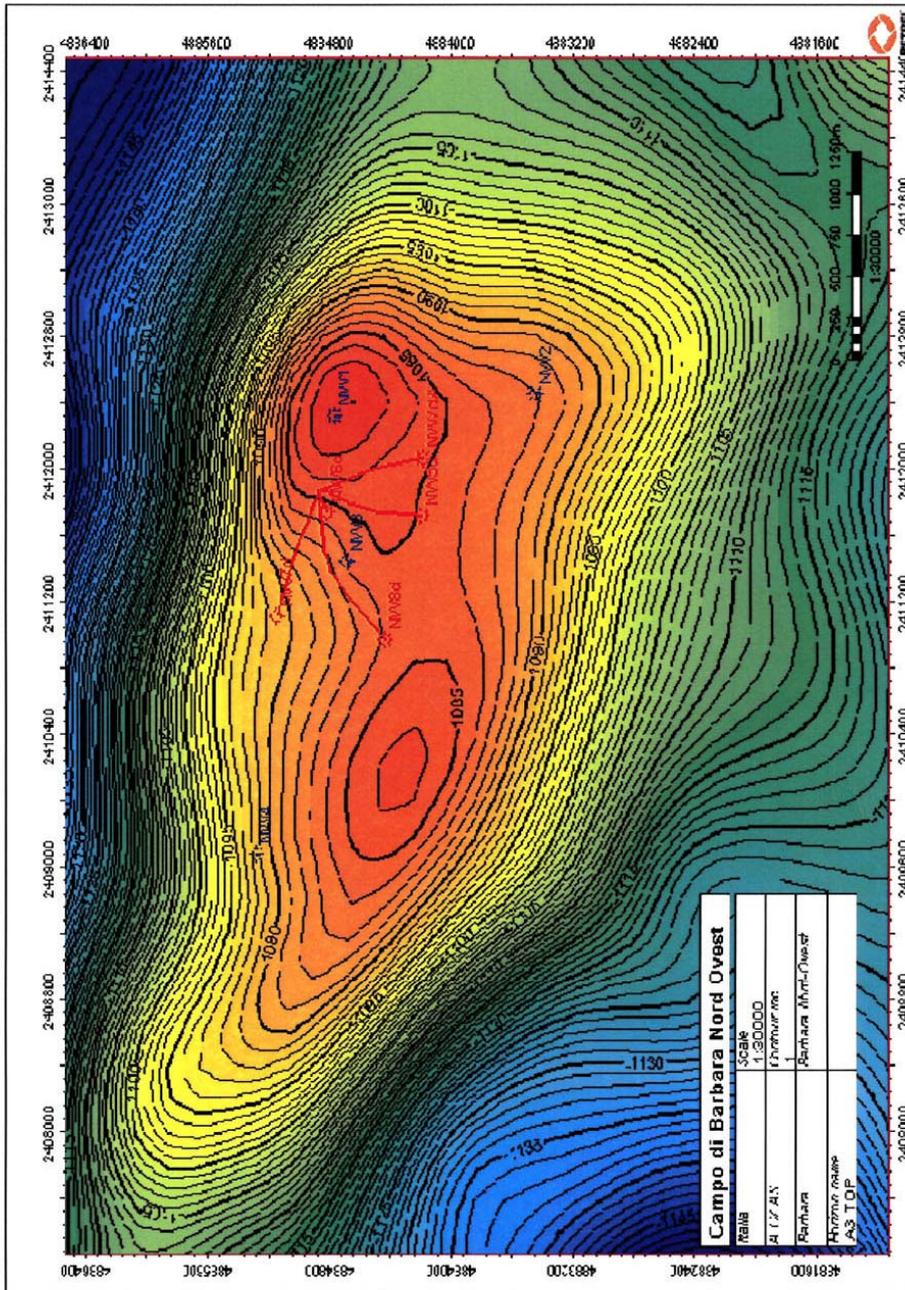
campo ANEMONE II ^a FASE - piattaforma Anemone B - (J.V. Eni 81% operatore - Edison Gas 19%)		DECRETO VIA n. 2979 del 3 marzo 1998 -	
DATI DI CAMPO			
UBICAZIONE PROFONDITA' FONDALE	offshore - 20 Km a NE di Rimini 23 m		
LITOLOGIA FORMAZIONE RESERVOIR ZONA MINERARIA PROFONDITA' RESERVOIR TIPO DI PIATTAFORMA (An. B) CARATTERISTICHE GEOLOGICHE	sabbie fini Porto Corsini PL1 - PL 2100 - 3370 (TVDSS) BEAF campo compartimentato da fraglie		
CONCESSIONE	A.C8.ME	D.M @ mar-98 @ 31 dic 2006	
DATA SCADENZA CONCESSIONE	05/11/2015		
N. POZZI	6	10	
RISERVE TECNICHE A VITA INTERA (MSm ³)	6100	5400	
START UP PRODUZIONE (set-76 campo)	mag 99-An.B		
FINE PRODUZIONE PREVISTA	2023	2040	
GAS PRODOTTO (MSm ³)		3904	
% RISERVE PRODOTTE		72%	
PROGRAMMA PROD. 2007 (MSm ³)		269.6	
PRESCRIZIONI			
1) MODELLO DI SUBSIDENZA		STATUS DELLE OTTEMPERANZE inviato a MATT: 29 settembre 2006	
2) INSTALLAZIONE E SURVEY DEI MARKERS RADIOATTIVI inviio DATI a : MATT e UNMIG / cadenza annuale		MARKERS SU ANEMONE 6D ULTIMO SURVEY: marzo 2006 eseguiti survey: ott.1998, sett.2002, marzo 2006	
3) LIVELLAZIONI inviio DATI a : MATT e UNMIG / cadenza annuale		inviati dati livellazioni anni 1998-2005	
4) PRELIEVO CAMPIONI DEI TERRENI ATTRAVERSATI inviio DATI a : MATT e UNMIG		Prelievo Carote di fondo su Anemone 11D Inviato dati posizione stratigrafica / descrizione litologica	
MODELLI DI SUBSIDENZA			
ULTIMO AGGIORNAMENTO			
STUDIO DI GIACIMENTO	MOD.STATICO E DINAMICO MONOCHELLA "GIU 95"	SIA	MOD.STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "SET 06"
RISERVE (MSm ³)	7142		5400
MOD. GEOMECCANICO	NON RICHIESTO		SEMANALITICO
MAX SUBS AL CENTRO (cm)	#		38.1 @ 2040
MAX DIST. CULMINE (Km)	#		12 @ 2060
STATUS ATTUALE DEI MONITORAGGI E PREVISIONE AGGIORNAMENTI			
LIVELLAZIONI	PROCEDE IL RILIEVO CON CADENZA ANNUALE DELLA "Dorsale Adriatica (TV-Pesaro)" NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE IL GIACIMENTO SURVEY: ott. 1998, sett. 2002, marzo 2006		
MARKERS	I AGGIORNAMENTO MODELLO DI SUBSIDENZA (F.E.M.) ENTRO 2007		
MODELLO SUBSIDENZA	PREVISTA, NEL 2007, NUOVA INSTALLAZIONE SULLA PIATTAFORMA E NELLA CENTRALE RUBICONE (ONSHORE)		
CGPS	ACQUISITA COPERTURA SAR (1992-2006) DEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LA PIATTAFORMA PER ANALISI INTEGRATE DEI DATI ALTIMETRICI E PER L'INSERIMENTO DELLA P.I.MA ANEMONE NEL PROGRAMMA DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA ATTUALMENTE IN CORSO IN MOLTI GIACIMENTI DELL'ADRIATICO		
SAR			

5.4 Giacimento Barbara NW

Per quanto riguarda il giacimento Barbara NW, le analisi e le valutazioni sono riportate nel file allegato:

Campo di Barbara NW: area giacimento e linee iso-subsidenza





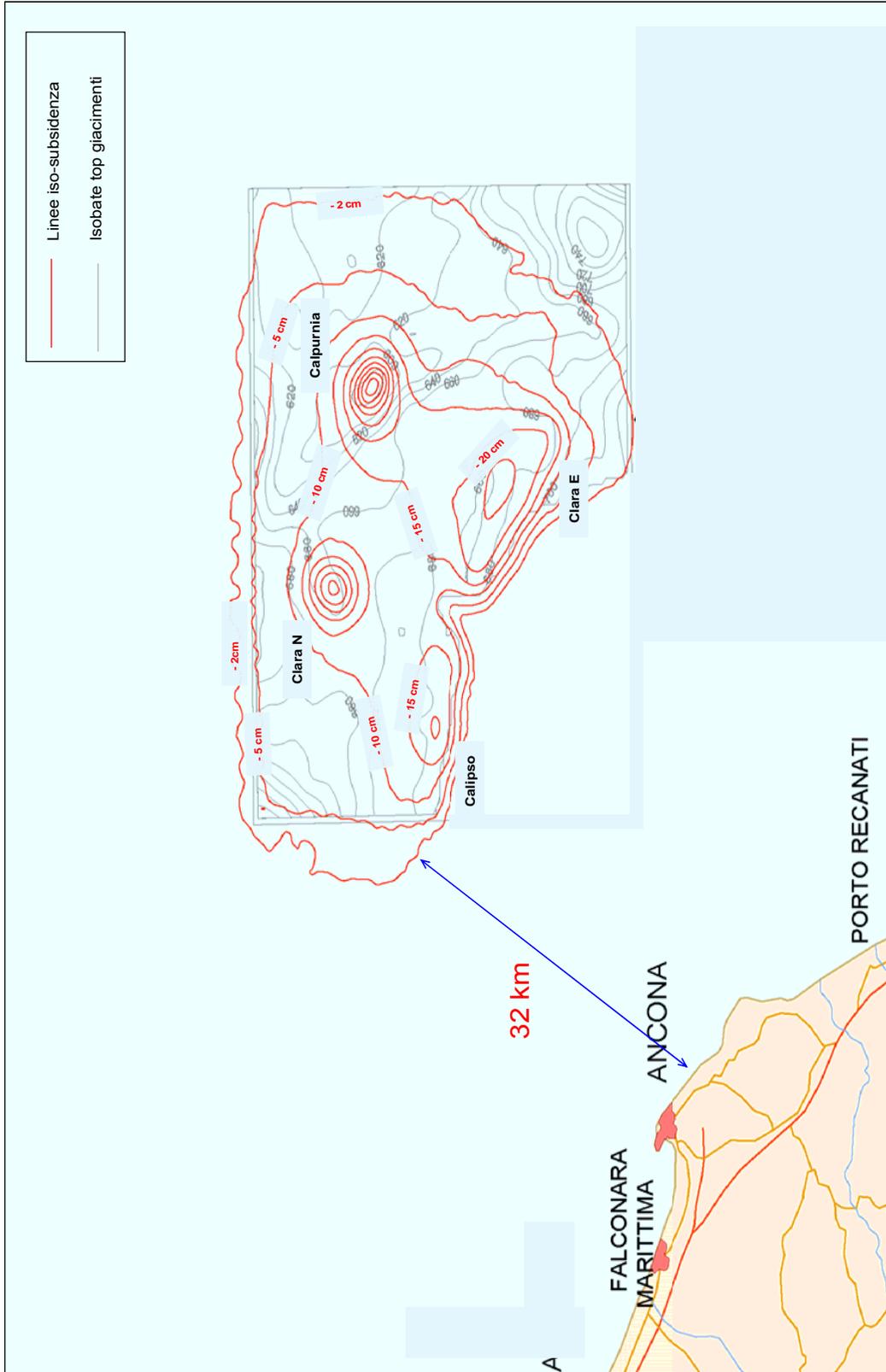
Campo di Barbara NW Mappa Top livello PLQ-A3

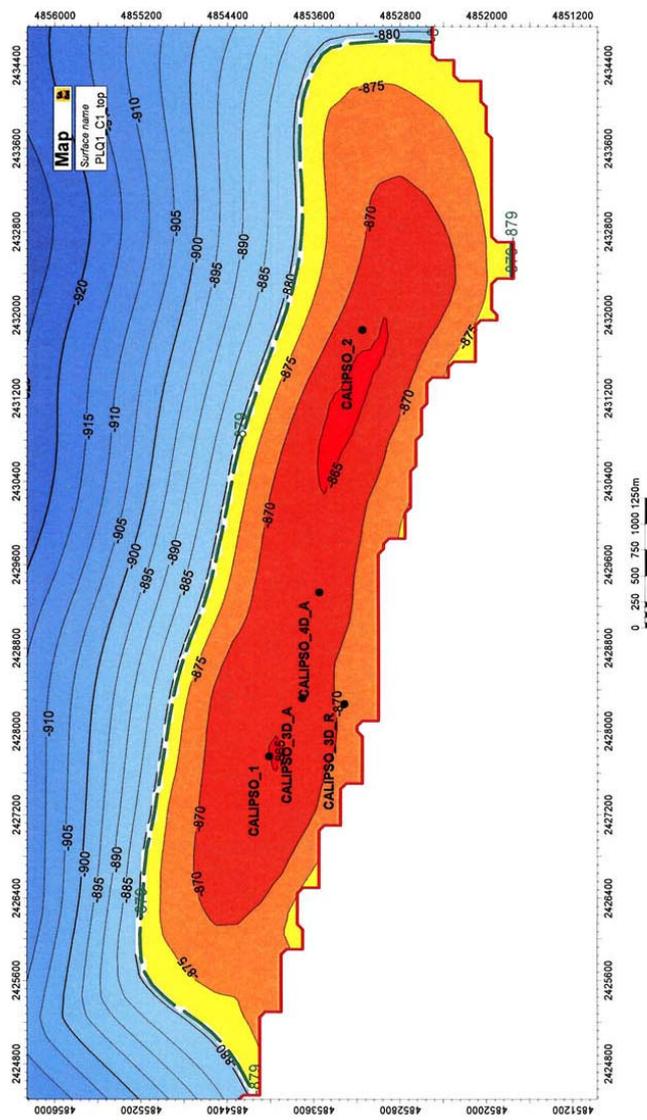
campo BARBARA NW (Eni 100%)	
DECRETO VIA n. 3477 del 15 DICEMBRE 1998 -	
DATI DI CAMPO	
UBICAZIONE PROFONDITA' FONDALE	offshore - 55 Km a NE di Ancona 70 m
LITOLOGIA FORMAZIONE RESERVOIR ZONA MINERARIA PROFONDITA' RESERVOIR TIPO DI PIATTAFORMA CARATTERISTICHE GEOLOGICHE	silt-sabbie fini in livelli sottili Carola PLQ1-PLQ 1000 - 1400 (TV/DSS) BEAF TORBIDI SOTTILI
CONCESSIONE	A.C7.AS @ 31 mag 2007
DATA SCADENZA CONCESSIONE	12/11/2014
N. POZZI	4
RISERVE TECNICHE A VITA INTERA (Msm ³)	2100
START UP PRODUZIONE	Sep-99
FINE PRODUZIONE PREVISTA	2024
GAS PRODOTTO (Msm ³)	792
% RISERVE PRODOTTE	73%
PROGRAMMA PROD. 2007 (Msm ³)	44.8
PRESCRIZIONI / Raccomandazioni	STATUS DELLE OTTEMPERANZE
NESSUNA PRESCRIZIONE / RACCOMANDAZIONE	#
#	#
#	#
MODELLI DI SUBSIDENZA	
	SIA
STUDIO DI GIACIMENTO RISERVE (Msm ³)	MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "SETT. '95" 2100
MOD. GEOMECCANICO	CILINDRICO SEMIALITICO
MAX SUBS AL CENTRO (cm)	18.6 (dopo 20 anni)
MAX DIST. CULMINE (Km)	3 (dopo 20 anni)
	ULTIMO AGGIORNAMENTO
	MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "MAGG. 07" 1080
	15.5 (dopo 10 anni)
	12 (dopo 24 anni)
STATUS ATTUALE DEI MONITORAGGI E PREVISIONE AGGIORNAMENTI	
LIVELLAZIONI	DAL 2006 SONO STATE INSERITE LINEE DI LIVELLAZIONE (Dorsale Pesaro-P.to S.Giorgio) NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE IL GIACIMENTO
MARKERS	NON PRESCRITTI
MODELLO SUBSIDENZA	AGGIORNATO MODELLO DI SUBSIDENZA (Semianalitico) MAGGIO 2007
CGPS	PREVISTO CGPS SULLA PIATTAFORMA E NELLA CENTRALE DI FALCONARA NEL 2007
SAR	ACQUISITA COPERTURA SAR (1992-2006) DEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LA PIATTAFORMA PER ANALISI INTEGRATE DEI DATI AL TIMETRICI E PER L'INSERIMENTO DELLA P.I.MA BARBARA NW NEL PROGRAMMA DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA ATTUALMENTE IN CORSO IN MOLTI GIACIMENTI DELL'ADRIATICO

5.5 Giacimento Calipso

Per quanto riguarda il giacimento Calipso, le analisi e le valutazioni sono riportate nel file allegato:

Clara complex: top giacimenti e linee di iso-subsidenza





CALIPSO– Mappa strutturale del Top PLQ1_C1

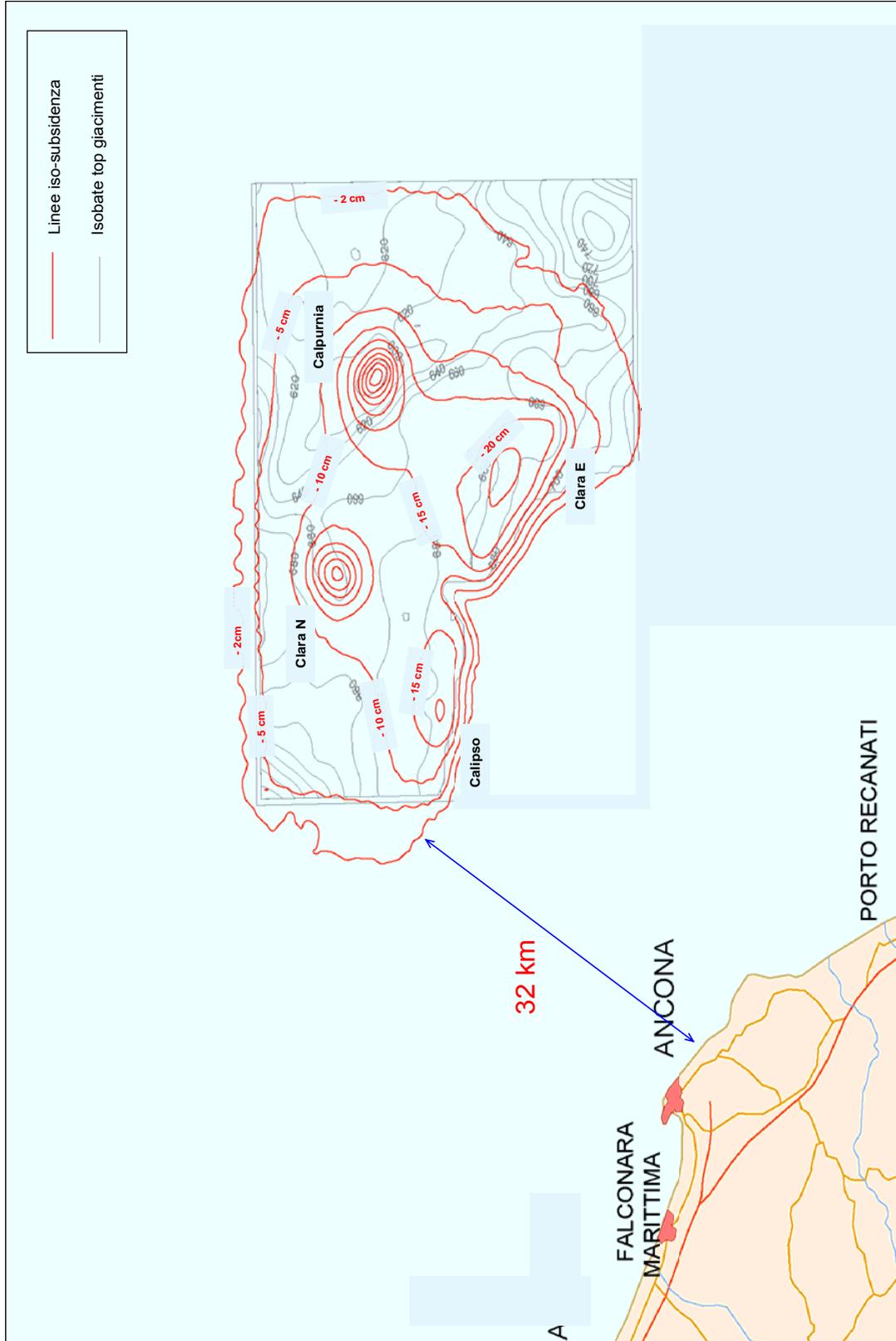
campo CALIPSO (J.V. Eni 51% - Edison Gas 49%)

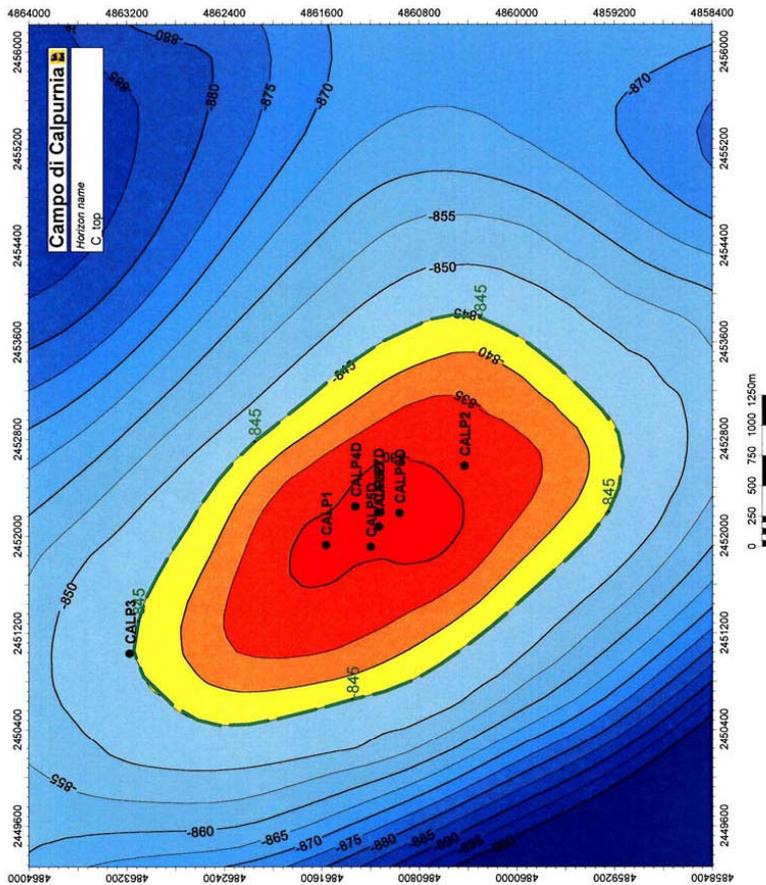
DATI DI CAMPO		DECRETO VIA n. 7078 del 22 MARZO 2002	
UBICAZIONE	offshore - 35 Km a E di Ancona	PRESCRIZIONI / Raccomandazioni 1) Prelievo di carote di parete <i>Prescrizione</i> Non prelevate a causa di problemi tecnici di pozzo Carote di parete e carote di fondo acquisite comunque nei pozzi esplorativo ed appraisal	STATUS DELLE OTTEMPERANZE NON PRESCRITTO
PROFONDITA' FONDALE	75 m		
LITOLOGIA	silt-sabbie fini in livelli sottili	2) aggiornamento e taratura modello subsidenza	NON PRESCRITTO
FORMAZIONE RESERVOIR	Carola		
ZONA MINERARIA	PLQ1-PLQ	2) inserire la piattaforma Calipso nel programma di monitoraggio della subsidenza attualmente in corso in molti giac. dell'Adriatico <i>Raccomandazione</i>	IN CORSO
PROFONDITA' RESERVOIR	800 - 1150 (TVDS)		
TIPO DI PIATTAFORMA	BEAF		
CARATTERISTICHE GEOLOGICHE	liv. reservoir in corpo coroidale		
CONCESSIONE		D.M@mar 02 @ 31 mag 2007	
DATA SCADENZA CONCESSIONE	B.C14.AS		
N. POZZI	27/05/2010	2	2
RISERVE TECNICHE		1805	1930
A VITA INTERA (MSm3)			
START UP PRODUZIONE	Nov-02		
FINE PRODUZIONE PREVISTA		2018	2020
GAS PRODOTTO (MSm3)			1018
% RISERVE PRODOTTE			53%
PROGRAMMA PROD. 2007 (MSm3)			170.8
MODELLI DI SUBSIDENZA			
	SIA		ULTIMO AGGIORNAMENTO
STUDIO DI GIACIMENTO	MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "AGOSTO '00"		MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "MAGGIO '07"
RISERVE (MSm3)	1805		1930
MOD. GEOMECCANICO	SEMANALITICO		ELEMENTI FINITI
MAX SUBS AL CENTRO (cm)	5.6 (dopo 12 anni)		21 (dopo 9 anni)
MAX DIST. CULMINE (Km)	2.5 (dopo 12 anni)		6 (dopo 38 anni Clara Est)
STATUS ATTUALE DEI MONITORAGGI E PREVISIONE AGGIORNAMENTI			
LIVELLAZIONI	DAL 2006 SONO STATE INSERITE LINEE DI LIVELLAZIONE (Dorsale Pesaro-P.to S.Giorgio) NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE IL GIACIMENTO		
MARKERS	NON PRESCRITTI		
MODELLO SUBSIDENZA	AGGIORNATO MODELLO DI SUBSIDENZA (F.E.M.) MAGGIO 2007		
CGPS	PREVISTO CGPS SULLA PIATTAFORMA E NELLA CENTRALE DI FALCONARA NEL 2007		
SAR	ACQUISITA COPERTURA SAR (1992-2006) DEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LA PIATTAFORMA PER ANALISI INTEGRATA DEI DATI ALTIMETRICI E PER L'INSERIMENTO DELLA P.MA CALIPSO NEL PROGRAMMA DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA ATTUALMENTE IN CORSO IN MOLTI GIACIMENTI DELL'ADRIATICO		

5.6 Giacimento Calpurnia

Per quanto riguarda il giacimento Calpurnia, le analisi e le valutazioni sono riportate nel file allegato:

Clara complex: top giacimenti e linee di iso-subsidenza





CALPURNIA– Mappa strutturale del Top PLQ1_C1

campo CALPURNIA (Eni 100%)

DECRETO VIA n. 4170 del 15 novembre 1999 -

DATI DI CAMPO

UBICAZIONE PROFONDITA' FONDALE	offshore - 55 Km a NE di Ancona 72 m
LITOLOGIA FORMAZIONE RESERVOIR ZONA MINERARIA PROFONDITA' RESERVOIR TIPO DI PIATTAFORMA CARATTERISTICHE GEOLOGICHE	silt-sabbie fini in livelli sottili Ravenna - Carola PLQ2 - PLQ1 - PLQ 570 - 1015 (TVDSS) BEAF torbiditi sottili

CONCESSIONE	D.M. @nov '99 @ 31 mag 2007
-------------	-----------------------------

DATA SCADENZA CONCESSIONE	01/10/2014	B.C22.AG
N. POZZI	5	5
RISERVE TECNICHE A VITA INTERA (MSm ³)	1980	2230
START UP PRODUZIONE	Oct-00	
FINE PRODUZIONE PREVISTA	2015	2015
GAS PRODOTTO (MSm ³)		1916
% RISERVE PRODOTTE		86%
PROGRAMMA PROD. 2007 (MSm ³)		114.9

PRESCRIZIONI	STATUS DELLE OTTEMPERANZE
1) PRELIEVO DI CAROTE DI PARETE	PRELEVATE CAROTE DI FONDO/PARETE SUL POZZO ESPLORATIVO/APPRASAL
2) AGG. E TARATURA MODELLO SUBSIDENZA	NON PRESCRITTO
3) * Resta ferma la necessità di intensificare e migliorare il sistema di alta precisione sulla costa adriatica	Dal 2006 nuove linee di livellazione in alta precisione sul tratto Pesaro-P.to S.Giorgio Prevista installazione del CGPS sulla piattaforma nel 2007
4) Studio del micropellet organico nel cono di subsidenza La successiva <u>Nota MATT del 29 maggio 2000</u> chiarisce che lo studio richiesto può far riferimento allo stato delle conoscenze attuali del problema... " (es.casi riportati in letteratura scientifica)	Per il campo di Calpurnia è previsto in via sperimentale il posizionamento di sensori di pressione per la misura delle variazioni del fondo mare. Contestualmente verrà realizzato lo studio prescritto.

MODELLI DI SUBSIDENZA

STUDIO DI GIACIMENTO RISERVE (MSm ³)	MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "FEBBRAIO '96" 1536 (su un profilo di produzione di 9 anni)	SIA	ULTIMO AGGIORNAMENTO
MOD. GEOMECCANICO	CILINDRICO		2230
MAX SUBS AL CENTRO (cm)	8 (dopo 9 anni)		ELEMENTI FINITI 53 (dopo 11 anni)
MAX DIST. CULMINE (Km)	2.5 (dopo 9 anni)		6 (dopo 38 anni Clara Est)

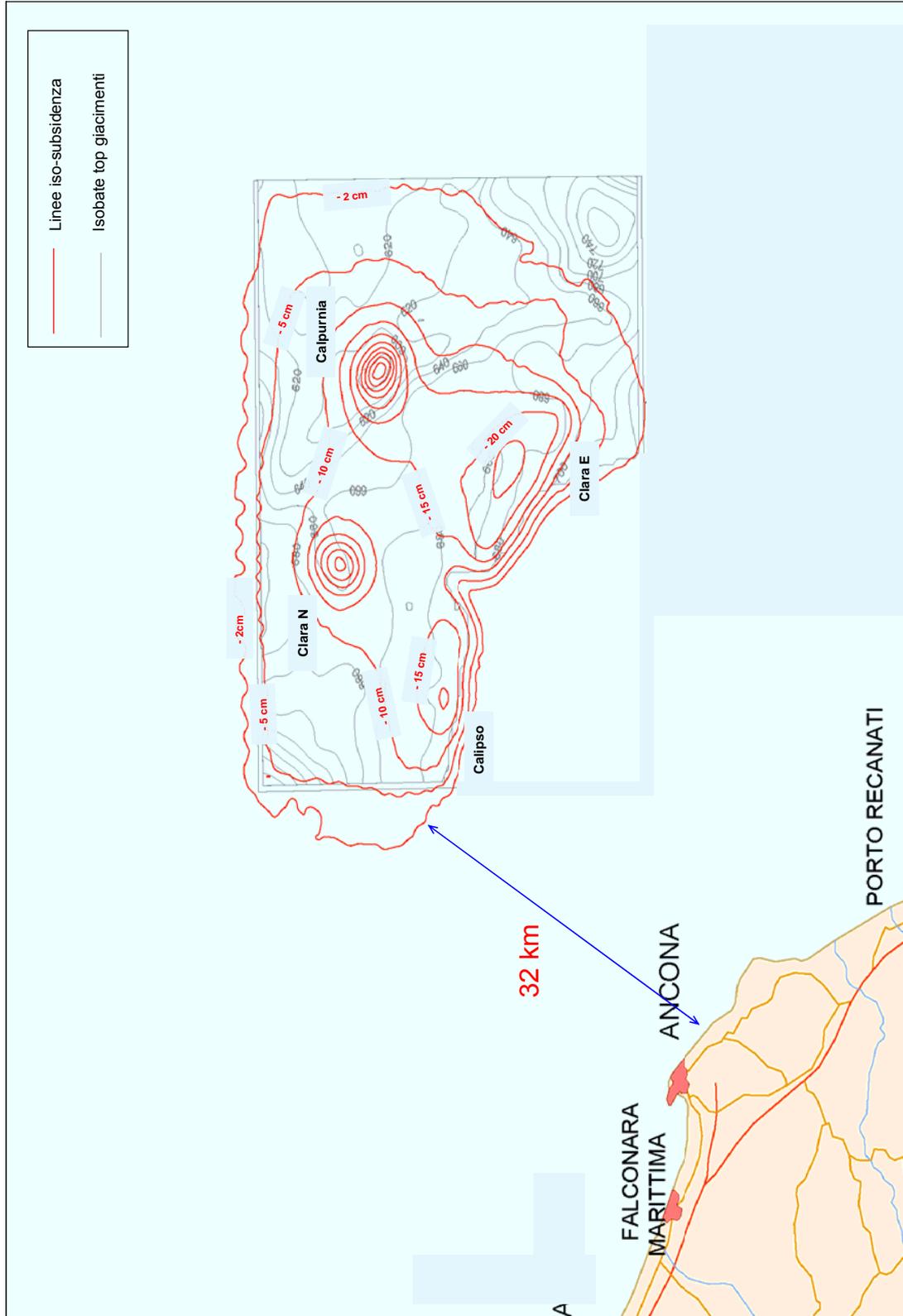
STATUS ATTUALE DEI MONITORAGGI E PREVISIONE AGGIORNAMENTI

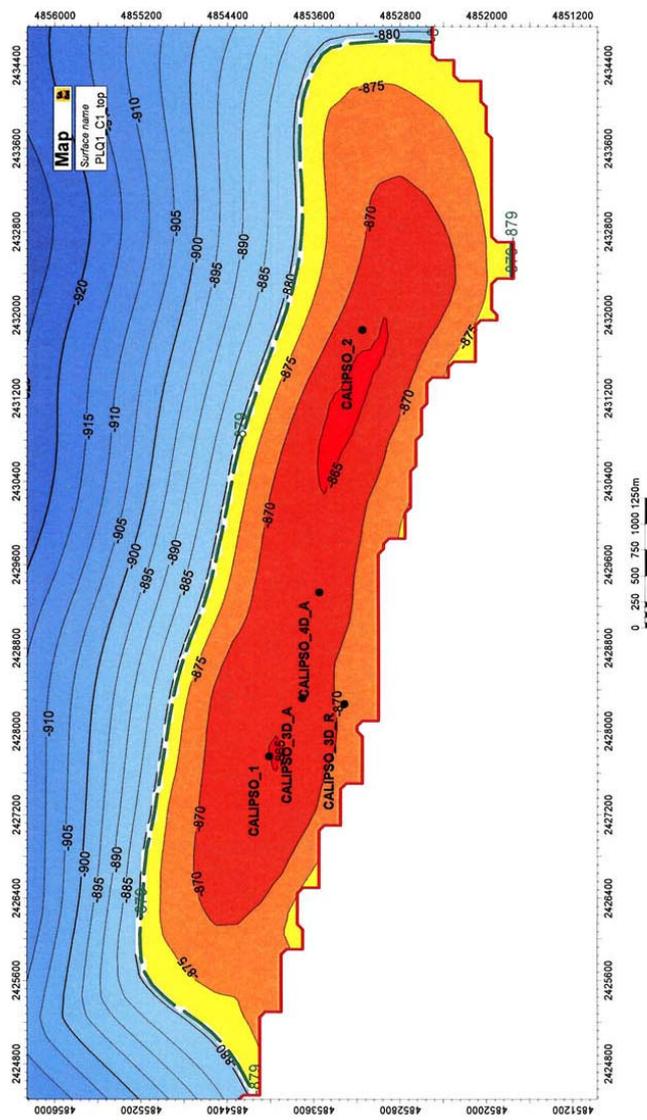
LIVELLAZIONI	DAL 2006 SONO STATE INSERITE LINEE DI LIVELLAZIONE (Dorsale Pesaro-P.to S.Giorgio) NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE IL GIACIMENTO	
MARKERS	NON PRESCRITTI	
MODELLO SUBSIDENZA	AGGIORNATO MODELLO DI SUBSIDENZA (F.E.M.) MAGGIO 2007	
CGPS	PREVISTO CGPS SULLA PIATTAFORMA E NELLA CENTRALE DI FALCONARA NEL 2007	
SAR	ACQUISITA COPERTURA SAR (1992-2006) DEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LA PIATTAFORMA PER ANALISI INTEGRATE DEI DATI AL TIME TRIGI E PER L'INSERIMENTO DELLA P.M.A CALPURNIA NEL PROGRAMMA DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA ATTUALMENTE IN CORSO IN MOLTI GIACIMENTI DELL'ADRIATICO	

5.7 Giacimento Clara Est

Per quanto riguarda il giacimento Clara Est, le analisi e le valutazioni sono riportate nel file allegato:

Clara complex: top giacimenti e linee di iso-subsidenza





CALIPSO– Mappa strutturale del Top PLQ1_C1

campi CLARA E + N (J.V. Eni 51% - Edison Gas 49%)

DECRETO VIA n. 4470 del 7 FEBBRAIO 2000 -

DATI DI CAMPO

UBICAZIONE	ofshore - 45 - 50 Km a NE di Ancona
PROFONDITA' FONDALE	73-75 m
LITOLOGIA	sabbie fini
FORMAZIONE RESERVOIR	CAROLA
ZONA MINERARIA	PLQ1- PLQ
PROFONDITA' RESERVOIR	760-1200 (TVDSS)
TIPO DI PIATTAFORMA	BEAF
CARATTERISTICHE GEOLOGICHE	TORBIDITI SOTTILI

CONCESSIONE	B.C.13.AS	D.M @feb '00	@ 31 mag 2007
-------------	-----------	--------------	---------------

DATA SCADENZA CONCESSIONE	27/05/2010
---------------------------	------------

N. POZZI	4 C.I.E 5 C.I.N	4 C.I.E 5 C.I.N
----------	--------------------	--------------------

RISERVE TECNICHE	3120 C.I.E 3460 C.I.N	2193 C.I.E 1006 C.I.N
------------------	--------------------------	--------------------------

A VITA INTERA (MSm3)	
----------------------	--

START UP PRODUZIONE	ott.2000 C.I.E dic.2000 C.I.N
---------------------	----------------------------------

FINE PRODUZIONE PREVISTA	2029 C.I. E 2029 C.I. N	2021 C.I.E 2024 C.I.N
--------------------------	----------------------------	--------------------------

GAS PRODOTTO (MSm3)	1498 C.I. E 888 C.I. N
---------------------	---------------------------

% RISERVE PRODOTTE	68% C.I.E 88% C.I.N
--------------------	------------------------

PROGRAMMA PROD. 2007 (MSm3)	147,5 C.I.E 49,4 C.I.N
-----------------------------	---------------------------

PRESCRIZIONI	STATUS DELLE OTTEMPERANZE
1) AGG. E TARATURA MODELLO SUBSIDENZA	inviato a MATT: 03 AGOSTO 2006 In data 20 luglio 2006 inviata breve nota esplicativa sul modello di subs. già inoltrato.
3) LIVELLAZIONI invio DATI a : MATT e UNMIG / cadenza annuale	Dal 2006 nuove linee di livellazione in alta precisione sul tratto Pesaro-P.to S.Giorgio

MODELLI DI SUBSIDENZA

	SIA	ULTIMO AGGIORNAMENTO
STUDIO DI GIACIMENTO	MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "MAGGIO 98"	MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "MAGGIO 07"
RISERVE (MSm3)	3120 C.I. E / 3460 C.I. N	2193 C.I. E / 1006 C.I. N
MOD. GEOMECCANICO	CILINDRICO	ELEMENTI FINITI
MAX SUBS AL CENTRO (cm)	10 (C.I.E) / 14 (C.I.N) (dopo 15 anni)	24.2 (C.I.E) @ 2021 / 40.3 (C.I.N) @ 2007
MAX DIST. CULMINE (Km)	4.3 (C.I.E) / 2.8 (C.I.N) (dopo 15 anni)	6 (dopo 38 anni Clara Est)

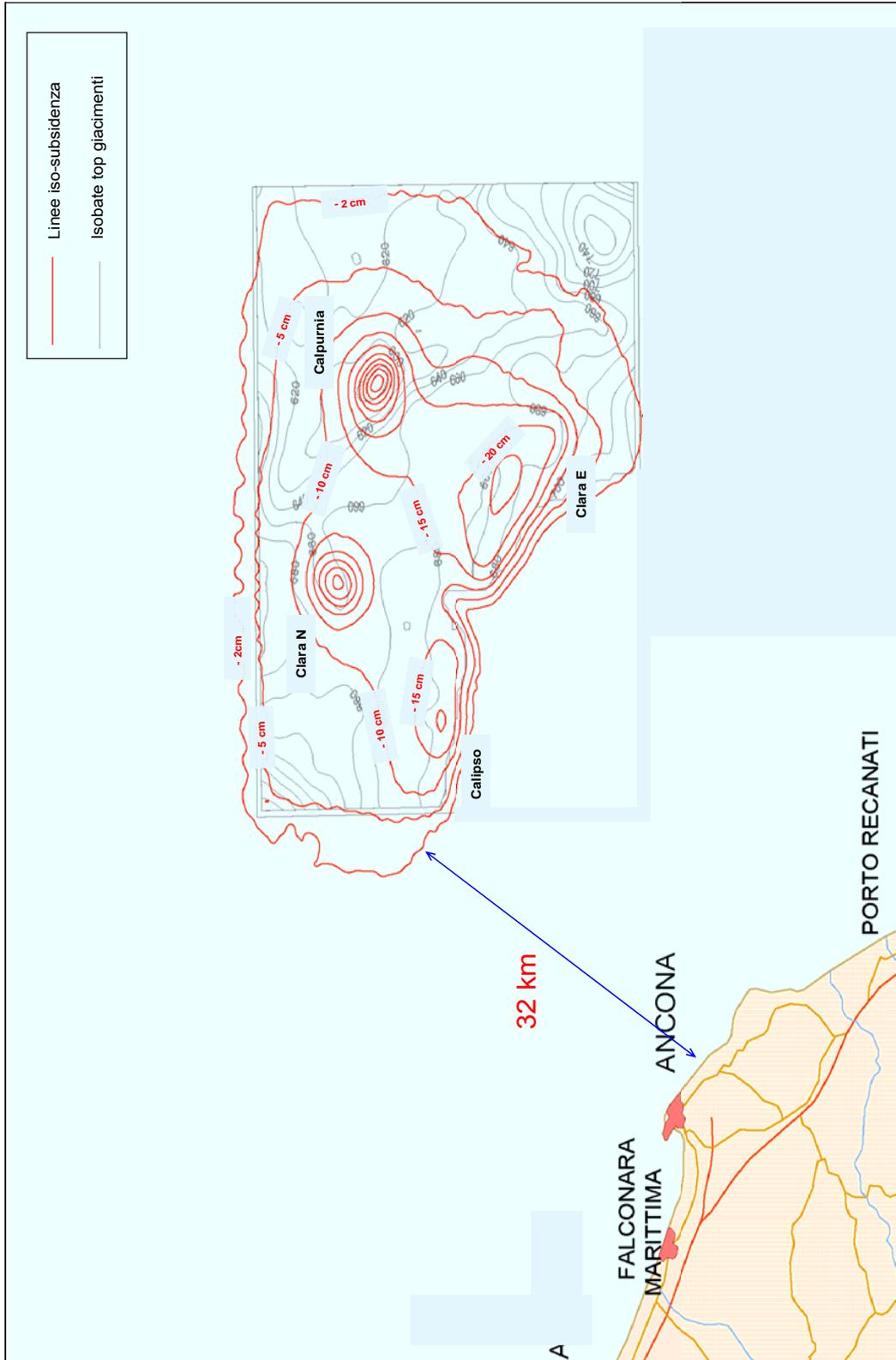
STATUS ATTUALE DEI MONITORAGGI E PREVISIONE AGGIORNAMENTI

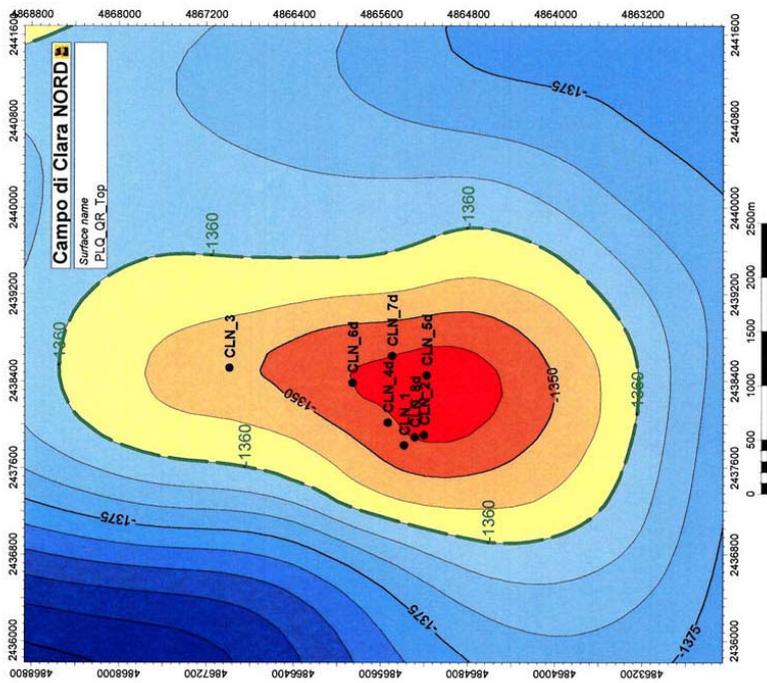
LIVELLAZIONI	DAL 2006 SONO STATE INSERITE LINEE DI LIVELLAZIONE (Dorsale Pesaro-P.to S.Giorgio) NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE I GIACIMENTI	
MARKERS	NON PRESCRITTI	
MODELLO SUBSIDENZA	AGGIORNATO MODELLO DI SUBSIDENZA (F.E.M.) MAGGIO 2007	
CGPS	PREVISTA, NEL 2007, NUOVA INSTALLAZIONE SULLE PIATTAFORME E NELLA CENTRALE FANO (ONSHORE)	
SAR	ACQUISITA COPERTURA SAR (1992-2006) DEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LA PIATTAFORMA PER ANALISI INTEGRATA DEI DATI ALTIMETRICI E PER L'INSERIMENTO DELLE P.ME CLARA E+N NEL PROGRAMMA DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA ATTUALMENTE IN CORSO IN MOLTI GIACIMENTI DELL'ADRIATICO	

5.8 Giacimento Clara Nord

Per quanto riguarda il giacimento Clara Nord, le analisi e le valutazioni sono riportate nel file allegato:

Clara complex: top giacimenti e linee di iso-subsidenza





CLARA NORD– Mappa strutturale del Top PLQ-Q

campi CLARA E + N (J.V. Eni 51% - Edison Gas 49%)

DECRETO VIA n. 4470 del 7 FEBBRAIO 2000 -

DATI DI CAMPO

UBICAZIONE PROFONDATA FONDALE	offshore - 45 - 50 Km a NE di Ancona 73-75 m
LITOLOGIA	sabbie fini
FORMAZIONE RESERVOIR	CAROLA
ZONA MINERARIA	PLQ1- PLQ
PROFONDATA RESERVOIR	750-1200 (TVDSS)
TIPO DI PIATTAFORMA	BEAF
CARATTERISTICHE GEOLOGICHE	TORBIDITI SOTTILI

CONCESSIONE	D.M @feb '00 @ 31 mag 2007
-------------	----------------------------

DATA SCADENZA CONCESSIONE	B.C13.AS 27/05/2010
---------------------------	-------------------------------

N. POZZI	4 CI. E 5 CI. N
----------	--------------------

RISERVE TECNICHE	2193 CI.E 1006 CI.N
------------------	------------------------

A VITA INTERA (MSm3)	3460 CI.N
----------------------	-----------

START UP PRODUZIONE	ott.2000 CI.E dic.2000 CI.N
---------------------	--------------------------------

FINE PRODUZIONE PREVISTA	2029 CI. E 2013 CI.N
--------------------------	-------------------------

GAS PRODOTTO (MSm3)	1498 CI. E 888 CI. N
---------------------	-------------------------

% RISERVE PRODOTTE	68% CI.E 88% CI.N
--------------------	----------------------

PROGRAMMA PROD. 2007 (MSm3)	147,5 CI.E 49,4 CI.N
-----------------------------	-------------------------

PRESCRIZIONI	STATUS DELLE OTTEMPERANZE
--------------	----------------------------------

1) AGG. E TARATURA MODELLO SUBSIDENZA
in data 20 luglio 2006 inviata breve nota esplicativa sul modello di subs. già inoltrato.

3) LIVELLAZIONI
invio DATI a : MATT e UNMIG / cadenza annuale

Dal 2006 nuove linee di livellazione in alta precisione sul tratto Pesaro-P.to S.Giorgio

MODELLI DI SUBSIDENZA

	SIA	ULTIMO AGGIORNAMENTO
--	------------	-----------------------------

STUDIO DI GIACIMENTO MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "MAGGIO 98" MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "MAGGIO '07"

RISERVE (MSm3) 3120 CI. E / 3460 CI.N 2193 CI. E / 1006 CI. N

MOD. GEOMECCANICO CILINDRICO ELEMENTI FINITI

MAX SUBS AL CENTRO (cm) 10 (CI.E) / 14 (CI.N) (dopo 15 anni) 24.2 (CI.E) @ 2021 / 40.3 (CI.N) @ 2007

MAX DIST. CULMINE (Km) 4.3 (CI.E) / 2.8 (CI.N) (dopo 15 anni) 6 (dopo 38 anni Clara Est)

STATUS ATTUALE DEI MONITORAGGI E PREVISIONE AGGIORNAMENTI

LIVELLAZIONI DAL 2006 SONO STATE INSERITE LINEE DI LIVELLAZIONE (Dorsale Pesaro-P.to S. Giorgio)

MARKERS NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE I GIACIMENTI:
NON PRESCRITTI

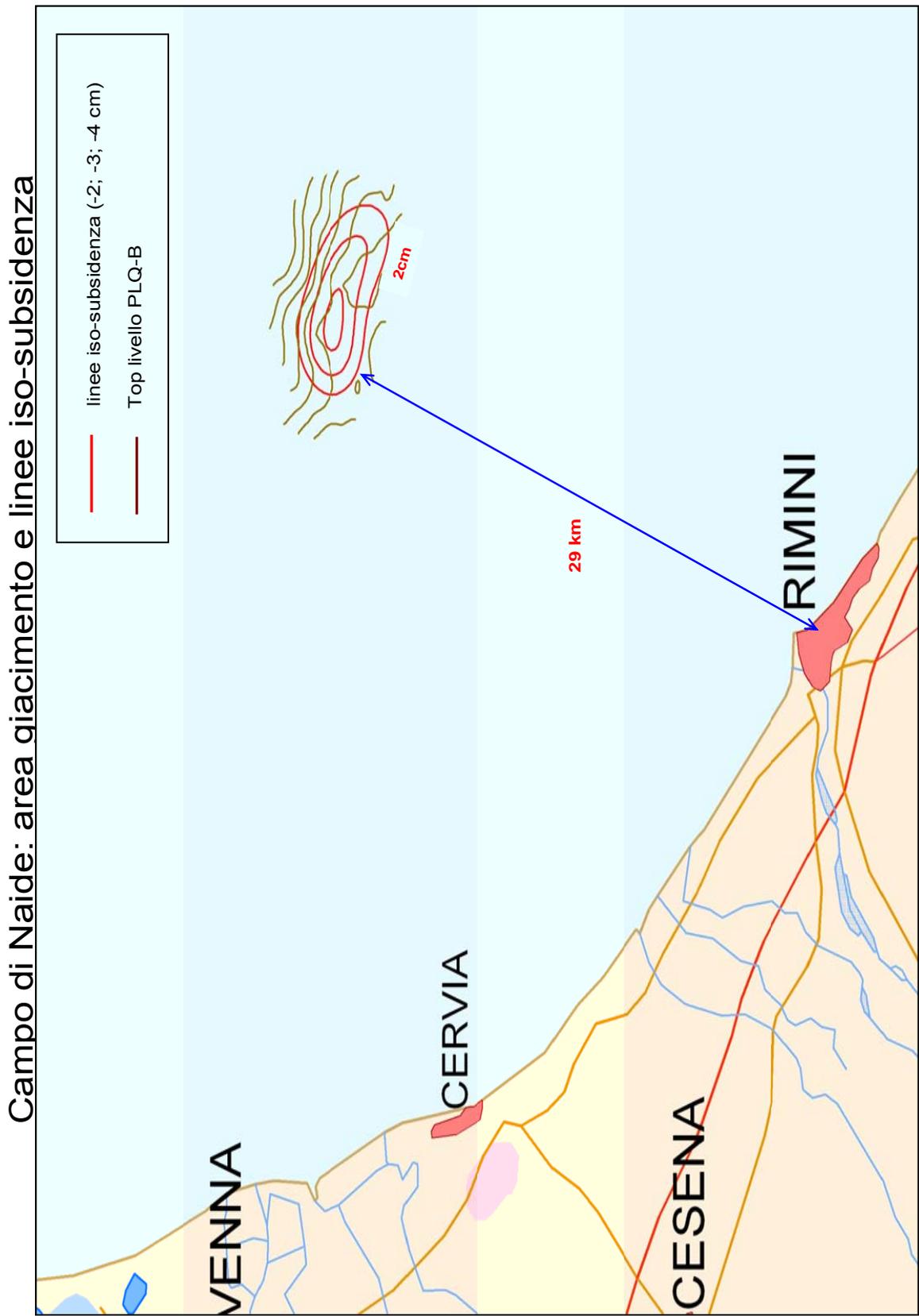
MODELLO SUBSIDENZA AGGIORNATO MODELLO DI SUBSIDENZA (F.E.M.) MAGGIO 2007

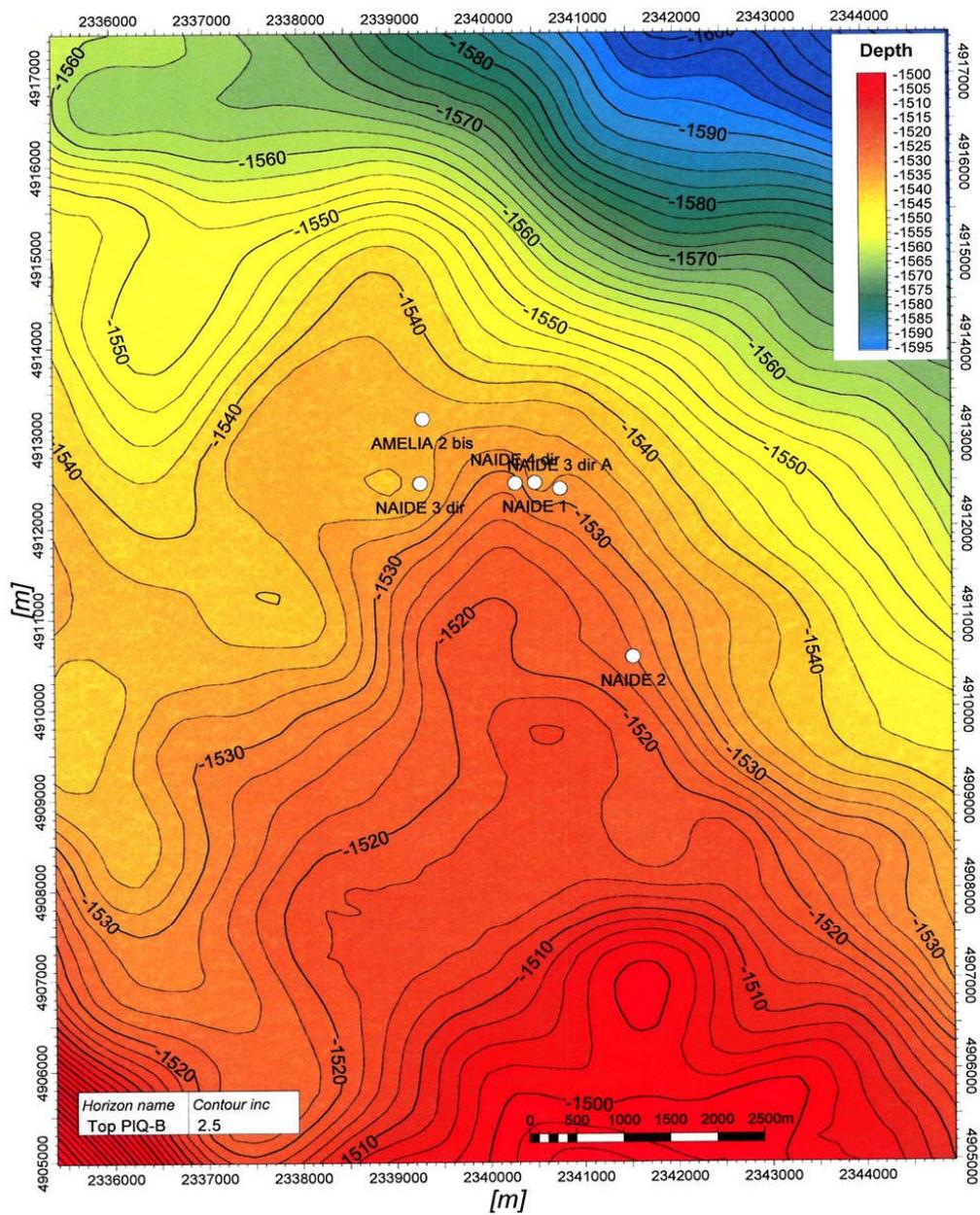
CGPS PREVISTA, NEL 2007, NUOVA INSTALLAZIONE SULLE PIATTAFORME E NELLA CENTRALE FANO (ONSHORE)

SAR ACQUISITA COPERTURA SAR (1992-2006) DEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LA PIATTAFORMA PER ANALISI INTEGRATE DEI DATI ALTIMETRICI E PER L'INSERIMENTO DELLE P.ME CLARA E+N NEL PROGRAMMA DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA ATTUALMENTE IN CORSO IN MOLTI GIACIMENTI DELL'ADRIATICO

5.9 Giacimento Naide

Per quanto riguarda il giacimento Naide, le analisi e le valutazioni sono riportate nel file allegato:





Campo di Naide Mappa Top livello PLQ-B

campo NAIDE (J.V. Eni 51% - Edison Gas 49%)

DECRETO VIA n. 7486 del 22 LUGLIO 2002 -

DATI DI CAMPO

UBICAZIONE PROFONDITA' FONDALE	offshore - 32 Km a E di Cesenatico 36 m
LITOLOGIA	silt-sabbie fini in livelli sottili
FORMAZIONE RESERVOIR	Carola - Pt. Garibaldi
ZONA MINERARIA	PLQ-PL3
PROFONDITA' RESERVOIR	1500 - 3000 (TVDS)
TIPO DI PIATTAFORMA	Mondobolare
CARATTERISTICHE GEOLOGICHE	liv. reservoir in corpo concoidale

CONCESSIONE	A.C21.AG	D.M@ 7-2002	@ 31 dic 2006
-------------	----------	-------------	---------------

DATA SCADENZA CONCESSIONE	09/11/2024		
N. POZZI	2		2
RISERVE TECNICHE	1800		1800
A VITA INTERA (MSm3)			
START UP PRODUZIONE	Jun-05		
FINE PRODUZIONE PREVISTA		#	2024
GAS PRODOTTO (MSm3)			194
% RISERVE PRODOTTE			11%
PROGRAMMA PROD. 2007 (MSm3)			95.1

PRESCRIZIONI / Raccomandazioni	STATUS DELLE OTTENPERANZE
1) Prelievo di carote di parete <i>Prescrizione</i>	Prelevate 32 carote di parete inviato al IMATT dati sul prelievo carote
2) inserire la piattaforma Naide nel programma di monitoraggio della subsidenza attualmente in corso in molti giac. dell'Adriatico <i>Raccomandazione</i>	inviati dati livellazioni anni 1998-2005 installato CGPS sulla piattaforma

MODELLI DI SUBSIDENZA

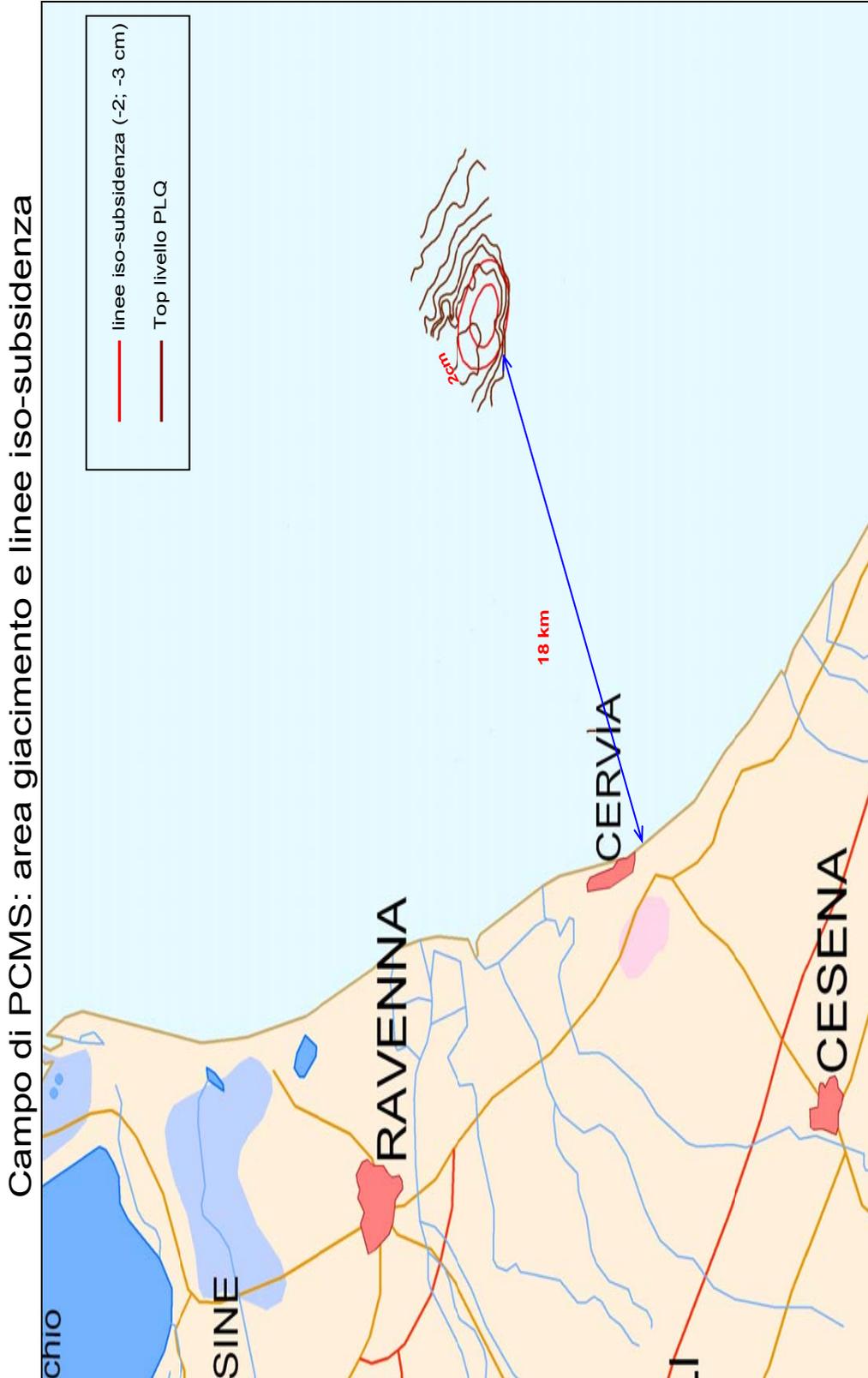
STUDIO DI GIACIMENTO	MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "APRILE '00"	MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "APRILE '00"	ULTIMO AGGIORNAMENTO
RISERVE (MSm3)	1800	1800	
MOD. GEOMECCANICO	SEMANALITICO	SEMANALITICO	
MAX SUBS AL CENTRO (cm)	5 @ 2022	5 @ 2022	
MAX DIST. CULMINE (Km)	2,5 @ 2022	2,5 @ 2022	

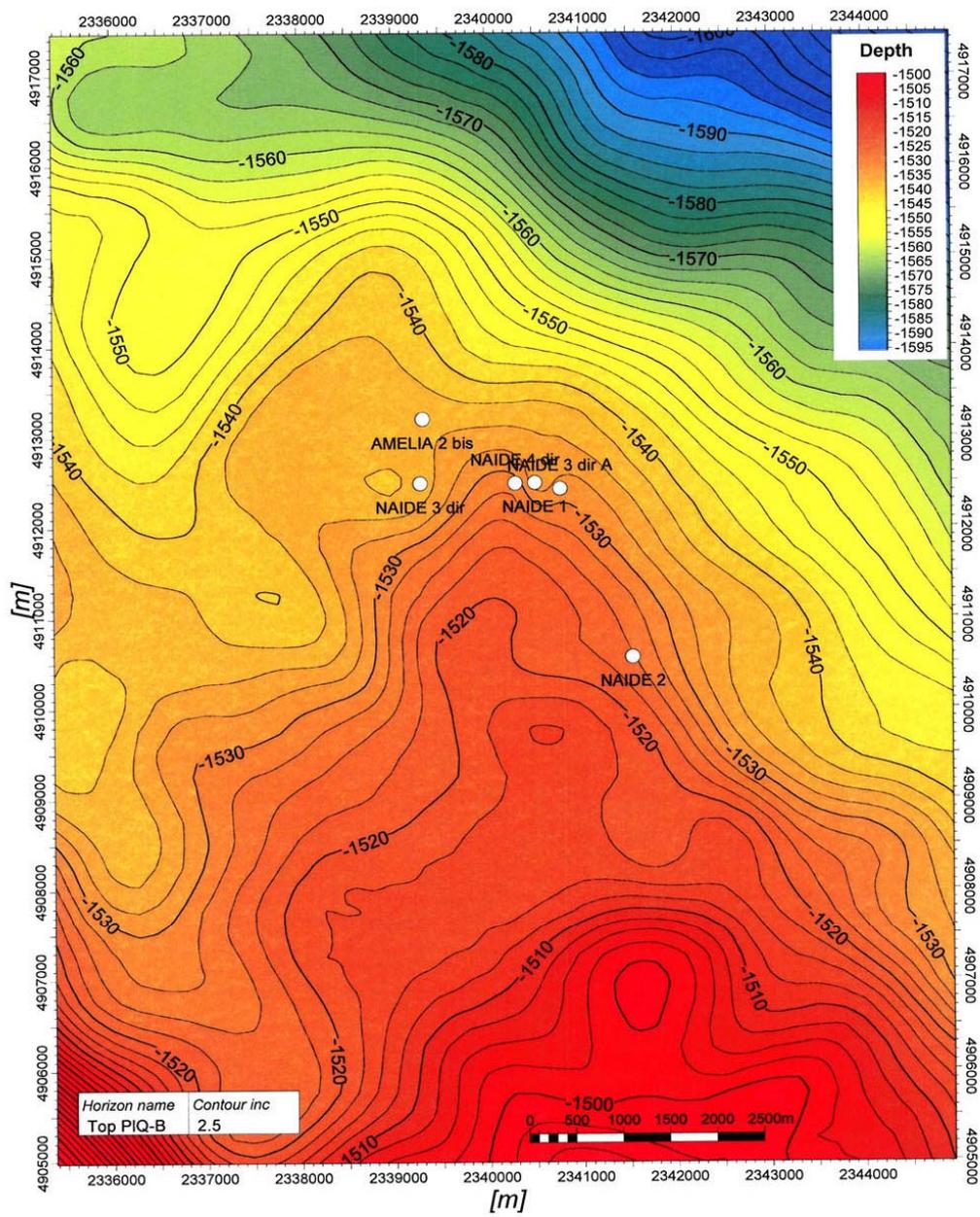
STATUS ATTUALE DEI MONITORAGGI E PREVISIONE AGGIORNAMENTI

LIVELLAZIONI	PROCEDE IL RILIEVO CON CADENZA ANNUALE DELLA "Dorsale Adriatica (TV-Pesaro)" NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE IL GIACIMENTO
MARKERS	NON PRESCRITTI
CGPS	INSTALLATO CGPS SULLA PIATTAFORMA: ATTIVO DA LUGLIO 2005
SAR	ACQUISITA COPERTURA SAR (1992-2006) DEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LA PIATTAFORMA PER ANALISI INTEGRATA DEI DATI ALTIMETRICI E PER L'INSERIMENTO DELLA P.MA NAIDE NEL PROGRAMMA DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA: ATTUALMENTE IN CORSO IN MOLTI GIACIMENTI DELL'ADRIATICO

5.10 Giacimento Porto Corsini Mare

Per quanto riguarda il giacimento Porto Corsini Mare, le analisi e le valutazioni sono riportate nel file allegato:





Campo di Naide Mappa Top livello PLQ-B

campo PORTO CORSINI MARE (PCMS 1 - PCMS 2) (Eni 100%)			
DECRETO VIA n. 6132 del 24 MAGGIO 2001 -			
DATI DI CAMPO			
UBICAZIONE PROFONDITA' FONDALE	offshore - 20 Km a NE di Cervia 24 m		
LITOLOGIA FORMAZIONE RESERVOIR ZONA MINERARIA PROFONDITA' RESERVOIR TIPO DI PIATTAFORMA CARATTERISTICHE GEOLOGICHE	sabbie fini Carica PLQ 1400 (TV/DSS) Monotubolare torcibiti legg. deformate		
CONCESSIONE	A.CI.46 (PCMS1) P. Corsini/Ilare (PCIS2)	D.M @mag/01	@ 31 mag 2007
DATA SCADENZA CONCESSIONE	26/05/2011		
N. POZZI (MSm3)	1 + 1	1+1	
RISERVE TECNICHE A VITA INTERA (MSm3)	457	425	
START UP PRODUZIONE	Nov-01		
FINE PRODUZIONE PREVISTA	2016		
GAS PRODOTTO (MSm3)	2016	269	
% RISERVE PRODOTTE	63%		
PROGRAMMA PROD. 2007 (MSm3)	40		
MODELLI DI SUBSIDENZA			
PRESCRIZIONI / Raccomandazioni	STATUS DELLE OTTEMPERANZE		
1) Prelievo di carote di parete <i>Prescrizione</i>	Prelievo 15 carote di parete su PCMS 2 inviato al MATT dati posizione stratigrafica / descrizione litologica		
2) recupero serie storiche altimetriche x studio effetti indotti prod. gas <i>Raccomandazione</i>	inviati dati livellazioni anni 1998-2005 In data 30 settembre 2006: inviate a MATT le "Note Sintetiche" di analisi e interpretazione dei dati altimetrici serie @2002 e serie 2003-2005		
3) aggiornamento e taratura modello subsidenza	NON PRESCRITTO		
MODELLI DI SUBSIDENZA			
ULTIMO AGGIORNAMENTO			
STUDIO DI GIACIMENTO	MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "MAGGIO '99"	MOD. STATICO E DINAMICO ECLIPSE 3D "MARZO '07"	
RISERVE (MSm3)	457	425	
MOD. GEOMECCANICO	CILINDRICO	ELEMENTI FINITI	
MAX SUBS AL CENTRO (cm)	4.5 (dopo 10 anni)	3.6 (dopo 16 anni)	
MAX DIST. CULMINE (Km)	2.5 (dopo 10 anni)	1.5 (dopo 36 anni)	
STATUS ATTUALE DEI MONITORAGGI E PREVISIONE AGGIORNAMENTI			
LIVELLAZIONI	PROCEDE IL RILIEVO CON CADENZA ANNUALE DELLA "Dorsale Adriatica (TV-Pesaro)" NEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE IL GIACIMENTO		
MARKERS	NON PRESCRITTI		
MODELLO SUBSIDENZA	AGGIORNATO MODELLO DI SUBSIDENZA (F.E.M.) MARZO 2007		
CGFS	INSTALLATO SULLA PIATTAFORMA "PCC"		
SAR	ACQUISITA COPERTURA SAR (1992-2006) DEL TRATTO DI COSTA ANTISTANTE LA PIATTAFORMA PER ANALISI INTEGRATA DEI DATI ALTIMETRICI E PER L'INSERIMENTO DELLE P.I.ME PCMS 1-2 NEL PROGRAMMA DI MONITORAGGIO DELLA SUBSIDENZA ATTUALMENTE IN CORSO IN MOLTI GIACIMENTI DELL'ADRIATICO		

6 REVISIONE DELLE STIME DELLA SUBSIDENZA: ANALISI E VALUTAZIONI DEGLI SCOSTAMENTI DALLE PREVISIONI INIZIALI

Come evidenziato con l'analisi dei dati relativi ai singoli giacimenti, in generale le previsioni di subsidenza effettuate nell'ambito dei SIA (seconda metà degli anni '90), e le successive revisioni effettuate nel periodo 2005-2007, evidenziano scostamenti a volte anche di forte entità. Le ragioni di tali scostamenti possono essere ricondotte principalmente ai seguenti fattori:

- Una maggiore e più dettagliata conoscenza dell'assetto geologico dei giacimenti e del bacino sedimentario cui appartengono. Queste informazioni, ottenute con la perforazione dei pozzi di sviluppo e dei pozzi esplorativi perforati nell'area del bacino, hanno, altresì, permesso d'eseguire una nuova interpretazione della sismica 2D/3D disponibile, la quale risulta essere più aderente alla situazione geostrutturale reale;
- l'acquisizione dei dati relativi all'effettivo comportamento produttivo dei pozzi. L'analisi e l'interpretazione di questi dati ha consentito di valutare con maggiore dettaglio il ruolo degli acquiferi e il loro comportamento durante la coltivazione del giacimento;
- l'acquisizione di ulteriori misure di compattazione in situ con marker radioattivi. L'analisi di questi dati e la loro integrazione nel database ha permesso di ottenere una correlazione regionale "coefficiente C_m vs. stress efficace" [Hueckel et al., 2005] maggiormente rappresentativa del comportamento meccanico dei livelli soggetti a depressurizzazione;
- il miglioramento dello stato dell'arte nella modellazione 3D (statica, dinamica e geomeccanica). La maggiore disponibilità di software più sofisticati è stata resa possibile anche in seguito ai notevoli sviluppi registrati nel campo informatico che si sono registrati negli ultimi anni.

Tenendo quindi presente quanto sopra riportato, nel seguito sono riportati in dettaglio gli scostamenti registrati per i singoli giacimenti, con una breve spiegazione delle loro possibili cause:

Giacimento "Regina"

Previsione relativa a	Subsidenza max. prevista (cm)	Estensione prevista del cono (Km)
SIA	7.2	2.0
Revisione	154	5.5

Gli scostamenti fra le due previsioni sono attribuibili a:

- un aumento di ca. 5 volte del valore del coefficiente C_m , che per questo giacimento è stato direttamente misurato con i marker installati nel pozzo 3D;
- aumento del gross pay (35.3 m per la sola zona mineralizzata a gas nello studio per il SIA iniziale vs. 90 m per la zona mineralizzate a gas + relativo acquifero in quello del 2006);
- caratterizzazione e migliore modellazione dell'acquifero d'estensione limitata connesso ai livelli produttivi.

2) Giacimento “Annalisa”

Previsione relativa a	Subsidenza max. prevista (cm)	Estensione prevista del cono (Km)
SIA	3.2	1.6
Revisione	1.9	non significativa

La riduzione della subsidenza prevista dipende da una stima più precisa del valore del coefficiente C_m , ottenuto dalla correlazione regionale di *Hueckel et al.* [2005].

3) Giacimento “Anemone Fase II”

Previsione relativa a	Subsidenza max. prevista (cm)	Estensione prevista del cono (Km)
SIA	n.d.	n.d
Revisione	38.1	12.0

Per questo giacimento il SIA non includeva la previsione iniziale di subsidenza.

4) Giacimento “Porto Corsini Mare Sud”

Previsione relativa a	Subsidenza max. prevista (cm)	Estensione prevista del cono (Km)
SIA	4.5	2.5
Revisione	3.6	1.5

Gli scostamenti registrati così modesti per cui si può ritenere sostanzialmente confermata la previsione iniziale.

5) Giacimento “Naide”

Previsione relativa a	Subsidenza max. prevista (cm)	Estensione prevista del cono (Km)
SIA	4.5	2.5
Revisione	n.d.	n.d

Poiché il giacimento è entrato in produzione nel luglio 2005, un aggiornamento fatto oggi della stima della subsidenza sarebbe poco significativo. per questo motivo la revisione delle previsioni di subsidenza è pianificata per la prima metà del 2009 (cfr. cap. 9).

6) Giacimenti del “Complesso Clara” (Clara Est, Clara Nord, Calpurnia e Calipso)”

La previsione di subsidenza per questi 4 giacimenti riportata nel SIA iniziale è la seguente:

Giacimento (dati SIA)	Subsidenza max. prevista (cm)	Estensione prevista del cono (Km)
Clara Est	10.0	4.3
Clara Nord	14.0	2.8
Calpurnia	8.0	2.5
Calipso	5.6	2.5

Nel 2007 è stato fatto lo studio di revisione in cui si è tenuto conto della possibile interferenza (idraulica e meccanica) fra tali giacimenti. I risultati ottenuti sono:

Giacimento (dati revisione 2007)	Subsidenza max. prevista (cm)	Estensione prevista del cono (Km)
Clara Est	24.2	6.0
Clara Nord	40.3	6.0
Calpurnia	53.0	6.0
Calipso	21.0	6.0

Gli scostamenti fra le due previsioni, più evidenti soprattutto per il campo Calpurnia, sono attribuibili principalmente a:

- l'aumento del valore del coefficiente C_m utilizzato nella revisione 2007 per i giacimenti di Clara Est, Clara Nord e Calipso. Infatti, come anche riportato al capitolo 2 della presente relazione, poiché livelli produttivi di tali giacimenti sono localizzati a profondità inferiori a 1500 m, in via cautelativa, e come suggerito da *Ferronato et al.* [2003], nelle revisioni 2007 è stato utilizzato un valore di C_m moltiplicato per un fattore 2;
- per il giacimento di Calpurnia, oltre ad un sensibile aumento del C_m (2.7 volte per il livello PLQ2 che si trova ad una profondità di 688 m), nel 2007 è stato anche introdotto un notevole incremento del gross pay soggetto a compattazione (58 m ca. per le sole zone mineralizzate a gas nel SIA iniziale vs. 101 m ca. per la zone mineralizzate a gas + relativo acquifero nella revisione) dovuto alla messa in produzione di nuovi livelli mineralizzati. La nuova previsione di subsidenza massima risente, inoltre, anche della compattazione dell'acquifero, di cui si è potuto meglio caratterizzare il comportamento rispetto allo studio iniziale;
- l'estensione del cono di subsidenza pari a 6 Km stimata nella revisione è identica per tutti i giacimenti, in quanto per effetto dell'interazione fra gli stessi, si ha la formazione di un unico cono (e non di 4 coni separati come valutato nei SIA iniziali).

7) Giacimento "Barbara NW"

Previsione relativa a	Subsidenza max. prevista (cm)	Estensione prevista del cono (Km)
SIA	18.6	3.0
Revisione	15.5	12.0

I risultati della previsione sono preliminari in quanto il relativo studio è in corso di finalizzazione, tuttavia non si osservano scostamenti significativi dalle stime iniziali.

Per quanto riguarda la maggior estensione del cono di subsidenza, questa è da ritenersi probabilmente dovuta alla migliore caratterizzazione dell'acquifero connesso al giacimento.

7 DATI DI SUBSIDENZA DAI MONITORAGGI COSTIERI

LIVELLAZIONI ALTIMETRICHE COSTIERE DA CERVIA A GIULIANOVA

In relazione alla verifica degli eventuali effetti ambientali sulla costa derivanti dall'instaurarsi del fenomeno della subsidenza in corrispondenza dei giacimenti oggetto dell'analisi del GdL, lo strumento di controllo messo in atto dal proponente ai fini del monitoraggio ambientale è costituito dalla rete di livellazione ENI, integrata dai rilievi satellitari radar SAR. Questa rete di livellazione si estende lungo la linea costiera adriatica nel tratto che si estende da Cervia a Giulianova, e include le aree costiere antistanti i giacimenti in questione.

L'analisi è stata effettuata, ove possibile (Cervia-Pesaro) sovrapponendo e confrontando i dati altimetrici ottenuti con le due diverse tecniche di rilievo disponibili sull'area (livellazioni ENI e SAR tipo RADARSAT).

Per una corretta comprensione dell'ambito e dei limiti in cui viene effettuata l'elaborazione dei dati, delle relazioni che intercorrono fra le diverse tecnologie di rilevamento ed, infine, delle unità di misura in cui sono stati espressi i risultati delle elaborazioni, si premette quanto segue:

- la velocità di movimento del punto di riferimento iniziale di tutte le campagne di livellazione per la linea costiera adriatica è stata assunta uguale a zero sul caposaldo origine di Treviso;
- i dati satellitari RADARSAT rappresentano velocità di movimento relative ad un punto di riferimento iniziale sempre ubicato sull'area oggetto d'analisi e con velocità assunta uguale a zero;
- tutti i valori rappresentati sulle figure sono stati elaborati come velocità di variazione altimetrica e vengono espressi in **millimetri/anno**; i valori positivi indicano stabilità altimetrica o tendenza all'innalzamento del territorio, quelli negativi tendenza all'abbassamento (subsidenza totale).

TRATTO CERVIA - PESARO

Livellazioni

A partire dai primi anni '70, Eni ha progettato e sviluppato lungo la costa adriatica una rete di livellazione geometrica che, in alcune Regioni, Province e Comuni (i.e. Emilia Romagna, Provincia e Comune di Ravenna) viene rilevata da oltre un decennio con cadenza annuale. Nel corso degli anni la rete è stata ampliata in estensione, perfezionata e resa più affidabile con l'aumento dello standard di misura (da "misura di precisione" a "misura di alta precisione").

Eni, inoltre, ha affidato la validazione dei dati al Dipartimento DISTART (Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, del Rilevamento del Territorio) dell'Università di Bologna. A partire dalla campagna 2003, l'Università di Bologna ha svolto e sta svolgendo stabilmente anche la funzione di controllo diretto e supervisione dei lavori di campagna, facilitando ed accelerando il processo di certificazione dei dati.

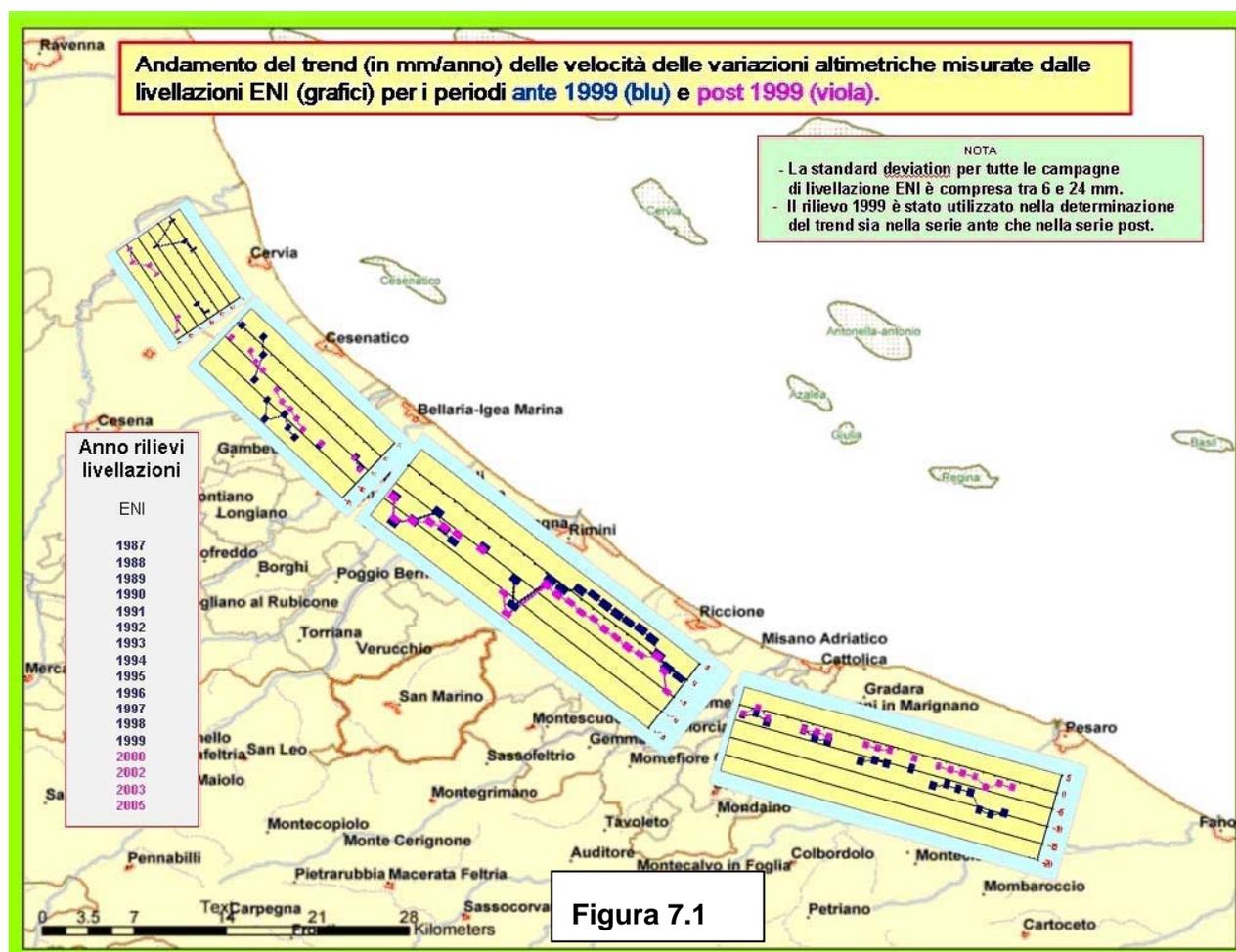
Nel tratto in esame (Cervia- Pesaro) l'analisi dei dati è stata effettuata su due periodi: periodo ante-1999 (dal 1987 al 1999) e periodo post-1999 (dal 1999 al 2005). L'analisi è stata effettuata utilizzando i capisaldi, con caratteristiche di omogeneità e continuità in entrambi i periodi, delle linee Eni .

Pur in presenza di uno stretto controllo dell'Ente Certificatore su tutte le fasi dei rilievi effettuati nell'ultimo triennio (2003-2005), l'analisi del trend dei capisaldi rilevati durante le campagne di livellazione eseguite nel periodo 1999-2005 ha evidenziato per l'anno 2004 un andamento in controtendenza nei confronti di quello storico dell'area, come del resto evidenziato dallo stesso

Ente Certificatore. E' sembrato pertanto opportuno, nell'analisi altimetrica del periodo 1999-2005, escludere i dati relativi all'anno 2004.

In figura 7.1 viene riportato il tratto di costa adriatica, di circa 63 km, lungo il quale è stata effettuata l'analisi, tratto che si estende in pratica dall'area immediatamente a nord di Cervia (dal fiume Savio) fino a Pesaro. In particolare l'andamento del trend medio delle velocità di variazione altimetrica lungo i capisaldi ENI per il periodo 1999-2005, risulta:

- **-6.0 mm/anno** nel tratto compreso fra il fiume Savio e la città di Cervia (subsidenza totale in aumento rispetto al periodo 1987-1999);
- **-4.4 mm/anno** tra Pinarella di Cervia e l'area immediatamente a nord di Cesenatico (subsidenza totale in aumento rispetto al periodo 1987-1999);
- **-7.8 mm/anno** tra Cesenatico (centro-sud) e S. Mauro a Mare (subsidenza totale in diminuzione rispetto al periodo 1987-1999);
- **-5,9 mm/anno** tra Bellaria e la Foce dell'Uso (stabile rispetto al periodo 1987-1999);
- **-10.3 mm/anno** tra Igea Marina e lo Scolo Pedrera (stabile rispetto al periodo 1987-1999);
- **-6.5 mm/anno** tra Osteria del Bagno e Viserbella (stabile rispetto al periodo 1987-1999);
- **-12.3 mm/anno** nella zona a nord di Rimini a cavallo della Marecchia (subsidenza in aumento rispetto al periodo 1987-1999);
- **-2,5 mm/anno** da Rimini a Riccione sud (subsidenza totale in aumento rispetto al periodo 1987-1999);
- **-2,0 mm/anno** da Riccione sud a Pesaro (subsidenza totale in diminuzione rispetto al periodo 1987-1999).



RILIEVI SAR del tipo RADARSAT

I rilievi radar di tipo RADARSAT sul territorio italiano sono iniziati nel marzo 2003 e vengono effettuati con cadenza di circa 24 giorni.

Le immagini rilevate da questi satelliti (RADARSAT) sono state elaborate in modo tale da ottenere, per tutti i punti dell'area che riflettono in modo qualitativamente adeguato le onde radar, la ricostruzione temporale delle variazioni altimetriche che si sono verificate nel periodo di interesse su ciascun singolo punto, rispetto ad un punto riflettente dell'area assunto come fisso (a velocità zero).

In figura 7.2 vengono riportati i risultati dei rilievi RADARSAT 2003-2006 con i valori delle relative graduazioni di colore. Sulla stessa figura è riportato, lungo un profilo che coincide con le 4 linee di livellazione citate in precedenza (**profilo base** di circa 63 km di lunghezza), anche un confronto fra i risultati dei dati RADARSAT con quelli dei rilievi livellometrici. In pianta viene evidenziato il tracciato di tale profilo con l'esatta ubicazione dei capisaldi di livellazione (triangoli rossi) lungo la dorsale adriatica. Sul grafico vengono confrontati l'andamento altimetrico nel periodo post 1999 misurato con i rilievi SAR RADARSAT e quello misurato con le livellazioni, e precisamente:

- 2003 – 2006 per i rilievi RADARSAT
- 1999 – 2005 per le livellazioni

Pur non trattandosi di periodi identici e considerando che i dati radar rappresentano velocità relative rispetto ad un'origine interna all'immagine ritenuta ferma nel tempo, il confronto nel periodo lungo il profilo base tra l'andamento della velocità Radarsat con quello delle livellazioni, mostra un trend spaziale ed escursioni relative estremamente simili tra le due metodologie.

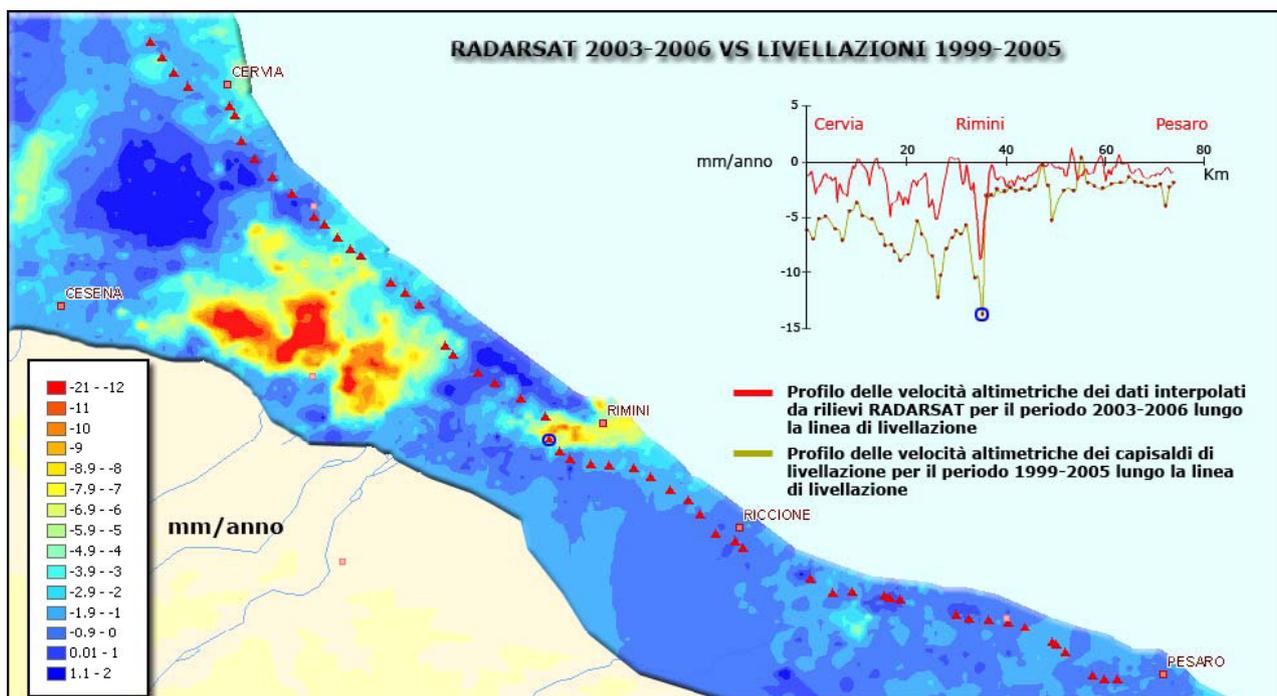


Figura 7-1

Questo fatto permette di considerare i dati di livellazione sicuramente attendibili, riducendo perciò di molto il grado di incertezza sulle velocità di subsidenza totale calcolate per l'area.

L'elevata velocità di subsidenza totale che si riscontra nell'entroterra tra Cesena e la costa corrisponde molto probabilmente ad un'area ad alta intensità di emungimento idrico. Analoga considerazione si applica anche per il caso dell'entroterra riminese.

In figura 7.3 vengono evidenziati i risultati dell'analisi SAR RADARSAT lungo il tratto Cervia – Pesaro con l'ubicazione dei giacimenti offshore.

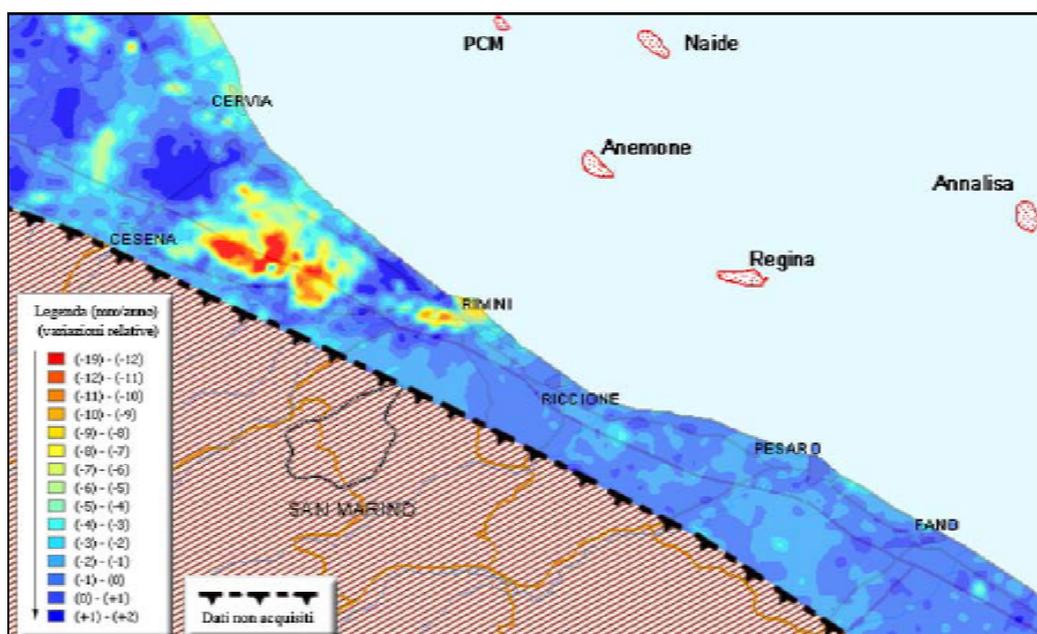


Figura 7-2

TRATTO PESARO – GIULIANOVA

In questo tratto di costa, in assenza di rilievi livellometrici antecedenti al 2006, anno in cui è stata istituita la rete di livellazione, materializzati i capisaldi ed effettuato il rilievo base, l'analisi dell'andamento altimetrico nel tempo è stata effettuata basandosi esclusivamente su dati interferometrici da radar.

Tali dati sono stati agganciati ai dati omologhi presenti nel tratto Cervia – Pesaro utilizzando la tecnica di mosaicatura delle diverse orbite facendo coincidere su base puramente statistica i valori di velocità sulle aree di overlap dei diversi data set.

Il risultato di tali analisi (RADARSAT) per il periodo 2003-2006 è rappresentato in figura 7.4, su cui viene evidenziata anche la posizione dei giacimenti offshore.

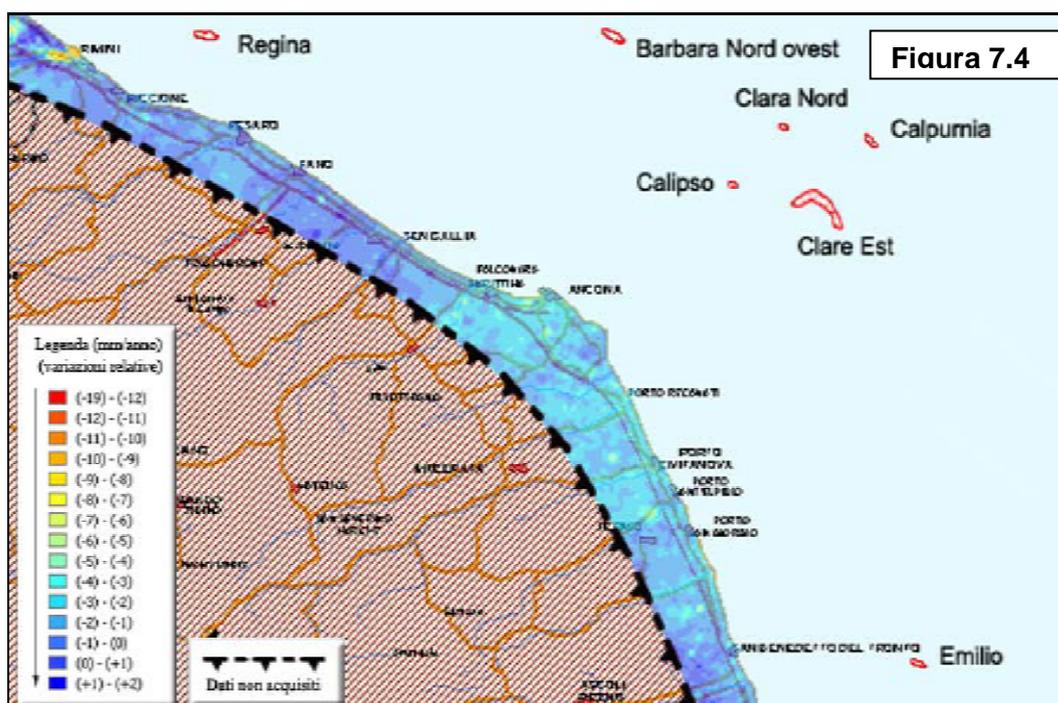


Figura 7.4

Su tale figura si possono notare valori di velocità media verticale relativamente uniformi senza accentuate variazioni locali, con valori medi costantemente distribuiti fra -1 e -4 mm/anno.

Sotto il profilo puramente geologico e sulla base delle conoscenze acquisite, merita infine di essere sottolineato come i giacimenti presenti in offshore lungo questo tratto di costa producano tutti da formazioni che non sono riscontrabili a terra, dove sono presenti invece litotipi decisamente meno permeabili.

CONCLUSIONI GENERALI

A – Nel tratto di costa compreso fra Rimini e Pesaro ed antistante i campi di Regina e di Annalisa si osserva una velocità di subsidenza totale che è prossima o uguale alla velocità di subsidenza naturale (2-3 mm/anno) stimata da dati di letteratura (i.e. Caputo et al. 1970, Arca e Beretta 1985).

Tale constatazione consente di escludere ogni possibile influenza del cono di subsidenza generato dalla coltivazione dei sopracitati giacimenti sulla linea di costa.

B – Nel tratto di costa compreso fra Fiume Savio e Rimini Nord l'immagine SAR RADARSAT (figura 7.3) mostra due aree a velocità di subsidenza totale superiore ai 10 mm/anno poste in corrispondenza di Cesenatico e Rimini Nord. Tali fenomeni non sono certamente attribuibili all'estrazione di gas da giacimenti offshore, in quanto:

- • nel caso di Cesenatico l'area interessata è localizzata ben all'interno della linea di costa;
- • nel caso di Rimini l'area interessata è molto localizzata, allungata verso l'interno del territorio e non presenta il tipico aspetto semi-ellittico che si dovrebbe osservare se un cono di subsidenza raggiungesse la costa.

C – Oltre alle due aree sopra citate, si osserva anche che il profilo altimetrico del tratto di costa compreso fra Fiume Savio e Rimini Nord presenta un andamento irregolare, caratterizzato da velocità di subsidenza totale in generale superiori a quella naturale.

Tale andamento e le relative velocità di subsidenza totale osservate non sono da attribuirsi all'estrazione di gas dai giacimenti offshore antistanti (Naide, Anemone, PCMS), in quanto le irregolarità osservate nel profilo altimetrico sono tipicamente indotte da cause antropiche localizzate (come ad es. l'estrazione d'acqua, si veda in proposito Teatini et al. 2006) e non sono riconducibili all'effetto caratteristico (forma semi-ellittica) di un cono di subsidenza che interessi la linea di costa.

D – Il tratto di costa compreso tra Pesaro e Giulianova presenta un profilo di velocità di subsidenza totale regolare, caratteristico di fenomeni naturali a carattere regionale. Tale profilo non mostra effetti antropici localizzati né, tantomeno, l'impronta semi-ellittica di un cono di subsidenza riconducibile all'estrazione di gas dai giacimenti offshore antistanti, che oltre tutto distano decine di km dalla costa (Clara E., Clara N, Calpurnia, Calipso, Barbara NW).

8 CRITERI UTILIZZATI PER LE VALUTAZIONI DEL GRUPPO DI LAVORO

8.1 Motivazioni della scelta del valore di 2 cm per la linea di isosubsidenza

Per quanto riguarda l'estensione del fenomeno di subsidenza, l'ENI ha sempre indicato l'isolinea dei - 2 cm come limite affidabile per la quantificazione dell'estensione del cono di subsidenza. Tale assunzione trae origine da quanto affermato dalla Commissione Scientifica Internazionale (CSI) presieduta dal professor E. Boschi:

“I risultati delle previsioni di subsidenza vengono normalmente presentati sotto forma di curve di livello di subsidenza. In questo ambito, la linea di iso-subsidenza di 5 centimetri è molto più affidabile e meno dipendente dalle assunzioni modellistiche di quanto sia la linea di iso-subsidenza di 1 centimetro. Quanto sopra è in accordo con la prassi internazionalmente accettata.

Ad esempio, in Olanda, le società petrolifere devono misurare la subsidenza fino a 30 anni dopo la fine della produzione, seguendo un piano di monitoraggio approvato dallo Stato. I risultati di misura e le previsioni sono segnalati alle Autorità, essendo la linea di iso-subsidenza di 2 centimetri il minimo profilo considerato nelle mappe di previsione. E' riconosciuto (anche a livello di Unione Europea) che la prassi adottata in Olanda è la più cautelativa a tutela dell'ambiente ed a difesa della pubblica incolumità.”

Il GdL ha discusso con ENI e ha verificato che tale limite può essere effettivamente accettato quale standard per definire, in maniera significativa, l'estensione areale della subsidenza.

8.2 La tecnologia dei markers radioattivi

Al momento attuale, la tecnologia basata sul monitoraggio dei markers radioattivi installati nei pozzi di controllo dove tale tecnica è stata attivata, costituisce l'unico sistema per ottenere le misure in situ della compattazione dell'intervallo mineralizzato prescelto (cfr. paragrafo 2.2.2).

I dati dei markers radioattivi installati nel pozzo Regina hanno infatti consentito, sia di registrare la compattazione anomala del sottosuolo nell'area del giacimento, che di estrarre i valori corretti del C_m sulla base dei quali sono state riviste e aggiornate le stime della subsidenza, oggetto dello studio in questione.

La tecnologia basata sull'uso dei markers radioattivi non è tuttavia oggetto di sviluppo nel campo della ricerca né si prevede che nel futuro tale metodo possa essere utilizzato con sistematicità per i motivi indicati nel seguito.

La tecnologia "radioactive marker bullet gun" (RMBG) presenta infatti una serie di problemi quali:

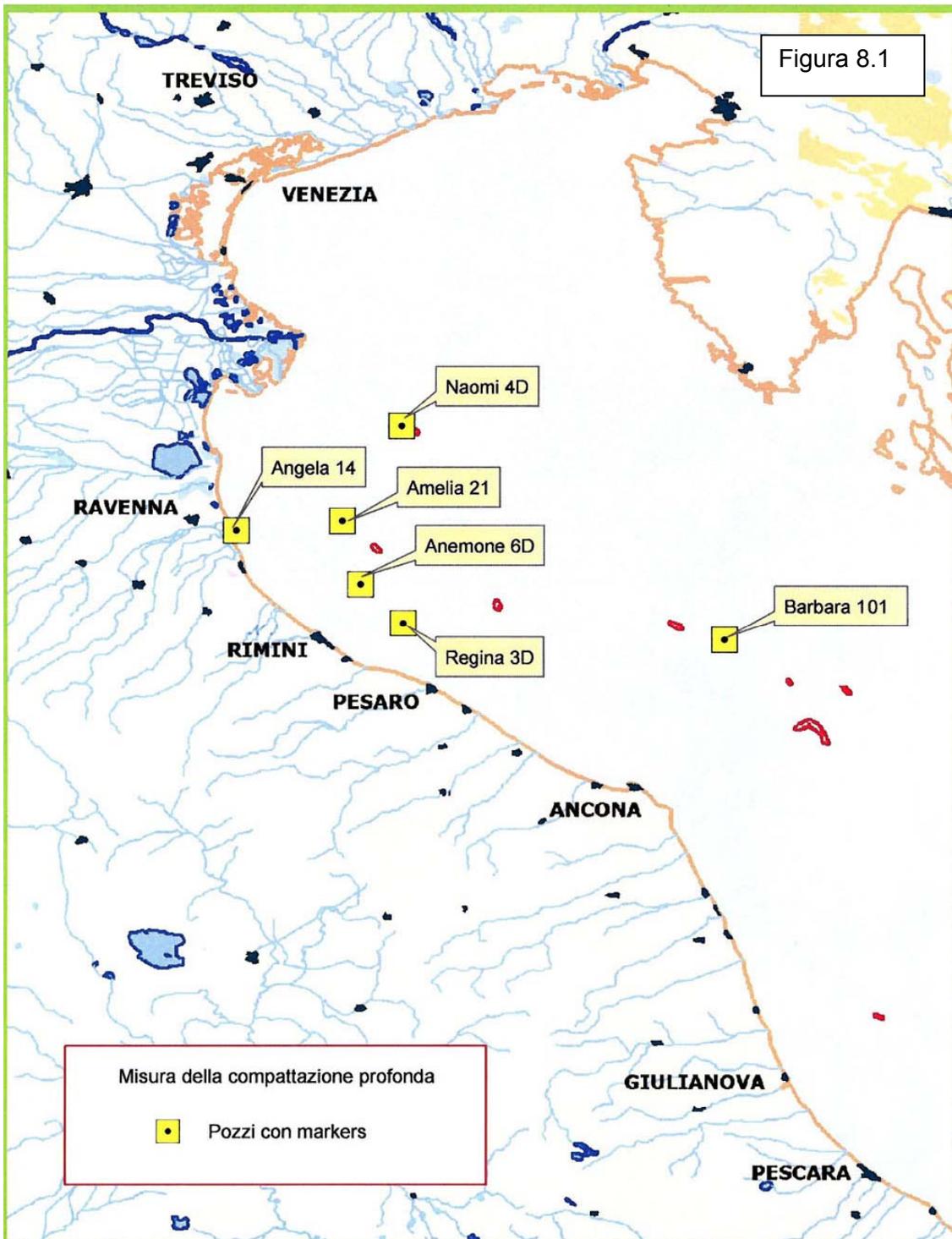
- obsolescenza della carica
- obsolescenza dell'hardware
- impossibilità dell'utilizzo in pozzi esistenti già tubati

Inoltre il metodo utilizzato sino al 2005 per l'installazione dei marker radioattivi, e basato sull'impiego di cariche esplosive (cartucce) che "sparano" i marker nella formazione mineralizzata (in pozzo non tubato), è classificato come esplosivo. Come tale doveva essere classificato in Italia in conformità al D.L. 2 Gennaio 1997, ai sensi del D.M. n. 72 del 19 Settembre 2002 e circolare n. 557/P.A.S. del 5 Maggio 2005. Tuttavia, non avendo, tali cartucce ottenuto la certificazione C.E., non è stato possibile per le compagnie di servizio specializzate nell'installazione dei markers riclassificare questo materiale secondo legge. Di conseguenza tale tipologia di cartucce non è ad oggi più disponibile sul mercato.

Premesso che si tratta comunque di un mercato internazionale di nicchia e limitato, esistono altre cariche, non dedicate, ma classificate, non in grado però di assicurare la stessa affidabilità e precisione e che comunque non possono essere utilizzate in pozzi esistenti già tubati.

A meno di un cambiamento delle condizioni di mercato attuali, per i motivi sopradetti le compagnie di servizio internazionali non stanno investendo nella ricerca/innovazione tecnologica per l'utilizzo dei marker.

E' per questo motivo quindi che ENI, anche sulla base di quanto viene fatto all'estero in situazioni analoghe, sta sviluppando una serie di metodi di monitoraggio alternativi e in grado di fornire le informazioni necessarie con un grado di precisione almeno pari a quello ottenibile con i markers radioattivi. La figura 8.1 riporta la posizione dei pozzi in Italia nei quali sono installati i markers radioattivi.



8.3 Utilizzazione del GPS in continuo (CGPS) per il monitoraggio della subsidenza

Tra i sistemi di monitoraggio in via di realizzazione l'ENI ha pianificato, ed è ora in fase di realizzazione, l'installazione di CGPS sulle piattaforme dei giacimenti di Annalisa, Regina, Anemone, Barbara NW, Clara Nord, Clara Est, Calpurnia e Calipso. Tali dispositivi di monitoraggio sono già presenti sulle piattaforme di Naide e Porto Corsini Mare Sud.

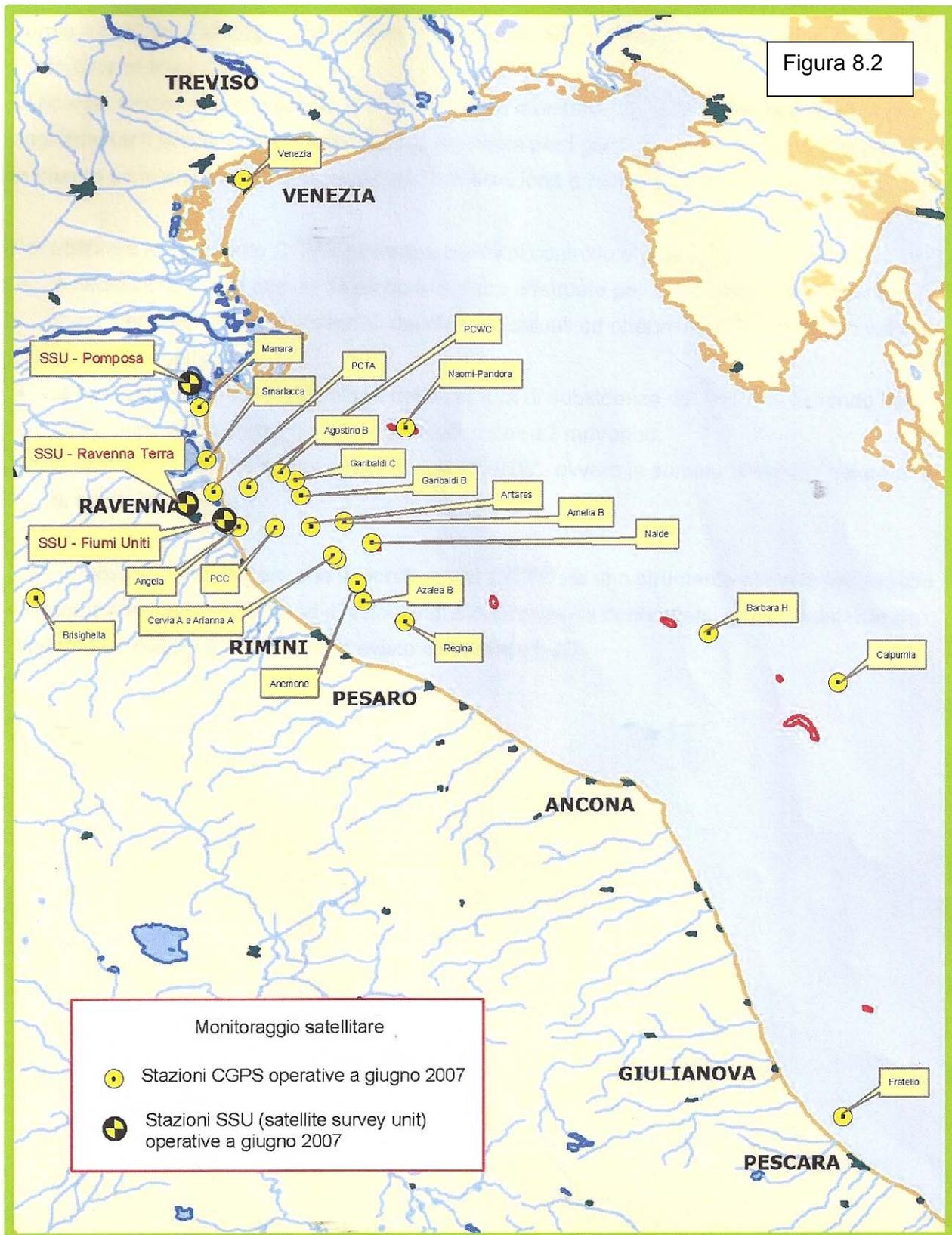
Il monitoraggio CGPS (cfr. paragrafo 3.2) permetterà di effettuare il controllo della subsidenza nei giacimenti a minore rischio in quanto in avanzata fase di coltivazione e/o molto distanti dalla costa, come nel caso dei giacimenti di Annalisa e Barbara NW.

Per utilizzare lo strumento CGPS come strumento di controllo è opportuno tener presente che:

- è necessario che le misure da elaborare siano effettuate per un periodo non inferiore a 12 mesi, per poter depurare i segnali dai disturbi casuali ed ottenere informazioni con valore statistico significativo;
- la precisione ottenibile nella stima della velocità di subsidenza, filtrando e mediando i segnali "puntuali" sull'arco di un anno, è dell'ordine ± 2 mm/anno;
- la velocità di subsidenza misurata è quella "totale", ovvero la somma di quella "naturale" e di quella "antropica".

Ciò premesso si può ritenere che il monitoraggio CGPS sia uno strumento efficace per seguire nel tempo l'evoluzione del trend di velocità di subsidenza da confrontarsi qualitativamente con l'andamento della velocità stessa previsto con i modelli 3D.

La figura 8.2 riporta l'ubicazione delle stazioni CGPS operative dal giugno 2007.



8.4 Ruolo della permeabilità nella previsione della subsidenza

Nel corso delle attività del GdL è stata approfondito lo studio del ruolo giocato dalla permeabilità nelle previsioni di subsidenza. Dagli studi effettuati con ENI, è emerso che occorre distinguere fra permeabilità dei livelli mineralizzati e permeabilità dell'acquifero.

Livelli mineralizzati

Per i giacimenti a gas dell'offshore adriatico la stima della permeabilità utilizzata nella costruzione dei modelli dinamici 3D di giacimento è di solito ottenuta con prove di produzione (i.e. *buildup test*) eseguite nei livelli mineralizzati attraversati dai pozzi esplorativi o dai pozzi d'accertamento. Tali valori sono ritenuti molto più affidabili di quelli misurati in laboratorio su campioni prelevati da carote di fondo in quanto:

- non risentono ovviamente del danneggiamento che la roccia serbatoio subisce con il carotaggio e successive operazioni;
- sono prove effettuate "in situ" alle reali condizioni di stress efficace della formazione;
- forniscono valori già "mediati" su spessori di alcuni metri di formazione. Al contrario, in laboratorio s'impiegano campioni della lunghezza di ca. 5cm; i valori ottenuti sono, pertanto, da considerarsi "puntuali" e risentono in larga misura delle naturali eterogeneità "a piccola scala" della roccia serbatoio.

E' importante sottolineare inoltre, che per lo sviluppo dei modelli dinamici 3D finalizzati allo studio della subsidenza non è in generale richiesta una conoscenza estremamente precisa della permeabilità del giacimento, ovvero quest'ultima non è considerata essere un parametro critico.

La viscosità del gas, infatti, è così bassa che anche in formazioni con permeabilità dell'ordine di 10-20 mD si hanno buone mobilità del gas stesso. In altre parole la depressurizzazione, da cui dipende la compattazione dei livelli in produzione, è abbastanza uniforme in senso spaziale ed è controllata principalmente dalle portate erogate e dalla spinta dell'acquifero. Eventuali anomalie che si possono osservare nella distribuzione della pressione in giacimento dipendono soprattutto dalla presenza di barriere (es. faglie sealing o parzialmente sealing) che devono essere considerate nei modelli dinamici.

Acquifero

La permeabilità, assieme all'estensione, controlla la risposta (i.e. la spinta) dell'acquifero al disturbo di pressione indotto dalla produzione del giacimento. Per comprendere il ruolo di tale risposta nelle stime di subsidenza servono ovviamente i modelli matematici. Si possono, però fare alcune considerazioni "qualitative" sulla base della formula semplificata di Geertsma,

$$u_{\max} = -2(1-\nu) \left(1 - \frac{c/R}{\sqrt{1+(c/R)^2}} \right) c_m h \Delta p$$

nella quale si assumerà che Δp rappresenti il valore medio della depressurizzazione del sistema "giacimento + acquifero" all'interno del cono di subsidenza, ed R il raggio del cono stesso².

a) Acquifero molto esteso e con buona permeabilità (es. > 20-30 mD)

La spinta dell'acquifero si manifesta rapidamente ed è efficace nel sostenere la pressione di giacimento. La depressurizzazione Δp è, quindi, minore rispetto al caso di un acquifero poco permeabile. Nel contempo la buona permeabilità facilita la propagazione del disturbo di pressione e, quindi, si avrà un cono di subsidenza più ampio. I due effetti sono fra di loro contrastanti: il primo, minori Δp , tende a ridurre la subsidenza massima (a parità di C_m e spessore gross), il secondo, allargando la zona depressurizzata, tende ad aumentare il diametro del cono di subsidenza.

² A stretto rigore la formula di Geertsma vale solo per geometrie cilindriche, mentre in generale i coni di subsidenza hanno forme più complesse, spesso pseudo-ellittiche. Tale formula viene, però, qui utilizzata solo in modo qualitativo, come ausilio per spiegare i diversi fenomeni che concorrono a determinare una data subsidenza.

Secondo la formula di Geertsma, dato che u_{max} varia linearmente con Δp , mentre ha una dipendenza non lineare con R , in generale prevarrà il primo effetto: per questo tipo di giacimenti la buona permeabilità dell'acquifero tende a ridurre la subsidenza massima ma ne allarga il cono.

b) Acquifero limitato e con buona permeabilità (es. > 20-30 mD)

La limitata estensione dell'acquifero ne riduce il contributo al sostegno di pressione in giacimento, ovvero si possono avere Δp significativi. Nel contempo la buona permeabilità facilita la propagazione del disturbo che raggiunge rapidamente il confine esterno dell'acquifero limitato che, pertanto, si depressurizza all'incirca nella stessa misura del giacimento: $\Delta p_{giac} = \Delta p_{acq}$.

In pratica, la buona permeabilità dell'acquifero estende la zona depressurizzata, dando però uno scarso beneficio al sostentamento di pressione in giacimento. Secondo la formula di Geerstma, ci si deve, pertanto aspettare (a seconda del C_m e dello spessore gross) valori elevati di subsidenza massima con coni limitati che si estendono poco oltre i limiti del sistema "giacimento + acquifero".

E' questo il caso di Regina dove la compattazione e la subsidenza hanno ulteriormente risentito degli anomali valori di C_m e dell'ispessimento del gross pay nell'acquifero.

c) Acquifero a bassa permeabilità (es. < 5-10 mD)

In questo caso l'estensione dell'acquifero ha molto meno importanza di quanto si è visto ai punti precedenti. La bassa permeabilità riduce, infatti, la velocità di propagazione del disturbo di pressione³ che non raggiunge il confine esterno dell'acquifero; quest'ultimo, pertanto, viene a comportarsi come se fosse limitato.

La bassa permeabilità dell'acquifero in questo caso, si traduce in uno scarso sostentamento di pressione in giacimento.

Nell'acquifero, a sua volta, la zona interessata dalla depressurizzazione è ristretta, ed il valore medio del Δp nella stessa è inferiore al corrispondente valore in giacimento (i.e. $\Delta p_{giac} > \Delta p_{acq}$). Secondo la formula di Geertsma, è questo il caso in cui (a parità del C_m e dello spessore gross) si hanno i valori più elevati di subsidenza massima con coni limitati che si estendono poco oltre i limiti del giacimento.

Le considerazioni sopra esposte mostrano, quindi, come non sia né semplice né diretto il ruolo svolto dalla permeabilità dell'acquifero nelle previsioni di subsidenza, ovvero in quale misura una variazione della permeabilità possa modificare la previsione iniziale di subsidenza.

A tale fatto si deve aggiungere, inoltre, che molto raramente si dispone di misure dirette della permeabilità, in quanto per ragioni operative le compagnie petrolifere non effettuano prove di produzione né *build-up test* nei pozzi perforati in acquifero.

³ In questa nota, per comodità d'esposizione, si sono usati termini come "propagazione" o "velocità di propagazione" che non sono per la verità del tutto corretti. Il moto dei fluidi nei mezzi porosi non è "impulsivo", come ad esempio nel colpo d'ariete in condotta, ma diffusivo (es. trasmissione del calore nei solidi).

9 CONCLUSIONI

9.1 Metodologia di indagine

Sulla base di quanto riportato nel capitolo 2 della presente relazione, riguardo all'approccio metodologico ed allo stato dell'arte per la previsione e il monitoraggio del fenomeno della subsidenza, anche in base ai risultati scaturiti nel corso delle attività condotte dal GdL, si ritiene che la metodologia impiegata da Eni E&P nel periodo 2005-2007 per le revisioni degli studi predittivi di subsidenza relativi ai giacimenti in questione, può essere considerata senz'altro in linea con il livello più avanzato dell'attuale stato dell'arte.

Le metodologie attualmente impiegate da Eni E&P sono il punto d'arrivo del processo di comprensione dei fenomeni fisici che determinano compattazione e subsidenza per estrazione di fluidi dal sottosuolo in progressivo sviluppo a partire dagli anni '70, sia per ciò che concerne gli strumenti modellistici che per gli apparati e i protocolli di misura per la valutazione delle proprietà geomeccaniche in laboratorio ed in situ.

A tale proposito un ruolo fondamentale ha avuto l'enorme sviluppo di tecnologie informatiche verificatosi nell'ultimo decennio, che reso disponibili potenti strumenti software di visualizzazione tridimensionale di corpi geologici complessi e macchine con cui realizzare in tempi accettabili simulazioni con modelli matematici molto complessi.

9.2 Quadro di sintesi dei risultati delle revisioni delle stime

Il quadro sinottico dei risultati delle verifiche effettuate dal Gruppo di Lavoro è riportato nella tabella seguente.

	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11
GIACIMENTO	ANEMONE II	ANNALISA	BARBARA NW	CALYPSO	CALPURNIA	CLARA EST	CLARA NORD	NAIDE	PORTO CORSINI MARE	REGINA
Start up produzione	mag-99	mar-00	set-99	nov-02	ott-00	ott-00	dic-00	giu-05	nov-01	feb-98
Riserve prodotte al 31.12.2006 [%]	72%	84	73	53	86	68	88	11	63	85
Distanza dalla costa [km]	20	34	55	35	55	45	50	32	20	17
Modello geomeccanico utilizzato per stima subsidenza (SIA)	n.d.	Cilindrico (Geertstma)	Cilindrico (Geertstma)	Semianalitico (Geertstma)	Cilindrico (Geertstma)	Cilindrico (Geertstma)	Cilindrico (Geertstma)	Semianalitico (Geertstma)	Cilindrico (Geertstma)	Cilindrico (Geertstma)
Stima max subsidenza al centro del giacimento (SIA) [cm]	n.d.	3.2 (a 10 anni da inizio produzione - 2010)	18.6 (a 20 anni da inizio produzione - 2019)	5.6 (a 12 anni da inizio produzione - 2014)	8 (a 9 anni da inizio produzione - 2009)	10 (a 15 anni da inizio produzione - 2015)	14 (a 15 anni da inizio produzione - 2015)	5 (a 20 anni da inizio produzione - 2025)	4.5 (a 10 anni da inizio produzione - 2011)	7.2 (a 10 anni da inizio produzione - 2008)
Modello geomeccanico utilizzato per la revisione della stima della subsidenza (data ultima revisione)	Semianalitico Geertstma (sett-06)	Semianalitico Geertstma (apr-05)	Semianalitico Geertstma (mag-07)	Elementi finiti FEM-ISAMGEO (2) (mag-07)	Elementi finiti FEM-ISAMGEO (2) (mag-07)	Elementi finiti FEM-ISAMGEO (2) (mag-07)	Elementi finiti FEM-ISAMGEO (2) (mag-07)	Semianalitico Geertstma (apr-00)	Elementi finiti FEM-ISAMGEO (mar-07)	Elementi finiti ABAQUS (set-06)
Stima max subsidenza al centro del giacimento (revisione modello) [cm]	38.1 (a fine produzione - 2040)	1.9 (a 11 anni da inizio produzione - 2010)	15.5 (a 10 anni da inizio produzione - 2009)	21 (a 9 anni da inizio produzione - 2011)	53 (a 11 anni da inizio produzione - 2011)	24.2 (a 21 anni da inizio produzione - 2021)	40.3 (a 7 anni da inizio produzione - 2007)	n.d.	3.6 (a 16anni da inizio produzione - 2017)	154 al 2040
Differenza assoluta stime subsidenza (revisione modello-SIA) (cm)	n.d.	-1,3	-3,1	15,4	45,0	14,2	26,3	n.d.	-0,9	146,8
Stima distanza minima linea isosubsidenza -2 cm dalla costa (SIA) [km] (1)	n.d.	32.4 (a 10 anni da inizio produzione - 2010)	52 (a 10 anni da inizio produzione - 2009)	32,5 (a 12 anni da inizio produzione - 2014)	52,5 (a 9 anni da inizio produzione - 2009)	40,7 (a 15 anni da inizio produzione - 2015)	47,2 (a 15 anni da inizio produzione - 2015)	29,5 (a 20 anni da inizio produzione - 2025)	17,5 (a 10 anni da inizio produzione - 2011)	15 (a 10 anni da inizio produzione - 2008)
Stima distanza minima linea isosubsidenza -2 cm dalla costa (revisione modello) [km]	12 (a 20 anni da fine produzione - 2060)	non significativa (subsidenza max < 2 cm)	43 (a fine produzione - 2024)	32 (relativa all'insieme dei 4 campi Clara Est, Clara Nord, Calpurnia, Calypso) prevista a 38 anni da inizio produzione Clara Est - 2038)	32 (relativa all'insieme dei 4 campi Clara Est, Clara Nord, Calpurnia, Calypso) prevista a 38 anni da inizio produzione Clara Est - 2038)	32 (relativa all'insieme dei 4 campi Clara Est, Clara Nord, Calpurnia, Calypso) prevista a 38 anni da inizio produzione Clara Est - 2038)	32 (relativa all'insieme dei 4 campi Clara Est, Clara Nord, Calpurnia, Calypso) prevista a 38 anni da inizio produzione Clara Est - 2038)	n.d.	18,5 (a 36 anni da inizio produzione - 2037)	11,5 al 2040
Previsioni aggiornamento modello per la stima della subsidenza (con modello FEM)	Entro il 2007 (con dati al 31.12.2006)	Non previsto	Non previsto	1° semestre 2011 (con dati al 31.12.2010)	1° semestre 2009 (con dati al 31.12.2008)	1° semestre 2012 (con dati al 31.12.2011)	Al momento non prevedibile			
Previsioni monitoraggi subsidenza off shore a breve termine (2007)	Istallazione CGPS su piattaforma	Istallazione CGPS su piattaforma	Istallazione CGPS su piattaforma	Istallazione CGPS su piattaforma	Istallazione CGPS su piattaforma	Istallazione CGPS su piattaforma	Istallazione CGPS su piattaforma	(4)	(4)	Istallazione CGPS su piattaforma
Previsioni monitoraggi subsidenza off shore a medio-lungo termine	Progetto sperimentale per un sistema di monitoraggio della compattazione mediante sensori installati sul fondale marino (in corso installazione prototipo)									
Previsioni monitoraggi subsidenza on shore a breve termine (2007)	Istallazione CGPS c/o centrale Rubicone	Istallazione CGPS c/o centrale Fano	Istallazione CGPS c/o centrale Falconara	Istallazione CGPS c/o centrale Falconara	Istallazione CGPS c/o centrale Falconara	Istallazione CGPS c/o centrale Fano	Istallazione CGPS c/o centrale Fano	-	-	Istallazione CGPS c/o centrale Rubicone
(1) Calcolato sottraendo alla distanza dalla costa del centro giacimento l'estensione del cono di subsidenza (linea isosubsidenza -2 cm)										
(2) Unico modello 3D per i 4 campi dell'area (Clara E, Clara N, Calpurnia, Calypso) per tenere conto di eventuali interazioni tra i relativi coni di subsidenza										
(3) Il segno negativo indica un avvicinamento della linea di isosubsidenza -2 cm alla linea di costa mentre il segno positivo indica un allontanamento della linea di isosubsidenza -2 cm alla linea di costa, pari al valore assoluto espresso in km										
(4) CGPS già installato su piattaforma										

A parte quel che riguarda il campo Regina, per il quale si richiamano le valutazioni riportate ai paragrafi 5.1.5 e 5.1.6, per ciò che concerne le stime della subsidenza, per nove dei dieci giacimenti oggetto d'indagine tra Aprile 2005 e Maggio 2007 è stata effettuata una revisione delle stime della subsidenza mediante l'impiego di modelli geomeccanici semianalitici o ad elementi finiti. Tale attività di revisione non era comunque prevista per tutti i giacimenti (cfr. paragrafo 1.3).

Le revisioni delle stime effettuate per i restanti nove campi, per i motivi già illustrati al paragrafo 6.1, hanno evidenziato scostamenti anche significativi sia in termini assoluti che in termini di distanza dalla costa della massima estensione del cono di subsidenza (isolinea di -2 cm), la quale si mantiene comunque sempre a distanze superiori ai 10 km e, in sei su nove giacimenti, superiori a 30 km.

Per i giacimenti Anemone 2, Calypso, Calpurnia, Clara Est, Clara Nord, Naide, Porto Corsini Mare è previsto l'aggiornamento tramite modello ad elementi finiti da effettuarsi tra il 2007 e il 2011;

Per i due giacimenti Annalisa e Barbara NW non è previsto l'aggiornamento in quanto per entrambi la revisione delle stime della subsidenza, già effettuata rispettivamente ad Aprile 2005 e a Maggio 2007, ha fornito valori inferiori a quelli stimati nello SIA ed entrambi risultano prossimi alla fine della produzione prevista entro il 2010 (% delle riserve residue inferiori al 30%);

Le attività di monitoraggio altimetrico lungo la costa adriatica descritte al capitolo 3 confermano l'assenza di interazioni tra l'estrazione di gas dai giacimenti situati nell'off shore adriatico e le variazioni altimetriche del territorio costiero che, oltre al tasso naturale di subsidenza locale, risultano invece principalmente influenzate da attività antropiche di emungimento idrico in corrispondenza dei maggiori centri abitati (Cesenatico e Rimini).

E' comunque opportuno precisare che i valori di velocità di subsidenza misurati rappresentano la sommatoria di tutti gli effetti, naturali ed antropici, che determinano le variazioni altimetriche del territorio e pertanto non è possibile riconoscere l'entità dei singoli "contributi" che concorrono al valore assoluto misurato.

In conclusione si ritiene che, anche tenendo conto del fatto che in fase di stima predittiva della subsidenza (fase SIA), sono stati compiuti errori che hanno portato, nella maggior parte dei casi, ad una sottostima dei valori di subsidenza attesi, i rilievi topografici di dettaglio effettuati lungo la linea di costa hanno confermato che la zona costiera antistante i giacimenti in esame non ha risentito degli effetti della subsidenza dovuta alla coltivazione dei giacimenti in questione, confermando con ciò anche le valutazioni effettuate in sede di pronuncia di compatibilità ambientale che escludevano l'estendersi di detti fenomeni fino alle zone costiere.

L'attività svolta dal Gruppo di Lavoro ha permesso di individuare, sulla base dei criteri esposti al punto seguente, il calendario delle nuove revisioni delle stime della subsidenza.

9.3 Criteri per la revisione degli studi di previsione della subsidenza

La revisione delle stime della subsidenza con modelli matematici più complessi e, in particolare, implementati con dati di input più affidabili ed aderenti alla realtà geologica e produttiva del giacimento, si impone come attività necessaria da effettuare su tutti i giacimenti con una periodicità che può essere stabilita in base ai criteri generali indicati nel seguito. Infatti, a parte il caso del giacimento di Groningen, per il quale le Autorità olandesi preposte al controllo richiedono all'operatore NAM di presentare una revisione delle previsioni di subsidenza ogni 5 anni (cfr. paragrafo 2.4), non esistono criteri o linee guida in campo internazionale ai quali riferirsi.

Sulla base dell'attività svolta dal Gruppo di Lavoro e degli studi effettuati in coordinamento con l'ENI, è stato possibile stabilire che tali criteri guida debbano basarsi sui seguenti elementi principali:

- **intervallo di tempo tra due revisioni consecutive delle stime della subsidenza;**
- **percentuale delle riserve di giacimento prodotte;**
- **distanza critica dalla costa della massima estensione del cono di subsidenza**

Questi tre elementi principali devono comunque essere integrati con altri fattori, non meno importanti, il cui peso può tuttavia variare caso per caso, a seconda della specifica situazione o della “performance” produttiva dei giacimenti.

Elementi principali e fattori specifici concorrenti, di seguito descritti, devono essere considerati sia nella fase in cui viene stabilito il calendario delle revisioni, che nel caso in cui si dovesse rendere necessario modificare, a causa del verificarsi di condizioni e/o eventi specifici, la scadenza temporale per l’esecuzione di nuove e più aggiornate stime predittive. Questi sono rappresentati principalmente da:

- **revisione delle riserve inizialmente previste che comporti un aumento delle riserve producibili;**
- **depressurizzazione del reservoir più rapida di quella prevista in sede di modellizzazione dei profili di produzione;**
- **variazioni significative della produttività dei pozzi;**
- **valori anomali o comunque superiori a quelli considerati rispetto all’ultima revisione delle stime, dei C_m calcolati sulla base del monitoraggio dei marker radioattivi;**
- **valori anomali del monitoraggio altimetrico della zona costiera;**
- **valori anomali di permeabilità, o comunque sensibilmente difformi rispetto ai valori medi osservati per le serie plioceniche mineralizzate, anche se con i limiti descritti al paragrafo 8.4**
- **disponibilità di misure dirette di C_m riferite ai livelli della formazione mineralizzata e alla loro profondità (dati dei marker radioattivi). Anche in questo caso si dovrà tener presente quanto detto a riguardo nel paragrafo 8.2;**
- **disponibilità di sistemi di controllo e monitoraggio diretti e affidabili, quali la rete CGPS, descritta al paragrafo 8.3.**

Intervallo di tempo

La scelta di questo parametro deve tener conto prioritariamente della necessità di lasciar trascorrere fra due revisioni consecutive un periodo di tempo sufficientemente lungo per poter acquisire le nuove informazioni (es. pressioni statiche, portate d’acqua, performance produttive dei pozzi, ecc.) sul comportamento del giacimento che consentano di “calibrare” in modo significativo il modello dinamico dello stesso. A questo proposito l’esperienza maturata sembrerebbe indicare la necessità di disporre di tempi superiori all’anno, salvo particolari situazioni che dovranno essere definite in funzione di peculiari caratteristiche geomeccaniche e produttive del giacimento. **Pertanto, l’impostazione sinora adottata in alcuni casi (verifiche con cadenza annuale) nel quadro prescrittivo dei Decreti VIA potrebbe risultare pertanto dispendiosa e non significativa.**

Indicativamente, si è constatato che un periodo di 3 o 4 anni è sufficiente a consentire l’acquisizione e l’elaborazione di nuovi dati di input per l’aggiornamento delle stime della subsidenza utilizzando i modelli più complessi tipo FEM.

Percentuale delle riserve di giacimento prodotte

In relazione a questo parametro il Gruppo di Lavoro ha potuto stabilire le quote di produzione significative, in corrispondenza delle quali è opportuno che vengano effettuate le revisioni degli

studi di subsidenza. Il criterio usato per stabilire gli “step” produttivi si fonda principalmente sulle previsioni dei profili di produzione e sul volume delle riserve in posto (GOIP) e producibili.

Gli “step” di produzione minimi individuati sono:

- pari almeno al 30%-35%, del GOIP, ovvero .dopo aver prodotto circa il 30%-35% delle riserve tecniche (i.e. il volume di gas producibile a vita intera del giacimento dai pozzi di sviluppo previsti e con le tecniche correnti) riportate nel SIA,
- dopo aver prodotto circa il 65%-70% delle riserve tecniche riportate nel SIA, e, comunque, dopo che siano trascorsi non più di 7 anni dall’inizio della produzione;

Distanza dalla costa della massima estensione del cono di subsidenza

Con questo parametro si intende tenere in debito conto la sensibilità del contesto ambientale in cui si trova il giacimento, sia in ragione della sua distanza dalla costa, che della presenza, ad una distanza che potrebbe in qualche maniera essere considerata potenzialmente critica, di aree di particolare pregio ambientale (naturale e/o paesaggistico), soggette a specifica tutela.

Riguardo agli altri fattori di interesse concorrente a quelli principali sopra descritti si può osservare che:

- **aumento delle riserve producibili:** questa situazione, si può verificare se la perforazione dei pozzi di sviluppo mostra un sensibile aumento nell’estensione e negli spessori (gross e net) dei livelli mineralizzati;
- **depressurizzazione inattesa del reservoir e variazioni significative della produttività dei pozzi:** queste situazioni possono agire quale “segnale” indicatore di un comportamento del giacimento significativamente difforme rispetto a quello restituito dal modello dinamico utilizzato in fase di previsione (si ricorda che il modello dinamico entra direttamente in gioco nella modellizzazione della compattazione);
- **valori anomali di C_m (da markers):** l’esperienza di Regina evidenzia chiaramente come l’osservazione di una tale anomalia debba condurre necessariamente ad anticipare la revisione delle stime della subsidenza;
- **valori anomali del monitoraggio altimetrico in corso lungo la linea di costa:** questo genere di riscontri possono indicare la possibile estensione fino alla costa del cono di subsidenza dovuto alla coltivazione dei giacimenti ad essa antistanti (se non già prevista in sede di SIA). Ciò comporterebbe necessariamente l’immediata interruzione delle operazioni di coltivazione e la necessità di procedere ad una nuova verifica modellistica della subsidenza per la ricerca delle cause del fenomeno;
- per quanto riguarda gli altri aspetti da tenere in considerazione quali la **permeabilità, la disponibilità di misure dirette di C_m riferite ai livelli della formazione mineralizzata e la disponibilità dei sistemi di monitoraggio diretti (rete CGPS)**, eventuali singole situazioni e casi particolari che possono intervenire in fase di coltivazione, potranno influire, in concorso con gli altri fattori considerati, nella variazione della tempistica stabilita sulla base dei criteri principali.

L’applicazione dei criteri suddetti alle specificità dei giacimenti in esame, considerando l’entità delle attuali stime di subsidenza risultanti dagli aggiornamenti effettuati, in termini sia di valore assoluto che di estensione areale, ha portato a stilare un possibile cronoprogramma dei prossimi aggiornamenti delle stime della subsidenza, sinteticamente riportato nella Tabella sinottica presentata nel presente capitolo.

In particolare, per ciascun giacimento, si evidenzia che:

GIACIMENTO ANNALISA

INIZIO PRODUZIONE	RISERVE PRODOTTE AL 31.12.2006	DISTANZA DALLA COSTA	ULTIMA REVISIONE STIME	SISTEMA DI MONITORAGGIO	PROSSIMA REVISIONE DELLE STIME DELLA SUBSIDENZA
Marzo 2000	84 %	34 km	Apr. 2005 Semianalitico Geertstma	CGPS sulla piattaforma	NON PREVISTA

Non è prevista una revisione delle stime della subsidenza in ragione del valore non significativo della subsidenza prevista, della distanza dalla costa e dell'avanzato grado di produzione delle riserve.

- ✓ **Si ritiene che la produzione in questo giacimento possa essere ripresa a condizione che siano effettuati i controlli e i monitoraggi descritti al paragrafo successivo.**

GIACIMENTO ANEMONE II FASE

INIZIO PRODUZIONE	RISERVE PRODOTTE AL 31.12.2006	DISTANZA DALLA COSTA	ULTIMA REVISIONE STIME	SISTEMA DI MONITORAGGIO	PROSSIMA REVISIONE DELLE STIME DELLA SUBSIDENZA
Maggio 1999	72 %	20 km	Sett. 2006 Semianalitico Geertstma	CGPS sulla piattaforma	ENTRO IL 2007 (modello FEM)

Situazione analoga al giacimento Annalisa; tuttavia, per disporre di un quadro definitivo bisognerà attendere la conclusione della nuova stima della subsidenza attualmente in corso e prevista entro la fine del corrente anno.

- ✓ **Si ritiene che la produzione in questo giacimento possa essere ripresa solo dopo la presentazione da parte dell'ENI, ed a valle dell'opportuna verifica da parte del MATTM, dei risultati della stima della subsidenza attualmente in corso.**

GIACIMENTO BARBARA NW

INIZIO PRODUZIONE	RISERVE PRODOTTE AL 31.12.2006	DISTANZA DALLA COSTA	ULTIMA REVISIONE STIME	SISTEMA DI MONITORAGGIO	PROSSIMA REVISIONE DELLE STIME DELLA SUBSIDENZA
Sett. 1999	73 %	55 km	Mag. 2007 Semianalitico Geertstma	CGPS sulla piattaforma	NON PREVISTA

Situazione analoga al giacimento Annalisa.

- ✓ **Si ritiene che la produzione in questo giacimento possa essere ripresa a condizione che siano effettuati i controlli e i monitoraggi descritti al paragrafo successivo.**

GIACIMENTO CALIPSO

INIZIO PRODUZIONE	RISERVE PRODOTTE AL 31.12.2006	DISTANZA DALLA COSTA	ULTIMA REVISIONE STIME	SISTEMA DI MONITORAGGIO	PROSSIMA REVISIONE DELLE STIME DELLA SUBSIDENZA
Nov. 2002	53 %	35 km	Mag. 2007 FEM- ISAMGEO	CGPS sulla piattaforma	1° SEMESTRE 2011 (con dati al 31.12.2010)

✓ **Si ritiene che la produzione in questo giacimento possa essere ripresa a condizione che siano effettuati i controlli e i monitoraggi descritti al paragrafo successivo.**

GIACIMENTO CALPURNIA

INIZIO PRODUZIONE	RISERVE PRODOTTE AL 31.12.2006	DISTANZA DALLA COSTA	ULTIMA REVISIONE STIME	SISTEMA DI MONITORAGGIO	PROSSIMA REVISIONE DELLE STIME DELLA SUBSIDENZA
Ott. 2000	86 %	55 km	Mag. 2007 FEM- ISAMGEO	CGPS sulla piattaforma	1° SEMESTRE 2011 (con dati al 31.12.2010)

✓ **Si ritiene che la produzione in questo giacimento possa essere ripresa a condizione che siano effettuati i controlli e i monitoraggi descritti al paragrafo successivo.**

GIACIMENTO CLARA EST

INIZIO PRODUZIONE	RISERVE PRODOTTE AL 31.12.2006	DISTANZA DALLA COSTA	ULTIMA REVISIONE STIME	SISTEMA DI MONITORAGGIO	PROSSIMA REVISIONE DELLE STIME DELLA SUBSIDENZA
Ott. 2000	68 %	45 km	Mag. 2007 FEM- ISAMGEO	CGPS sulla piattaforma	1° SEMESTRE 2011 (con dati al 31.12.2010)

✓ **Si ritiene che la produzione in questo giacimento possa essere ripresa a condizione che siano effettuati i controlli e i monitoraggi descritti al paragrafo successivo.**

GIACIMENTO CLARA NORD

INIZIO PRODUZIONE	RISERVE PRODOTTE AL 31.12.2006	DISTANZA DALLA COSTA	ULTIMA REVISIONE STIME	SISTEMA DI MONITORAGGIO	PROSSIMA REVISIONE DELLE STIME DELLA SUBSIDENZA
Dic. 2000	88 %	50 km	Mag. 2007 FEM- ISAMGEO	CGPS sulla piattaforma	1° SEMESTRE 2011 (con dati al 31.12.2010)

- ✓ **Si ritiene che la produzione in questo giacimento possa essere ripresa a condizione che siano effettuati i controlli e i monitoraggi descritti al paragrafo successivo.**

GIACIMENTO NAIDE

INIZIO PRODUZIONE	RISERVE PRODOTTE AL 31.12.2006	DISTANZA DALLA COSTA	ULTIMA REVISIONE STIME	SISTEMA DI MONITORAGGIO	PROSSIMA REVISIONE DELLE STIME DELLA SUBSIDENZA
Giu. 2005	11 %	32 km	Apr. 2000 Semianalitico Geertstma	CGPS sulla piattaforma	1° SEMESTRE 2009 (con dati al 31.12.2008)

Per questo giacimento la revisione delle stime di subsidenza, peraltro non prescritta nel Decreto di V.I.A., non è stata effettuata in quanto il giacimento è entrato in produzione solo nel Giugno 2005 ed ha raggiunto ad oggi circa l' 11% della produzione prevista; pertanto considerando lo scarso livello di depressurizzazione del giacimento e i valori massimi di subsidenza non significativi, stimati in 5 cm a 20 anni dall'inizio della produzione in fase di SIA nel 2000, il GdL non ha ritenuto necessario effettuare l'aggiornamento delle stime di subsidenza.

- ✓ **Si ritiene che la produzione in questo giacimento possa essere ripresa a condizione che siano effettuati i controlli e i monitoraggi descritti al paragrafo successivo.**

GIACIMENTO PORTO CORSINI MARE

INIZIO PRODUZIONE	RISERVE PRODOTTE AL 31.12.2006	DISTANZA DALLA COSTA	ULTIMA REVISIONE STIME	SISTEMA DI MONITORAGGIO	PROSSIMA REVISIONE DELLE STIME DELLA SUBSIDENZA
Nov. 2001	63 %	20 km	Mag. 2007 FEM- ISAMGEO	CGPS sulla piattaforma	1° SEMESTRE 2012 (con dati al 31.12.2011)

- ✓ **Si ritiene che la produzione in questo giacimento possa essere ripresa a condizione che siano effettuati i controlli e i monitoraggi descritti al paragrafo successivo.**

GIACIMENTO REGINA

INIZIO PRODUZIONE	RISERVE PRODOTTE AL 31.12.2006	DISTANZA DALLA COSTA	ULTIMA REVISIONE STIME	SISTEMA DI MONITORAGGIO	PROSSIMA REVISIONE DELLE STIME DELLA SUBSIDENZA
Feb. 1998	85 %	17 km	Sett. 2006 FEM- ABAQUS	CGPS sulla piattaforma	AL MOMENTO NON DEFINIBILE

Per il giacimento Regina, considerata la peculiarità del fenomeno occorso e, in particolare, considerando che:

- la percentuale di riserve residue è pari a circa il 15%;
- la massima subsidenza stimata al culmine del giacimento è prevista al 2040, coincidente con la fine della produzione;
- l'ultimo aggiornamento del modello predittivo è stato effettuato a Settembre 2006 sulla base di nuovi dati geologici, geofisici e di produzione e pertanto non appare realistico poter disporre a breve termine di dati aggiornati per implementare il modello;
- è in corso un campagna di monitoraggio ambientale (sedimenti, benthos, colonna d'acqua ecc.) nell'area del giacimento finalizzata all'individuazione delle eventuali perturbazioni ambientali indotte dalla subsidenza verificatasi; la necessità di tale attività è emersa nel corso dei lavori oggetto del presente rapporto.

In base alle considerazioni sopra esposte si ritiene che da un punto di vista puramente tecnico, le stime della subsidenza oggi disponibili costituiscano l'aggiornamento più attendibile di cui si possa disporre, tuttavia, considerata l'entità assoluta della subsidenza misurata con i markers radioattivi, molto superiore a quella considerata al tempo del procedimento di VIA, è opportuno attendere i risultati dei monitoraggi ambientali in corso prima di prendere qualsiasi ulteriore decisione.

- ✓ **Si ritiene pertanto che la produzione in questo giacimento possa essere ripresa solo dopo la presentazione da parte dell'ENI, ed a valle dell'opportuna verifica da parte del MATTM, dei risultati dei monitoraggi ambientali in corso, e che, conseguentemente, il prossimo aggiornamento del modello di subsidenza, attualmente non definibile nei tempi, potrà essere stabilito anche in funzione dei risultati dei suddetti.**

9.4 Monitoraggi e controlli

L'applicazione dei criteri sopra riportati ha come conseguenza diretta che le stime effettuate in sede di SIA sono sostanzialmente soggette a profonde revisioni nel corso della vita produttiva del giacimento. Pertanto appare chiaro che un apparato prescrittivo prefissato, che non tenga cioè conto dei criteri indicati nel presente capitolo, potrebbe non soddisfare pienamente l'obiettivo delle prescrizioni inerenti il monitoraggio dei fenomeni geodinamici.

In un panorama in evoluzione, quale risulta essere quello che si evince dalle attività condotte dal GdL, il controllo e il monitoraggio ambientale del fenomeno della subsidenza e dei parametri a questa direttamente connessi, acquista una particolare importanza. A tale proposito si valuta positivamente l'implementazione dei sistemi di monitoraggio diretto dei giacimenti mediante il sistema CGPS e la sperimentazione di nuove tecniche per il controllo diretto dell'estensione del cono di subsidenza quale lo SPG (Seabed Pressure Gauge, o Sensori di Pressione a Fondomare) di cui si è fatto cenno al paragrafo 3.2.

L'acquisizione dei dati strumentali del CGPS, dovrà essere comunque integrata dal controllo delle attività indirette consistenti nell'acquisizione dei dati di produzione che rappresentano utili indicatori per la verifica di andamenti anomali rispetto alle previsioni, nonché segnali importanti per intraprendere eventuali azioni immediate atte a prevenire effetti non previsti sull'ambiente e sul territorio.

- ✓ **Si ritiene pertanto che, per tutti i giacimenti per i quali è stata proposta la ripresa delle attività di coltivazione, dovrà essere fornito al MATTM e al Ministero dello Sviluppo Economico (MISE), con cadenza annuale, un Rapporto di Giacimento contenente almeno i seguenti dati:**
 - **misure derivanti dal sistema CGPS installato sulla piattaforma, opportunamente disaggregate e validate con l'indicazione di eventuali variazioni di velocità del rateo di subsidenza totale;**

- **profili di produzione di gas e acqua misurati in pozzo,**
 - **confronti tra i dati strumentali di cui al punto precedente con le previsioni calcolate rispettivamente con i modelli dinamici e con lo studio di giacimento (ultimi aggiornamento disponibile).**
- ✓ **Resta fermo che qualora nel corso dell'acquisizione dei dati strumentali e di produzione si verificano eventi o andamenti "anomali" non riconducibili a fattori accidentali, essi dovranno essere tempestivamente segnalati al MATTM e al MISE.**

9.5 Possibili sviluppi futuri dell'attività del GdL

L'attività svolta dal GdL ha rappresentato, oltre che un necessario momento di verifica tecnica a supporto delle decisioni che verranno adottate dalle Amministrazioni competenti, un'importante occasione per affrontare tematiche generali e specifiche inerenti il fenomeno della subsidenza connesso alla *gestione* dei giacimenti offshore.

Non tutti gli aspetti oggetto di discussione ed analisi emersi nel corso delle attività hanno potuto trovare, essenzialmente per motivi legati sia alle scadenze imposte che al rispetto delle finalità prioritarie dell'attività affidata al GdL, un congruo spazio per essere sufficientemente trattate ed approfondite.

Considerata l'importanza strategica dell'attività di coltivazione di idrocarburi offshore ed altresì la necessità che tale attività possa essere condotta, allo stato attuale e in prospettiva futura, con tutte le necessarie garanzie ambientali, appare quindi importante suggerire in questa sede una traccia per il possibile prosieguo dell'attività del GdL, ampliando quest'ultimo ad un più ampio "*Tavolo Tecnico*" esteso anche a soggetti del mondo scientifico (Università, Enti di Ricerca) e/o ad altri soggetti istituzionali coinvolti nel rilascio delle autorizzazioni.

Potendo disporre delle necessarie risorse (umane, finanziarie, temporali) l'obiettivo finale della "seconda fase" delle attività del GdL, potrebbe essere quindi rappresentata dall'elaborazione di apposite "Linee Guida" per la valutazione dell'impatto ambientale del possibile fenomeno della subsidenza connesso con le attività di estrazione di idrocarburi offshore. Le Linee Guida così concepite avrebbero lo scopo di fornire sia ai Proponenti una base tecnica e metodologica ufficiale per l'elaborazione del progetto e del relativo S.I.A., che ai soggetti preposti al rilascio dell'autorizzazione, i criteri per l'analisi e la corretta valutazione del progetto.

La necessità di disporre di tale strumento è emersa, tra l'altro, proprio confrontando i diversi Decreti VIA emanati e, in particolare, l'apparato prescrittivo che è risultato essere spesso difforme, a parità di condizioni specifiche e a contorno, oppure, al contrario, analogo, in condizioni specifiche e a contorno però diverse.

Inoltre, come chiaramente emerso dall'attività condotta dal GdL, il continuo aggiornamento delle conoscenze scientifiche, tecnologiche e modellistiche, richiede necessariamente un parallelo aggiornamento nei criteri di caratterizzazione, analisi e valutazione dei fenomeni in gioco e ciò è può essere reso possibile solo elaborando, come in altri settori di attività, una sorta di *documento tecnico di riferimento*, aggiornato periodicamente con successive revisioni.

Pertanto, al fine di non disperdere l'esperienza compiuta e di valorizzare il lavoro sin qui svolto, si raccomanda di proseguire, con una fase successiva, il lavoro intrapreso dal GdL, affinché vengano predisposte le Linee Guida finalizzate alla standardizzazione dell'approccio alla metodologia di calcolo della stima predittiva della subsidenza e della metodologia di controllo e monitoraggi dei parametri geodinamici. Ciò appare oltremodo opportuno ed auspicabile in quanto tale problematica si colloca in un contesto del tutto privo di riferimenti specifici ed aggiornati di carattere tecnico-scientifico e normativo, sia a livello nazionale che internazionale

14. Bibliografia

- Aziz, K., and Settari, A., *Petroleum Reservoir Simulation*, Applied Science Publishers Ltd., London, 1979.
- Baù, D., Ferronato, M., Gambolati, G., and Teatini, P., 2002. Basin-scale compressibility of the northern Adriatic by the radioactive marker technique. *Géotechnique*, Vol. 52, No. 8, pp. 605-616.
- Bertoni, W., Elmi, C., and Marabini, F., 2005. The Subsidence of Ravenna. *Giornale di Geologia Applicata*, Vol. 1, pp. 23-32.
- Brighenti, G., and Fabbri, S., 1982. Variazioni di porosità e permeabilità nelle rocce sciolte sottoposte a compattamento. *Proc. XVIII-th Conv. Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Bologna, pp 77-88.
- Consonni, P., Mantica, S., and Capasso, G. Metodologie per la modellazione dei fenomeni di compattazione e subsidenza connessi con la coltivazione di giacimenti di idrocarburi. In "Problemi di Geoingegneria: estrazioni di fluidi e subsidenza", Macini, P., and Mesini, E. eds., 16 ° GEOFLUID, Piacenza, 7 Oct. 2006.
- Doornhof, D., 1992. Surface subsidence in the Netherlands: the Groningen gas field. *Geologie en Mijnbouw*, Vol. 71, pp. 119-130.
- Dudley, J.W., Hathon, L.A., Lehr, B.C., Doornhof, D., and van der Wal, O. *Surface Subsidence Prognosis for the Shell Canada Niglintgak Field – Report for Public Release*, Attachment JRP NRCAN 2.04-3, Shell International Exploration and Production B.V., Rijswijk, 2005, 14 p.
- Dusseault, M.B., and van Domselaar, H.R., Unconsolidated sand sampling in Canadian and Venezuelan oil sands, *Proc. of the 2nd International Conference on Heavy Crude and Tar Sands*, UNITAR, Caracas, February 7-17, 1982
- Ferronato, M., Gambolati, G., and Teatini, P. Interpretation of radioactive marker measurements to evaluate compaction in the northern Adriatic gas fields, *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, December 2003, pp.401-411.
- Gambolati, G., Ricceri, G., Bertoni, W., Brighenti, G., and Vuillermin, E., 1991. Mathematical simulation of subsidence of Ravenna. *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 11, pp. 2899-2918.
- Geertsma, J., 1973. A Basic Theory of Subsidence Due to Reservoir Compaction: the Homogeneous Case, *Verh. Kon. Ned. Geol. Mijnbouwk. Gen.*, Vol. 28, pp. 43-62.
- Geertsma, J., and van Opstal, G., 1973. A Numerical Technique for Predicting Subsidence Above Compacting Reservoirs Based on Nucleus of Strain, *Verh. Kon. Ned. Geol. Mijnbouwk. Gen.*, Vol. 28, pp. 63-78.
- Haeberle, D.C., Pakal, R., Asmann, M., and Duffy, B. W. *Taglu Surface Subsidence Study* Attachment JRP NRCAN 2.04-1, ExxonMobil Upstream Research Company, Nov. 2004, 12 p.
- Haeberle, D.C., Sheng-Yuan Hsu, and Asmann, M. *Taglu Surface Subsidence Study-Addendum*, Attachment JRP NRCAN 2.04-2, ExxonMobil Upstream Research Company, Feb. 2005, 5 p.

Holt, R.M., Brignoli, M., Kenter, C.J., Meij, R., and Schutjens, P.M.T.M., From Core Compaction to Reservoir Compaction: Correction for Core Damage Effects, *SPE preprint 47263* presented at the SPE/ISRM Eurock '98 held in Trondheim, Norway, July 8-10, 1998.

Hueckel, T., Cassiani, G., Fan Tao, Pellegrino, A., and Fioravante, V., 2001. Aging of oil/gas bearing sediments, their compressibility and subsidence, *J. Geotech. Geoenv. Engrg*, ASCE, 127 (11), pp. 926 – 938.

Hueckel, T., Cassiani, G., Prévost, J.H., and Walters, D.A., Field derived compressibility of deep sediments of the northern Adriatic, in *Land Subsidence – Special Volume, Proc. of the 7th Int. Symp. on Land Subsidence*, P. R. China, 23-28 Oct. 2005.

Mindlin, R.D., and Cheng, D.H., 1950. Thermoelastic Stress in the Semi-Infinite Solid. *J. Applied Phys*, Vol. 21, p. 931-933.

Nagel, N.B. *Compaction and Surface Subsidence Potential for the Parsons Lake Field, Mackenzie Delta – Northwest Territories, Canada*, Attachment JRP 4.08-2, ConocoPhillips Upstream Technology, Nov. 2004 updated May 2006, 35 p.