

Istanza di Concessione di Coltivazione Idrocarburi denominata “Colle Santo”



Revisione critica e omogeneizzazione di elaborati geologici
relativi al progetto di sviluppo del giacimento di gas
naturale denominato “Colle Santo”, parte della
documentazione allegata all’Istanza di VIA

Aprile, 2018

Sommario

1. Introduzione	2
2. Conclusioni	4
3. Modello geologico-strutturale e stratigrafico	7
3.1. Introduzione	7
3.2. Geologia delle successioni e strutture superficiali: Sintesi e riferimenti	9
3.3. Geologia regionale e caratterizzazione delle strutture geologiche profonde: Analisi critica della scelta del modello geologico-strutturale di riferimento	9
3.4. Assetto geologico-strutturale e stratigrafico a scala del giacimento: Analisi critica e vincoli per la ricostruzione del Modello Geologico 3D.....	18
3.5. Conclusioni	31
4. Modello idrogeologico e Modello della Subsidenza	32
4.1. Definizione della porosità secondaria ai fini della stima dei caratteri petrofisici e della subsidenza...	32
4.1.1. Conclusioni	35
4.2. Ripressurizzazione da parte dell'acquifero	35
4.2.1. Conclusioni	39
4.3. Modello di subsidenza.....	39
4.3.1. Ulteriori pozzi di sviluppo	40
4.3.2. Effetti della subsidenza.....	41
4.3.3. Confronto con altre esperienze in Italia. Gli analoghi "minerari"	43
4.3.5. Conclusioni	45
5. Sismicità	46
5.1. Strutture sismogenetiche.....	46
5.2. Sismicità indotta/innescata.....	49
5.3. Piano di Monitoraggio Sismico.....	54
5.4. Frane "naturali" e Franosità sismo-indotta.....	58
5.5. Conclusioni	61
6. Sintesi degli impegni assunti da CMI	62
7. Bibliografia	64

1. Introduzione

CMI Energia ha presentato il 25.06.2016 al Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Istanza di avvio della procedura di Valutazione di Impatto Ambientale per il progetto denominato "Progetto di Sviluppo Concessione Colle Santo", ubicato in Regione Abruzzo, che prevede la coltivazione del giacimento di gas naturale "Colle Santo" attraverso:

- la realizzazione di un gasdotto di collegamento dell'area pozzi esistente con la centrale di separazione e trattamento del gas, anch'essa da realizzare,
- l'apertura e la messa in produzione di due pozzi già perforati nel passato,
- la realizzazione di ulteriori 2 (+1 eventuale) pozzi di sviluppo.

In aggiunta alla documentazione tecnica allegata all'istanza, numerosa documentazione integrativa è stata presentata dalla CMI Energia nel tempo, anche sotto forma di controdeduzioni e di integrazioni volontarie, al fine di rispondere alle varie richieste di informazioni aggiuntive da parte degli Enti coinvolti, Associazioni di cittadini, comunità locali.

Di tutta la documentazione, diversi rapporti, relazioni e studi affrontano tematiche relative alla componente suolo e sottosuolo, ovvero in generale tematiche "geologiche" (geologiche, idrogeologiche, geomeccaniche, geotecniche, sismologiche), sia per l'area vasta che per i siti previsti per la realizzazione delle opere; alcuni documenti, depositati o semplicemente richiamati, sono riferibili a procedimenti autorizzativi promossi a partire dal 2009, relativi ad una diversa ipotesi di sviluppo del medesimo giacimento di Colle Santo. In Tab 1 un elenco non esaustivo della principale documentazione, presentata da CMI a corredo dell'Istanza di VIA, utilizzata per la redazione del presente rapporto.

CMI Energia, per consentire una più agevole disamina degli aspetti legati alle tematiche "geologiche" ha ritenuto opportuno dare incarico a Strata GeoResearch srl, spin-off dell'Università di Chieti-Pescara, di effettuare una revisione unitaria e critica di tutta la documentazione finora depositata su tali tematiche, per riesaminare e ridiscutere in maniera ragionata e coordinata i vari contributi proposti nel corso degli anni da più specialisti.

Strata GeoResearch ritiene che la documentazione "geologica" presentata a corredo dell'Istanza di VIA, e nelle successive integrazioni e controdeduzioni, risulta essere adeguata e congruente per definire un quadro esauriente ed esaustivo delle conoscenze sia alla scala regionale che alla scala del giacimento e della progettazione definitiva oggetto della procedura di VIA.

La revisione critica ed unitaria delle informazioni contenute nella diversa documentazione "geologica" afferente al progetto di sviluppo del giacimento Colle Santo viene affrontata nel presente rapporto nell'ambito di tre macro aspetti:

- Assetto geologico-strutturale
- Idrogeologia e Subsidenza
- Sismicità

Si vuole in questa sede evidenziare che:

- I dati utilizzati nel presente lavoro derivano da quanto reso disponibile da CMI e da specifiche conoscenze tecniche di Strata GeoResearch, inclusa la diversa bibliografia di settore.
- Non sono state effettuate nuove modellazioni quantitative; quelle esistenti sono state assunte come valide e ritenute esaustive ai fini di una compiuta valutazione degli effetti e impatti indotti dalla realizzazione delle opere e dalla estrazione dei fluidi dal sottosuolo.

- Le previsioni e simulazioni effettuate nei diversi studi tecnici allegati alla documentazione presentata da CMI, inclusa la verifica di congruenza e omogeneizzazione effettuata in questo studio sono unicamente frutto dell'analisi degli effetti derivanti dalla produzione di giacimento ipotizzata e non sono stati tenuti in considerazione gli effetti non imputabili alla produzione di giacimento. Un elenco non esaustivo di tali effetti non imputabili alla produzione comprende le attività antropiche di altra natura e i fenomeni naturali non ipotizzabili allo stato attuale delle conoscenze.

Titolo	Codice elaborato
Studio di impatto ambientale	TEA-ENG-16-12
Relazione tra geodinamica e morfostruttura e rapporto tra i piani di scollamento profondi e le strutture superficiali delle nuove opere in progetto	ALL-6
Caratterizzazione geomorfologica dell'Area del Permesso di ricerca Monte Pallano	ALL-7
Campo di Colle Santo - Studio sulla subsidenza indotta dalla futura produzione del campo	ALL-14
Piano di monitoraggio diga di Bomba	ALL-15
Carta della pericolosità da frana	015-PG-1012
Carta del rischio da frana	015-PG-1013
PTCP - Carta della suscettività alle frane	015-PG-0999
Integrazioni del 27/11/2017 - Allegato H - Relazione integrativa al quadro geomeccanico (punti 21b e 21c)	INT-009
Integrazioni del 20/11/2017 - Allegato A - How to Address Subsidence Evaluation for a Fractured Carbonate Gas Reservoir Through a Multi-disciplinary Approach	INT-002
Integrazioni del 20/11/2017 - Allegato C - Relazione sullo stato dei piezometri esistenti e sul programma di adeguamento con nuovi piezometri e con assestometro	INT-004
Integrazioni del 20/11/2017 - Allegato D - Relazione Idrogeologica	INT-005
Integrazioni del 20/11/2017 - Allegato E - Relazione Geologica e sulla Sismicità	INT-006
Integrazioni del 20/11/2017 - Allegato F - Predisposizione di una rete di monitoraggio microsismico nell'area del giacimento di Colle Santo	INT-007
Integrazioni del 20/11/2017 - Allegato G - Integrazioni al quadro geologico e sismotettonico	INT-008
Planimetria di inquadramento generale	015-PG-1006

Tab. 1 Elenco non esaustivo della principale documentazione, presentata da CMI a corredo dell'Istanza di VIA, utilizzata per la redazione del presente rapporto.

Per una facile lettura, le figure sono citate in Maiuscolo (Fig. x) se riferite al presente rapporto, in minuscolo (fig. x) se riferite ai diversi Allegati citati.

In fase di compilazione del presente rapporto, l'11 aprile 2018 CMI ha ricevuto dal MATTM, e inoltrato a Strata GeoResearch, il documento ISPRA intitolato "Analisi delle criticità. Progetto di sviluppo concessione Colle Santo" (doc. ISPRA RTSIA-3385-DEF del 7 marzo 2018). In tale documento sono discusse ed elencate alcune criticità che ISPRA, in qualità di consulente tecnico-scientifico a supporto delle attività della Commissione VIA/VAS del MATTM, ha evidenziato sulla base della documentazione tecnica presentata da CMI. Da una attenta lettura di tale documento, risulta che le criticità elencate sono sovrapponibili a quanto evidenziato da Strata GeoResearch; questo rapporto quindi può essere considerato anche come documento di chiarimenti relativamente alle criticità emerse sui temi di geologia e sismicità dal detto documento redatto da ISPRA.

2. Conclusioni

Alla luce della revisione critica della documentazione disponibile, si può concludere che la documentazione geologica presentata a corredo dell'Istanza di VIA, e nelle successive integrazioni e controdeduzioni, risulta essere sufficientemente adeguata e congruente per definire un quadro esaustivo delle conoscenze geologiche sia alla scala regionale che alla scala del giacimento e della progettazione definitiva oggetto della procedura di VIA.

In particolare:

- **Modello geologico:**

- La revisione critica della documentazione tecnica presentata da CMI ha avuto come obiettivo il chiarimento di alcuni aspetti legati alla **caratterizzazione geologico-strutturale** dell'area in esame, che sono stati trattati in modo discontinuo e con finalità diverse nei vari documenti e integrazioni presentati a corredo dell'Istanza di VIA.
- Gli schemi geologici presentati e la letteratura citata mostrano un **quadro geologico complesso** e dei modelli interpretativi non univoci, sia per le strutture di superficie che per quelle più profonde. Le principali cause della pluralità delle interpretazioni e dei modelli esistenti in letteratura risiedono nella scarsa qualità del dato di sottosuolo, nella mancanza di vincoli adeguati per la taratura degli orizzonti sismici in profondità e nelle diversità dell'approccio allo stile deformativo (scuole di pensiero) a cui fanno riferimento gli autori degli articoli scientifici da cui i modelli derivano.
- La scelta del **modello geologico-strutturale a scala regionale** proposto da Calamita et al. (2009; 2011) appare coerente; in ogni caso, il modello "alternativo" di Patacca et al. (2008) non risulterebbe avere implicazioni significative ai fini della costruzione del modello geologico 3D esteso e quindi per la caratterizzazione del comportamento geomeccanico a scala regionale, essendo le principali differenze tra i due modelli associate a strutture esterne all'area del giacimento o profonde.
- I lineamenti tettonici individuati all'interno della struttura Casoli-Bomba hanno un diverso coinvolgimento nella costruzione dei **modelli geologici 3D statici e dinamici** a scala del giacimento e delle successioni limitrofe potenzialmente interessate da variazioni di pressione. Il back-thrust t3, riscontrato negli elaborati di CMI Energia, sulla cui presenza la letteratura scientifica è concordante, delimita l'estensione giacimento a O e a SO, mentre il thrust t6, presente nei lavori di Calamita e coautori, assente in Patacca et al (2008), esterno al giacimento, è considerato come bordo orientale dell'acquifero limitrofo, ad esso idraulicamente connesso.

- **Modello Idrogeologico e modello di subsidenza:**

- **Parametri petrofisici:** sono stati ricavati sia dai dati provenienti dalle carote prelevate nei pozzi Bomba 2 e Bomba 3, sia dall'elaborazione dei log elettrici registrati ai pozzi; i parametri così ottenuti possono essere quindi ritenuti mediamente rappresentativi del giacimento stesso anche ai fini delle simulazioni delle condizioni di sollecitazione e quindi del modello di subsidenza adottato.
- **Porosità primaria e secondaria:** in relazione ai valori dedotti dai log dei pozzi Monte Pallano 1 e 2, dalla considerazione che le spazature da fratturazione diminuiscono con la profondità e dalla scelta dei valori da bibliografia e/o da modellazione, emergerebbe chiaramente che i dati di input scelti

sono risultati essere a beneficio della sicurezza e che dunque le simulazioni tengono conto di condizioni peggiori ai fini del calcolo dell'entità della subsidenza.

- **Spinta dell'acquifero:** le simulazioni eseguite possono essere considerate sufficientemente esaustive delle condizioni reali. In particolare, appare più realistica la simulazione eseguita con il cosiddetto acquifero forte.
- **Modello di subsidenza e Monitoraggio:** si ritiene che l'analisi del fenomeno della subsidenza indotta dall'estrazione prevista di fluidi dal sottosuolo sia stata effettuata in maniera corretta, considerando con la dovuta attenzione i possibili fattori perturbanti e le possibili conseguenze ipotizzabili con lo stato attuale delle conoscenze.

È evidente che un attento monitoraggio delle deformazioni del suolo in fase di pre-esercizio, di esercizio e di post-esercizio potrà verificare la reale deformazione del suolo e gli eventuali scostamenti rispetto al modello previsionale, permettendo quindi l'adozione di misure atte a ricondurre il "sistema diga" in condizioni di sicurezza. La progettazione esecutiva di tale monitoraggio dovrà necessariamente conformarsi a quanto previsto nell'All.15 in termini di linee guida da seguire (rete di ricevitori GPS, misure InSAR, pressioni test periodici ai pozzi) e azioni conseguenti da intraprendere. Tali linee guida dovranno conformarsi anche a quanto previsto dal documento "Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche" del MiSE.

- **Sismicità**

- Se da una parte sarà assolutamente necessario attenersi a quanto previsto dalle citate Linee Guida del MiSE e dalle possibili successive modifiche e implementazioni, dall'altra si ritiene che lo stato attuale di conoscenze e di progettazione definitiva presentati nella diversa documentazione allegata alla Istanza di VIA (e nella successiva documentazione integrativa) siano sufficienti per definire un quadro esaustivo della sismicità dell'area e delle problematiche connesse alla realizzazione delle opere previste, che serviranno di base, con tutte le eventuali prescrizioni che potranno scaturire, alla successiva progettazione esecutiva. In tale contesto si inserisce anche la redazione della relazione sismica sulle strutture, della relazione geotecnica, del piano di indagine per la valutazione dei fenomeni di liquefazione, dello studio di compatibilità idrogeologica.
- Sulla base della documentazione presentata e degli studi effettuati dagli specialisti coinvolti e dal gestore della diga, ne sembra conseguire che le distorsioni angolari attese risulterebbero di alcuni ordini di grandezza inferiori rispetto ai valori in gioco nell'ambito delle verifiche strutturali, tanto da non incidere sull'esito delle stesse. Si suggerisce che prima dell'inizio dei lavori vengano aggiornate, di concerto con il concessionario della diga, le verifiche sismiche dettate dalla norma e vengano revisionati i conseguenti scenari di deformazione dinamica.

- Buona parte delle **indagini di dettaglio** e la loro restituzione in relazioni e indagini sito-specifiche, alcune delle quali richiesti dalla CT-VIA come integrazioni (come ad esempio la Relazione sismica sulle strutture, il Piano di indagini per la valutazione dei fenomeni di liquefazione o la Relazione geotecnica) potranno essere realizzate in fase di progettazione esecutiva; tale fase potrà iniziare solo a valle di quanto potrà scaturire dalle eventuali prescrizioni dettate dal Decreto di Compatibilità Ambientale.
- Nell'ambito del punto precedente, CMI ha assunto diversi **impegni** a predisporre una serie di **indagini di sito** (vedi Cap. 6) che saranno sviluppate sia in fase di progettazione esecutiva che di esercizio: fra queste il **monitoraggio sismico e della deformazione del suolo** accennato nei punti precedenti. Tali indagini e monitoraggi si ritiene possano essere sufficienti, in questa fase della progettazione, per investigare al

meglio i siti oggetto degli interventi e monitorare con sufficiente dettaglio gli impatti sulle componenti ambientali.

3. Modello geologico-strutturale e stratigrafico

3.1. Introduzione

Il giacimento di gas naturale “Colle Santo” è collocato all’interno dei depositi carbonatici di piattaforma riferiti alle Unità Apulo-Adriatiche, deformate, dell’Appennino meridionale. Il giacimento è individuato all’interno della porzione meridionale della struttura sepolta Casoli-Bomba, estesa in direzione circa NO-SE, caratterizzata da una geometria arcuata, con lunghezza di circa 30 km e larghezza di circa 10 km.

L’assetto stratigrafico dell’area di indagine, oltre che da dati di affioramento, è stato ricostruito sulla base di dati di pozzo eseguiti dalla fine degli anni ’60 fino a tempi più recenti (Bomba 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7; Monte Pallano 1d e Monte Pallano 2). In sintesi, la successione stratigrafica è caratterizzata dall’ alto verso il basso da (Fig. 3.1):

- Depositi alluvionali (Alluvioni Ciottolose);
- Complesso Alloctono;
- Pliocene inferiore: Argille con intercalazioni siltoso-sabbiose (Formazione Santerno);
- Miocene superiore (Messiniano): Anidriti con intercalazioni marnose (Formazione Gessoso Solfifera);
- Miocene superiore-medio: Calcarea marnoso e calcarea detritico organogeno di piattaforma carbonatica aperta, poco profonda (Formazione Bolognano);
- Cretaceo superiore (Senoniano): Calcarea detritico-organogeno, fratturato, di soglia di piattaforma (Piattaforma Apula — Formazione Calcari di Monte Acuto).

Un piano di sovrascorrimento a basso angolo, localizzato ad una profondità intorno a 1000m TVDss (pozzi Bomba 1 e Bomba 7) sovrappone tettonicamente il complesso alloctono ai depositi del Pliocene inferiore (Fig. 3.1). La *cap rock* del giacimento è costituita da calcari marnoso-argillosi (Formazione Bolognano, Miocene), con andamento continuo al di sopra del giacimento e spessore di circa 20-25m. La successione mineralizzata è costituita da calcari bioclastici fratturati (Formazione Calcari Monte Acuto, Cretacico superiore e Formazione Bolognano, Miocene inferiore) e presenta uno spessore compreso tra 75m (pozzo Monte Pallano 1dir) e 140m (Bomba 7). Il contatto gas-acqua è stato incontrato nei pozzi perforati a una quota pari a 1120m TVDss (Total Vertical Depth, sub sea) (All.14).

In questo capitolo viene effettuata una revisione critica della documentazione presentata per definire il **modello geologico-strutturale e stratigrafico** illustrato nei vari documenti e integrazioni presentati da CMI a corredo dell’Istanza di VIA (es. All.6; All. 14; All. A; All. E; All. G in Tab.1).

Sebbene fortemente interconnesse dal punto di vista scientifico, le tematiche geologiche affrontate possono essere divise in:

1. Geologia delle successioni e strutture superficiali;
2. Geologia regionale e caratterizzazione delle strutture geologiche profonde;
3. Assetto geologico-strutturale e stratigrafico a scala del giacimento.

Per quanto riguarda il tema 1 (Geologia delle successioni e strutture superficiali), questo risulta ampiamente trattato nella documentazione allegata da CMI Energia a corredo dell'Istanza di VIA e gli aspetti salienti sono sintetizzati nel capitolo 3.2.

Diversamente, i temi 2 (Geologia regionale e caratterizzazione delle strutture geologiche profonde) e 3 (Assetto geologico-strutturale e stratigrafico a scala del giacimento) richiedono un approfondimento, avendo ravvisato nella documentazione disponibile la necessità di uniformare diversi aspetti relativi alla letteratura scientifica e ai modelli geologico-strutturali utilizzati. La mancanza di una revisione critica di questi aspetti potrebbe risultare in una scarsità di chiarezza e innescare criticità durante il processo di revisione.

I temi 2 e 3 saranno analizzati nei capitoli 3.3 e 3.4 attraverso una revisione critica dei vari documenti e integrazioni presentati da CMI a corredo dell'Istanza di VIA.

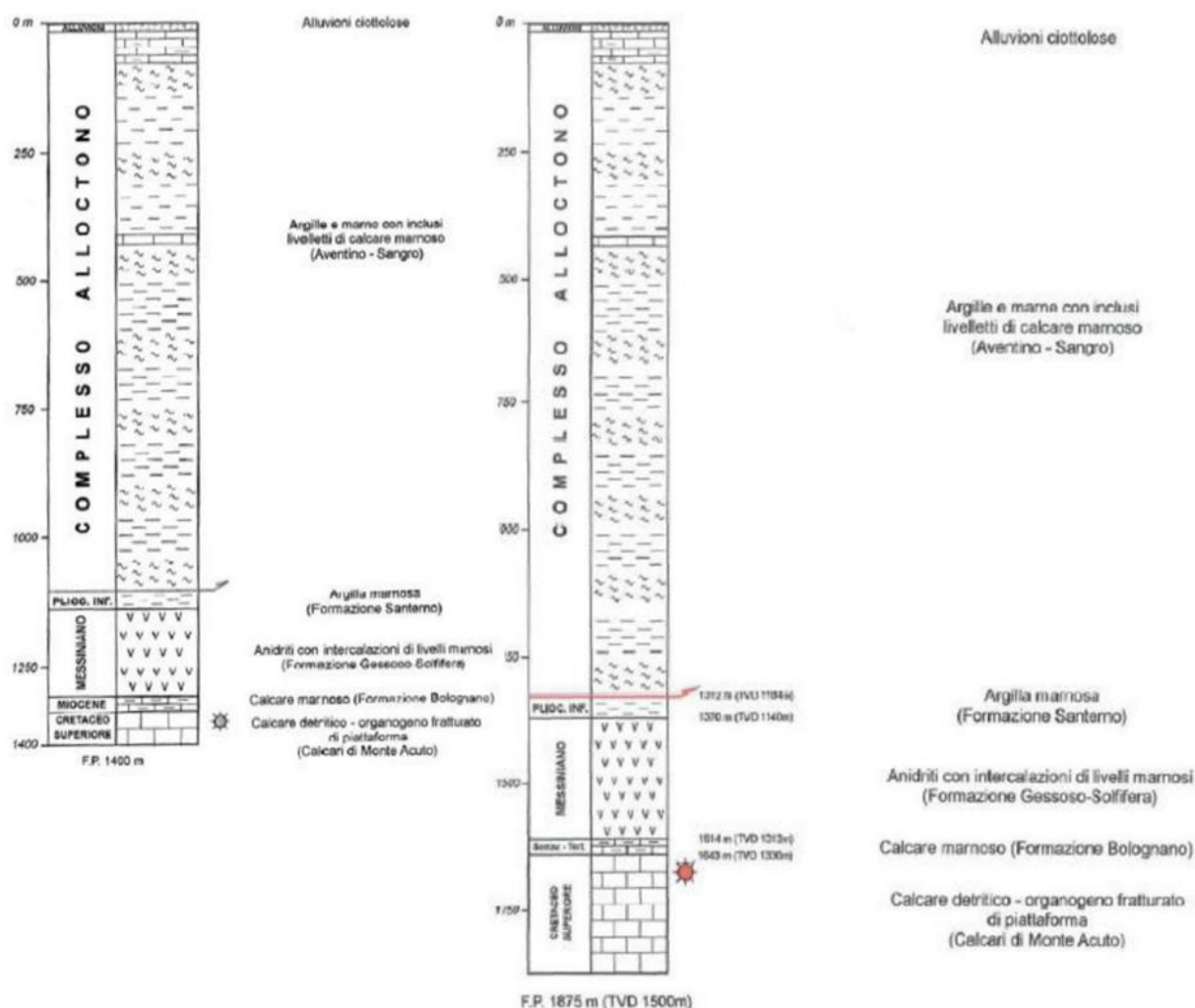


Fig. 3.1: Log stratigrafici schematici dei pozzi Monte Pallano 1dir e Monte Pallano 2dir (da SIA, fig. 3c; All.E, fig.6)

3.2. Geologia delle successioni e strutture superficiali: Sintesi e riferimenti

Questo tema è trattato nell'All.6, in cui sono rivisti criticamente e discussi diversi modelli proposti in letteratura relativi all'evoluzione tettonica dell'area, a partire dalla revisione delle carte geologiche disponibili. I dati di letteratura sono integrati con dati di superficie acquisiti tramite rilevamento geologico. La descrizione delle strutture profonde, così come trattata nel paragrafo 2.1 dell'All.6, è stata successivamente integrata sulla base dei dati di letteratura più recenti e aggiornati.

Per quanto riguarda la relazione tra l'assetto strutturale delle unità alloctone e quello della piattaforma Apula profonda, nell'All.6 si evidenzia che: *“A livello regionale lo stile deformativo delle falde molisane e sannitica [Complesso Alloctono] si differenzia notevolmente dalle unità strutturali carbonatiche che costituiscono l'ossatura dell'Appennino centrale (Bigi et al., 2003; Corrado et al., 1998a). La presenza di un imponente livello di scollamento in corrispondenza dell'unità litostratigrafica delle Argille varicolori (Oligocene superiore-Miocene inferiore) ha profondamente influenzato le geometrie compressive delle unità molisano-sannitiche, caratterizzate dallo sviluppo di sovrascorrimenti con una lunghezza dei flat di gran lunga superiore a quella delle zone di rampa (Di Bucci et al., 1999). [...] Gli ispessimenti dovuti a superfici di thrust a basso angolo non sembrano interessare l'area discussa nella presente relazione. Infatti le stratigrafie dei pozzi perforati a N e a E del Lago di Bomba (pozzi Bomba, Pennadomo e Monte Pallano) mostrano come la Piattaforma apula sepolta si attesti a circa un chilometro di profondità e come l'alloctono al tetto del ricoprimento [sovrascorrimento] principale sia sostanzialmente in successione stratigrafica, con facies ascrivibili alla sedimentazione del bacino molisano (successioni Tufillo e Agnone del bacino molisano).”*

Nell'area prospiciente la zona pozzi e il Monte Pallano le varie unità stratigrafiche che costituiscono il complesso alloctono sono in sovrapposizione tettonica attraverso dei back-thrust a basso angolo a vergenza SO, che riprendono lo stile deformativo del thrust basale, in contrasto con le faglie normali e i sovrascorrimenti più ad alto angolo che caratterizzano lo stile deformativo delle successioni della piattaforma Apula in profondità (All.6; All.E, fig. 4 e 5).

La relazione tra le caratteristiche litologiche delle successioni superficiali e la geomorfologia dell'area è illustrata nell'All.E, che riporta carte geologiche di dettaglio, sezioni stratigrafiche pellicolari, oltre a stralci dalla Carta Pericolosità del P.A.I, e alla carta geomorfologica generale (in scala originale 1:25.000). La caratterizzazione geomorfologica dell'area del permesso di ricerca “Monte Pallano” è inoltre affrontata nell'All.7.

3.3. Geologia regionale e caratterizzazione delle strutture geologiche profonde: Analisi critica della scelta del modello geologico-strutturale di riferimento

Il tema della geologia regionale e la caratterizzazione delle strutture geologiche profonde è trattato nei paragrafi di inquadramento geologico nel SIA e nelle successive integrazioni (All.E; All.G), finalizzate

all'approfondimento di aspetti geomorfologici e di sismicità. Inoltre, negli allegati All.14 e All.A (Giani et al., 2017), gli aspetti di geologia regionale sono trattati, oltre che per inquadramento, anche per illustrare le caratteristiche del modello geologico-strutturale regionale preso come riferimento per la costruzione del modello geologico 3D allascale sub-regionale (modello geologico esteso) e alla scala del giacimento.

Gli strumenti di indagine per la caratterizzazione della geologia regionale sono, in generale, le carte geologiche e strutturali regionali, le sezioni geologiche crostali, i profili sismici profondi, le carte tematiche (isobate, gravità, sismicità). In questo ambito, i caratteri geologici regionali hanno implicazioni sulla ricostruzione delle fasi tettoniche, sul quadro sismotettonico e in parte sulla ricostruzione del modello geologico 3D esteso (di dimensioni circa 21x20km², per uno spessore di 5km), utilizzato per il modeling di tipo geomeccanico.

La ricostruzione dell'assetto geologico regionale è stata oggetto di numerosi lavori scientifici. I modelli geologico-strutturali proposti dai vari autori non sono tuttavia univoci, differendo principalmente per cinematica e stile deformativo delle strutture più profonde. L'elaborato di base su cui sono costruiti i modelli a scala regionale è rappresentato dal profilo sismico CROP11, orientato circa SO-NE, che attraversa il giacimento "Colle Santo" nella zona centrale, passando nei pressi dei pozzi BO2-3-1-6-7 (Fig. 3.2).

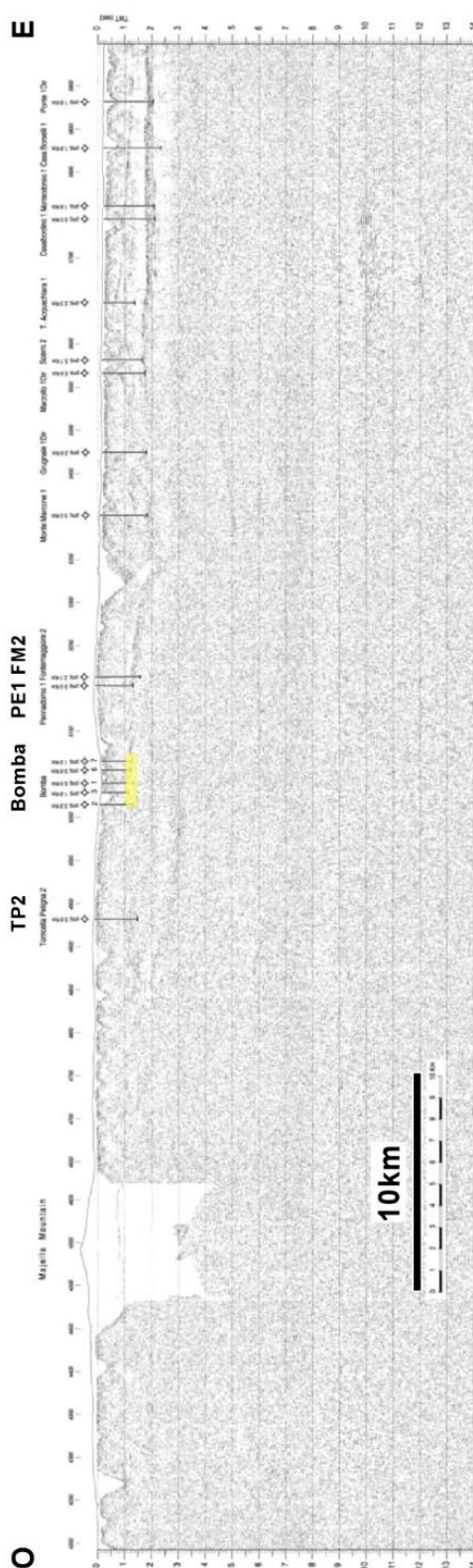


Fig. 3.2: Linea CROP11. Tratto compreso tra la piana di Sulmona (a ovest) e Vasto (a est). Stack non interpretata. Il tratto in giallo indica approssimativamente la posizione del giacimento di Colle Santo (Ubicazione pozzi da Patacca et al., 2008).

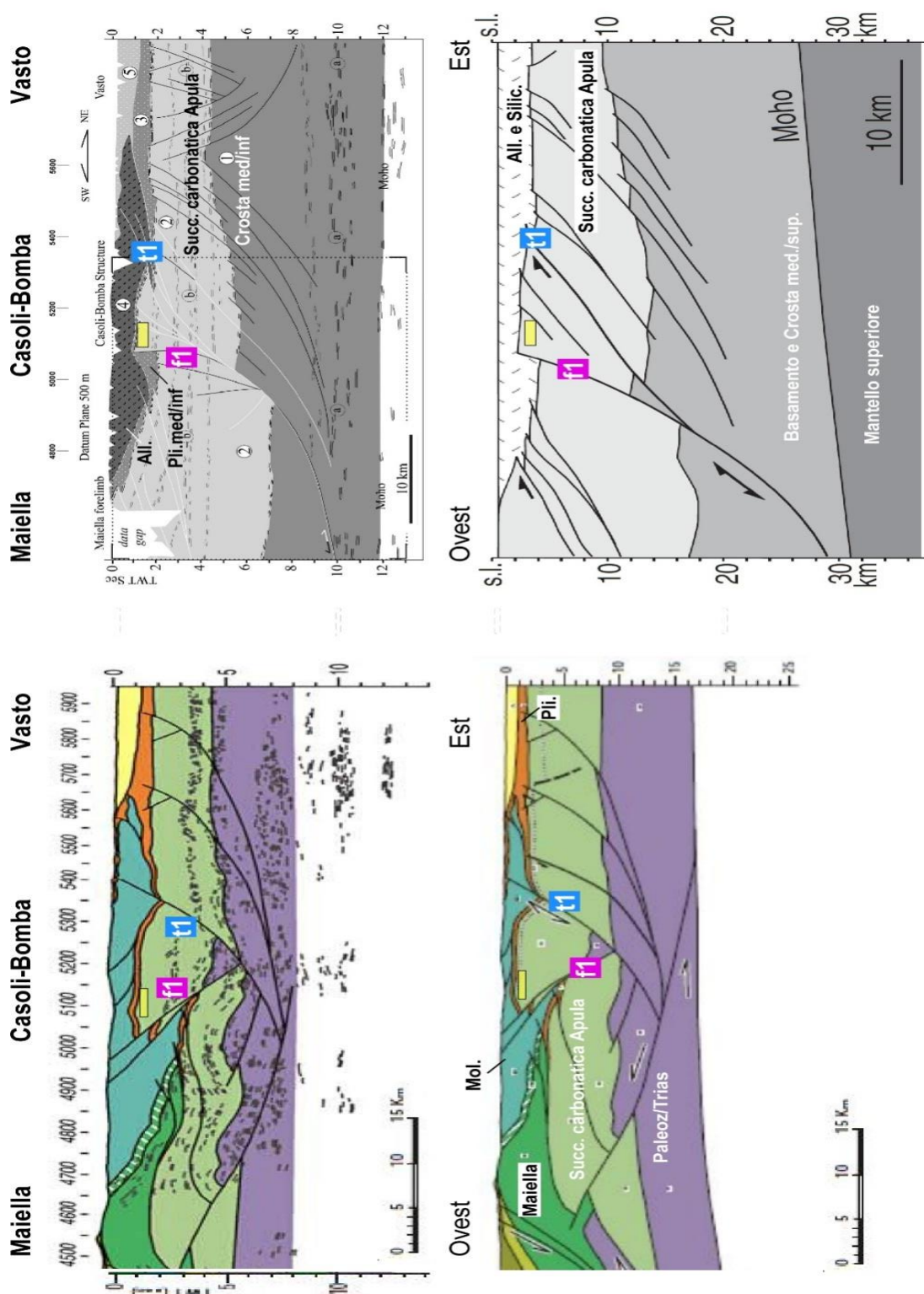
I lavori scientifici di riferimento che presentano un'interpretazione geologica accurata del profilo sismico CROP11, sono essenzialmente quelli di Patacca et al. (2008) e Calamita et al. (2009; 2011). In questi lavori è dato particolare risalto al tratto compreso tra l'anticlinale della Maiella e la costa Adriatica, focalizzando l'attenzione sulle geometrie e i lineamenti tettonici che definiscono la struttura Casoli-Bomba, sede del giacimento "Colle Santo".

La Fig. 3.3 mette a confronto i diversi modelli proposti dagli autori, ponendo gli elaborati alla stessa scala. In Patacca et al. (2008) la struttura Casoli-Bomba è descritta come una struttura di tipo "pop-up", ossia una struttura invertita limitata ad O da un sistema di back-thrust e a E da una faglia inversa ad alto angolo che ha riattivato una faglia normale del Pleistocene inferiore, immergente a O (Patacca et al. 2008, pag. 31).

In Calamita et al. (2009; 2011) la struttura Casoli-Bomba è descritta come un'anticlinale con geometria a box, caratterizzata da una cresta che si estende in lunghezza per circa 10 km e il suo forelimb è dislocato da un thrust che registra un raccorciamento di circa 3km. In accordo con questi autori, l'anticlinale è bordata a O da faglie normali pre-thrusting e a E da thrust che dislocano in short-cut le faglie normali stesse, invertendone i tratti più profondi (crosta-medio inferiore) a basso angolo, che dislocano la successione carbonatica e i depositi di avanfossa del Pliocene. La struttura è inoltre intercettata da back-thrust minori immergenti sia a O che a E.

Le principali differenze tra i due modelli sono relative a:

1. lo stile deformativo a scala regionale: "thin skinned" (Patacca et al. 2008) vs "crustal short-cut geometry" (Calamita et al., 2009; 2011);
2. la geometria a grande scala della struttura Casoli – Bomba: anticlinale di pop-up vs anticlinale di short-cut;
3. la presenza vs assenza di un sole-thrust che coinvolge la successione Paleozoica-Triassica;
4. la fase di sviluppo della struttura (post- vs pre-alloctono);
5. la terminazione occidentale della struttura Casoli-Bomba (qui indicata come f1): back-thrust vs faglia normale invertita solo nella porzione a basso angolo nella crosta media-profonda (Calamita et al. (2009; 2011);
6. la terminazione orientale della struttura (qui indicata come t1) e il suo andamento in profondità: faglia normale invertita vs thrust di short-cut.



Calamita et al. (2009; 2011)

Patacca et al. (2008)

Fig. 3.3:- Modelli geologico-strutturali a scala regionale, proposti nei vari lavori scientifici di riferimento costruiti sulla base dall'interpretazione della Linea CROP 11. In alto: interpretazione della linea sismica. in basso: sezione geologica ricostruita (depth-converted). Il tratto in giallo indica approssimativamente la posizione del giacimento "Colle Santo". f1 e t1 indicano i lineamenti tettonici che delimitano a E e a O la struttura Casoli-Bomba.

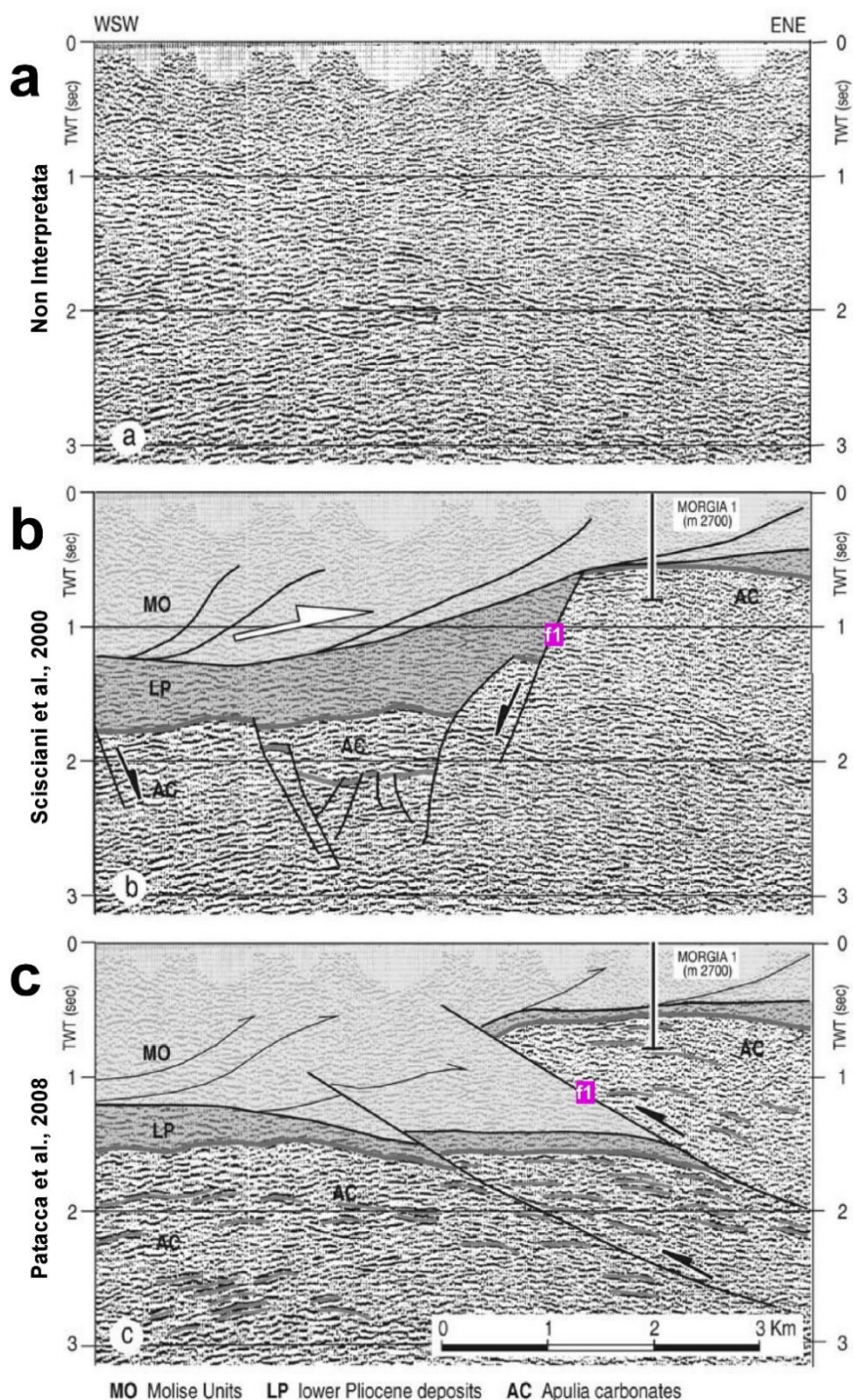


Fig. 3.4: Confronto tra le diverse interpretazioni geologiche della terminazione occidentale della struttura Casoli-Bomba, osservate in un profilo sismico, orientato SO-NE, parallelo al profilo CROP11 e passante pochi chilometri più a nord del giacimento "Colle Santo". a) linea sismica non interpretata; b) interpretazione proposta da Scisciani et al. (2000); c) interpretazione proposta da Patacca et al. (2008). (modificata da Patacca et al., 2008, pag. 19).

Più in dettaglio, le differenze di interpretazione relative al bordo occidentale della struttura Casoli- Bomba sono apprezzabili confrontando l'interpretazione di una linea sismica, orientata circa parallelamente al profilo sismico CROP 11, ubicata pochi chilometri a nord, passante per il pozzo Morgia 1, proposta rispettivamente da Patacca et al. (2008, pag. 19) e da Scisciani et al. (2000), la cui interpretazione è concorde con quella proposta successivamente da Calamita et al. (2009; 2011) (Fig. 3.4). Dal confronto risulta che le interpretazioni convergono nel settore orientale, vincolato dal pozzo Morgia 1, mentre per il resto le due interpretazioni differiscono per:

1. la geometria della faglia f1 che borda la struttura: distensiva per Scisciani et al., 2000 e coautori (Calamita et al., 2009, 2011), compressiva per Patacca et al (2009). Per Scisciani e coautori, la faglia f1 rappresenta una faglia normale e il settore di Morgia 1 corrisponde al blocco di letto della faglia (Fig. 3.4a), mentre per Patacca et a., (2008) la faglia f1 rappresenta una faglia inversa e il settore dove insiste il pozzo Morgia 1 corrisponde al blocco di tetto della faglia (Fig 3.4b).
2. la posizione e l'andamento del top dei carbonati nei settori della linea diversi da quelli tarati con il pozzo Morgia 1;
3. la posizione degli orizzonti basali delle unità associate al Pliocene Inferiore e al Complesso Alloctono e conseguente diverso spessore delle unità.
4. i tempi di attivazione della faglia f1. Secondo Scisciani et al. (2000) e successivamente Calamita et al. (2009; 2011), la faglia normale f1 è sigillata dai depositi del Pliocene inferiore a cui si sovrappone il complesso alloctono attraverso il thrust basale a basso angolo. Diversamente, Patacca et al. (2008) considerano i thrust sigillati dai depositi del tardo Pleistocene (Lavecchia et al., 2009 in DISS ver. 3.2.0, ITCS079).

Senza entrare nel merito delle interpretazioni proposte dagli autori sopra citati, l'insieme di queste differenze evidenzia che la scarsità di vincoli per la taratura degli orizzonti sismici, unita alla scarsa qualità della linea sismica, offre diverse e contrastanti possibilità di interpretazione.

Peraltro, il lineamento tettonico "f1" che borda a ovest la struttura Casoli-Bomba, fulcro ed espressione delle principali differenze interpretative tra i vari autori, non costituisce la chiusura strutturale occidentale del giacimento di "Colle Santo", che invece risulta essere rappresentata da una faglia ubicata circa 1,5km a NE della faglia f1, nella parte centrale della anticlinale, e corrispondente ad un back-thrust di medie dimensioni (t3 in Fig. 3.8 e cap. 3.4). Tale faglia, considerata anche nella modellizzazione 3D del giacimento è documentata attraverso linee sismiche e mappe (archivio dati CMI da interpretazioni Agip, vedi capitolo 3.4) che permettono un livello di dettaglio maggiore rispetto alla linea CROP e trova riscontro nella carta geologica di Calamita et al. (2009; 2011), mentre non è presente nei vari elaborati in Patacca et al. (2008) (Fig. 3.5).

Da un punto di vista geometrico, avendo come base la linea CROP11 si osserva che:

1. la posizione dei principali riflettori (ossia il top e la base della successione sedimentaria della piattaforma Apula) risulta in generale accordo (Calamita et al. 2009, pag. 389);
2. in entrambi i modelli f1, nell'intorno del giacimento, mostra una geometria ad alto angolo;

3. in entrambi i modelli la struttura Casoli-Bomba è delimitata ad E da un thrust (t1) posto circa 8-9 km ad E rispetto alla terminazione orientale per pendenza del giacimento (Fig. 3.5).
4. in entrambi i modelli ad una profondità di circa 2 secondi, il lineamento tettonico f1 mette a contatto le successioni carbonatiche della piattaforma Apula a tetto e a letto della faglia (Fig. 3.5).

In definitiva, la scelta del modello geologico-strutturale a scala regionale di Calamita et al. (2009; 2011), come base di riferimento nell'All.14 per la ricostruzione dell'assetto geologico-strutturale e stratigrafico alla scala del giacimento e quindi per la ricostruzione geologica 3D, sembra essere motivata dalle seguenti ragioni:

1. modello geologico più recente;
2. elevato numero di pubblicazioni e citazioni concordanti, su un arco di tempo di oltre 10 anni e su riviste nazionali e internazionali;
3. focalizzazione sulla descrizione della struttura Casoli - Bomba, prendendo in considerazione un maggior numero di dati a diversa scala che descrivono la prosecuzione settentrionale e meridionale della stessa struttura;
4. documentazione di strutture e cinematiche simili in altri settori della catena appenninica;
5. maggior numero di elaborati e schemi geologici, presentati a diverse scale;
6. documentazione più dettagliata di lineamenti tettonici minori presenti all'interno della struttura Casoli - Bomba, osservati sul profilo sismico CROP11 e su linee sismiche parallele;
7. documentazione su carta geologica di lineamenti tettonici sepolti, sottostanti il Complesso Alloctono;
8. ricostruzione dell'assetto strutturale dell'area e delle fasi evolutive integrando dati di diverso tipo (es. analisi di terreno, interpretazione di profili sismici a diversa scala (CROP, linee sismiche di maggiore dettaglio, low-temperature thermochronometers, presentati successivamente dagli stessi autori in Satolli et al., 2014);
9. espressione superficiale delle faglie coerente con l'interpretazione Agip.

Per completezza, si riporta che in letteratura sono presenti altri lavori scientifici che mostrano le caratteristiche geologico-strutturali dell'area in oggetto, attraverso sezioni geologiche schematiche o a scala regionale (e.g. Calamita et al., 2002; Ghisetti e Vezzani 2002; Di Luzio et al., 2009; Tiberti e Orlando, 2006; Festa et al., 2006; 2014; Patacca e Scandone, 2007; Di Luzio et al., 2009; Lavecchia e De Nardis, 2009; Satolli et al., 2014; Del Ben e Oggioni, 2016). Rispetto ai modelli presentati e discussi, questi lavori:

1. non mostrano differenze significative, oppure
2. non forniscono dati di maggiore dettaglio per caratterizzazione della struttura Casoli-Bomba a scala sub-regionale e a scala del giacimento, o infine
3. mostrano differenze negli stili deformativi e nelle geometrie delle strutture della crosta media e profonda poco significativi per la caratterizzazione della struttura di Casoli-Bomba.

Al riguardo si evidenzia che la sezione geologica crostale interpretativa proposta da Lavecchia e De Nardis (2009) e riportata nel DISS ver. 3.2.0 (ITCS079) sulla quale è individuato, su indagini esclusivamente sismotettoniche, un thrust regionale (indicato come sorgente sismogenetica regionale, ACBT) posto a E, a cui i lineamenti tettonici che delimitano l'anticlinale Casoli-Bomba si raccordano in profondità, non è presa come riferimento per la costruzione del modello geologico a scala del giacimento, ma comunque considerata per le indagini di sismicità (cap. 5 di questo documento).

La scelta del modello geologico-strutturale a scala regionale non risulta avere implicazioni particolari nel modeling geomeccanico alla luce di quanto espresso nell'All. H a pag. 6, dove si afferma che: “...*le variazioni delle tensioni verticali totali sono apprezzabili solo nelle zone adiacenti le faglie principali*”, ossia quelle che delimitano il giacimento e l'acquifero collegato t3, t6, e non quelle che delimitano la struttura Casoli-Bomba (vedi capitolo successivo) e considerando che sempre nello stesso Allegato tali variazioni si esauriscono all'intorno delle profondità del giacimento mineralizzato (<2.000 m di profondità).

Per quanto riguarda, invece, gli schemi geologici generali di Patacca e Scandone (2007) e Festa et al. (2006), presentati rispettivamente nei paragrafi di inquadramento geologico dell'All.E (fig. 3) e All.G (fig. 2.1), questi hanno il solo scopo di illustrare schematicamente le diverse unità che costituiscono la catena Appenninica e la zona di avanfossa e la loro evoluzione nel tempo, ma non sono funzionali per la costruzione di un modello geologico-strutturale di dettaglio alla scala del giacimento, essendo concettuali e privi di scala. I lavori più recenti che riportano informazioni relative all'area in esame, come Satolli et al. (2014) e Del Ben e Oggioni (2016), riportati in All.G (fig. 2.2 e 2.3), offrono un contributo per la definizione delle fasi deformative dell'intero sistema catena-avanfossa-avampaese, ma anch'essi non apportano ulteriori dettagli per la descrizione dei caratteri geologico-strutturali alla scala sismica della struttura Casoli-Bomba e del giacimento, fornendo sezioni geologiche schematiche e interpretazioni sismiche solo abbozzate.

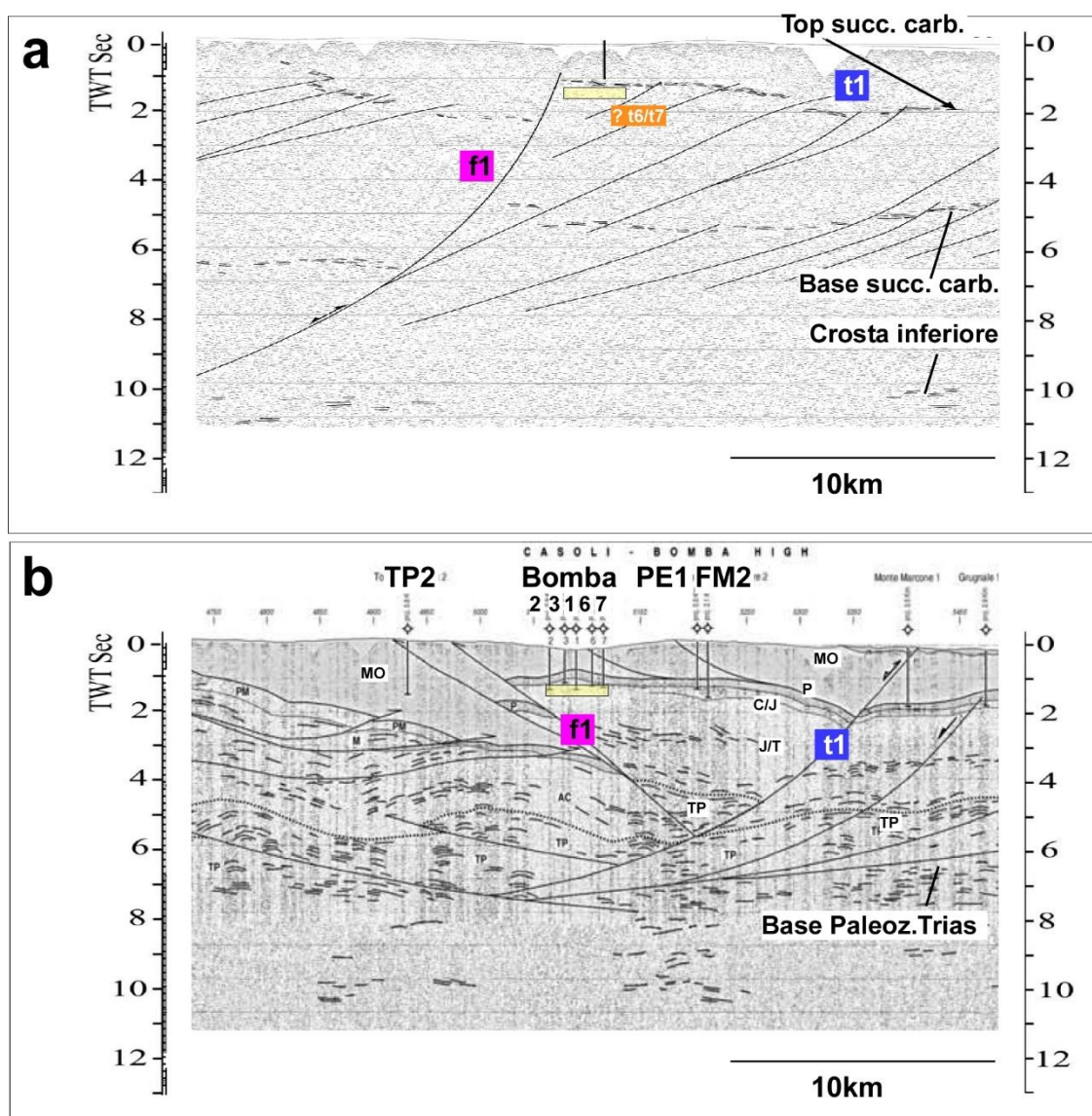


Fig. 3.5: Confronto tra le Interpretazioni del profilo sismico CROP 11 nel tratto che intercetta la struttura Casoli-Bomba. a) Calamita et al., 2009; b) Patacca et al., 2008. Il tratto in giallo indica approssimativamente la posizione del giacimento "Colle Santo". f1 e t1 indicano i lineamenti tettonici che delimitano a E e a O la struttura Casoli-Bomba.

3.4. Assetto geologico-strutturale e stratigrafico a scala del giacimento: Analisi critica e vincoli per la ricostruzione del Modello Geologico 3D

L'assetto geologico a scala del giacimento, riferito alla struttura della trappola nei pressi del giacimento, il confinamento della mineralizzazione, la copertura del giacimento (*cap rock*) e la stratigrafia delle unità interessate, sono illustrati nel SIA e nell'All.14 e brevemente sintetizzati in altri allegati come l'All.A (Giani et al., 2017) e l'All.E.

La caratterizzazione dell'assetto geologico-strutturale a scala sub-regionale è stata eseguita integrando:

1. Dati di pozzi che intercettano il giacimento e pozzi che intercettano le successioni coinvolte in aree limitrofe, esterne al giacimento;
2. Linee sismiche caratterizzate da un livello di dettaglio maggiore rispetto al CROP, disponibili nell'archivio dati CMI Energia e in parte disponibili anche sul sito Ministero dello Sviluppo Economico – UNMIG (progetto VIDEPI);
3. Elaborati da pubblicazioni scientifiche che illustrano mappe geologiche, linee sismiche interpretate e sezioni geologiche ricostruite in aree prossime al giacimento;
4. Revisione della mappa del top dei carbonati ("Top Carbonate depth map") alla scala 1:12500 (fonte: Agip);
5. Revisione degli elaborati presenti in "Monte Pallano" Field - 3D Reservoir Simulation Study prepared for ForestOil (Bello, 2008) e "Monte Pallano" Field – Well testing interpretation (wells MP1 & MP2) & development hypothesis" (archivio dati CMI Energia).

La Fig. 3.6 sintetizza il dataset utilizzato, con l'ubicazione dei pozzi più prossimi al giacimento "Colle Santo" e il grid sismico dell'archivio dati CMI Energia.

La rappresentazione e caratterizzazione dei corpi geologici nello spazio tridimensionale è stata eseguita da DREAM (All. 14) su tre livelli, attraverso la costruzione dei seguenti modelli geologici integrati:

1. Modello geologico esteso (di dimensioni in pianta di circa 21x 20 Km², in profondità di circa 5km) (All. 14);
2. Modello statico e dinamico del giacimento, comprendente sia le formazioni mineralizzate a gas, sia le formazioni che risentono maggiormente delle variazioni di pressione indotte dalla produzione (di dimensioni in pianta di circa 6 x 8Km²);
3. Modello statico del reservoir, confinato all'estensione della zona mineralizzata (di dimensioni in pianta di circa 4x4 Km²) (All. 14).

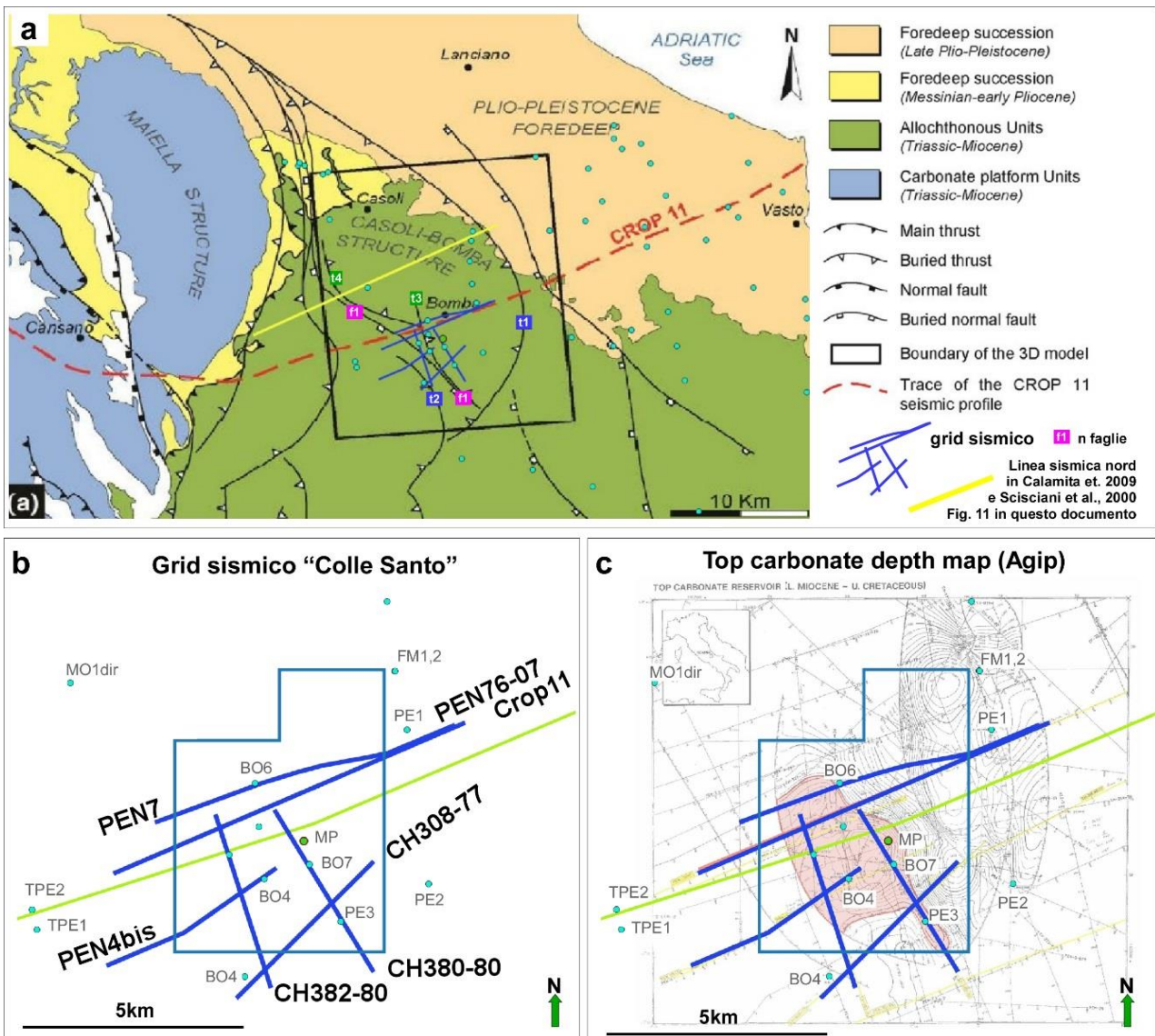


Fig. 3.6: Dataset utilizzato per la costruzione del modello geologico. a. Carta Geologica schematica di Calamita et al. (2009), ridisegnata da Giani et al., 2017. b. Traccia delle linee sismiche principali che costituiscono grid sismico (archivio dati CMI Energia) e del profilo sismico CROP11 (in verde). c) Mappa del "top carbonate depth" fornita da Agip, successivamente rielaborata da DREAM (Archivio dati CMI Energia).

Come presentato in All.14 (pag. 12), la griglia tridimensionale (3D grid), utilizzata per la rappresentazione volumetrica dei corpi geologici è stata generata in modo da soddisfare i seguenti requisiti:

1. rappresentatività dell'assetto geologico strutturale e stratigrafico, sia a scala regionale che a scala del giacimento;
2. idoneità alla simulazione fluido-dinamica a scala di giacimento e nel suo intorno;
3. idoneità alla simulazione geomeccanica a scala regionale.

A questo scopo è stata adottata una discretizzazione con celle di dimensioni minori (100x100m²) nella parte centrale del modello in corrispondenza della zona reservoir e delle formazioni limitrofe, (Fig. 3.7), e una discretizzazione con celle di dimensioni progressivamente maggiori (fino a un massimo di 2100x2100m²)

verso le aree più esterne del modello, ovvero in corrispondenza delle formazioni più lontane dal giacimento (Fig. 3.7).

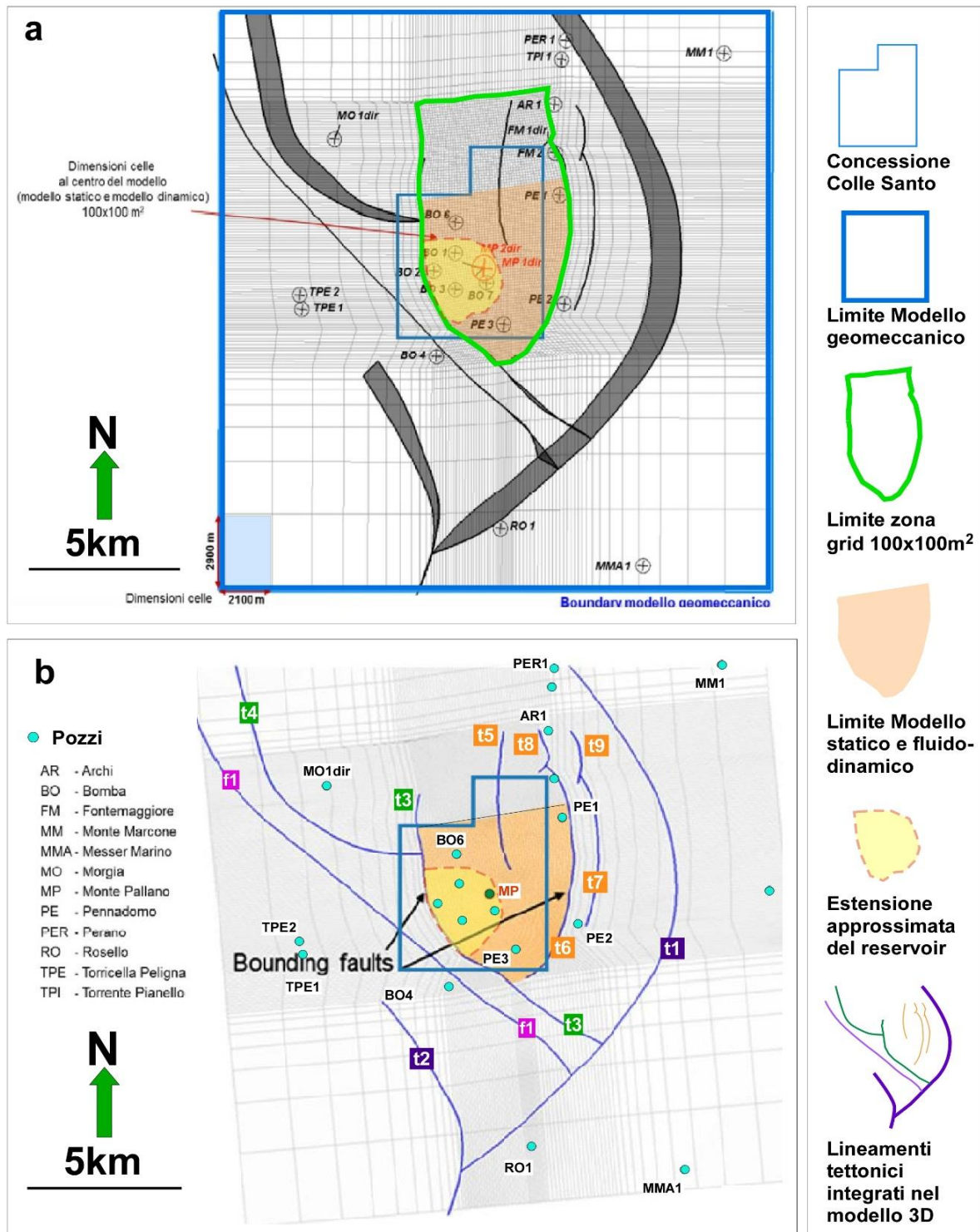


Fig. 3.7: Discretizzazione areale del 3D grid, mostrante i lineamenti tettonici integrati nel modello geologico 3D. a) modificata da All.14, fig. 2.6; b) modificata da fig. 3 All.A, Giani et al., 2017.

Nella documentazione si riscontra un passaggio di scala decisamente brusco, da sezioni geologiche costruite sulla base dell'interpretazione del profilo sismico regionale CROP11 (Calamita et al. 2009; 2011), a modelli geologici 3D di dettaglio alla scala del reservoir (modello geologico 3D, presentato in All.14, Fig. 3.8).

La mappa delle discontinuità tettoniche, illustrata in All.14 (pag. 7), e la sezione geologica strutturale schematica del giacimento, presentata nel SIA e in All.E (fig. 6), colmano in parte questo brusco passaggio di scala, ma la mancanza di riferimenti diretti, che possano funzionare da collegamento tra i vari elaborati presentati, rende difficile apprezzare i caratteri geologici e strutturali alle diverse scale.

Con l'obiettivo di illustrare i diversi passaggi eseguiti per la realizzazione del modello geologico 3D e facilitare il collegamento tra gli elaborati eseguiti a scale diverse, viene di seguito riportata una serie di elaborati già presentati o citati nei vari documenti e integrazioni.

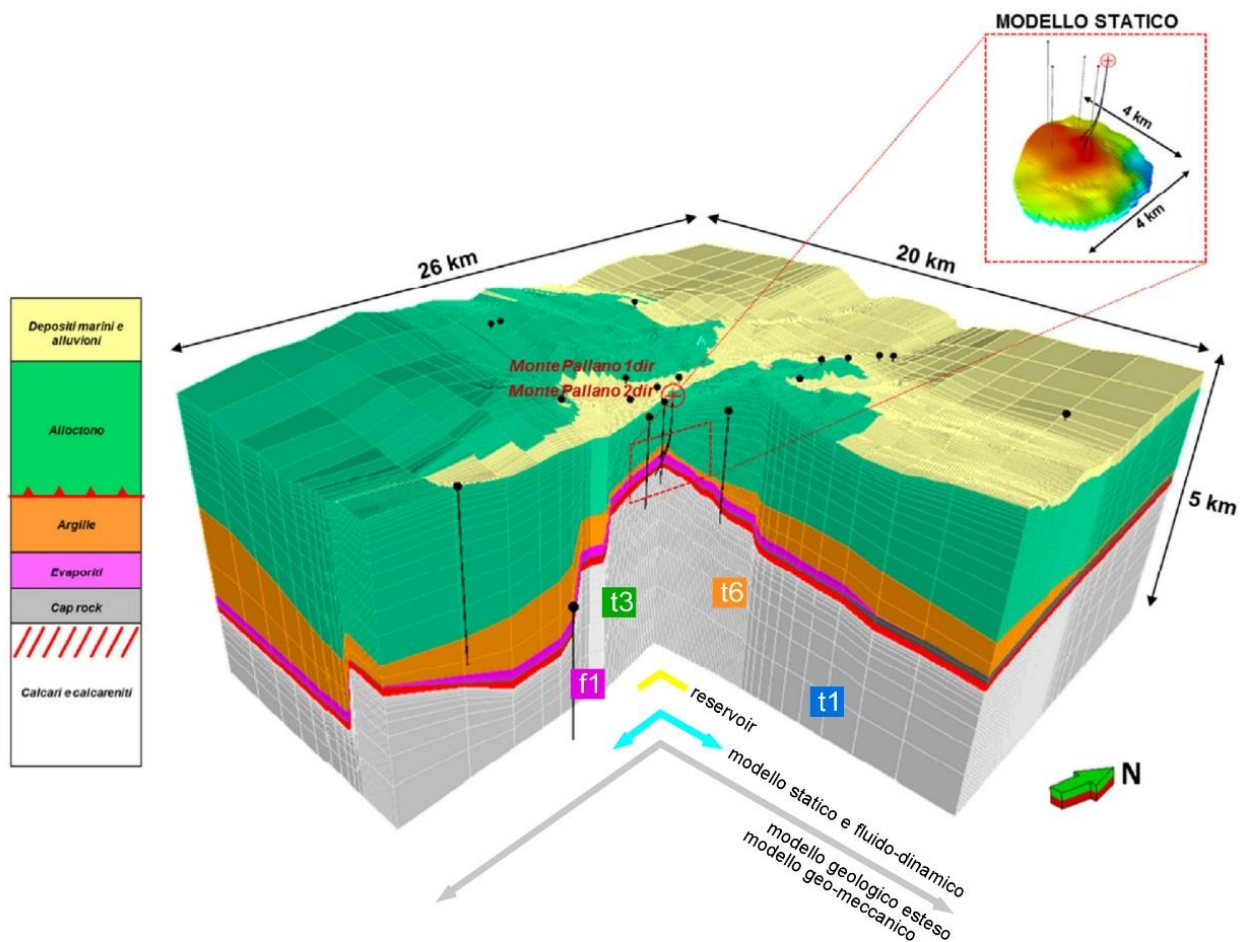


Fig. 3.8: Ricostruzione geologica 3D (Modello Geologico esteso). Il riquadro in alto a destra mostra il Modello statico del reservoir costruito nell'intorno del giacimento. La figura di fianco a sinistra mostra la colonna stratigrafica utilizzata nel modello (da All.14, fig. 2.7)

Sulla base del grid sismico e sulla revisione della mappa dell'orizzonte "top dei carbonati" ("*Top Carbonate depthmap*", interpretazione AGIP, Archivio CMI) sono stati costruiti gli elaborati di sintesi presentati nella documentazione CMI Energia, indicati come:

1. Mappa della discontinuità tettoniche (Fig. 3.9a), (All. 14, fig. 2.3);
2. Mappa top reservoir (Fig. 3.9b), (All. 14, fig. 2.5).

La Fig. 3.9 mette a confronto i due elaborati, ponendoli alla stessa scala. In Fig. 3.9a, è inoltre schematicamente rappresentata l'estensione in pianta del giacimento "Colle Santo". In Fig. 3.9b, la superficie equivalente del top del giacimento è mappata tra il back-thrust (t3) a OSO che delimita l'estensione del giacimento in direzione OSO, e il thrust (t6) a E, localizzato circa 2,5 km a E dalla chiusura del giacimento per pendenza.

Nella "Mappa della discontinuità tettoniche" (Fig. 3.9a) sono individuati una serie di lineamenti tettonici, distinguibili in:

1. lineamenti tettonici di dimensioni maggiori, corrispondenti alle faglie che bordano la struttura Casoli-Bomba, individuati anche a scala regionale (lineamenti tettonici di significato regionale: Thrust 1 (t1), Fault 1 (f1) in All. 14);
2. lineamenti tettonici di dimensioni medie (Thrust 3 (t3) e Thrust 4 (t4) in All. A)
3. lineamenti tettonici di dimensioni minori (faglie interne alla struttura Casoli-Bomba, Thrust 5-9 in All. A).

I lineamenti tettonici di dimensioni maggiori (f1 e t1), che rappresentano rispettivamente i limiti occidentale e orientale della struttura Casoli-Bomba, sono identificabili nelle carte geologiche schematiche (Fig 3.8a) e nelle sezioni geologiche derivate dalla interpretazione del profilo sismico CROP11 in Calamita et al. (2009, fig. 3.3) e di Giani et al. (2017, fig. 1a). In accordo con il modello geologico-strutturale a scala regionale, le faglie f1 e t1 mostrano la maggiore estensione laterale, la maggiore profondità e il maggior rigetto, mettendo in contatto le successioni carbonatiche con i depositi evaporitici e silicoclastici.

I lineamenti tettonici di dimensioni medie (t3 e t4), sono documentati nel grid sismico in prossimità del giacimento (Fig. 3.10), rappresentati nella mappa "top dei carbonati" ("*Top Carbonate depth map*", prodotta da Agip e rielaborata da DREAM) e anch'essi identificabili nelle carte geologiche schematiche di Calamita et al. (2009, fig. 7a) e di Giani et al. (2017 fig. 1a). t3 e t4 non sono rappresentati nella sezione geologica derivata dalla interpretazione del profilo sismico CROP11 degli stessi autori.

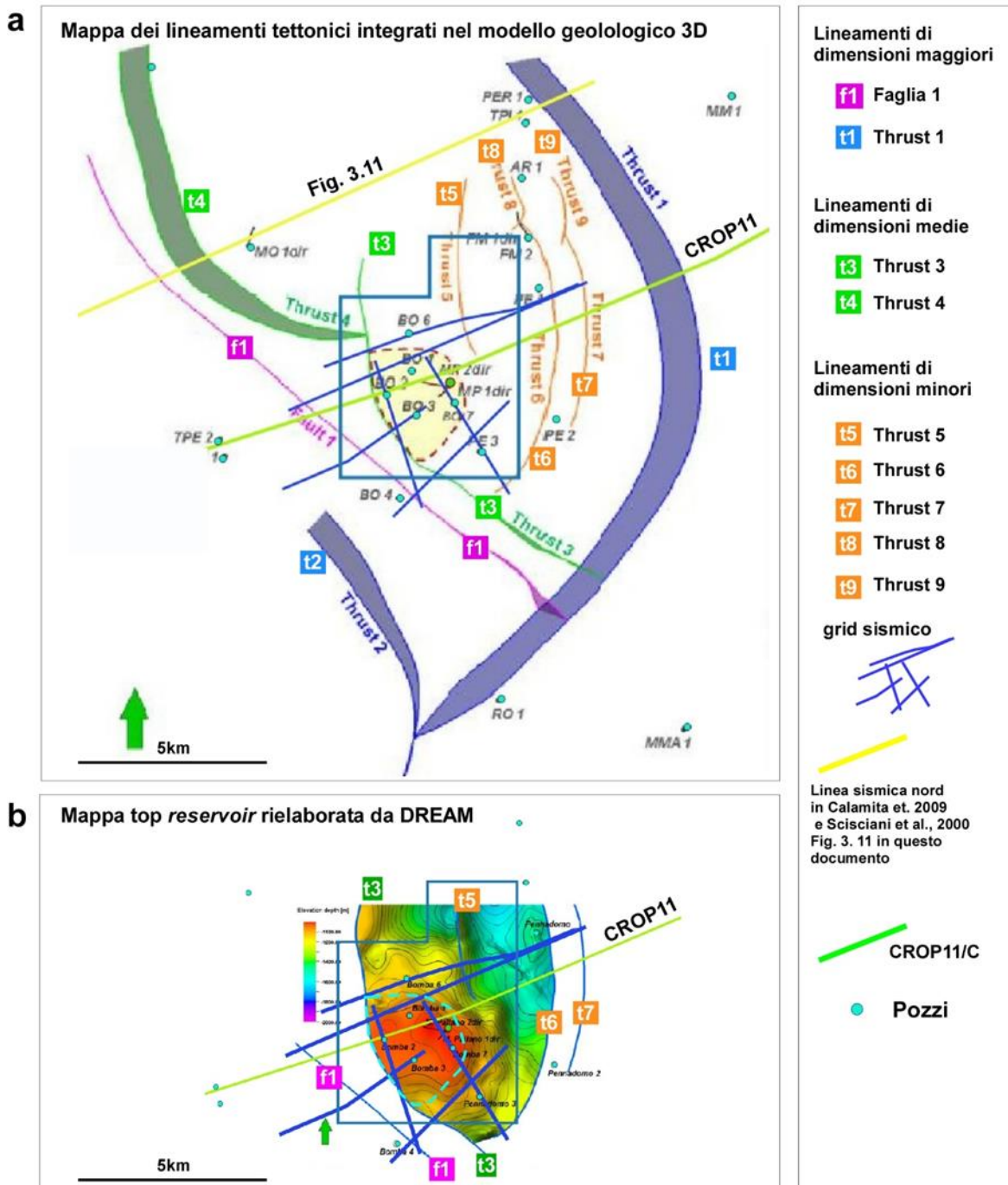


Fig. 3.9: a) Mappa dei lineamenti tettonici integrati nel modello geologico. Il poligono giallo indica approssimativamente l'area di estensione in pianta del giacimento "Colle Santo" (Modificata da All.14, fig. 2.3). b) Mappa top reservoir rielaborata da DREAM. La mappa si estende nel tratto compreso tra t3 a S e t6 a E, ossia oltre il limite l'area del giacimento, indicata schematicamente con il perimetro tratteggiato celeste (modificata da All.14, fig. 2.5)

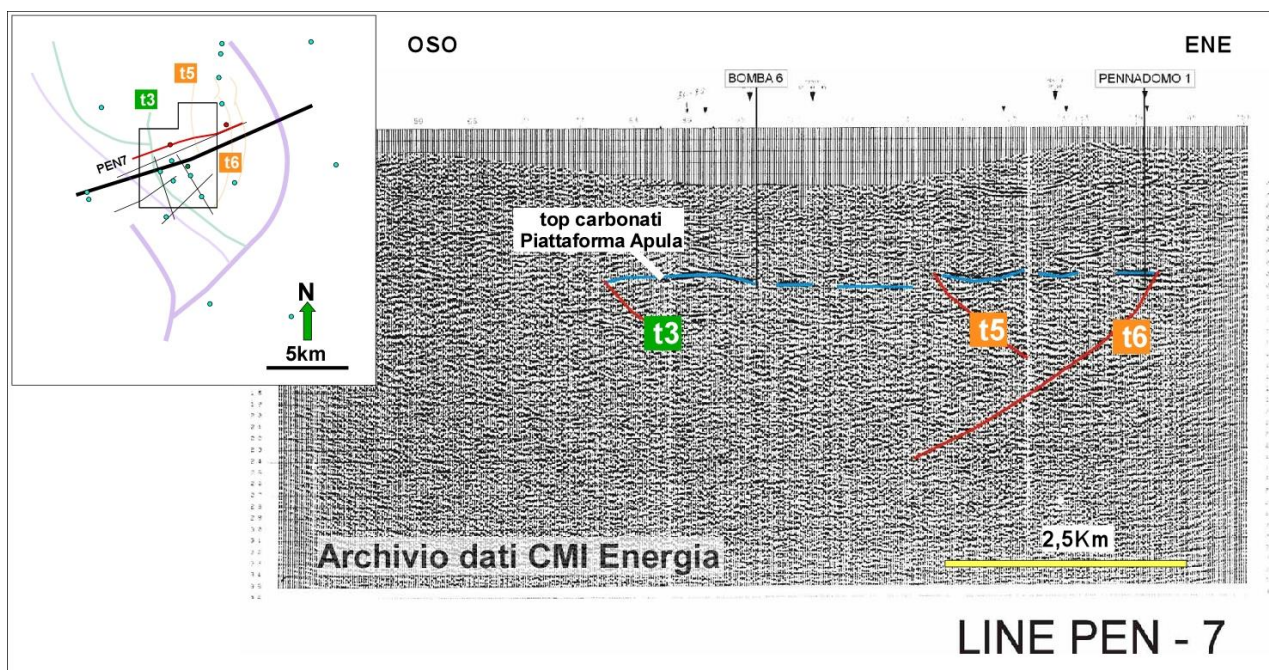


Fig. 3.10: Profilo sismico PEN-7, con andamento OSO-ENE, circa parallelo al CROP11, che intercetta i pozzi Bomba 6 e Pennadomo 1. In blu Orizzonte Top Carbonati. Da Archivio Dati CMI Energia.

I lineamenti tettonici di dimensioni minori (faglie interne alla struttura Casoli-Bomba: Thrust 5-9 in All. A) sono individuati nel grid sismico (Fig. 3.10) ma non sono documentati nelle carte geologiche schematiche presenti in letteratura. Essi corrispondono schematicamente ai thrust minori ad alto angolo, interni alla struttura Casoli-Bomba, rappresentati nelle sezioni geologiche derivate dalla interpretazione del profilo sismico CROP11 (Calamita et al., 2009, Fig. 3.3 e 3.5 di questo documento).

La prosecuzione settentrionale dei lineamenti tettonici di dimensioni maggiori (f1 e t1) e medie (t3 passante verso N a t4, vedi Fig. 3.9a e Fig. 3.6a) è documentata da Calamita et al. (2009, fig. 7d) nella sezione geologica derivante dall'interpretazione di una linea sismica (Fig.3.11), ubicata pochi km più a nord del giacimento "Colle Santo" con direzione OSO- ENE, passante per il pozzo Morgia 1.

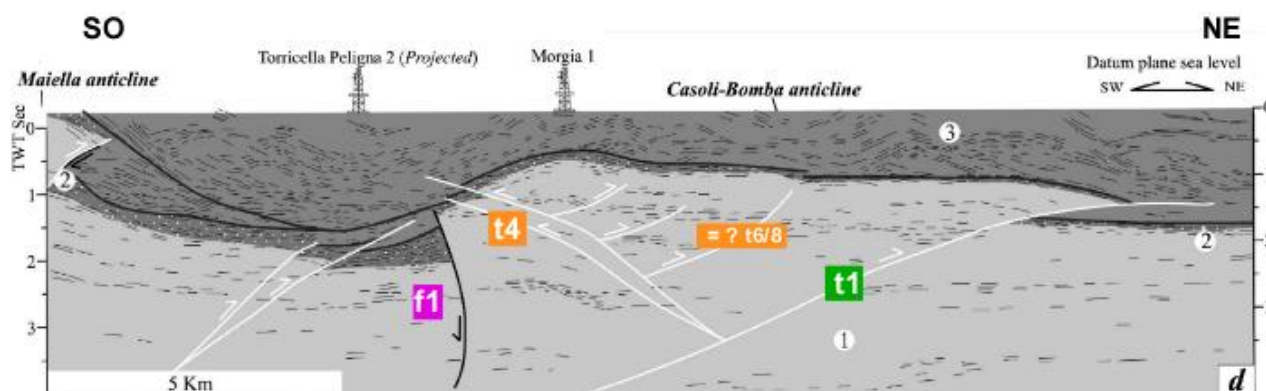


Fig. 3.11: Interpretazione di linea sismica parallela al profilo CROP11, in Calamita et al. (2009) posta a nord del giacimento “Colle Santo”, passante per Morgia 1 (vedi Fig. 8a per ubicazione), mostrandone la prosecuzione settentrionale dei lineamenti principali che delimitano la struttura Casoli-Bomba e alcuni lineamenti interni.

Il profilo mostra la presenza di thrust minori con scarso rigetto verticale nella zona centrale della struttura Casoli-Bomba che, sebbene non continui, possono essere comparati con i thrust minori osservati nel grid sismico che intercetta il giacimento “Colle Santo” più a sud.

La Fig. 3.12 mostra la sezione geologica schematica, derivante dall’archivio dati CMI Energia, e riportata in SIA e in All.E (fig. 6), orientata in direzione circa E-O, che intercetta i pozzi Bomba 2, 3, 7 e Pennadomo 2. In Figura è rappresentato il back-thrust di medie dimensioni (t3), il thrust minore (t6) e un ulteriore thrust interno (t<) con rigetto non significativo, non riportato nelle revisioni dei dati più recenti elaborate da CMI Energia.

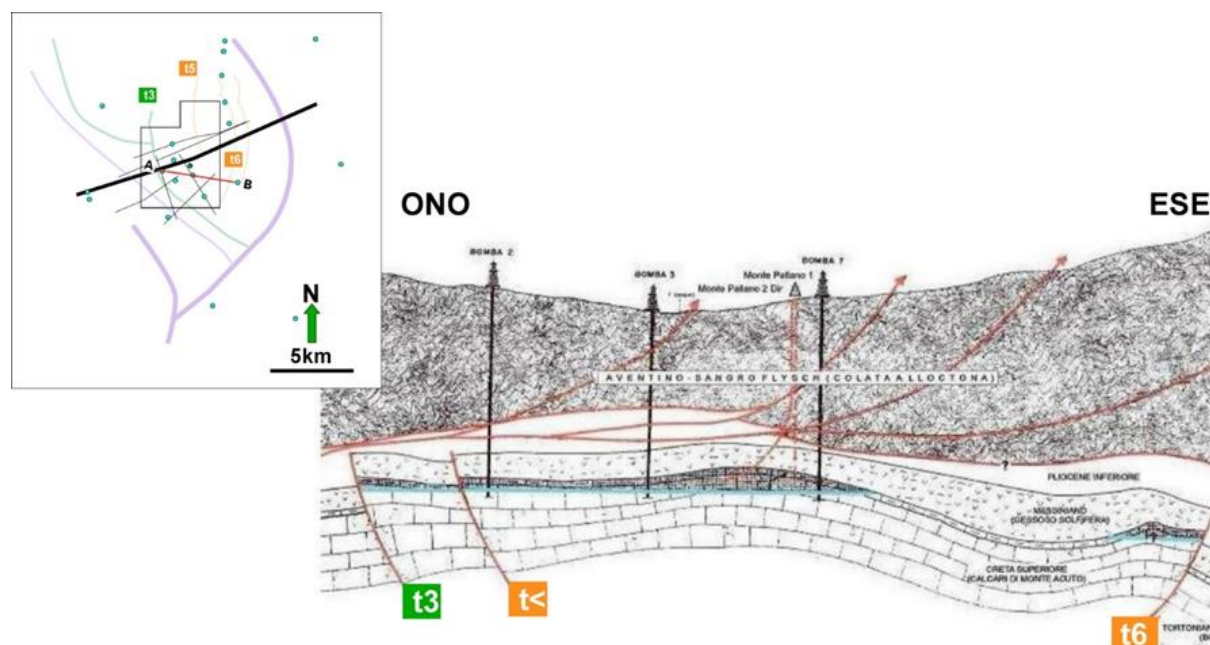


Fig. 3.52: Sezione geologica schematica rappresentativa del Giacimento “Colle Santo”.

Il set dei lineamenti tettonici sopra descritti, integrati con i dati di stratigrafia derivati dai pozzi, definisce la struttura e la geometria dei modelli geologici 3D sia statici che dinamici del reservoir.

Osservando i modelli geologici ricostruiti (Figg. 3.8; 3.13) si nota che:

1. I lineamenti tettonici di dimensioni maggiori $f1$ e $t1$ definiscono la forma e le dimensioni a scala pluri-chilometrica della anticlinale che contiene il giacimento. La loro posizione e i rigetti associati hanno implicazioni sulla costruzione del modello geologico esteso e quindi sulla caratterizzazione del comportamento geomeccanico dei corpi interessati a scala regionale. La loro rappresentazione geometrica nel modello, con andamento ad alto angolo, sembra essere coerente con quanto ricostruito nei lavori scientifici presi come riferimento.
2. I lineamenti tettonici $t3$ (dimensioni medie) e $t6$ (di dimensioni minori), che presentano rigetti significativi se confrontati con lo spessore della successione mineralizzata (compresa tra i 74 e i 140m), sono considerati i limiti S, O e E rispettivamente nei modelli 3D statici e dinamici del giacimento, che comprendono sia la zona mineralizzata, sia la zona potenzialmente interessata a variazioni di pressione indotte dalla produzione (All. 14, pag. 20). Sebbene non esplicitamente indicato, le figure 2.9, 3.2 e 3.3 in All.14, rappresentanti rispettivamente la distribuzione della porosità, la saturazione in gas nel modello dinamico e la vista 3D del modello dinamico, mostrano rappresentazioni volumetriche confinate dal back-thrust $t3$ a S e O e dal thrust $t6$ a E. Tali modelli sono confinati a nord ad una distanza considerata ragionevole ai fini del modeling fluido-dinamico, posta circa 4 km (in pianta) calcolata dai pozzi Monte Pallano (Fig. 3.14a, b, c). Nel modeling geomeccanico (stima delle variazioni del carico litostatico, All.14 e All.H), $t3$ e $t6$ costituiscono una barriera idraulica soggetta ad una differenza di pressione tra le formazioni che si depletano a seguito della produzione di gas e le formazioni indisturbate in cui la pressione resta sempre uguale a quella idrostatica iniziale (Fig. 3.14 b, c, d). In tale modeling, lungo $t3$ e $t6$ si registra la maggiore variazione dello stato tensionale verticale a seguito della messa in produzione.
3. Il lineamento tettonico $t3$ rappresenta il lineamento più significativo alla scala del giacimento, e quindi per la costruzione del modello statico del reservoir (di dimensioni circa 4×4 km²). Esso costituisce il bordo meridionale e occidentale del giacimento, realizzando il contatto tra la successione mineralizzata della Piattaforma Apula al tetto e le litologie evaporitiche e silicoclastiche al letto. Gli altri lineamenti minori, presenti nelle zone limitrofe, non hanno un'implicazione diretta nella ricostruzione del modello statico del reservoir, essendo quest'ultimo chiuso in tutte le altre direzioni per pendenza strutturale della *cap rock* che incontra la superficie di contatto gas-acqua, assunta ad una quota pari a 1120m TVDss. Verso E, i lineamenti tettonici minori più prossimi al giacimento sono $t5$ e $t6$, posti rispettivamente ad una distanza di circa 1,2 km e 3,5 km dalla zona di terminazione orientale del giacimento.

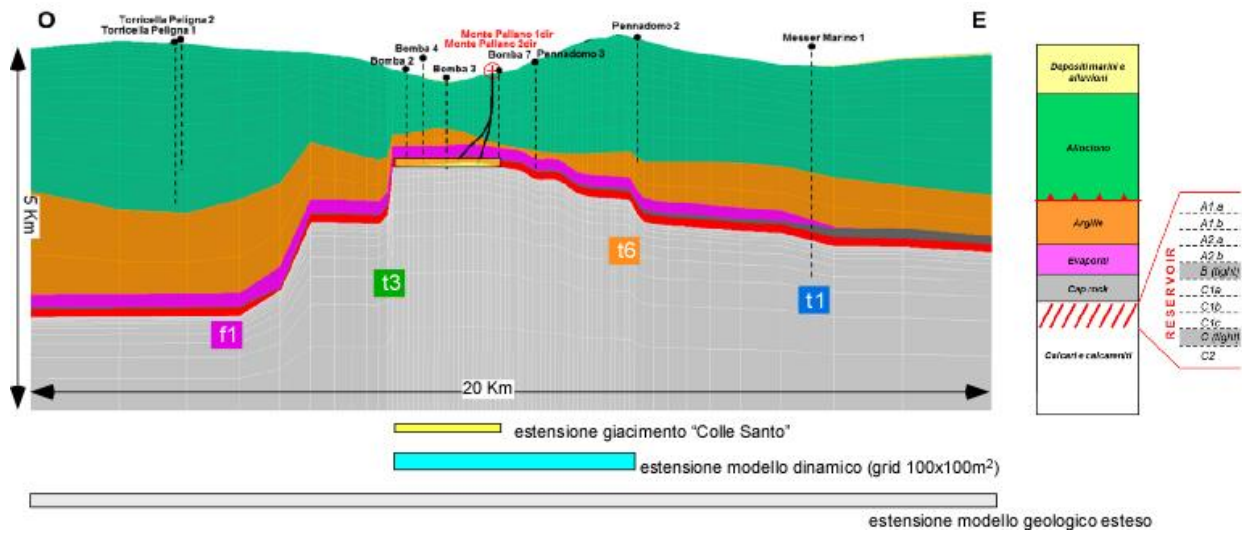


Fig.3.13: Sezione geologica schematica ottenuta dal modello 3D. È indicata schematicamente la posizione dei lineamenti tettonici integrati nel modello, l'estensione approssimata del giacimento e l'estensione della zona con celle di dimensione ridotta, compresa tra t3 e t6, utilizzata per la costruzione del modello dinamico (modificata da All.14, fig. 2.8)

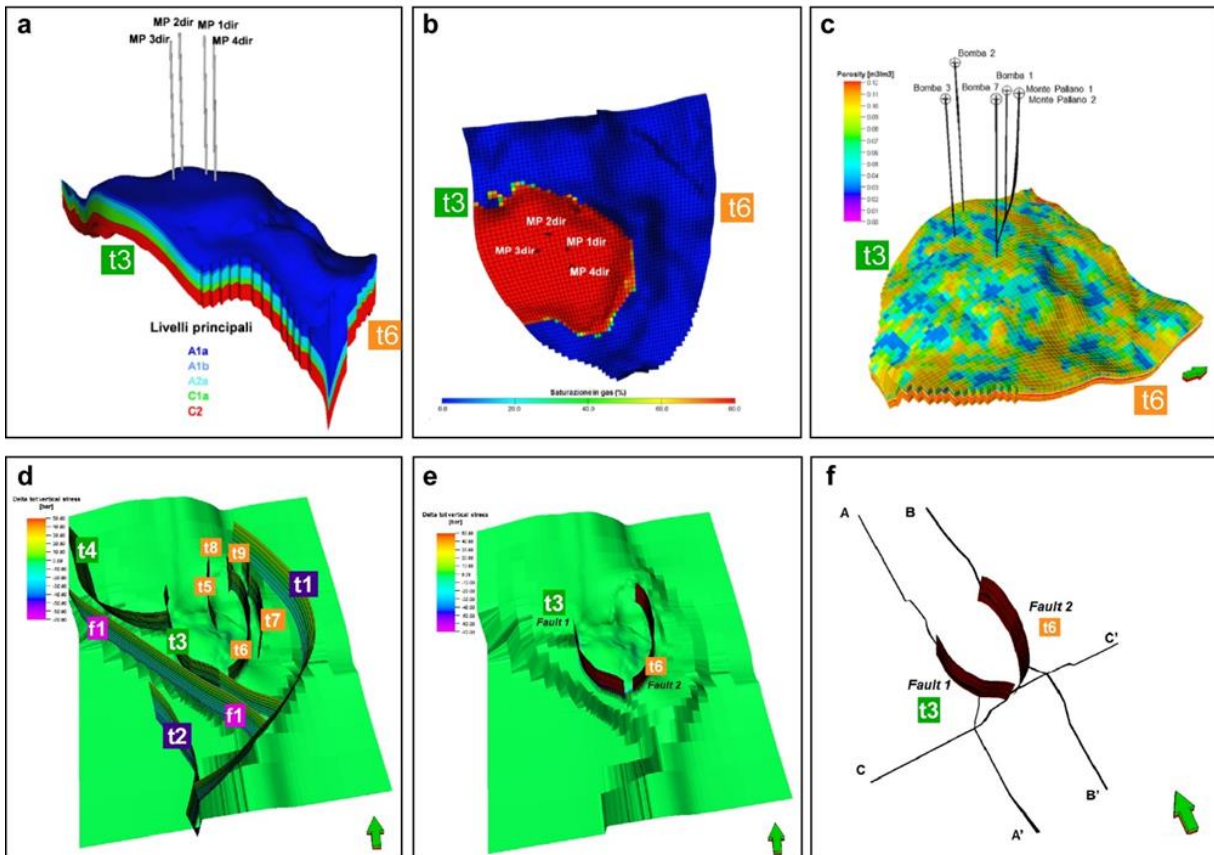


Fig. 3.14: Indicazione della posizione dei lineamenti che definiscono i limiti del modello dinamico. a) Vista 3D del Modello Dinamico con indicazione dei Layer principali. b) Mappa Saturazione gas nel modello dinamico del giacimento. c) Mappa di distribuzione porosità. Modificato da All.14. d), e), f) Elaborati riportati nell'All. H di Integrazione al quadro geomeccanico.

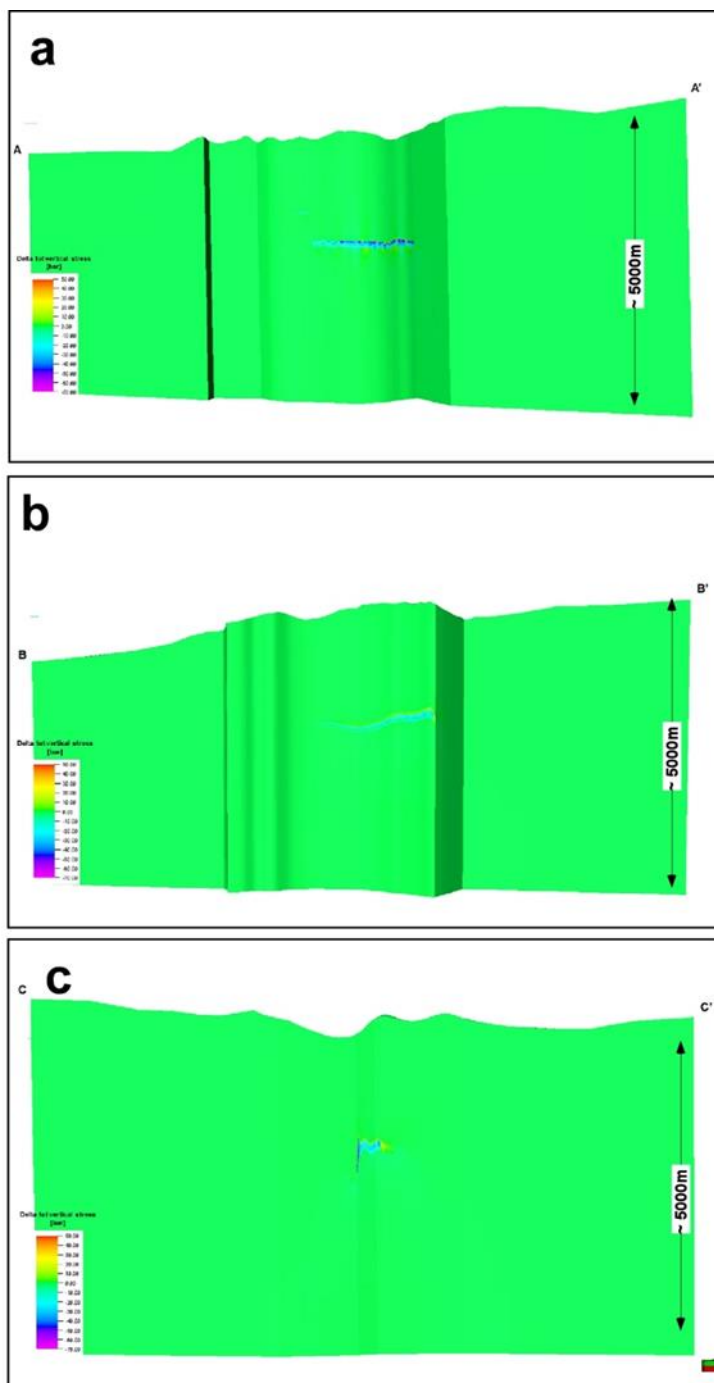


Fig. 3.15: Sezioni da modello geologico mostranti la variazione delle tensioni verticali tra la fine della produzione primaria e le condizioni iniziali. Vedi Fig. 3.14f per ubicazione della traccia delle sezioni (Modificato da fig. 2.7, 2.9, 2.11 dell'All.H)

3.5. Conclusioni

La revisione critica della documentazione tecnica presentata da CMI ha avuto come obiettivo il chiarimento di alcuni aspetti legati alla caratterizzazione geologico-strutturale dell'area in esame, che sono stati trattati in modo discontinuo e con finalità diverse nei vari documenti e integrazioni presentati a corredo dell'Istanza di VIA.

Gli schemi geologici presentati e la letteratura citata mostrano un quadro geologico complesso e dei modelli interpretativi non univoci, sia per le strutture di superficie che per quelle più profonde. Le principali cause della pluralità delle interpretazioni e dei modelli esistenti in letteratura risiedono nella scarsa qualità del dato di sottosuolo, nella mancanza di vincoli adeguati per la taratura degli orizzonti sismici in profondità e nelle diversità dell'approccio allo stile deformativo (scuole di pensiero) a cui fanno riferimento gli autori degli articoli scientifici da cui i modelli derivano.

La scelta del modello geologico-strutturale a scala regionale proposto da Calamita et al. (2009; 2011) appare coerente; in ogni caso, il modello "alternativo" di Patacca et al. (2008) non risulterebbe avere implicazioni significative ai fini della costruzione del modello geologico 3D esteso e quindi per la caratterizzazione del comportamento geomeccanico a scala regionale, essendo le principali differenze tra i due modelli associate a strutture esterne all'area del giacimento (vedi il t6) o profonde.

I diversi lineamenti tettonici individuati all'interno della struttura Casoli-Bomba sono stati utilizzati per delimitare i diversi modelli, coerentemente con lo scopo della singola modellizzazione, i.e. per la costruzione dei modelli geologici 3D statici e dinamici a scala del giacimento e delle successioni limitrofe potenzialmente interessate da variazioni di pressione. Il back-thrust t3, delimita l'estensione giacimento a O e a SO, mentre il thrust t6, esterno al giacimento, è considerato come bordo orientale dell'acquifero limitrofo, ad esso idraulicamente connesso. Entrambi i lineamenti t3 e t6 sono documentati negli elaborati di CMI Energia, trovano riscontro nei lavori di Calamita e coautori, mentre non sono indicati in Patacca et al. (2008).

4. Modello idrogeologico e Modello della Subsidenza

4.1. Definizione della porosità secondaria ai fini della stima dei caratteri petrofisici e della subsidenza

La caratterizzazione petrofisica del giacimento e delle rocce contermini, ed in particolare della porosità primaria e secondaria, è stata eseguita sulla scorta di dati rilevati in perforazioni, dati bibliografici ed analisi statistiche. In considerazione della loro notevole importanza sia nella definizione delle risorse sia, soprattutto, nella stima dei cedimenti, si approfondisce come segue.

I valori di porosità utilizzati per gli 8 livelli all'interno del reservoir (*All.14. tabella 2.3*) mostrano (Fig.4.1) sicuramente i massimi valori possibili di porosità come somma della porosità primaria e secondaria. Nella Fig. 4.2 sono riportate alcune immagini delle rocce del reservoir relative al pozzo Bomba 2.

LIVELLO	Porosità [%]			NTG [%]	S _{wi} [%]
	Min	Media	Max		
A1a	3.1	7.4	10.6	49	20.9
A1b	7.6	10.3	11.8	56	20.9
A2a	6.2	9.3	10.6	52	20.9
A2b	7.7	9.0	9.9	46	20.9
B tight	-	-	-	-	-
C1a	3.9	10.0	12.1	54	20.9
C1b	7.0			57	20.9
C1c	7.6			55	20.9
C tight	-	-	-	-	-
C2	4.3	10.0	11.5	51	20.9

Fig. 4.1 -Valori di porosità totale negli 8 intervalli del reservoir (*All.14, pag. 16*)



Fig. 4.2 - Diversi tratti di carota del reservoir relativi alla perforazione del pozzo Bomba 2 (da archivio CMI).

In tale tipo di rocce, in fase di esecuzione dei pozzi Monte Pallano dir 1 e 2, sono stati eseguiti log di porosità (Fig.4.3). Il log di tipo FVPA (Fracture porosity) elabora dati di imaging con informazioni riguardanti, tra l'altro, spaziatura, lunghezza e inclinazione della rete di fratturazione e restituisce una porosità da fratturazione. Nella figura è riportato il log eseguito nel pozzo Monte Pallano 2 dir con le informazioni riguardanti il rilievo della porosità e della fratturazione indicate in rosso.

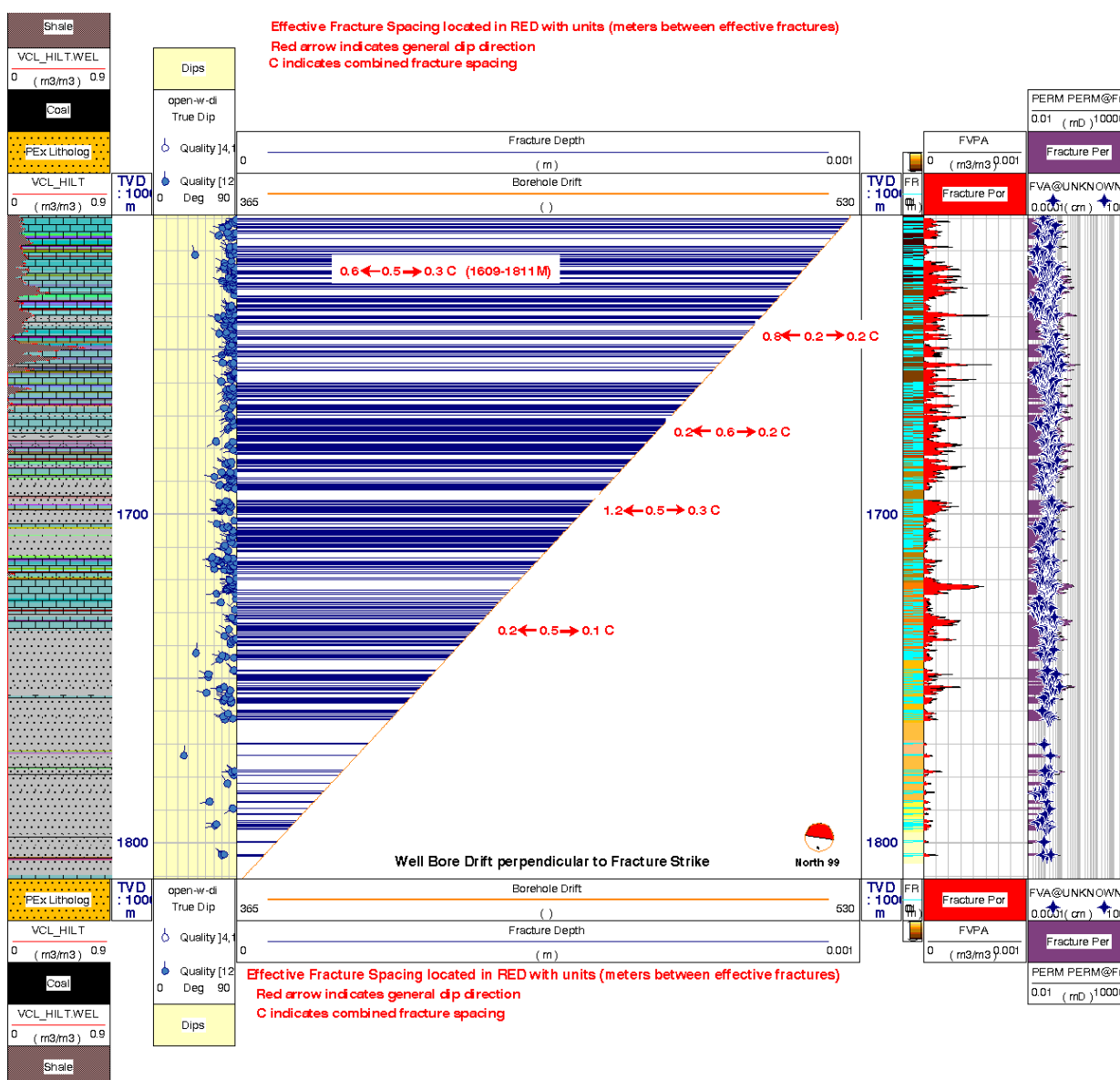


Fig. 4.3 – elaborazioni quantitative del log FMI eseguita al pozzo Monte Pallano 2 dir. In rosso sono indicate tutte le informazioni dedotte dal FVPA compresa la distribuzione della porosità dedotta (da archivio CMI)

I suddetti dati, unitamente a quelli derivati da log classici di porosità, hanno consentito di definire gli intervalli di porosità riportati in Fig. 4.1, da cui si evince una porosità media nel reservoir utilizzata per la modellazione di 8,8 % con massimi del 10% nei livelli A1b, C1a e C2.

I valori riportati in Fig. 4.1, utilizzati per le simulazioni, risultano superiori anche ai valori generalmente utilizzati in acquiferi in affioramento e dunque in condizioni litostatiche ben diverse. Nella Tabella 4.1 sono indicati i valori cosiddetti bibliografici da Celico (1986, tab 2.4 pag 36) e Civita (2005, tab 2.4 pag 24) per le rocce carbonatiche sl.

Rif.	Tipo di roccia	Porosità totale (%)	Porosità efficace (%)	Rif.	Tipo di roccia	Porosità totale (%)	Porosità efficace (%)
Celico (1986)	Calcari	3-20	2-10	Civita (2005)	Calcare massiccio	0,5-15	0-1
	Dolomie	2-10	2-5		Calcare fessurato	1-10	2-10
					Dolomia	2-10	0-1

Tab. 4.1 - Valori di riferimento di porosità totale ed efficace in rocce carbonatiche in acquiferi superficiali

I caratteri petrofisici del reservoir scelti e/o modellati sono risultati a beneficio della sicurezza; questo è anche riscontrato anche dalla scelta dei parametri di “resistenza e deformabilità” descritti al paragrafo 4.3.4 dell’allegato 14, che si riassumono in Tabella 4.2, dai quali si desume che le caratteristiche peggiori ai fini delle simulazioni sono proprio quelle del reservoir.

Parametri di resistenza e deformabilità	Rocce			
	Reservoir	Capping	Evaporiti	Formazioni calcaree basali
C (coesione MPa)	5,0	6,1	2,0	10,9
Φ (angolo di attrito °)	37	39	25	40
Modulo elastico statico (GPa)	22,9	25,2	3,6	27,1

Tabella 4.2 - Parametri di resistenza e deformabilità delle rocce costituenti il reservoir e adiacenti.

4.1.1. Conclusioni

Per quanto sopra detto in relazione ai valori dedotti dai log dei pozzi Monte Pallano 1 e 2, dalla considerazione che le spaziature da fratturazione diminuiscono con la profondità e dalla scelta dei valori da bibliografia e/o da modellazione, emergerebbe chiaramente che i dati di input scelti sono risultati essere a beneficio della sicurezza e che dunque le simulazioni tengono conto di condizioni peggiori ai fini del calcolo dell’entità della subsidenza.

4.2. Ripressurizzazione da parte dell’acquifero

Uno dei fenomeni di maggior influenza nella stima dei cedimenti è quello della ripressurizzazione del reservoir ad opera delle acque presenti nel reservoir stesso e negli acquiferi contermini. Ai fini di una miglior comprensione ed analisi del fenomeno, della sua probabilità di accadimento e delle modalità di accadimento, si precisa quanto segue.

I casi sottoposti a simulazione dinamica di estrazione per la previsione della subsidenza sono stati due:

- **Caso 1 Acquifero forte** in cui è stata assunta una forte spinta dell'acquifero (compatibile con la presenza di un acquifero di dimensioni infinite rispetto all'estensione del giacimento);
- **Caso 2 Acquifero medio** in cui è stato assunto un acquifero di media forza (corrispondente ad un acquifero di dimensioni pari a 3-4 volte l'estensione del giacimento).

Acquifero assente - Assenza di ripressurizzazione del giacimento. Riguardo alla possibilità della mancanza totale di acquifero in grado di ripressurizzazione il reservoir dopo la depletazione, occorre precisare che tale ipotesi non è stata presa in considerazione in quanto non possibile per tre livelli di motivi: 1) di tipo idrogeologico, 2) di tipo chimico, 3) di tipo geologico.

1 – motivazioni di tipo idrogeologico

Le condizioni di pressurizzazione del giacimento in corrispondenza del pozzo Bomba 1 evidenziano una pressione di 138,6 bar alla profondità di -1050 m dalla superficie di riferimento (datum TVDss pari al l.m.m.) pari a 136,8 atm e dunque ad una colonna d'acqua (Carico idraulico) di 1413 m.

La quota del piano campagna del pozzo Bomba 1 è di 193 m s.l.m.; lo spessore dalla profondità di 1050 m dal l.m.m. alla testa pozzo è dunque pari a 1243 m (1050 + 193). Pur considerando come saturo l'intero spessore sopra calcolato, non è verificato il carico idraulico di 1413 m di acqua.

Il carico idraulico medio dell'acquifero basale della Maiella (Celico, 1983; Boni et al., 1986; Nanni e Rusi, 2003) è di 410 m s.l.m. in corrispondenza del punto più basso (sorgente Verde) tendente a salire sia verso nord (420 m s.l.m. in corrispondenza delle captazioni Foro) che verso sud (457 m s.l.m. in corrispondenza degli incrementi in alveo dell'Aventino). Tale carico, riferito alla profondità del giacimento, risulta essere 1460 m (1050+410), idraulicamente compatibile con quello registrato nel giacimento (1413 m) a meno di una perdita di carico (ΔH) di 1460-1413=47 m. Il gradiente idraulico tra l'area del campo pozzi e la struttura della Maiella (distante circa 12 Km (12.000 m) è $47/12.000 = 0,0042$ (4‰). Valore del tutto in linea con gradienti in acquiferi carbonatici permeabili per fratturazione e carsismo.

L'assetto idraulico sopra descritto, riportato nello schema di Fig. 4.4, evidenzia che le condizioni di pressurizzazione del giacimento sono dovute all'assetto piezometrico dell'acquifero carbonatico circostante a prescindere dal ruolo ritardante o meno di intercalazioni marnose o simili o dalla presenza di faglie. Queste ultime possono avere un ruolo di limite idraulico al flusso, a causa della eventuale bassa permeabilità e trasmissività, ma non costituiscono ostacolo alla trasmissione della pressione.

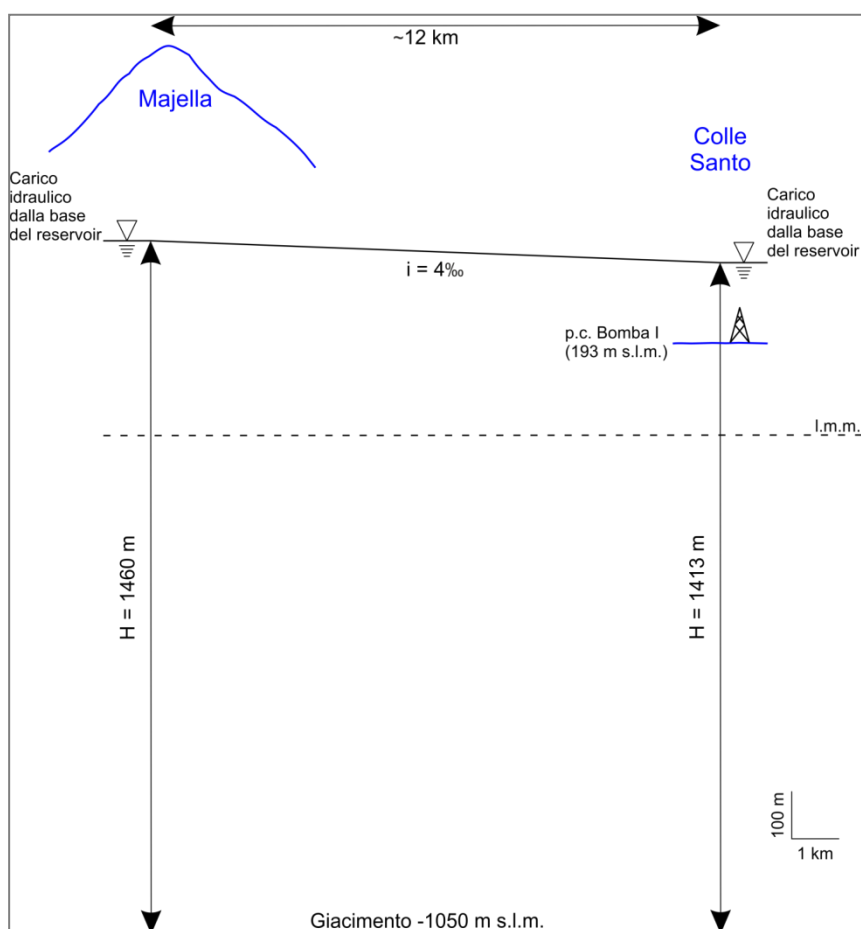


Fig. 4.4 - Schema piezometrico redatto sulla base dei dati di carico idraulico nell'acquifero della Maiella e delle condizioni piezometriche nel giacimento Colle Santo

L'estensione dell'acquifero risulterà ovviamente maggiore di quanto schematicamente riportato in Fig. 4.4 e ricomprenderà l'intero acquifero della Maiella (circa 300 Km² in affioramento) e gli acquiferi adiacenti a carico idraulico simile (regolato dall'assetto piezometrico appenninico). Le simulazioni eseguite in condizioni cosiddette di acquifero di estensione infinita (acquifero forte) appaiono in definitiva più realistiche di quelle eseguite in condizioni di acquifero ampio 3-4 volte il reservoir (acquifero medio) che invece appaiono molto cautelative.

2 – motivazioni di tipo chimico

La salinità delle acque, riscontrata da analisi di acque di strato nella perforazione del pozzo Bomba 2 durante prove di strato nell'intervallo di profondità 1440-1450 m, ha mostrato valori pari a 0,91 g/l Na-Cl (da Allegato 14) corrispondente ad un Residuo Fisso (RF) di 910 mg/l. Tale valore può essere convertito in prima approssimazione in conducibilità elettrica tramite la relazione

$$RF = \alpha \chi$$

in cui:

α = coefficiente di trasformazione secondo Richard-Nguyen Van Cu (1961) pari a 0,758544 per acque nel range di conducibilità variabile da 830 a 10000 $\mu\text{S}/\text{cm}$;

χ = conducibilità elettrica a 20°C in $\mu\text{S}/\text{cm}$

La conducibilità elettrica χ risulta dunque pari a 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 20°C. Il valore ottenuto risulta inferiore a quello noto per le acque di strato, normalmente di tipo cloruro-sodiche ad elevata conducibilità elettrica, che accompagnano i giacimenti di idrocarburi. In Fig. 4.5 sono riportate, a scopo indicativo, analisi chimiche di acque di strato (ENI, 1962) dalle quali è possibile notare come i valori più bassi (peraltro indicati per il campo Alanno in Abruzzo) mostrano valori di 3,927 g/l (3927 mg/l) ovvero $\chi = 5177 \mu\text{S}/\text{cm}$, dunque notevolmente più alti di quelli registrati per il giacimento Colle Santo. Quest'ultimo, allo stesso tempo, risulta maggiore dei valori di salinità in acquiferi carbonatici soggetti a circolazione attiva. Infatti la salinità delle acque dell'acquifero della Maiella riscontrata nelle principali sorgenti basali risulta in media di 222 mg/l (circa 330 $\mu\text{S}/\text{cm}$) con valori massimi di poco superiori a 370 mg/l (circa 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

N°	Rifer. bibliogr.	Località	Roccia-serbatoio		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻ CO ₃ ²⁻	Na ⁺ +K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Residuo solido
			litologia	età							
1	(101)	Oceano	—	—	18,980	2,649	0,140	10,936	0,400	1,272	34,481
2	(1)	Cortemaggiore (Italia)	sabbia	Miocene	94,190	0,110	0,180	49,520	6,380	2,300	164,210
3	(73)	Alanno (Italia)	calcare	Miocene	0,530	0,548	0,930	0,511	0,310	0,070	3,927
4	(33)	Ragusa (Italia)	dolomite	Triass.	46,305	0,385	1,308	23,645	5,481	0,681	81,010
5	(51)	Burgan (Kuwait)	arenaria	Cretac.	98,275	0,198	0,380	46,191	10,158	2,206	154,388
6	(9)	Ector County (Texas)	calcare	Silur.	75,872	1,851	0,442	35,620	8,167	2,786	108,760
7	(76)	Miami (Kansas)	sabbia	Carbonif.	12,600	0,001	0,517	7,550	0,418	0,180	21,266
8	(114)	Seminole (Oklahoma)	sabbia	Ordovic.	118,000	0,665	0,067	59,400	12,100	1,890	192,122
9	(103)	Beauregard (Louisiana)	sabbia	Eocene	12,571	0,007	0,886	8,163	0,255	0,019	21,901
10	(51)	Lagunillas (Venezuela)	—	Miocene	0,089	ass.	5,383	2,003	0,010	0,063	7,548

Fig. 4.5 - Chimismo in g/l di acque di giacimento da diverse località (da ENI, 1962). Si noti il residuo fisso dell'esempio 3 che, pur essendo il minore in tabella, è chiaramente maggiore del giacimento Colle Santo.

I valori così bassi (910 mg/l pari a 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$), registrati a profondità di 1400 m dal p.c. nel giacimento Colle Santo, sono giustificabili solo se si ammette una diluizione di acque di strato da parte delle acque sotterranee caratterizzate da basso contenuto salino come quelle degli acquiferi carbonatici adiacenti, a loro volta ricaricati da acque meteoriche. In alternativa potrebbero derivare esclusivamente dalle acque meteoriche ma con tempi di residenza maggiori delle acque di circolazione attiva circolanti negli acquiferi carbonatici.

3 – motivazioni di tipo geologico

La ricostruzione geologica della struttura Casoli Bomba vede la prosecuzione della struttura verso nordovest e dunque verso la struttura idrogeologica della Maiella in accordo col modello a scala regionale esposto al Cap.3. La presenza di faglie non comporta necessariamente la mancanza di contatto idraulico tra i diversi settori presenti. Esse possono rallentare il flusso idrico se sono caratterizzate da permeabilità minore delle litologie circostanti ma non evitano la trasmissione della pressione. La condizione descritta al punto 1 del presente paragrafo ne costituisce la prova idraulica.

In sostanza la “copertura” da parte del capping (calcari marnosi della Formazione Bolognano), delle argille plioceniche e delle argille varicolori sono un vincolo al mantenimento delle condizioni idrauliche molto più di quanto potrebbero fare gli allineamenti tettonici.

Oltre a quanto sopra occorre evidenziare che le condizioni attuali vedono la presenza di acqua con le suddette caratteristiche chimiche la cui genesi non è riconducibile esclusivamente ad acque di strato ma ad una provenienza meteorica e successiva circolazione lenta e dunque con elevati tempi di permanenza. La loro stessa presenza attuale testimonia dunque la possibilità di rientro in caso di depressurizzazione.

4.2.1. Conclusioni

Per quanto sopra le simulazioni eseguite, riportate nell’Allegato 14 al SIA e nelle ulteriori precisazioni riportate nell’Allegato H delle integrazioni del 11/2017, possono essere considerate sufficientemente esaustive delle condizioni reali. In particolare, appare più realistica la simulazione eseguita con il cosiddetto acquifero forte per quanto visto al punto 1 sia in termini piezometrici che in termini di estensione.

4.3. Modello di subsidenza

Il modello geologico-strutturale e stratigrafico è stato ampiamente affrontato da parte del proponente nei diversi studi e rapporti allegati alla documentazione sottoposta a VIA e riassunto nel presente documento al Cap. 3. Questo modello permette di porre il maggior numero di vincoli in termini di definizione geometrica delle barriere idrauliche, di parametri petrofisici, di pressioni di strato. La figura 6 dell’All. E, qui riproposta in Fig. 4.6 rappresenta molto schematicamente l’assetto geologico nell’intorno del giacimento.

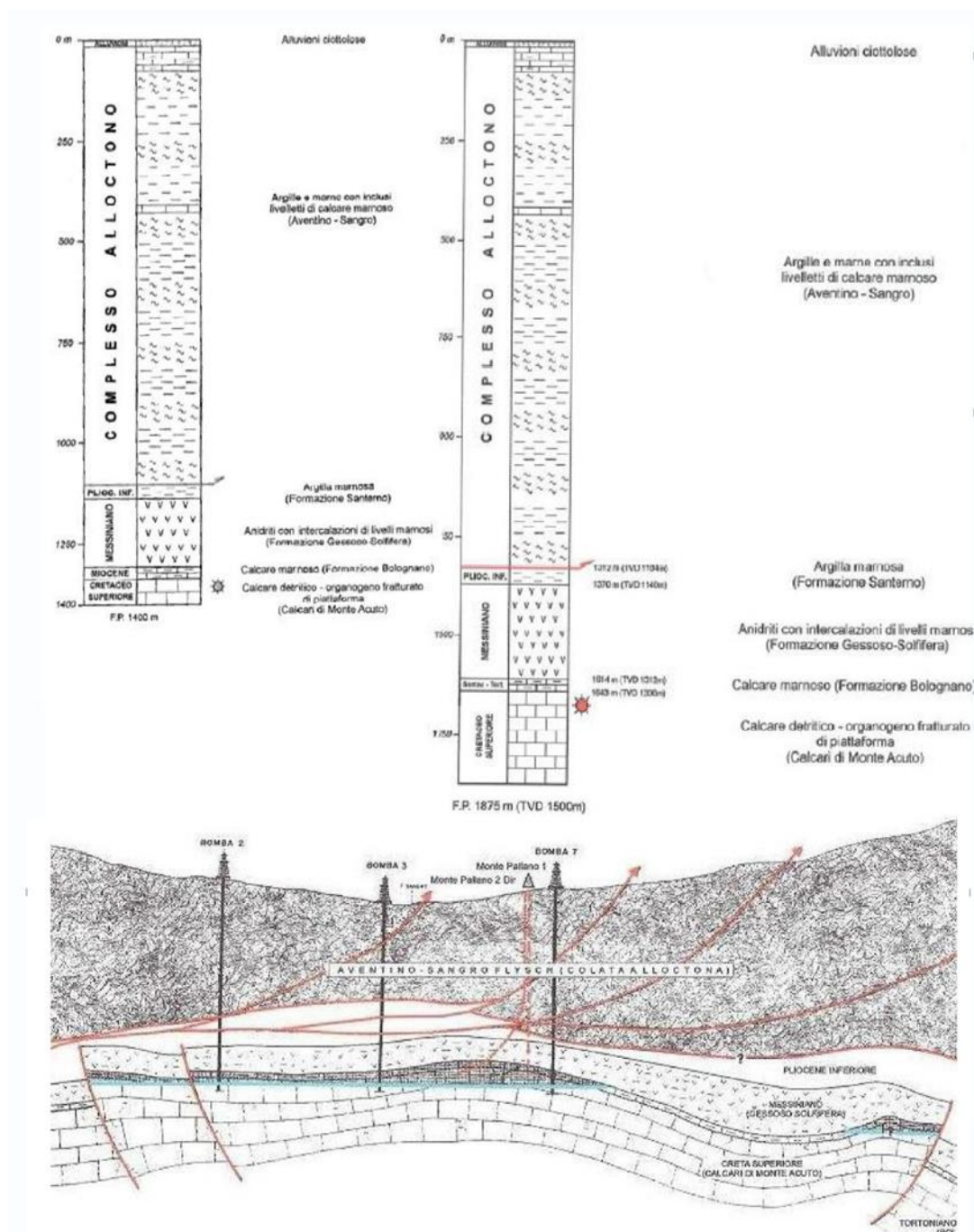


Fig. 4.6 - Sezione rappresentativa geologico strutturale del giacimento e log stratigrafici dei pozzi Monte Pallano 1 e 2 (Fig.6 dell'All. E)

4.3.1. Ulteriori pozzi di sviluppo

I pozzi di sviluppo previsti (Monte Pallano 3, -4 e eventuale -5), derivanti dalla modellazione del giacimento, sono stati ipotizzati a partire dall'esistente piazzola utilizzata per la perforazione dei pozzi Monte Pallano 1 e -2 (SIA, Cap. 3.3.2). L'ubicazione del fondo foro (Bottom Hole, BH) è rappresentata nella Fig. 3.2 dell'All.14 ed

è stata individuata sulla base di un corretto sviluppo del giacimento che tenesse conto del modello di porosità sviluppato e delle conseguenti aree di drenaggio (Fig. 4.7). Il progetto di sviluppo prevede, a nostro avviso correttamente, che la perforazione degli ulteriori pozzi di sviluppo e quindi l'individuazione dei BH definitivi avvenga dopo un primo periodo di produzione dai pozzi esistenti. In tale primo periodo sarà possibile analizzare il comportamento del giacimento e quindi si potranno meglio definire le aree di drenaggio e le traiettorie più opportune.

Sia i pozzi perforati Monte Pallano 1 e 2 sia quelli previsti, con traiettorie che si discosteranno dalla verticale, da un punto di vista minerario dovrebbero avere il suffisso -d (Monte Pallano 1d; 2d; ...); per semplicità di esposizione e per non generare ulteriore incomprensioni di lettura si mantiene in questa sede la nomenclatura utilizzata. La nomenclatura mineraria sarà in ogni caso rispettata.

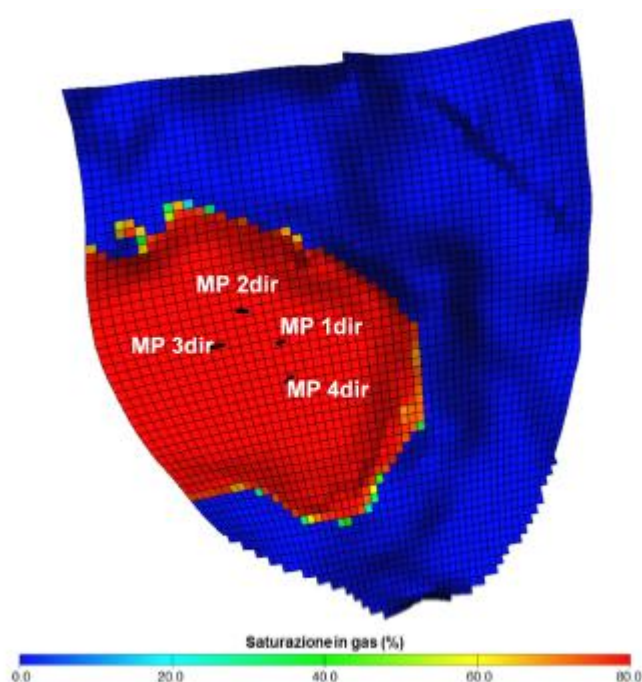


Fig. 4.7 - Modello dinamico del giacimento, con l'individuazione dei BH dei pozzi perforati (Monte Pallano 1 e -2) e da perforare (Monte Pallano 3; -4) (fig. 3.2 dell'All.14)

4.3.2. Effetti della subsidenza

Il modello di subsidenza (All. 14, vedi anche le integrazioni dell'All. H ("Integrazioni al quadro Geomeccanico (punti 21b e 21c)")) è stato sviluppato secondo diversi scenari in funzione della spinta dell'acquifero e dei parametri di deformabilità. La simulazione è stata effettuata per i 15 anni previsti di produzione del gas e per ulteriori 45 anni successivi, al fine di garantire il raggiungimento di un nuovo equilibrio statico.

- **Acquifero medio**
 - A: moduli elastici statici
 - B: moduli elastici dinamici
 - C: moduli elastici statici conservativi
- **Acquifero forte**

- D: moduli elastici statici
- E: moduli elastici dinamici
- F: moduli elastici statici conservativi

CASO	Modulo elastico	Acquifero	MASSIMA DEPLETION (15 anni)		FINE SIMULAZIONE (60 anni)	
			Spostamento verticale massimo [mm]	Raggio [km]	Spostamento verticale massimo residuo [mm]	Raggio [km]
C	conservativo	medio	-29.5	5.2	-23.2	5.2
A	statico		-22.2	5.0	-15.9	4.9
B	dinamico		-7.5	4.0	-5.4	3.9
F	conservativo	forte	-22.6	4.3	-8.5	3.4
D	statico		-16.9	3.8	-3.1	1.7
E	dinamico		-5.7	2.8	-1.1	-

Fig. 4.8 - Risultati degli scenari analizzati (Tab. I, All.14)

	Distorsioni angolari massime, β_{max} [x/2000]	β_{max}/β_{amm} [%]
Valori ammissibili	1	-
Caso C	0.0044	0.44 %
Caso A	0.0039	0.39 %
Caso E	0.0005	0.05 %

Fig. 4.9 - Confronto fra valori ammissibili e valori previsti in corrispondenza della diga in condizioni di massima depletion per gli scenari C, A, E (Tab. II, All.14)

Per ciò che riguarda gli **effetti attesi della subsidenza indotta sulla diga di Bomba**, a pag. VII dell'All.14 si evidenzia che "in tutti i casi analizzati i valori delle distorsioni angolari restituiti dal modello sono ampiamente inferiori (fino a 3-4 ordini di grandezza) ai valori ammissibili riportati in Marr e Jamiolkowsky (2009) per la diga in terra di Bomba. Le rotazioni ammissibili per la diga sono pari a 1/2000". Le deformazioni orizzontali in superficie "sono anch'esse ampiamente sotto i limiti ammissibili riportati". A questo proposito, si evidenzia quanto riportato nel piano di monitoraggio AceaElectrabel (All.15), che indica come del tutto tollerabili per la diga movimenti del versante che insiste sulla spalla destra di 20mm/anno, valori ben al di sopra di quanto previsto dal modello di subsidenza, a testimonianza di una elevata duttilità dell'opera.

Le incertezze citate da Marr e Jamiolkowsky (2009) e dalla Dream nell'All.14, legate principalmente alla distribuzione dei valori di compressibilità delle rocce, possono essere ricondotte fondamentalmente alla oggettiva difficoltà di elaborare una stima della distribuzione dei parametri di rigidità della roccia che tenga conto delle condizioni puntuali di ogni singolo blocco roccioso del volume complessivo del giacimento. Si ritiene che tali incertezze non vadano ad incidere sulla modellazione quantitativa effettuata della subsidenza indotta.

Lo Studio Dream (All.14), inoltre, conferma quanto realizzato da Marre Jamiolkowsky (2009); introduce inoltre il concetto che le possibili deformazioni e gli spostamenti indotti dalle operazioni di coltivazione sono in parte reversibili, elemento questo che contribuisce ad affermare che il corpo diga risulterebbe ancor più in condizioni di sicurezza rispetto alle condizioni di Marre Jamiolkowsky (2009).

Per quanto riguarda gli **effetti indotti dalla subsidenza sulla stabilità dei versanti**, si ricorda quanto evidenziato nel SIA (pag.343), che riprende il modello di Marr e Jamiolkowsky (2009) in termini di fenomeni di versante indotti dalla subsidenza, e il documento del precedente operatore, Forest CMI, “Controdeduzioni alle osservazioni” del 2010 (archivio interno CMI, citato estesamente nel documento della Regione Abruzzo scaricabile al seguente link www.regione.abruzzo.it/xAmbiente/index.asp?modello=schedaIntervento&servizio=xList&stileDiv=mono&template=default&b=via&b=via501&tom=501). In questo ultimo lavoro, la Forest CMI presenta una analisi delle frane nelle aree affette da subsidenza indotta attesa. Su tutte le frane è stata quindi effettuata una verifica di stabilità alle condizioni pre-coltivazione e alla fine della vita del giacimento, applicando un fattore moltiplicativo arbitrario pari a 10 dei cedimenti del suolo attesi (ovvero con una subsidenza massima totale pari a 76 cm). Il risultato è che i fattori di sicurezza delle frane rimangono di fatto inalterati.

Vale in ultimo evidenziare che il movimento franoso (soliflusso superficiale) che insiste sulla spalla destra della diga di Bomba è stato considerato nel piano di monitoraggio AceaElectrabel: sono stati previsti un caposaldo GPS (CS OLMO) e una stazione microsismica (OLMO) sul corpo cartografato.

4.3.3. Confronto con altre esperienze in Italia. Gli analoghi “minerari”

Nei Cap. 5.4.2 e 5.4.3 del SIA vengono illustrati esempi di assetti e comportamenti analoghi a quanto previsto per il giacimento Colle Santo. Si tratta della produzione dal giacimento di San Salvo-Cupello e quella dai pozzi Cerro Falcone. Se per il primo diverse considerazioni portano a concludere che trattasi di un giacimento con un assetto geologico (e idrogeologico) regionale e con caratteristiche intrinseche di giacimento (pressione iniziale e finale, composizione del fluido, meccanismo di produzione) del tutto analoghi al giacimento Colle Santo, il secondo viene portato come esempio di contesto territoriale di superficie analogo, per la presenza di una diga in materiale sciolto analoga a quella di Bomba e con effetti di superficie misurati e non significativi.

1. San Salvo-Cupello

Numerose sono le analogie con quanto conosciuto per il giacimento Colle Santo. I dati principali sono riassunti nella Fig. 4.10, ricavata dal SIA.

Alla luce di quanto definito al Cap. 3 sul Modello geologico-strutturale e al Cap. 4.1 e 4.2 sugli aspetti idrogeologici regionali e locali, si ritiene che l’affermazione “*Dal punto di vista della subsidenza e degli effetti in superficie, il giacimento Colle Santo si comporterà in modo del tutto analogo a quello di San Salvo Cupello*” (SIA, Cap. 4.3.1) possa essere considerata più che congruente e basata su dati scientifici sufficienti e veritieri, e che il modello previsionale sulla subsidenza sia quindi da considerare realistico, prudentiale e cautelativo.

Tale affermazione trova un suo riscontro anche considerando che il modello, i cui risultati sono richiamati nel Cap. 4.3 del presente studio, prevede fra l'altro un valore di pressione finale del giacimento inferiore rispetto a quello di San Salvo-Cupello; e considerato inoltre che nel caso di San Salvo-Cupello non sono state riscontrate, in 30 anni di produzione, evidenze significative di subsidenza in superficie e che la subsidenza in superficie è tanto più accentuata quanto minore è la pressione finale di campo. In definitiva, seppure esistano differenze geologiche sostanziali, si ritiene che il campo di San Salvo-Cupello possa essere considerato un analogo "minerario" del campo Colle Santo.

	San Salvo Cupello	Colle Santo
Formazione geologica mineralizzata	calcarei (Cretaceo)	calcarei (Cretaceo)
mineralizzazione	Gas naturale Metano 61.6% Azoto 24.67% CO ₂ 4% H ₂ S 0.2%	Gas naturale Metano 69.6% Azoto 21% CO ₂ 0.7% H ₂ S 0.27%
Estensione superficiale	Circa 25 km ²	Circa 10 km ²
Pressione iniziale	142.5 kg/cmq a	141.3 kg/cmq a
Pressione Finale	Media effettiva alla fine della produzione (1993) scenario e confronto con P iniziale: 93.0 kg/cmq a (-35%) (da 89.0 a 96.0 kg/cmq a)	Previsioni e confronto con P iniziale: (1 kg/cmq = 0.981 bar) Caso Realistico: 65 kg/cmq a (-54%) Caso Prudenziale: 50 kg/cmq a (-65%) Caso Cautelativo: 50 kg/cmq a (-65%)
Meccanismo di produzione	Water drive, con ricarica da massiccio appenninico ad ovest	Water drive, con ricarica da massiccio appenninico ad ovest
Riserve	Prodotti >5 mld Smc	~2 mld Smc, mai prodotti

Fig. 4.10 - Confronto fra i dati e il comportamento riscontrati al giacimento San Salvo-Cupello e i dati e le previsioni al giacimento Colle Santo (SIA, pag.349)

2. Pozzi di Cerro Falcone

Il caso viene portato nel SIA come esempio di produzione significativa di fluidi da un giacimento carbonatico e per una analisi e eventuale comparazione qualitativa delle conseguenti evidenze in superficie. Si tratta di un campo in vicinanza della diga di Marsico Nuovo, realizzata in materiale sciolto (terra e pietrame) con una altezza di 68m e lunghezza del coronamento di 450m, e analoga alla diga di Bomba, anch'essa in materiale sciolto, con una altezza di 57.5m e coronamento di 650m.

In questo caso, l'affermazione che non è riscontrata in superficie un significativo tasso di subsidenza è confortata dai dati derivanti da un monitoraggio specifico con dati interferometrici (InSAR).

4.3.5. Conclusioni

Si ritiene che l'analisi del fenomeno della subsidenza indotta dall'estrazione prevista di fluidi da sottosuolo sia stata effettuata in maniera corretta, considerando con la dovuta attenzione i possibili fattori perturbanti e le possibili conseguenze ipotizzabili con lo stato attuale delle conoscenze.

Rimandando anche a quanto espresso nel Cap.5.5, è evidente che un attento monitoraggio delle deformazioni del suolo nelle fasi di pre-esercizio, esercizio e post-esercizio potrà verificare la reale deformazione del suolo e gli eventuali scostamenti rispetto al modello previsionale, permettendo quindi l'adozione di misure atte a ricondurre il sistema (inclusa la diga) in condizioni di sicurezza. Gli stessi autori, incluso AceaElectrabel nell'All.15, evidenziano sia la necessità di tale monitoraggio che le principali linee guida da seguire (rete di ricevitori GPS, misure InSAR, pressioni test periodici ai pozzi). Tali linee guida dovranno conformarsi anche a quanto previsto da *"Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche"* (http://unmig.mise.gov.it/unmig/agenda/upload/85_238.pdf).

5. Sismicità

5.1. Strutture sismogenetiche

La tematica è affrontata in dettaglio negli allegati seguenti:

- Allegato E: Relazione Geologica e sulla Sismicità
- Allegato G: Integrazioni al Quadro Geologico e Sismotettonico

In questi allegati viene evidenziato che la classificazione sismica dei comuni interessati è sostanzialmente “governata” dalle seguenti strutture sismogenetiche (DISS 3.2.0), “*non necessariamente prossime all’area di studio, ma che fanno comunque risentire localmente l’azione di propagazione dei sismi*” (All.E):

- Tocco Casauria – Tremiti
- Sulmona basin
- Aremogna – Cinquemiglia
- Shallow Abruzzo Citeriore Basal Thrust (Shallow ACBT, ITCS079)
- Deep Abruzzo Citeriore Basal Thrust (Deep ACBT, ITCS078)

Come riportato nell’All.G, secondo il DISS 3.2.0 (http://diss.rm.ingv.it/dissnet/CadmoDriver?action_do_single=1&state=find&token=NULLNULLNULLNULL&tabber=1&page=pSASources_d&IDSource=ITCS079) l’area vasta all’intorno dell’area in studio è interessata più direttamente dalle ultime due strutture (ACBT Deep e Shallow).

Come risulta dal DISS 3.2.0, restano aperte alcune questioni relativamente alla geometria, alla attività e alle possibili interconnessioni di queste due strutture sismogenetiche con altre limitrofe, come ad esempio:

- la zona di taglio litosferica delle Tremiti (Scrocca, 2007) e/o le trascorrenti sepolte EW di Fracassi e Valensise (2007) ubicate nella parte settentrionale della ACBT
- le più profonde faglie crostali trascorrenti EW che tagliano l’avampese apulo, come la zona di taglio litosferica delle Tremiti (Scrocca, 2007) e/o le trascorrenti sepolte EW di Fracassi e Valensise (2007) ubicate nella parte settentrionale della ACBT
- il BasalThrust della Maiella e/o le faglie normali immergenti a SW di Morrone-Porrara (Lavecchia et al., 2010)

L’Allegato G, a pagina 23, riporta nelle Conclusioni che “*L’approfondimento del quadro geologico e sismotettonico della zona circostante il giacimento di Colle Santo è stato effettuato sulla base di una ricerca approfondita all’interno dei cataloghi e database pubblici e su informazioni che derivano dalla letteratura scientifica. In particolare, sono stati impiegati i database dei progetti ITHACA e DISS per l’identificazione delle faglie capaci e attive nelle vicinanze del giacimento. Inoltre, tramite i dati estratti dai cataloghi CPT15 e DBMI15, è stata effettuata una ricerca relativa alla sismicità storica e alle intensità calcolate degli eventi sismici rilevati nella zona del Comune di Bomba. ... I dati relativi alla sismicità storica mostrano che in diverse occasioni negli ultimi 300 anni la zona oggetto di studio è stata affetta da terremoti significativi,*

principalmente legati all'attivazione di strutture compressive (thrust). Tuttavia, analizzando i dati relativi al periodo di sismicità strumentale (dal 1980 in poi), si evidenzia chiaramente come la zona del giacimento di Colle Santo sia caratterizzata da una bassa sismicità. Un solo terremoto con magnitudo maggiore di M 4 è stato registrato in zona con epicentro ad una distanza di circa 50 km dal comune di Bomba negli ultimi 37 anni. Tutte le sezioni presentate mostrano l'assenza di terremoti significativi in una zona piuttosto ampia intorno al giacimento."

Questo non vuole necessariamente significare che l'area del giacimento Colle Santo possa ritenersi esente da eventi sismici significativi, come correttamente riportato nell'Allegato E, dove viene evidenziato come le velocità massime attese di accelerazione al suolo possono assumere valori compresi fra 0,100 e 0,175g, con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni. Nello stesso All.14 è possibile ritrovare diverse osservazioni sulla scarsa conoscenza di faglie capaci in superficie e sulla distanza tra le faglie e il giacimento.

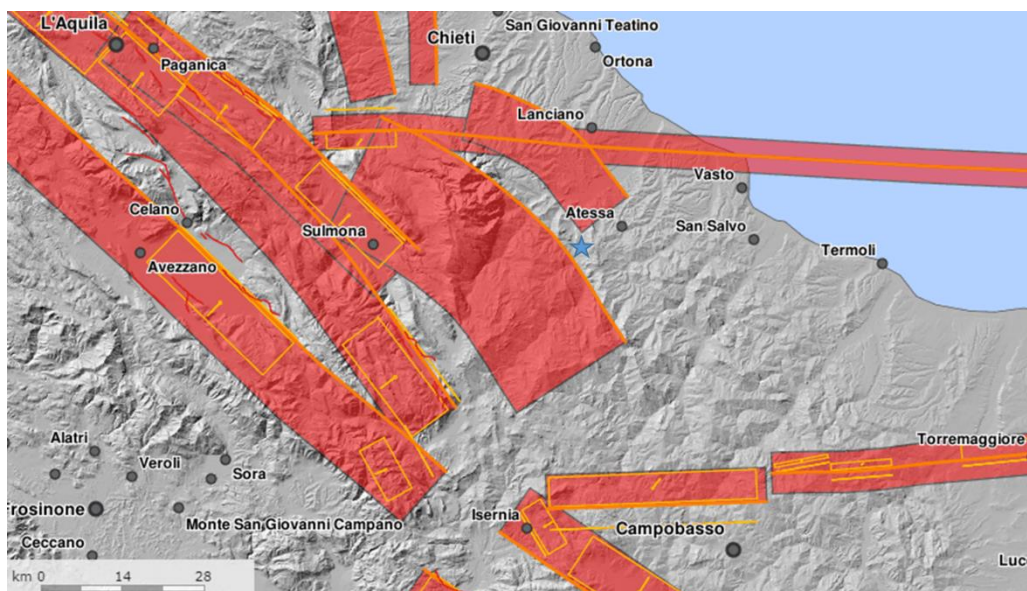


Fig. 5.1 - Strutture sismogeniche dell'Italia centro-meridionale (<http://diss.rm.inq.it/dissmap/dissmap.phtml>). La stella blu indica la posizione approssimativa del giacimento Colle Santo.

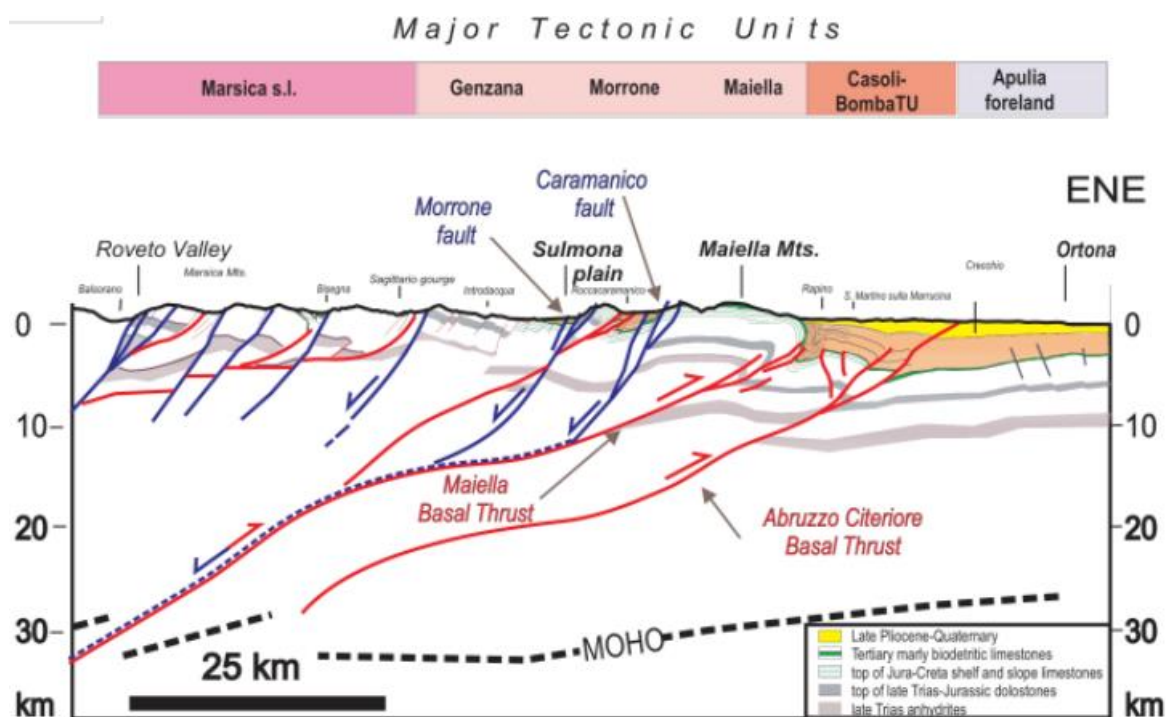


Fig. 5.2 - Sezione crostale interpretativa, con una ricostruzione sintetica del Maiella Basal Thrust e dell'Abruzzo Citeriore Basal Thrust- ACBT (Lavecchia & de Nardis [2009]), così come riportato nel DISS 3.2.0

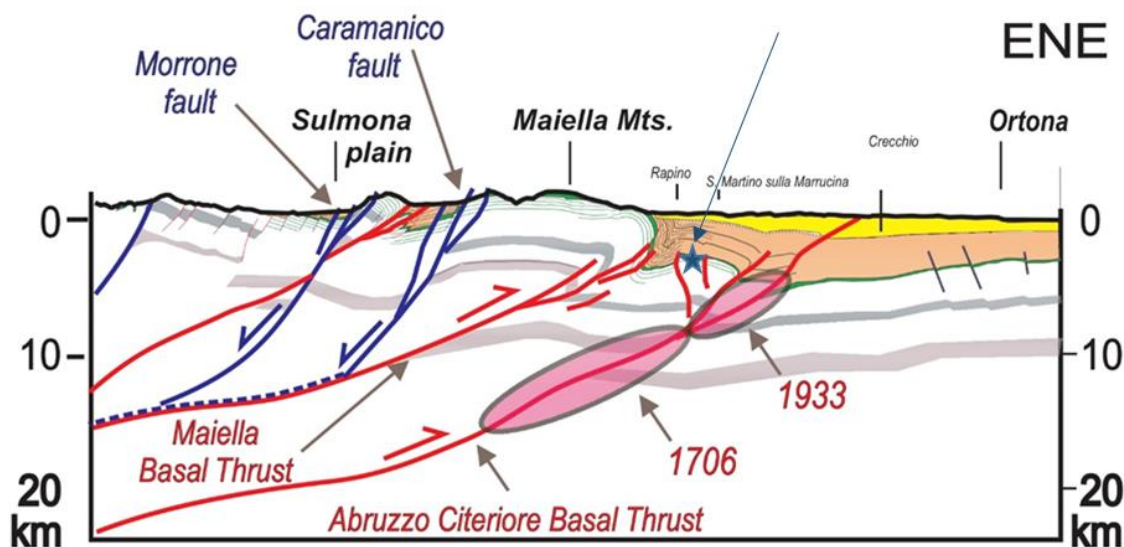


Fig. 5.3 - Dettaglio della sezione crostale precedente, con evidenziato il ruolo sismogenetico dell'ACBT, così come riportato nel DISS 3.2.0. La stella blu evidenzia la posizione strutturale, non in scala, proiettata circa 15-20 km verso Nord, dell'elemento riconducibile al giacimento di Colle Santo

5.2. Sismicità indotta/innescata

La letteratura scientifica utilizza comunemente i termini *“indotto”* e *“innescato”* per descrivere i terremoti causati dagli effetti indotti direttamente o indirettamente da attività antropiche. In alcune pubblicazioni entrambi i termini sono utilizzati in modo intercambiabile (alcuni utilizzano il termine *“stimolato”*), mentre in altre (McGarr et al., 2002; Foulger et al., 2018) viene utilizzata la seguente distinzione:

- **terremoti indotti:** le attività antropiche sono responsabili della gran parte della variazione del campo di stress che genera la sismicità.
- **terremoti innescati:** le attività antropiche sono responsabili in minima parte della perturbazione lungo le faglie, anticipando eventi sismici che si sarebbero comunque verificati naturalmente. Il ruolo principale nei terremoti innescati è svolto dalle forze tettoniche che sono già presenti prima della perturbazione antropica.

A causa della complessità del sistema è estremamente difficile riuscire a discriminare, laddove viene comprovato il ruolo delle attività antropiche, tra terremoti indotti e innescati.

I meccanismi invocati per tenere conto della sismicità *“stimolata”*, includono principalmente i cambiamenti di stress dovuti a variazioni di volume di fluidi iniettati, quindi ai carichi applicati, e aumento della pressione di poro lungo la superficie di faglia (Foulger et al., 2018) (Fig. 5.4).

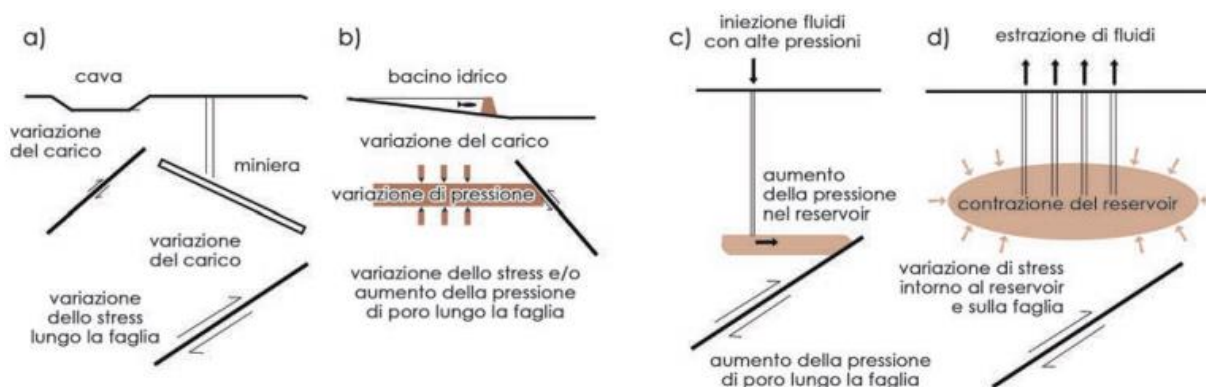


Fig. 5.4 -Schema del meccanismo della sismicità indotta da estrazioni minerarie e cava (a), bacini idrici artificiali (b) ed attività estrattive di petrolio & gas naturale dovuta ad iniezione di fluidi (c) ed estrazione (d). (Balocchi, 2016)

È ormai riconosciuto dalla letteratura scientifica che, nell’ambito delle attività antropiche che possono generare sismicità stimolata, indotta o innescata, rientrano anche quelle estrattive. Fra queste, le condizioni che possono più frequentemente stimolare sismicità sono (NRC, 2013; Scrocca, 2014):

- **Iniezione di fluidi nel sottosuolo.** Si genera un aumento della pressione di poro e, di conseguenza, una riduzione dello sforzo normale effettivo sui piani di faglia, che vengono a trovarsi quindi in stato critico e si muovono sismicamente. Esempi: Rangely Oil Field, Colorado; Rocky Mountain Arsenal, Colorado; Texas; Oklahoma.
 - Risposta rapida: generalmente piccoli terremoti ($-2 \leq M \leq 3$) collegati con la fratturazione idraulica di ammassi rocciosi;
 - Risposta lenta: terremoti che possono raggiungere magnitudo sino a 5. Vengono spiegati come il risultato della diffusione in profondità dell'onda di pressione generata dall'iniezione dei fluidi che causa lo scivolamento lungo faglie potenzialmente sismogeniche.
- **Estrazione di Fluidi: Effetti Poroelastici.** L'estrazione di fluidi causa un decremento della pressione di poro e una conseguente contrazione del reservoir, con relativa subsidenza. Poiché il reservoir è accoppiato elasticamente con le rocce circostanti, tale contrazione genera il trasferimento di stress poroelastico alle regioni adiacenti, inducendo lo sviluppo di terremoti. Sismicità tende a svilupparsi nella zona del giacimento (entro c. 5 km), sopra e sotto il reservoir, con $M \leq 5$ e con un ritardo temporale rispetto all'inizio dell'estrazione. Esempi classici: Groningen (Olanda); Lacq (Pyrenees, Francia)
- **Estrazione di Fluidi: Disequilibri Isostatici.** La produzione di idrocarburi ha l'effetto di rimuovere una massa Δm dalla crosta. Per ripristinare l'equilibrio verticale delle forze in gioco, la risposta isostatica a questa rimozione di massa induce un ispessimento crostale che può realizzarsi con l'attivazione di sovrascorrimenti anche distanti dalla zona di produzione (McGarr, 1991). Esempio controverso: Gazli (Uzbekistan, 1956, riserve gas 456 GS_m3).

Un ulteriore elemento discriminante necessario per la discussione è la dimensione delle forze in gioco e quindi dei giacimenti (e quindi dei volumi) e delle relative portate di iniezione o di estrazione; tutti gli esempi succitati sono riferiti a giacimenti di diversi ordini di grandezza più grandi di quelli italiani o che sviluppano tecniche di estrazione diverse da quelle applicate in Italia (es. high volume-high pressure hydraulic fracking).

Come definito da Scrocca (2014), *“Nei limiti dell'errore nelle localizzazioni epicentrali e della completezza dei database sismologici disponibili, per i principali giacimenti italiani si hanno scarse evidenze di sismicità stimolata chiaramente attribuibile alle attività estrattive”*. Inoltre, da un punto di vista qualitativo, è necessario evidenziare che la probabilità di eventi sismici “stimolati” in Italia decresce, rispetto a casi anche conosciuti nel mondo, per i seguenti motivi:

- Assenza di applicazioni di attività di fratturazione idraulica a elevate pressioni e elevati volumi (**frackings.s.**) per assenza di spessori significativamente economici di “shale gas”
- Recupero secondario con **iniezione di grandi volumi di acqua** non effettuato;
- Per lo sviluppo di significativi **effetti poroelastici** risulta necessario avere reservoir di porosità elevata e litologie compattabili, in contesti eventualmente associati a presenza di faglie pre-esistenti, con presenza di formazioni incassanti rigide. In generale, tali condizioni sono assenti nei principali reservoir italiani e in particolare sono assenti nel contesto in cui si sviluppa il reservoir di Colle Santo.
- Per lo sviluppo di significativi effetti dovuti a **disequilibrio isostatico**, risulta necessario avere giacimenti di dimensioni significative, non presenti in Italia.

Una approfondita analisi degli effetti dell'estrazione di idrocarburi sulla sismicità stimolata è stata svolta a seguito degli eventi sismici in Emilia del 2012, con l'istituzione della cosiddetta Commissione ICHESE, il cui obiettivo è stato quello di stabilire eventuali correlazioni fra la generazione di quegli eventi sismici e le attività di estrazione/re-iniezione di fluidi dal sottosuolo.

Nel rapporto ICHESE del 2014 (<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/notizie/notizie-2014/commissione-ichese-on-line-il-rapporto-integrale>), furono prese in considerazione diverse possibili fonti di disturbo antropico sulla sismicità. Dopo aver escluso relazioni di causa-effetto fra gli eventi sismici e il sito di stoccaggio gas di Minerbio, i siti di estrazione gas di Spilamberto e Recovato e l'attività geotermica al pozzo Casaglia, l'attenzione si concentrò sulle attività, regolarmente autorizzate, di re-iniezione di acque di strato al pozzo Cavone-14, facente parte della Concessione per la coltivazione di idrocarburi liquidi "Mirandola".

La Commissione concluse, a pag. 186, che *"it is highly unlikely that the activities of hydrocarbon exploitation at Mirandola and the geothermal activity at Casaglia have produced sufficient stress change to generate an 'induced' seismic event. While it cannot constitute proof, the current state of knowledge and all the processed and interpreted information does not allow the ruling out of the possibility that the actions involved in hydrocarbon exploitation in the Mirandola field may have contributed to 'trigger' the Emilia seismic activity"*. A pagina 190 del Rapporto, inoltre, è indicato che *"Exhaustive examination of all the available literature shows that the discrimination between natural and triggered/induced earthquakes is a difficult problem and does not presently have a reliable, ready-to-use solution"*.

Alla luce di ciò, e a seguito delle raccomandazioni espresse nel Rapporto citato, sono state seguite due principali linee di approccio:

- la prima ha portato il MISE alla definizione del documento *"Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche"* (http://unmig.mise.gov.it/unmig/agenda/upload/85_238.pdf).
- la seconda ha portato al cosiddetto "LabCavone" (<http://labcavone.it/>), che ha prodotto:
 - test di interferenza ai pozzi e uno studio dal titolo *"On the potential for induced seismicity at the Cavone oilfield: analysis of geological and geophysical data, and geomechanical modeling"* (Astiz et al, 2014; <http://labcavone.it/documenti/32/allegatrapporto-studiogiacimiento.pdf>), che a seguito di specifici test di interferenza ha evidenziato come il campo di stress generato dalle attività di re-iniezione di fluidi di strato al pozzo Cavone-14 possa essere considerato esaurito in un raggio di 4-500 m, e le cui conclusioni sono riassumibili nella frase *"we can conclude that the rapid changes in Coulomb stress on the Mirandola fault from the May 2012 earthquake sequence were much more important than the stress changes that slowly accumulated over the lifetime of production in the Cavone field"*.
 - la messa in opera e l'esercizio di una rete di monitoraggio microsismico attualmente in corso secondo le Linee Guida del MISE, i cui risultati sono pubblicati regolarmente sul sito del Laboratorio.

Nell'ambito degli stessi indirizzi di ricerca, ISPRA nel 2014 ha pubblicato un *"Rapporto sullo stato delle conoscenze riguardo alle possibili relazioni tra attività antropiche e sismicità indotta/innescata in Italia"*

(http://www.isprambiente.gov.it/files/notizie-ispra/notizia-2014/rapporto-sismicita-indotta-innescata-in-italia/Rapporto_sismicita_indotta_innescata_in_italia.pdf). In tale Rapporto vengono elencati gli episodi di sismicità indotta/innescata documentati o ipotizzati in Italia (Fig. 5.5). Anche in questo Rapporto viene evidenziata la difficoltà non solo nel riconoscere tali episodi rispetto alla sismicità naturale, ma anche nel differenziarli fra episodi di sismicità indotta e innescata. È bene sottolineare che alla luce dell'esperienza del LabCavone, successiva al Rapporto ISPRA citato, il caso di Cavone può ormai tranquillamente essere stralciato dai casi ipotizzati di sismicità indotta, e che alla luce di recenti studi (<https://ingvterremoti.wordpress.com/2016/07/11/caviaga-15-maggio-1951-davvero-un-terremoto-indotto/>; Caciagli et al, 2015) anche il caso di Caviaga viene ormai allocato fra gli eventi sismici naturali.

Certamente i casi conosciuti nel mondo di sismicità indotta/innescata dalle attività umane legate all'estrazione di fluidi nel sottosuolo (ad esempio i casi del Texas e dell'Oklahoma, o del bacino di Groningen in Olanda) non possono essere presi come riferimento o come analogia con l'Italia; si tratta infatti di

- contesti geologici profondamente diversi sia a scala regionale e alla scala dei giacimenti,
- volumi totali, portate e pressioni di estrazione e re-iniezione di diversi ordini di grandezza di differenza,
- utilizzo di tecniche di estrazione e re-iniezione non utilizzate in Italia.

Anche se per numerosi motivi (tipologia ed età della roccia serbatoio, assetto strutturale, tipologia di idrocarburi estratti, assenza di re-iniezione nel progetto di sviluppo di Colle Santo), il giacimento di Cavone non può essere considerato un analogo del giacimento di Colle Santo, è innegabile però che l'esperienza maturata nella gestione di tale giacimento è quella più vicina e moderna a cui fare riferimento.

Località	Prov.	Documentato ¹ Ipotizzato ²	Periodo di monitoraggio locale considerato	Mmax (anno)	Inxx	Bibliografia	NOTE
Tipologia Attiva							
Pieve di Cadore	BL	Documentato	1949-1952	2 (1964)		Caloi (1966)	
Vajont	BL	Documentato	1962-1968	<2 (1963)		Mignan (1968); Caloi (1971)	
Rodricoli	FC	Documentato	1981-1989	3		Preciselli et al. (1995)	
Passante	CZ	Documentato	1981-1996	2.5		Guzeppetti et al. (1996)	
Camportorvo	AQ	Ipotizzato	n.d.	5.7 (1950)	VIII	Maccione (2013)	
Particello	PZ	Documentato	2005-2012	2.7 (2010)		Valoroso et al. (2009); Stabile et al. (2014)	
Campo geotermico							
Lardarello/ Travale	PT	Ipotizzato	1978-1982	3.2 (1978)		Bonini et al. (1980a); Bonini et al. (1983); Evans et al. (2012)	In questi campi di produzione i dati disponibili mostrano l'occorrenza di eventi indotti di bassa magnitudo correlati al processo di reiniezione dei fluidi, mentre il livello della sismicità naturale di fondo tende ancora dibattuta l'interpretazione degli eventi maggiori, considerati in alcune analisi naturali e in altre indotti/innescati
Annata	GR/SI	Ipotizzato Ipotizzato	1982-1992	4.5 (2000) 3.5 (1983)	VI	Maccione et al. (2001) Bonini et al. (1990); Moia et al. (1993); Evans et al. (2012)	
Latera	VT	Documentato	1978-1982	2.9 (1980)		Bonini et al. (1980b); Carabelli et al. (1984); Bonini et al. (1990); Moia et al. (1993); Evans et al. (2012)	
Torre Alfina	VT	Documentato	1978-1982	3 (1977)	III/IV	Bonini et al. (1980b); Moia et al. (1993); Evans et al. (2012)	I dati disponibili in concomitanza con specifici esperimenti di iniezione di fluidi documentano chiari esempi di eventi indotti, generalmente organizzati in sequenze di magnitudo da negativa a circa 2, con singoli eventi che raggiungono magnitudo 2.9 a Latera e 3.0 a Torre Alfina.
Cezano	RM	Documentato	1978-1982	2 (1978)		Bonini et al. (1980b); Evans et al. (2012)	
Cavaga	LO	Ipotizzato		5.4 (1951)	VI/VII	Caloi (1956)	
Cavone	MO	Ipotizzato		5.9 (2012)	VI/VIII	ICHESE (2014)	
Montemaro	PZ	Ipotizzato	2006	1.7		Valoroso et al. (2009)	Valoroso et al. (2009) correlano un scisma di 40 micrometri ($M_s < 1.7$) avvenuto nel Giugno 2006 con le attività nel pozzo Costa Molina 2, in cui sono re-iniettate acque di strato estratte da giacimenti della Val d'Agri. Gli eventi sismici, accuratamente registrati da una rete temporanea ad alta densità operativa dal Maggio 2005 al Giugno 2006, sono localizzati entro 1 km di distanza dal pozzo. Studi recenti eseguiti dall'INGV e presentati in convegni nazionali ed internazionali (Valoroso et al., 2013; Chiarabba, 2014) hanno analizzato dati registrati dalla rete sismica nazionale nell'area di Montemaro. Questi studi evidenziano che l'attività microstacata iniziata nel Giugno 2006 è continuata negli anni successivi, correlandosi spazialmente e temporalmente con le attività di re-iniezione nel pozzo Costa Molina 2.
Rubi/Cave Friedl	UD	Ipotizzato		n.d. (1965)	V	Caloi (1970)	
Miniera							

Fig. 5.5 - Quadro riassuntivo degli episodi di sismicità indotta/innescata documentati o ipotizzati. Per ciascun episodio è riportata la tipologia di attività svolta, i relativi articoli pubblicati e alcune note esplicative (ISPRA, 2014)

5.3. Piano di Monitoraggio Sismico

Le relazioni di cui agli Allegati E e G inquadrano lo stato delle conoscenze in termini di sismicità naturale e di accelerazione al suolo massima attesa; inoltre, l'Allegato F (pag. 3) presenta *“uno studio di pre-fattibilità per la predisposizione di una rete di monitoraggio microsismico nell'area del giacimento di Colle Santo alla luce delle linee guida del Ministero dello Sviluppo Economico (MISE-DGS-UNMIG, 2014) e dell'esistente piano di monitoraggio (AceaElectrabel, 2010) già approvato dal Ministero delle Infrastrutture (Prot. 0013981-21/12/2010).”* In particolare, lo studio tratta i seguenti punti:

- *Valutazione del numero e della posizione delle stazioni di superficie esistenti appartenenti alla rete nazionale, regionale e locale.*
- *Individuazione di aree per la possibile ubicazione di stazioni di superficie addizionali sulla base delle linee guida fornite dal MISE e dell'esistente piano di monitoraggio.*
- *Ottimizzazione delle aree per la possibile ubicazione di stazioni di superficie addizionali sulla base della distanza da eventuali faglie attive, sorgenti di rumore antropogenico, accessibilità alle reti elettrica e stradale.*
- *Valutazione dell'installazione di geofoni anche in pozzo nell'eventualità che la copertura fornita dalla rete di superficie non sia sufficiente.*

Inoltre vengono presentate, ad integrazione dello studio, le seguenti indicazioni:

- *Criteri per l'individuazione delle caratteristiche delle eventuali sorgenti sismiche.*
- *Suggerimenti per l'individuazione dei livelli di soglia del rumore allo scopo di poter determinare la minima magnitudo degli eventi localizzabili.*
- *Procedura tipo per l'esecuzione di simulazioni numeriche con dati sintetici al fine di stimare l'ampiezza dell'onda sismica attesa ai punti di misura.”*

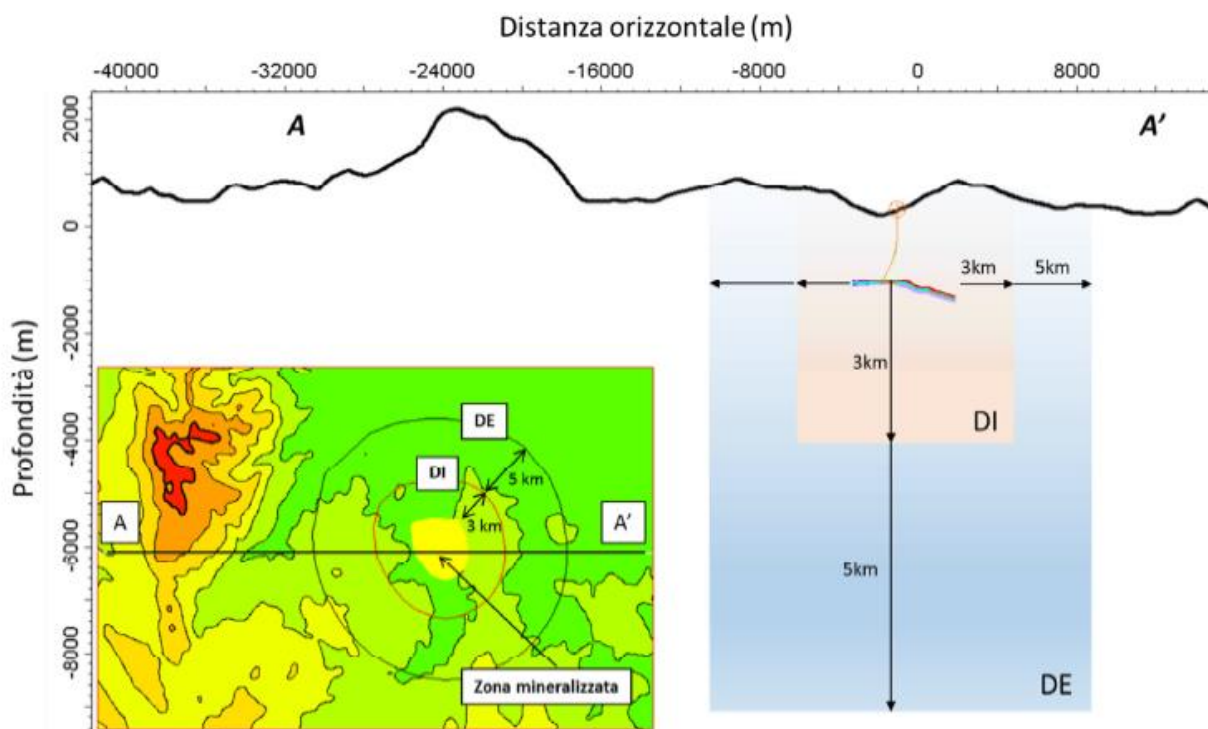


Fig. 5.6 - Mappa e sezione della zona circostante il giacimento di Colle Santo con l'indicazione della dimensione areale e verticale del Dominio interno (DI) e del Dominio esteso (DE) di rilevazione (Fig. 2.1 dell'Allegato F), come da Linee Guida del MISE

Nella documentazione allegata all'Istanza di VIA, il documento "Allegato_15_Monitoraggio_ACEA" presenta un "piano di monitoraggio strumentale dei fenomeni che possono creare rischi per la sicurezza della diga di Bomba e delle relative opere accessorie, durante le fasi di estrazione del gas (dal giacimento di Colle Santo) da parte della Società Forest CMI".

Tale piano, sviluppato da Forest, condiviso con ACEAELECTRABEL in quanto concessionario della centrale idroelettrica di Bomba, e approvato dal Ministero delle Infrastrutture – DG Dighe il 21/12/2010, fu realizzato al fine di garantire un adeguato piano di azione e di gestione di fenomeni anomali sulla diga causati dalle attività di estrazione ed era volto a definire:

- I sistemi di controllo
- Le soglie di controllo e di sicurezza
- Le procedure operative

Lo studio di pre-fattibilità dell'All.F è stato effettuato con lo scopo di integrare la rete prevista ai fini di garantire monitoraggi e procedure operative a seguito di comportamenti anomali del corpo diga, con ulteriori punti di rilevamento che soddisfino quanto previsto dalle Linee Guida del MISE, in modo da massimizzare l'accuratezza e la completezza delle acquisizioni.

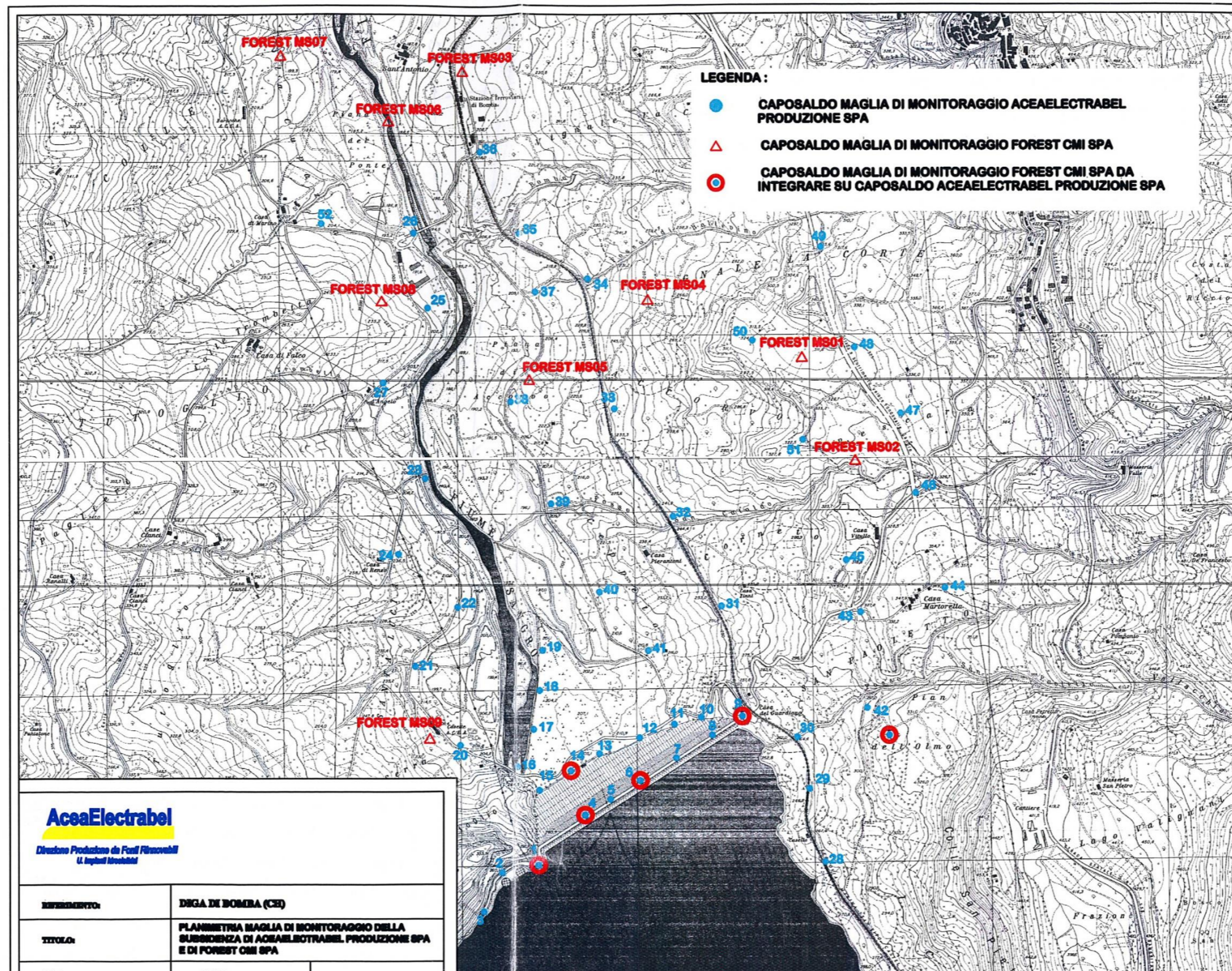


Fig. 5.7 – Rete di capisaldi per il monitoraggio della subsidenza indotta sul corpo diga di Bomba (All.15)

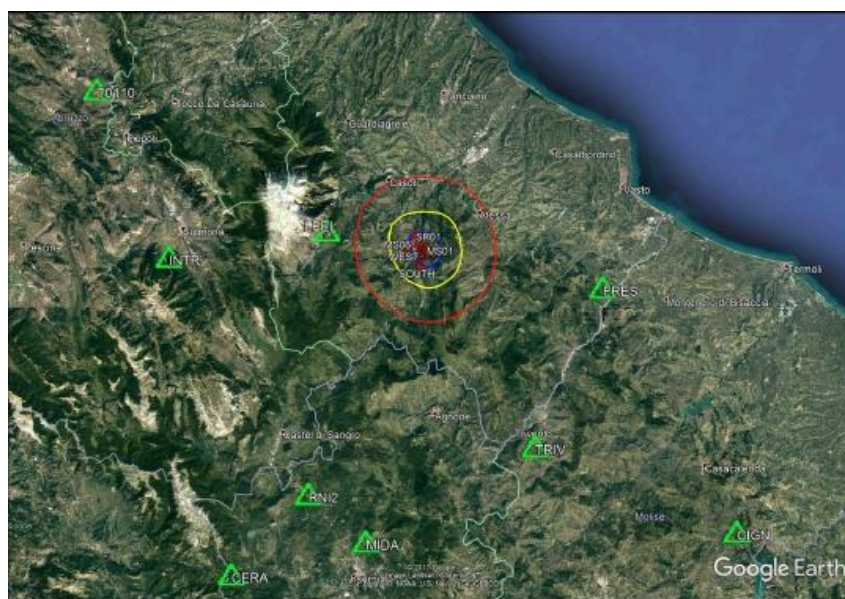


Fig. 5.8 - Mappa delle stazioni di monitoraggio microsismico già previste nel piano di monitoraggio esistente (triangoli rossi) e delle stazioni appartenenti alla rete nazionale (triangoli verdi) in un raggio di 50 km dal giacimento di Colle Santo. Il cerchio giallo corrisponde all'estensione del dominio interno (DI) di rilevazione mentre il cerchio rosso individua l'estensione del dominio esteso (DE). (fig. 3.3 All. F)



Fig. 5.9 - Mappa con l'indicazione delle zone favorevoli (verdi) e non favorevoli (rosse) per l'installazione di stazioni di monitoraggio aggiuntive. Il cerchio blu corrisponde approssimativamente all'estensione del giacimento mentre il cerchio giallo individua l'estensione del dominio interno (DI). (fig. 3.4 All. F)

Va evidenziata una ipotetica incongruenza fra la figura dell'All.2 dello studio ACEAELECTRABEL "Piano Monitoraggio Diga Bomba" (All. 15) e la figura 3.1 dell'All. F, che mostrano una diversa area del giacimento proiettata in superficie. Tali differenze sono facilmente riconducibili alle normali variazioni nelle interpretazioni delle geometrie del sottosuolo, da considerarsi influenti allo scopo specifico del monitoraggio della sismicità (e della deformazione del suolo).

I dettagli del Piano di Monitoraggio, con individuazione dei siti delle stazioni di misura, potranno essere realizzati in fase di progettazione esecutiva, senza per questo andare ad inficiare quanto previsto dalle Linee Guida MiSE alle pagg. 12 e 13: *"Per quanto riguarda i tempi di esercizio del monitoraggio, si raccomandano le seguenti modalità:*

- 1. il monitoraggio sismico dovrà partire **almeno un anno prima** dell'inizio dell'attività di coltivazione o stoccaggio, al fine di poter verificare e misurare la sismicità naturale di fondo in condizioni "non perturbate";*
- 2. il monitoraggio sismico dovrà proseguire per tutto il tempo dell'attività di coltivazione o stoccaggio prevista, e protrarsi per almeno un anno dopo la conclusione delle attività.*

Si vuole in questa sede ricordare che il Proponente (Concessionario) dovrà, nella definizione delle tempistiche associate alla progettazione esecutiva, tenere conto di quanto previsto sempre dalle Linee Guida del MiSE al Cap. 9: *"Il Concessionario, in concerto con la SPM designata, è in carico di predisporre il progetto di monitoraggio, ed è responsabile della realizzazione delle reti (intendendo con ciò l'acquisto, l'installazione o l'eventuale adeguamento della strumentazione), nonché per la loro manutenzione e gestione. La SPM esamina e valuta il progetto di monitoraggio ai fini della sua approvazione da parte del MiSE ed esegue l'elaborazione, l'analisi e l'interpretazione dei dati. La SPM può anche essere incaricata dal Concessionario di eseguire la realizzazione e la manutenzione delle reti, ferme restando la responsabilità e la copertura dei costi da parte dello stesso Concessionario."*

Sempre al Cap.9 delle Linee Guida, la Struttura Preposta al Monitoraggio (SPM) è così definita *"La SPM è costituita da una o più Università o Enti di ricerca di comprovate competenze in materia, eventualmente in consorzio tra loro, o anche con strutture private. Per ogni concessione sarà designata una SPM che svolgerà, in via esclusiva, il compito di organo tecnico di supervisione dei progetti, raccolta, trattamento e trasmissione dei dati al MiSE e al Concessionario. Le modalità di conferimento dell'incarico saranno stabilite dal MiSE"*.

Una volta che sarà quindi designata dal MiSE la SPM per la Concessione di Coltivazione Colle Santo, dovrà essere cura del Concessionario (CMI Energia) sviluppare, *"in concerto con la SPM designata"*, il progetto definitivo ed esecutivo di monitoraggio.

5.4. Frane "naturali" e Franosità sismo-indotta

Nella documentazione allegata al SIA, oltre alla cartografia derivante dalla pianificazione territoriale alle diverse scale che evidenzia suscettività, pericolosità e rischio di frana nell'area vasta all'intorno delle aree interessate dal progetto (All.015-PG-0999-PTCP_Suscettivita_alle_Frane; All.015-PG-1012-

PAI_Carta_della_Pericolosità_da_Frana; All.015-PG-1013-PAI_Carta_del_Rischio_da_Frana), l'argomento relativo alla franosità in generale, con considerazioni che possono, seppure indirettamente, permettere di avere un quadro sulla franosità sismo-indotta è trattato fondamentalmente in due studi allegati alla documentazione di VIA:

- All. 6: "Relazione tra geodinamica e morfostruttura e rapporto tra i piani di scollamento profondi e le strutture superficiali delle nuove opere in progetto", redatto dal Dip. Scienze Geologiche dell'Università degli Studi di Roma TRE);
- All. 7 "Caratterizzazione geomorfologica dell'area del permesso di ricerca Monte Pallano", redatto da GeoMap)

I due studi citati interessano l'area vasta del Permesso di Ricerca e l'area dei previsti risentimenti in superficie della subsidenza indotta (Cap. 4.3.2); il tracciato del gasdotto e l'area della Centrale, esterni alle aree analizzate dai due studi, vengono da CMI considerati nell'ambito della cartografia del PAI.

I due studi si compendiano in maniera esaustiva, in quanto alla revisione bibliografica e analisi speditiva sul terreno effettuate nel primo studio si aggiunge una analisi fotointerpretativa nel secondo; gli Autori evidenziano una elevata propensione al dissesto per diverse tipologie di frana, e nel contempo sottolineano che:

- le superfici di scorrimento di frana non corrispondono alle superfici di contatto tettonico stratigrafico tra le formazioni presenti;
- i contatti tettonici e la presenza di litologie a diversa competenza e permeabilità favoriscono la creazione di scarpate ripide, con significativa presenza d'acqua in prossimità dei contatti tra carbonati e depositi pelitici. La concomitanza di questi due fattori predisponenti facilita lo sviluppo di frane in prossimità di tali contatti.

La stabilità delle aree oggetto degli interventi previsti è ampiamente discussa nel Cap. 4.1.3.4 del SIA; in sintesi (Fig. 5.10):

- l'area pozzi e il primo tratto del gasdotto interessano alcune aree mappate come R1 (rischio da frana Moderato) / P2 (pericolosità da frana Elevata)
- il restante tratto del gasdotto e la superficie destinata alla costruzione della centrale di trattamento non sono soggette né a pericolosità né a rischio da frana, pertanto le opere risulterebbero compatibili con le prescrizioni del PAI.

Vale la pena in questa sede considerare un aspetto relativo alla diga di Bomba:

- il movimento franoso (soliflusso superficiale) che insiste sulla spalla destra della diga (R1 da PAI) è stato considerato nel piano di monitoraggio AceaElectrabel: sono stati previsti infatti un caposaldo GPS (CS OLMO) e una stazione microsismica (OLMO) sul corpo cartografato

Considerata l'ubicazione delle opere previste in rapporto alle zone a rischio di frana così come classificate dal PAI, considerate le eventuali modifiche che potranno risultare a seguito della procedura di VIA in atto, e considerata la stretta relazione fra franosità (sismo-indotta o meno) e condizioni idrogeologiche, si ritiene che la formulazione di scenari di pericolosità per franosità sismo-indotta (vedasi fra gli altri Romeo, 2005), potrà essere effettuata, per le aree interessate dagli interventi previsti, in fase di progettazione esecutiva, ad esempio in occasione della redazione dello Studio di compatibilità idrogeologica.

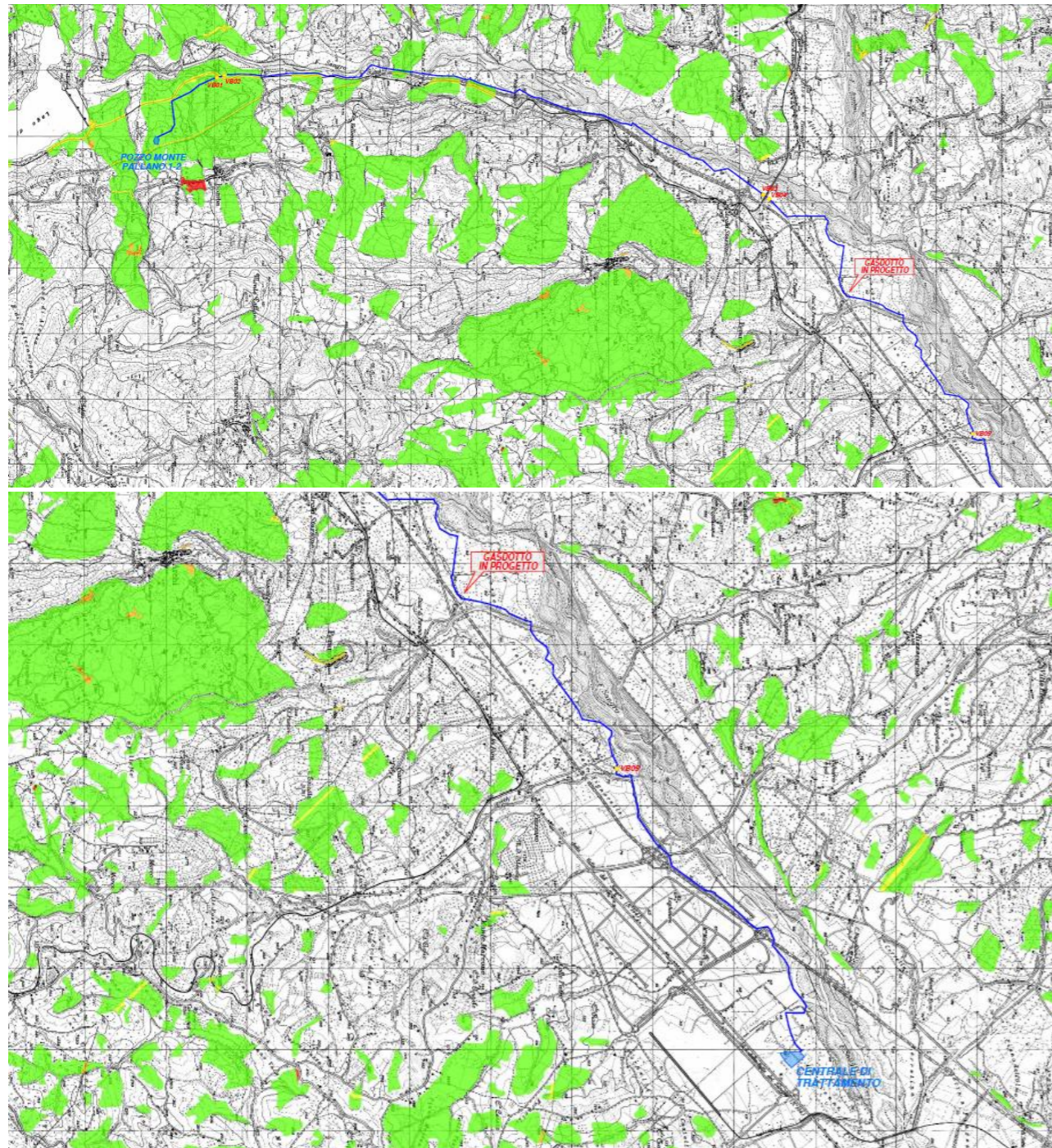


Fig. 5.10 - Stralcio della Tav. 015-PG-1013-PAI_Carta_del_Rischio_da_Frana, allegata al SIA

CLASSI DI RISCHIO

- R1 Rischio Moderato**
per il quale i danni sociali ed economici sono marginali.
- R2 Rischio Medio**
per il quale sono possibili danni minori agli edifici e alle infrastrutture che non pregiudicano l'incolumità delle persone, l'agibilità degli edifici e la funzionalità delle attività economiche.
- R3 Rischio Elevato**
per il quale sono possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture con conseguente inagibilità degli stessi, l'interruzione di funzionalità delle attività socio-economiche.
- R4 Rischio Molto Elevato**
per il quale sono possibili la perdita delle vite umane e lesioni gravi agli edifici e alle infrastrutture, la distruzione di attività socio-economiche.

-  CASDOTTO IN PROGETTO
-  CAMERETTA DI INTERCETTAZIONE

SCALA 1:25.000
0 200 500 1000 1500 2000 METRI



5.5. Conclusioni

Se da una parte sarà assolutamente necessario attenersi a quanto previsto dalle citate Linee Guida del MiSE e dalle possibili successive modifiche e implementazioni, dall'altra si ritiene che lo stato attuale di conoscenze e di progettazione definitiva presentati nella diversa documentazione allegata alla Istanza di VIA (e nella successiva documentazione integrativa) siano sufficienti per definire un quadro esaustivo della sismicità dell'area e delle problematiche connesse alla realizzazione delle opere previste, che serviranno di base, con tutte le eventuali prescrizioni che potranno scaturire, alla successiva progettazione esecutiva. In tale contesto si inserisce anche la redazione della relazione sismica sulle strutture, della relazione geotecnica, del piano di indagine per la valutazione dei fenomeni di liquefazione, dello studio di compatibilità idrogeologica. Inoltre, integrando quanto riportato anche nel Cap. 4.3.2 e nel Cap. 4.3.5 del presente Rapporto:

- AceaElectrabel, gestore della diga, e il Ministero delle Infrastrutture hanno ritenuto accettabile la previsione di subsidenza di ForestCMI (Marr&Jamiolowski), ben conoscendo che la diga insiste in una zona classificata come sismica; è quindi più che plausibile concludere che entrambi gli Enti abbiano implicitamente ritenuto che le deformazioni attese non avrebbero avuto alcun effetto peggiorativo sulla diga in termini di capacità di superare l'evento sismico di progetto
- Sulla base di quanto riportato da AceaElectrabel, pur senza conoscerne la definizione dei parametri di input utilizzati per la relativa modellazione, le distorsioni angolari attese nel caso più cautelativo risulterebbero pari allo 0.44% (circa 1/225) delle distorsioni angolari ammissibili per la diga (caso "conservativo" in All. 14), dove per deformazione ammissibile si deve intendere quella deformazione che mantiene inalterate le capacità strutturali di un'opera, in termini tanto "statici" che "dinamici"
- Alla luce anche delle considerazioni di carattere idrogeologico riportate in questa relazione, riferite all'azione dell'acquifero, il valore massimo atteso di distorsione angolare durante tutti i 15 anni di produzione risulterebbe pari a 0.05% (circa 1/2000) dell'ammissibile (caso realistico del modello previsione Dream in Allegato 14)
- Sulla base della documentazione presentata e degli studi effettuati dagli specialisti coinvolti e dal gestore della diga, ne sembra conseguire quindi che le distorsioni angolari attese risultano di alcuni ordini di grandezza inferiori rispetto ai valori in gioco nell'ambito delle verifiche strutturali, tanto da non incidere sull'esito delle stesse, analogamente a quanto riscontrato per le analisi effettuate sui corpi franosi

In ogni caso, si suggerisce che in fase di progettazione esecutiva vengano aggiornate, di concerto con il gestore della diga, le verifiche sismiche dettate dalla norma e vengano aggiornati i conseguenti scenari di deformazione.

6. Sintesi degli impegni assunti da CMI

Di seguito vengono richiamati gli impegni già assunti da CMI e dichiarati nella documentazione allegata al SIA e in quella integrativa, relativamente alle componenti ambientali Suolo, Sottosuolo, Ambiente Idrico.

Suolo

- Indagini geognostiche finalizzate all'ottenimento della Compatibilità idrogeologica da parte dell'Autorità di Bacino, per il gasdotto di collegamento (*ante operam*)
- Indagini geognostiche lungo il tracciato della condotta finalizzate alla caratterizzazione dello stato di addensamento degli eventuali depositi incoerenti attraversati e le caratteristiche sismiche degli stessi, per verificare la suscettibilità alla liquefazione (*ante operam*)
- Indagini geologiche e geognostiche in area centrale di trattamento per la verifica del quadro geostratigrafico e per la definizione del quadro geotecnico parametrico locale e sismico sito-specifico, come previsto dalle Norme Tecniche di Costruzione (*ante operam*)
- Campionamenti ed analisi chimiche secondo "Piano preliminare di utilizzo in sito delle terre erocce da scavo escluse dalla disciplina dei rifiuti" (*ante operam*)
 - 41 punti di campionamento lungo il gasdotto (uno ogni 500m), 11 punti di campionamento in area centrale di trattamento
- Campionamento terreno vegetale movimentato durante posa del gasdotto, su parcelle 20x20m, per verifica mantenimento fertilità suoli (*ante operam, durante esercizio*)

Subsidenza e microsismicità

- Implementazione piano di monitoraggio della subsidenza e della microsismicità redatto da AceaElectrabel e approvato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (Dic 2010), con attivazione del monitoraggio almeno un anno prima dell'inizio della produzione (*ante operam, durante esercizio*)
 - Approfondimento fondazioni 9 stazioni GPS esistenti
 - Installazione 7 nuove stazioni GPS
 - Installazione 8 stazioni microsismiche
 - Monitoraggio movimenti suolo con tecnologia SAR
- Installazione di un assestmetro in area pozzi (*ante operam*)
- Predisposizione, a cura della SPM (Struttura Preposta al Monitoraggio) incaricata, del Piano di monitoraggio conforme al documento "Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche" redatto dal Gruppo di lavoro istituito con delibera 27-2-2014 del Presidente della Commissione per gli Idrocarburi e per le Risorse Minerarie (CIRM) (*ante operam*).
- Implementazione del Piano di Monitoraggio della SPM e attivazione del monitoraggio almeno un anno prima dell'inizio della produzione (*ante operam e durante esercizio*)
- Misurazione pressioni di giacimento a fondo pozzo con cadenza annuale (*durante esercizio*)

Ambiente idrico

- Realizzazione di 3 piezometri "bis" in area pozzi, in adiacenza ai precedenti ostruiti, per campionare acque sotterranee superficiali e profonde (*ante operam*)
- Realizzazione di 2 nuovi piezometri in area pozzi (*ante operam*)

- Installazione di 4 sonde multiparametriche per monitoraggio in continuo in area pozzi (*ante operam*)
- Realizzazione di 2 piezometri in area centrale di trattamento, attrezzati con sonde multiparametriche per monitoraggio in continuo (*ante operam, durante esercizio*)
- Realizzazione di una maglia di piezometri in area centrale per ricostruire superficie falda
- Prelievi ed analisi annuali qualità acque sotterranee in area pozzi e centrale di trattamento (*ante operam, durante esercizio, post operam*)
- Indagini e analisi finalizzate all'ottenimento della Compatibilità idraulica da parte dell'Autorità di Bacino, per il gasdotto di collegamento (*ante operam*)

7. Bibliografia

- Balocchi P. (2016). *Sismicità indotta in Italia e l'esempio della Val D'Agri*. Sapere.2016.06.3
- Forest. (2007) - *Monte Pallano" Field – Well testing interpretation (wells MP1 & MP2) & development hypothesis*. Dataset CMI
- Bello G. (2008) – *“Monte Pallano” Field - 3D Reservoir Simulation Study prepared for Forest Oil*. Dataset CMI
- Bigi S., Calamita F., Corrado S. (2003) - *Assetto strutturale dell'Appennino centrale esterno*. In: Crescenti, U., Miccadei, E., Praturlon A. (eds.), *Guide Geologiche Regionali, Abruzzo, 10*, 30-40. A cura della Società Geologica italiana. BE-MA editrice
- Boni C., Bono P., Capelli G. (1986) *Schema idrogeologico dell'Italia centrale*. Mem. Soc. Geol. It., 35 (2)
- Caciagli, M., R. Camassi, S. Danesi, S. Pondrelli, and S. Salimbeni (2015) -*Can We Consider the 1951 Caviaga (Northern Italy) Earthquakes as Noninduced Events?*, Seismol. Res. Lett. 86 1335-1344
- Calamita F., Esetime P., Paltrinieri W., Scisciani V., Tavarnelli E. (2009) -*Structural inheritance of pre- and syn-orogenic normal faults on the arcuate geometry of Pliocene-Quaternary thrusts : Examples from the Central and Southern Apennine Chain*. Ital. J. Geosci. (Bollettino della Soc. Geol. Ital.) 128, 381–394
- Calamita F., Satolli S., Scisciani V., Esetime P., Pace P. (2011) -*Contrasting styles of fault reactivation in curved orogenic belts: Examples from the central Apennines (Italy)*. Bull. Geol. Soc. Am. 123, 1097–1111
- Calamita F., Scisciani V., Montefalcone R., Paltrinieri W. & Pizzi A. (2002) - *L'ereditarietà del paleomargine di Adria nella geometria del sistema orogenico centro-appenninico: l'area abruzzese esterna*. Mem. Soc. Geol. It., 57, 355-368
- Celico P. (1986) *Prospezioni idrogeologiche Vo.1*. Liguori Editore
- Celico P. (1983) - *Idrogeologia dell'Italia centro meridionale*. Quaderni della Cassa per il Mezzogiorno 4 (2)
- Civita M. (2005) *Idrogeologia applicata e ambientale*. Casa Editrice Ambrosiana
- Corrado S., Di Bucci D., Naso G., Faccenna C. (1998) - *Influence of paleogeography on thrust system geometries: an analogue modelling approach for the Abruzzi-Molise (Italy) case history*. Tectonophysics, 296, 437-453
- Di Bucci D., Corrado S., Naso G., Parotto M., Praturlon A. (1999) - *Evoluzione tettonica neogenico-quadernaria dell'area molisana*. Bollettino della Società Geologica Italiana, 118, 13-30
- Di Luzio E., Mele G., Tiberti M.M., Cavinato G.P., Parotto M. (2009) - *Moho deepening and shallow upper crustal delamination beneath the central Apennines*. Earth Planet. Sci. Lett. 280, 1–12
- Del Ben A., Oggioni F. (2016) -*Seismic evidence of the rebound of the Adria foreland and the current geodynamics of the Central and Southern Apennines (Italy)*. J. Geodyn. 99, 51–63
- ENI (1962) - *Enciclopedia del petrolio e del gas naturale*. Vol. ab.–but. Colombo Roma
- Festa A., Accotto C., Coscarelli F., Malerb, E., Palazzin G. (2014) - *Geology of the Aventino River Valley (eastern Majella, central Italy)*. J. Maps 10, 584–599

Foulger G.R., Wilson M.P., Gluyas J.G., Julian B.R., Davies R.J. (2018) - *Global review of human-induced earthquakes*. Earth-Science Reviews, Volume 178, March 2018, 438-514. Elsevier

Funciello R., Mattei M., Capelli G., Corrado S., Mazza R., Storti F. (2008) – *Geologia regionale e idrogeologia dell'area Maiella-Bomba*. Relazione per Geocomp Corp. Univ. Roma TRE

Ghissetti F., Vezzani L. (2002) - *Normal faulting, extension and uplift in the outer thrust belt of the central Apennines (Italy): role of the Caramanico fault*. Basin Res., 14, 2, 225-236

Giani G.P., Gotta A., Marzano F., Rocca V. (2017) - *How to Address Subsidence Evaluation for a Fractured Carbonate Gas Reservoir Through a Multi-disciplinary Approach*. Geotech. Geol. Eng. 35, 2977–2989

ISPRA (2014) - *Rapporto sullo stato delle conoscenze riguardo alle possibili relazioni tra attività antropiche e sismicità indotta/innescata in Italia*. http://www.isprambiente.gov.it/files/notizie-ispra/notizia-2014/rapporto-sismicita-indotta-innescata-in-italia/Rapporto_sismicita_indotta_innescata_in_italia.pdf

Lavecchia G., de Nardis R. (2009) - UR 4.01 S1-29 *Seismogenic sources of major earthquakes of the Maiella area (central Italy): constraints from macroseismic field simulations and regional seismotectonics*. Convegno annuale dei progetti sismologici, Convenzione-Quadro tra Dipartimento della Protezione Civile e Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Triennio 2007-09, 19-21 October 2009, Rome, Italy

Lavecchia G., de Nardis R., Burrato P., Fracassi U. (2010) - *DISS 3.1.1: Seismogenic Source ITCS079 - Shallow Abruzzo Citeriore Basal Thrust*. INGV-DISS version 3. <http://diss.rm.ingv.it/dissHTML/ITCS079INF.html>

McGarr A., Simpson D., Seeber L. (2002) - *40 case histories of induced and triggered seismicity*. International Geophysics, 81A, pp. 647-661

MiSE (2014) - *Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche*. http://unmig.mise.gov.it/unmig/agenda/upload/85_238.pdf

Nanni T., Rusi S. (2003) - *Idrogeologia del massiccio carbonatico della montagna della Majella (Appennino centrale)*. Boll. Soc. Geol. It., 122

National Research Council, Committee on Induced Seismicity Potential in Energy Technologies (2013) – *Induced Seismicity Potential in Energy Technologies*. The National Academy

Patacca E., Scandone P. (2007) - *Geology of the Southern Apennines*. Boll. della Soc. Geol. Ital. Vol. Spec. 7, 75–119

Patacca E., Scandone P., Di Luzio E., Cavinato G.P., Parotto M. (2008) - *Structural architecture of the central Apennines: Interpretation of the CROP 11 seismic profile from the Adriatic coast to the orographic divide*. Tectonics 27

Richard-Nguyen Van Cu C. (1961) - *Relation entre la resistivité d'une eau et son taux de mineralisation*. L'eau, 1 pp 22-24

Romeo R.W. (2005) - *Scenari di pericolosità da frane sismoindotte*. Giornale di Geologia Applicata 2, 123-128

Satolli S., Pace P., Viandante M.G., Calamita F. (2014) - *Lateral variations in tectonic style across cross strike discontinuities: An example from the central Apennines belt (Italy)*. Int. J. Earth Sci. 103, 2301–2313

Scisciani V., Calamita F., Bigi S., De Girolamo C. & Paltrinieri W. (2000) - *The influence of syn-orogenic normal faults on Pliocene thrust system development: the Maiella structure (Central Apennines, Italy)*. Mem. Soc. Geol. It., 55, 193-204

Scrocca D. (2014) – *Giacimenti di idrocarburi e sismicità stimolata in Appennino settentrionale*. Atti Workshop “Idrocarburi e sismicità in Italia”, Roma, 12 novembre 2014. A cura di Società Geologica Italiana e Assomineraria

Tiberti M.M., Orlando L. (2006) - *2D gravity modelling along the CROP11 seismic profile*. Boll. di Geofis. Teor. ed Appl. 47, 447–454

Vezzani L., Ghisetti F., Festa A. (2002) - *Carta Geologica del Molise (scala 1:100.000) - Note Illustrative*. Litografia Geda. Nichelino (TO)