



Engineering
Management
Contracting

ENGEA
CONSULTING

ISAMGEO



RELAZIONE RELATIVA ALLA PREDISPOSIZIONE DEL MODELLO STATICO

Appendice H Parte 1 del SIA

IMPIANTO SMALL SCALE LNG PLANT

Collesanto gas field

-	01	28/11/2023	EMISSIONE PER ENTI	ISAMGEO	ITF Cosmep	ITF Cosmep
-	00	10/11/2023	EMISSIONE PER ENTI	ISAMGEO	ITF Cosmep	ITF Cosmep
Status	Rev. n.	Data	Descrizione	Elaborato	Verificato	Approvato

INDICE

1. Sintesi non tecnica	3
2. Introduzione.....	6
3. Modello geologico regionale.....	9
3.1. Descrizione dei modelli di riferimento.....	10
3.1.1. Patacca et al. 2008	10
3.1.2. Calamita et al. 2009.....	13
3.2. Confronto dei modelli	15
3.3. Modello adottato per la caratterizzazione statica del giacimento.....	17
4. Modello 3D di giacimento	19
4.1. Dati utilizzati	19
4.2. Modello strutturale e stratigrafico	22
4.3. Modello petrofisico	29
4.4. Contatto gas-acqua	35
4.5. Calcolo volumi in posto.....	36
5. Conclusioni.....	37
Bibliografia.....	39

1. Sintesi non tecnica

Il campo di Colle Santo, situato all'interno dell'omonima istanza di concessione, nel comune di Bomba (CH) in Abruzzo, è stato scoperto da Agip nel 1966 attraverso la perforazione del pozzo esplorativo Bomba 1, seguito da altri pozzi per verificarne l'estensione areale. Il giacimento non era stato messo in produzione e tutti i pozzi realizzati abbandonati minerariamente.

A partire dal 2007 il campo è stato oggetto di nuove attività. In particolare, sono stati perforati due nuovi pozzi da parte della società Forest CMI S.p.A., denominati Monte Pallano 1dir (MP 1dir) e Monte Pallano 2dir (MP 2dir). I pozzi sono stati oggetto di una fase di valutazione, che ha confermato la presenza di gas e la capacità produttiva. A seguito della fase di testing i pozzi sono stati sospesi. LNEnergy Srl (già Forest CMI S.p.A. e già CMI Energia srl) ha in programma di riprendere le attività per la messa in produzione del giacimento di Colle Santo, da realizzarsi esclusivamente attraverso i due pozzi già esistenti (MP 1dir e MP 2dir).

Questo documento descrive la costruzione del modello statico del giacimento, sviluppato su richiesta di LNEnergy Srl ed avente diverse finalità: valutare le risorse disponibili, il potenziale produttivo del campo e soprattutto l'impatto che la produzione di gas avrà sulle formazioni geologiche profonde, con particolare attenzione per le tematiche di subsidenza e stabilità delle faglie. Il modello statico qui descritto costituisce dunque la base per il successivo modello fluido-dinamico (finalizzato a simulare la variazione di pressione dei pori nel giacimento e negli acquiferi ad esso collegati a seguito della produzione di gas) e del modello geomeccanico, che servirà a studiare la variazione dello stato tenso-deformativo del sottosuolo, visto che la Sottocommissione VIA nel parere 601 aveva già richiesto espressamente:

Caratterizzazione delle relazioni tra il giacimento di gas, l'acquifero presente nell'area e il loro comportamento simulato in funzione di vari scenari di produzione, con stima della associata subsidenza e dei meccanismi di ripressurizzazione potenziali (Parere CT VIA n. 601 del 14 novembre 2022 – Pag. 29)

Il modello statico di giacimento è stato costruito a partire dai dati esistenti all'interno dell'istanza di concessione Colle Santo, ed esteso arealmente fino a coprire una superficie di 24x24 km² ed in profondità fino a circa 11 km. Sono stati utilizzati tutti i dati dei pozzi perforati disponibili, comprese le informazioni pubbliche sui titoli minerari cessati all'interno dell'area di interesse estesa, reperiti dal sito del progetto ViDEPI. La maggior parte dei pozzi esistenti nell'area sono stati oggetto di chiusura mineraria con conseguente ripristino dello stato dei luoghi, e oggi non sono più accessibili. Il volume considerato, particolarmente esteso rispetto alle dimensioni del giacimento, consente da un lato di avere una visione tridimensionale completa delle strutture geologiche di maggior interesse, e dall'altro di evitare effetti di bordo nella modellistica numerica, in particolare per quanto riguarda l'effetto degli acquiferi profondi e l'estensione laterale del disturbo del campo di sforzo.

La costruzione del modello statico si compone di quattro fasi sequenziali, che rispettivamente conducono a:

1. Modello strutturale
2. Modello stratigrafico
3. Modello petrofisico
4. Calcolo dei volumi di gas in posto

I primi due step sono stati eseguiti partendo inizialmente dalla revisione di un'ampia bibliografica inerente all'inquadramento geologico-strutturale dell'area di studio. Questa revisione ha permesso di individuare due modelli teorici di riferimento, che sono stati analizzati in dettaglio, al fine di realizzare un modello statico digitale coerente con entrambi i modelli teorici.

Il modello stratigrafico (step 2) è stato definito a partire dalla mappa del top dei carbonati miocenici (all'interno dei quali si trova il giacimento) interpretato da AGIP nel 1989 sulla base di circa 40 linee sismiche 2D. I dati originali non sono più disponibili e si è dunque dovuto utilizzare l'interpretazione esistente, che comunque appare affidabile e coerente con le altre informazioni disponibili. La superficie geologica costruita a partire dalla sismica è stata poi estesa lateralmente (fino a coprire l'area di 24x24 km²) grazie alle informazioni ricavate dai pozzi perforati in passato ed ora abbandonati. Questa attività ha permesso anche di ricostruire tutte le altre superfici chiave per la definizione finale della successione stratigrafica di interesse, permettendo di estendere ad una profondità totale di 10 km sotto il livello del mare il modello digitale tridimensionale.

Con il terzo step, il modello petrofisico, i parametri petrofisici della roccia serbatoio sono stati distribuiti all'interno del giacimento partendo dai dati di pozzo. L'attenzione è stata in particolar modo concentrata sulla distribuzione della porosità efficace, parametro chiave per la definizione della permeabilità nel modello dinamico, e per l'impatto che questa caratterizzazione avrà sulla propagazione della depressurizzazione nell'acquifero a seguito della produzione di gas, con profonde implicazioni per la valutazione del rischio di subsidenza. Sono state riviste con attenzione le analisi petrofisiche precedenti, i profili e i log dei pozzi all'interno dell'area mineralizzata e le relative descrizioni e analisi delle carote prelevate, per permettere una caratterizzazione adeguata dell'intera sequenza attraversata dai pozzi. Tutti questi dati sono stati integrati per la definizione della distribuzione della porosità all'interno del giacimento. Sono stati creati due casi di riferimento: un caso base utilizzando una distribuzione con metodologia geostatistica classica, ed un caso cautelativo che, sempre su base geostatistica, simula un aumento della fratturazione (porosità secondaria) vicino a faglie e piegamenti (anticlinali), che si traduce in definitiva in una distribuzione maggiore di valori elevati di porosità efficace in queste zone. È considerato un caso cautelativo perché zone a maggior porosità avranno una significativa influenza nella fase di modellizzazione dei fenomeni geodinamici profondi collegati alla produzione. Questa caratterizzazione petrofisica del giacimento segue il parere 601 della Sottocommissione VIA, che ha richiesto espressamente:

Caratterizzazione petrofisica del giacimento con dati aggiornati e valutazione delle incertezze correlate su base statistica, con dati riproducibili, come evidenziato nel parere CTVA incluso nel DM_2021_0000406. (Parere CTVA n. 601 del 14 novembre 2022 – Pag. 29)

L'ultima fase dello studio ha comportato il calcolo del gas in posto (in genere riportato tramite l'acronimo GOIP, *Gas Originally In Place*), i cui risultati si sono rivelati in perfetta linea con tutte le stime passate effettuate da varie società di analisi indipendenti, dimostrando la validità e la robustezza della metodologia utilizzata nel presente studio.

2. Introduzione

L'area di studio e di modello si concentra sul campo di gas naturale di Colle Santo, un'importante risorsa energetica situata all'interno dell'omonima istanza di concessione, nel comune di Bomba, nella provincia di Chieti, in Abruzzo (**Figura 1**).

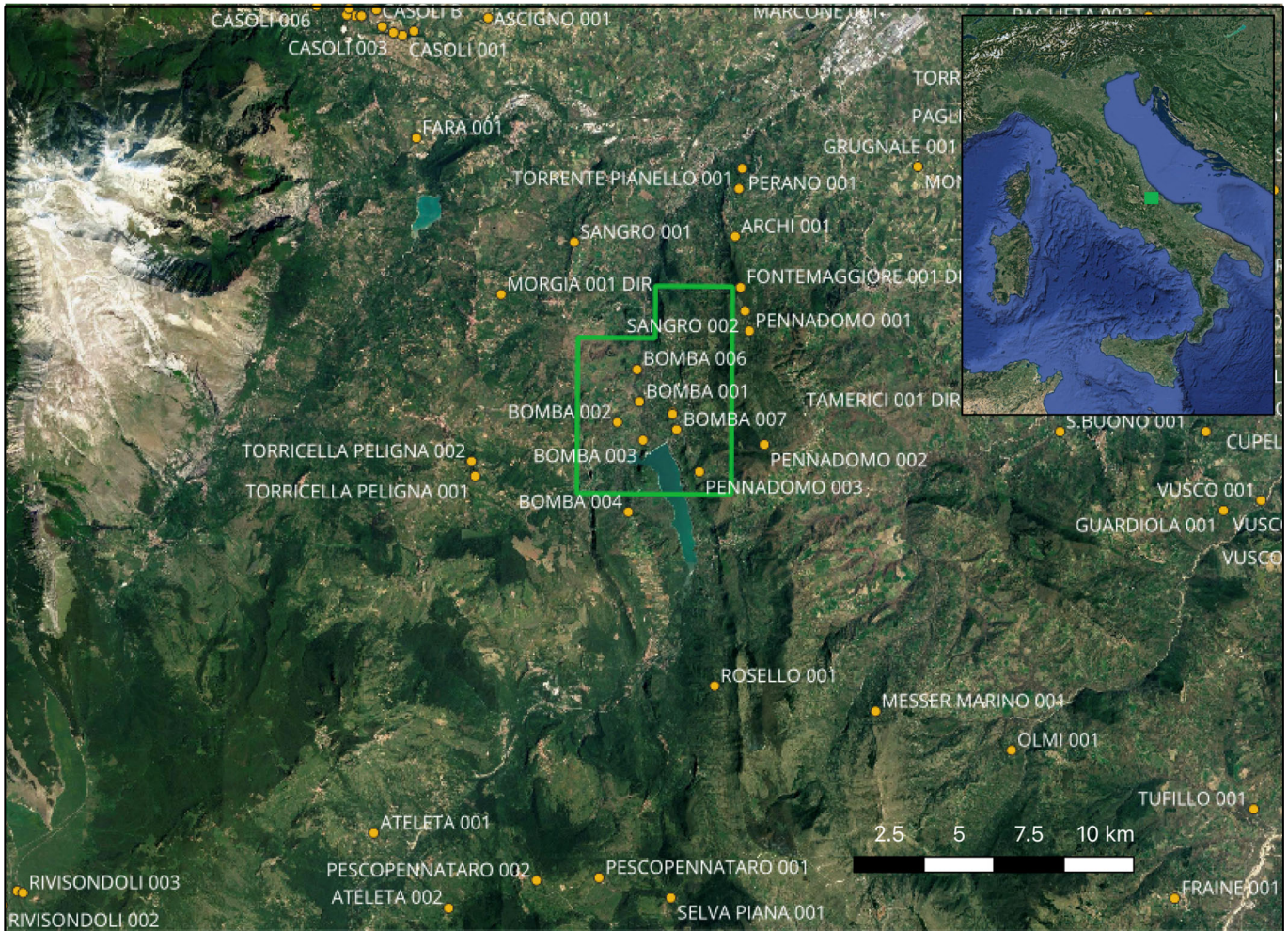


Figura 1: istanza di concessione di coltivazione in terraferma di Colle Santo. I pozzi indicati risultano chiusi minerariamente e le aree minerarie già ripristinate in superficie.

Le caratteristiche geologiche, note in letteratura e che fanno riferimento allo studio geologico in atto, rendono il campo di Colle Santo un'importante risorsa di gas naturale.

Il campo è stato scoperto come giacimento di Bomba da Agip nel 1966 attraverso la perforazione del pozzo esplorativo Bomba 1. I pozzi Bomba 2, Bomba 3 e Bomba 7, perforati negli anni immediatamente successivi, hanno confermato la presenza di gas naturale, composto principalmente da metano (69%) e azoto (22%) con quantità non trascurabili di H₂S. Il giacimento è costituito da calcari che appartengono alla Formazione Bolognano del Miocene superiore e alle unità carbonatiche sottostanti del Cretaceo,

denominate carbonati di Monte Acuto o di Cupello (a seconda del pozzo che le ha attraversate). Il campo non è mai stato messo in produzione e tutti i pozzi perforati da Agip sono stati chiusi e abbandonati minerariamente.

Forest CMI S.p.A. nel 2007 ha ripreso il progetto perforando e testando due pozzi direzionati, Monte Pallano 1dir (MP 1dir) e Monte Pallano 2dir (MP 2dir). I test eseguiti hanno confermato la presenza di gas e la sua produttività. Entrambi i pozzi, sospesi dopo la fase di test, risultano attualmente accessibili.

CMI Energia Srl, dal luglio 2023 LNEnergy Srl, subentrata nel 2015 alla società Forest CMI S.p.A., ha in programma di mettere in produzione il giacimento di Colle Santo con un nuovo progetto di sviluppo. Lo scenario di sviluppo considera la messa in produzione del campo tramite i due pozzi esistenti Monte Pallano 1dir (MP 1dir) e Monte Pallano 2dir (MP 2dir), per la produzione di LNG (gas naturale liquefatto) con la tecnologia dello Small Scale.

Per la valutazione delle risorse di gas e per le successive analisi dinamiche e geomeccaniche sugli impatti della produzione e dello sfruttamento del campo, è stato costruito un modello statico di giacimento, che si estende su un'area di 24x24 km² (**Figura 2**), per coprire quelle che potranno essere le estensioni dei domini di rilevazione per la configurazione del monitoraggio microsismico, secondo le indicazioni contenute nel documento tecnico "Indirizzi e Linee-guida per i monitoraggi" pubblicato dal MiSE nel mese di novembre 2014.

Come prima cosa è stata analizzata un'ampia bibliografia per definire il quadro geologico-strutturale regionale su cui costruire il modello strutturale, primo step del modello statico di giacimento.

In seguito sono stati raccolti, analizzati, e integrati nel modello tutti i dati disponibili sul giacimento e quelli pubblici (dati di pozzo e report dei titoli minerari cessati disponibili all'interno del progetto ViDEPI). Questo ha permesso di definire il modello stratigrafico e di estendere le superfici principali del modello al di fuori dell'area della istanza di concessione.

Sono state poi riviste le analisi petrofisiche precedenti ed integrate all'interno del modello per definire arealmente le proprietà fisiche del giacimento. È stato anche definito un caso in cui la porosità possa seguire un trend in funzione di faglie e pieghe anticlinaliche, in modo da simulare una variazione nel grado di fratturazione del reservoir all'interno della struttura. Tutto ciò servirà poi come caso conservativo nella modellizzazione geomeccanica del giacimento, per cercare di prevedere il comportamento della subsidenza con un livello di fratturazione maggiore di quello finora interpretato con i dati disponibili.

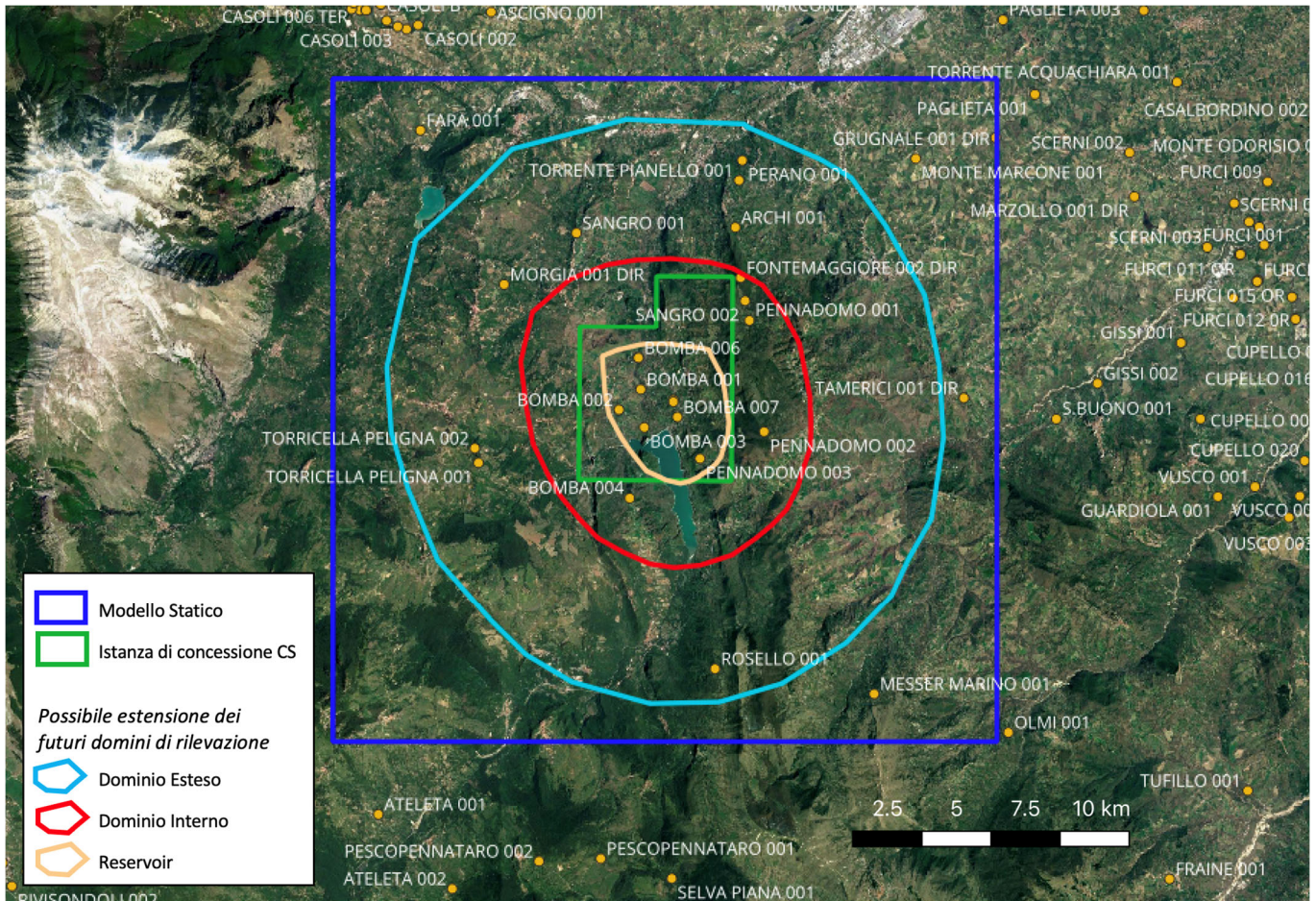


Figura 2: area del modello statico di giacimento (in blu scuro) in relazione alla ipotetica estensione dei vari domini di rilevazione. I punti arancioni sono i pozzi esistenti (da progetto ViDEPI), che risultano chiusi minerariamente e le aree minerarie già ripristinate in superficie.

3. Modello geologico regionale

I modelli geologico-strutturali della struttura di Casoli-Bomba proposti in letteratura da vari autori differiscono principalmente per cinematica e stile deformativo delle strutture più profonde. La scarsa qualità dei dati di sottosuolo porta a diverse e contrastanti possibilità di interpretazione. Tuttavia, i lavori scientifici ritenuti più esemplificativi e completi per un'interpretazione geologico strutturale dell'area sono essenzialmente quelli di Patacca et al. (2008) e Calamita et al. (2009; 2011), in seguito indicati all'occorrenza anche come modello di Patacca e modello di Calamita. Gli altri lavori scientifici (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) propongono modelli che, rispetto a quelli di Patacca e di Calamita, non mostrano differenze significative e non forniscono dati di maggiore dettaglio per caratterizzare la struttura di Casoli-Bomba a scala del giacimento o di quello che sarà il modello statico/dinamico/geomeccanico (un'area estesa di 24x24 km², e profonda 10km)

I due modelli di riferimento possono essere sintetizzati nel modo seguente:

1. Il modello geologico strutturale, elaborato da Patacca et al. 2008, si basa sull'interpretazione della porzione orientale della linea sismica CROP 11, che attraversa gli Appennini centrali dalla Piana del Fucino alla costa Adriatica. Il modello propone uno stile tettonico "thin-skin", in cui una spessa sequenza sedimentaria paleozoica-triassica, interpretata come la copertura del basamento cristallino precambriano, è stata staccata dal basamento originario e incorporata nel cuneo orogenico post-tortoniano. Il modello suggerisce anche che il bacino del Fucino e altre depressioni intramontane siano controllati da processi di collasso gravitativo indotti dal sollevamento durante l'accorciamento crostale, piuttosto che da una estensione generalizzata successiva alla compressione appenninica.

La struttura di Casoli-Bomba è una anticlinale asimmetrica, con un fianco occidentale più ripido e un fianco orientale più dolce. Le formazioni coinvolte sono costituite da carbonati di piattaforma e di bacino mesozoico-terziari, sovrastati da evaporiti e marne messiniane e da flysch silicoclastici pliocenici. La struttura è stata interpretata come il risultato di una propagazione fuori sequenza dei sovrascorrimenti attivi durante il Plio-Pleistocene (Patacca et al., 2008).

2. Il modello geologico strutturale della catena appenninica centrale e meridionale, elaborato da Calamita et al. 2009, mette in evidenza il ruolo fondamentale delle faglie normali pre- e sin-orogeniche. Queste faglie si sono sviluppate durante il rifting mesozoico e la flessurazione neogenica dell'avampaese, influenzando significativamente lo sviluppo dei sovrascorrimenti plio-quadernari e delle pieghe associate. Il modello propone un meccanismo di tettonica d'inversione, un processo in cui i sovrascorrimenti seguono una traiettoria di short-cut attraverso le faglie normali, ereditandone il pattern e la geometria. Questo meccanismo di inversione strutturale è ben illustrato dalla struttura di Casoli-Bomba. In questa regione, una faglia normale pre-orogenica, immergente verso ovest, è stata ruotata e riattivata come sovrascorrimento cieco ad alto angolo.

Questo processo ha controllato lo sviluppo di una piega a scatola, evidenziando l'importanza dell'eredità strutturale nel modellare la tettonica attuale (Calamita et al., 2009).

3.1. Descrizione dei modelli di riferimento

3.1.1. Patacca et al. 2008

Il modello geologico strutturale degli Appennini centrali, come descritto da Patacca et al. 2008, è un'interpretazione dettagliata basata sulla porzione orientale della linea sismica CROP 11. Questa linea attraversa la catena montuosa dall'Adriatico al Tirreno, fornendo una vista unica delle strutture sotterranee. Questa interpretazione è il risultato di un'analisi approfondita dei dati sismici, stratigrafici e strutturali disponibili, che ha permesso di delineare un quadro geologico complesso e dettagliato della regione.

Il modello si concentra sulle unità tettoniche coinvolte nel trasporto orogenico post-Tortoniano. Questo periodo segue l'apertura del bacino tirrenico, un evento che ha avuto un impatto significativo sulla geologia della regione. L'apertura del bacino tirrenico ha portato a una serie di cambiamenti geologici, tra cui la formazione di nuove strutture tettoniche e la riattivazione di strutture preesistenti. Una caratteristica chiave del modello è l'integrazione delle informazioni sismiche con i dati stratigrafici e strutturali. Questi dati provengono da linee commerciali e pozzi esplorativi nella zona di studio. Questa integrazione permette una comprensione più completa delle strutture geologiche presenti. Inoltre, l'uso di dati provenienti da diverse fonti aumenta la robustezza del modello, permettendo di confrontare e verificare le interpretazioni.

Il modello riconosce l'esistenza di una spessa sequenza sedimentaria di età Paleozoico-Triassica. Questa sequenza costituisce la base della Piattaforma Apula e rappresenta l'unità più profonda incorporata nel sistema di sovrascorrimento. Il modello suggerisce uno stile tettonico thin-skin. Questo implica il distacco dalla base cristallina e l'incorporazione nel cuneo orogenico di una spessa sequenza Paleozoico-Triassica. Questa sequenza è possibilmente interessata da metamorfismo di basso grado nella parte inferiore.

Quindi, il modello discute la migrazione spazio-temporale dei depositi di flysch silicoclastici e il contemporaneo sviluppo del bacino tirrenico in posizione retroarco. Questi fenomeni sono correlati al rollback della litosfera adriatica in subduzione. Questo processo ha portato all'incorporazione nella cintura di sovrascorrimento di segmenti di avampaese progressivamente più esterni, che hanno subito un trasporto orogenico verso est e nordest. Lungo il tracciato della linea CROP 11, l'accorciamento tettonico ha raggiunto la regione del Fucino nel Messiniano inferiore e le aree più esterne a est della Majella (Alto di Casoli-Bomba) nel Pleistocene inferiore. Il modello fornisce anche prove di una compressione ancora attiva negli Appennini centrali/settentrionali con persistente subduzione della litosfera adriatica sotto la catena montuosa. Queste prove provengono dalle soluzioni di piano di faglia dei terremoti crostali e dalla distribuzione degli ipocentri dei terremoti subcrostali.

La struttura dell'area, secondo il modello, è caratterizzata da una serie di unità tettoniche sovrapposte che si sono formate in tempi diversi tra il Tortoniano e il Pleistocene inferiore (**Figura 3**). Queste unità sono:

1. **L'Unità Gran Sasso-Genzana:** costituita da carbonati di piattaforma e di pendio del Triassico superiore-Cretaceo inferiore e del Paleogene, seguiti, localmente in disconformità, da carbonati di rampa aperta del Miocene, e da flysch silicoclastici del Messiniano.
2. **L'Unità Morrone-Porrara:** costituita da carbonati di piattaforma e di pendio del Giurassico-Cretaceo superiore e del Paleogene, seguiti da carbonati di rampa aperta del Miocene, e da flysch silicoclastici del Messiniano.
3. **L'Unità Molise:** costituita da carbonati di bacino del Giurassico/Cretaceo inferiore al Tortoniano, e da flysch silicoclastici del Tortoniano superiore-Messiniano.
4. **L'Unità Majella:** costituita da carbonati di piattaforma e di bacino del Cretaceo inferiore-Paleogene, seguiti da carbonati di rampa aperta e da evaporiti del Miocene e da marne del Messiniano, e infine da flysch silicoclastici del Pliocene inferiore.
5. **L'Unità Queglia:** costituita da carbonati di bacino del Cretaceo superiore-Paleogene, seguiti da carbonati di rampa aperta e da evaporiti del Miocene, e da flysch silicoclastici del Messiniano-Pliocene inferiore.
6. **L'Unità Casoli:** costituita da argille marnose del Pliocene inferiore, che rappresenta il tetto dell'anticlinale e il riempimento di una depressione sinclinale.

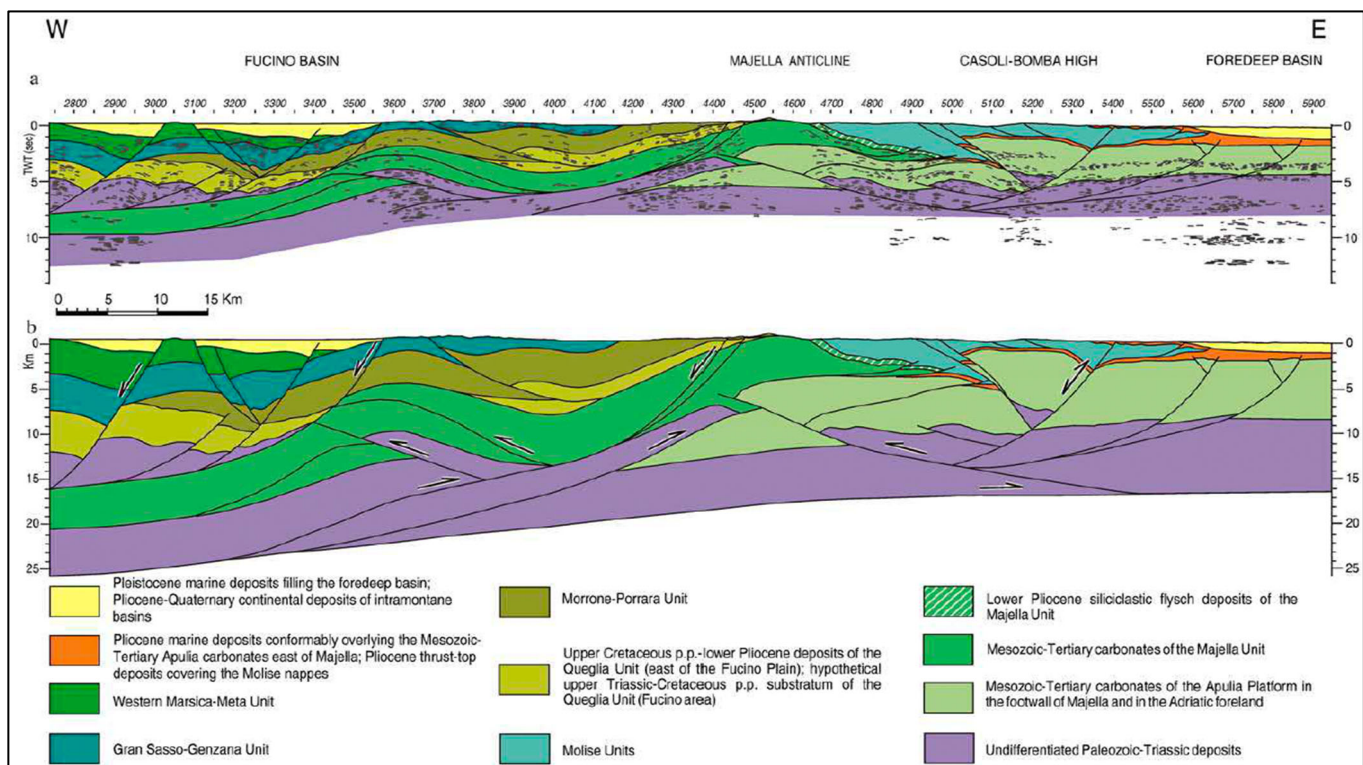


Figura 3: interpretazione sezione orientale del CROP 11 in tempi (sopra) e profondità (sotto). Da Patacca et al., 2008.

Queste unità sono state deformate e sovrapposte durante l'orogenesi appenninica. Questo processo ha portato alla formazione di una serie di strutture geologiche complesse, tra cui faglie, pieghe e sovrascorrimenti. Il modello suggerisce che la struttura di Casoli-Bomba è il risultato di una serie di eventi tettonici che hanno avuto luogo nel corso di milioni di anni. Questi eventi includono la formazione di nuove strutture tettoniche, la riattivazione di strutture preesistenti e la deformazione delle rocce sedimentarie.

3.1.1.1. Punti di forza

- Il modello si basa su una linea sismica profonda che offre una visione unica delle strutture sotterranee, integrata con altre linee commerciali e pozzi esplorativi.
- Il modello identifica una spessa sequenza sedimentaria di età Paleozoico-Triassica che costituisce la base della Piattaforma Apula e che rappresenta l'unità più profonda incorporata nel sistema di sovrascorrimento.
- Il modello propone uno stile tettonico thin-skin, che implica il distacco dalla base cristallina e l'incorporazione nel cuneo orogenico di una spessa sequenza Paleozoico-Triassica, possibilmente interessata da metamorfismo di basso grado nella parte inferiore.
- Il modello offre una nuova interpretazione dell'origine del bacino del Fucino e di altre faglie normali presenti negli Appennini centrali, come il sistema di faglie di Caramanico nella regione della Majella, che sarebbero controllate da processi di collasso gravitativo guidati dal sollevamento durante l'accorciamento crostale.
- Il modello tiene conto delle evidenze di una compressione ancora attiva negli Appennini centrali/settentrionali con persistente subduzione della litosfera Adriatica sotto la catena montuosa, come derivante dalle soluzioni di piano di faglia dei terremoti crostali e dalla distribuzione degli ipocentri dei terremoti subcrostali.

3.1.1.2. Punti di debolezza

- Il modello non fornisce evidenze sismiche di depositi sin-rift mesozoici riattivati dalla tettonica compressiva tardo-neogena, come postulato da alcuni modelli di inversione che ipotizzano il coinvolgimento del basamento tramite la riattivazione inversa di faglie estensionali mesozoiche (soprattutto giurassiche).
- Il modello non spiega la presenza di rocce magmatiche mafiche riconosciute nel pozzo Gargano 1 a circa 4700 m, e se queste rocce siano riferibili a colate laviche paleozoiche o a dicchi di vulcaniti terziarie analoghe a quelle affioranti a Punta delle Pietre Nere a circa 12 km a ovest di Gargano 1.
- Il modello non si sofferma molto sulla struttura Casoli-Bomba, in quanto cerca di dare un'interpretazione generale della parte orientale della sezione CROP 11.

- Il modello riconosce l'assenza di informazioni sismiche a basse profondità in alcune aree a causa delle lacune nei dati e della limitata copertura del profilo CROP 11.

3.1.2. Calamita et al. 2009

Il modello geologico strutturale di Calamita et al. 2009 è un'interpretazione dettagliata e innovativa della geologia dell'Appennino centro-meridionale. Il modello si basa sull'ipotesi che le faglie normali pre- e sin-orogeniche abbiano controllato lo sviluppo delle strutture compresse plio-quadernarie. Questo concetto è stato sviluppato attraverso l'analisi integrata di dati geologici di superficie e di sottosuolo, e l'interpretazione di linee sismiche industriali e del profilo CROP 11.

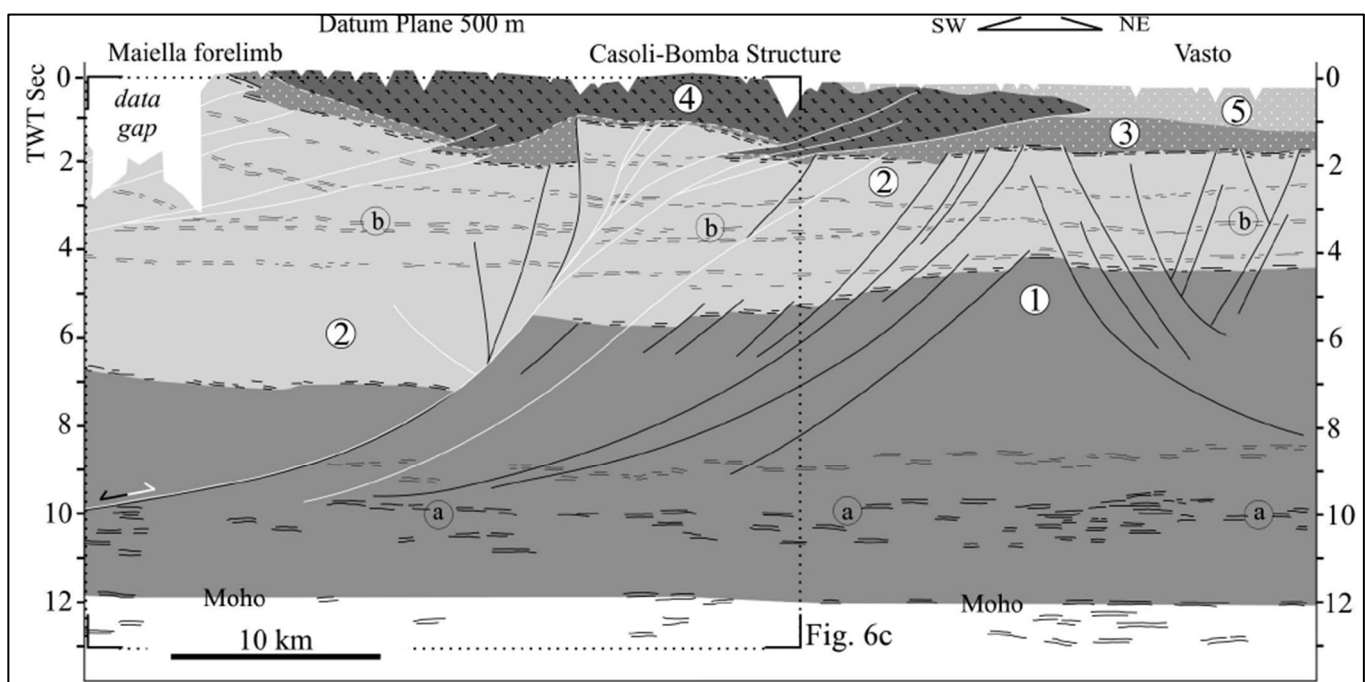


Figura 4: interpretazione della struttura di Casoli-Bomba dal CROP 11 in tempi. Da Calamita et al., 2009. 1) Crosta medio-inferiore; 2) Successione sedimentaria apula (Permiano-Miocene); 3) Depositi silicoclastici di avanfossa (Pliocene medio-inferiore); 4) Unità alloctone molisane e relativi bacini satellite (Oligocene-Pliocene inferiore); 5) depositi del bacino periadriatico (Pliocene superiore-Pleistocene).

Le faglie normali giurassiche, formatesi durante il rifting mesozoico, sono state dislocate e ruotate dai sovrascorrimenti neogenici, seguendo una traiettoria di short-cut. Queste faglie hanno influenzato la geometria e l'orientamento delle pieghe associate ai sovrascorrimenti, generando anticlini rovesciati o coricate. Questo processo ha portato alla formazione di strutture complesse e interconnesse, che riflettono l'interazione tra le faglie normali preesistenti e i sovrascorrimenti successivi.

Le faglie normali plio-quadernarie, associate alla flessurazione dell'avampaese, sono state invertite dai sovrascorrimenti plio-quadernari, formando strutture arcuate con geometrie di push-up. Queste strutture sono parallele alle faglie normali dell'avampaese e mostrano una variazione di direzione da N-S a NW-SE

ed E-W. Questo suggerisce un controllo strutturale sulla deformazione compressiva, con le faglie normali dell'avampaese che agiscono come guide per lo sviluppo delle strutture compressive.

Le faglie normali permo-triassiche, immergenti verso ovest, hanno controllato la distribuzione e la variazione di spessore dei sedimenti sin-rift. Queste faglie sono state invertite dai sovrascorrimenti a basso angolo nella crosta medio-inferiore e dislocate dai sovrascorrimenti ad alto angolo nella crosta superiore. Questo processo ha portato alla formazione di una serie di bacini sin-rift, che riflettono la geometria delle faglie normali preesistenti.

In sintesi, Il modello evidenzia il ruolo dell'eredità strutturale del paleomargine di Adria sulla geometria e la cinematica delle strutture compresse dell'Appennino centro-meridionale. Il modello si inserisce nel quadro generale della tettonica d'inversione dell'Appennino, che ha coinvolto le strutture estensionali preesistenti del paleomargine di Adria.

Tra le strutture analizzate nel modello, la struttura Casoli-Bomba è particolarmente importante. Si tratta di un'anticlinale di shortcut, che si è formata in seguito alla riattivazione in regime compressivo di faglie normali pre-orogeniche. Questo processo ha portato alla formazione di una struttura arcuata, che riflette la geometria delle faglie normali preesistenti. La struttura di Casoli-Bomba è delimitata verso ovest da una faglia listrica estensionale e a est da una faglia normale pre-orogenica che hanno giocato un ruolo fondamentale nel controllo della distribuzione e della variazione di spessore dei sedimenti sin-rift. L'interpretazione del profilo CROP 11 ha consentito di ricostruire la geometria e la cinematica della struttura di Casoli-Bomba, evidenziando l'inversione dei tratti a basso angolo delle faglie normali nella crosta medio-inferiore e la loro dislocazione in short-cut nella crosta superiore.

3.1.2.1. Punti di forza

- Il modello è supportato da dati geologici, di superficie e di sottosuolo, integrati con l'interpretazione di linee sismiche industriali e del profilo CROP 11.
- Il modello spiega la geometria arcuata delle strutture salienti della catena, in accordo con l'architettura del paleomargine di Adria.
- Il modello descrive i meccanismi di inversione tettonica, di short-cut e di riattivazione delle faglie normali, che hanno influenzato la deformazione crostale e la cinematica dei sovrascorrimenti.
- Il modello è in linea con i dati paleomagnetici che mostrano rotazioni differenziali dei fogli di sovrascorrimento in relazione all'architettura del paleomargine di Adria (Pierantoni et al., 2005; Satolli et al., 2005)
- Il modello è coerente con i dati geodinamici che indicano una componente traspressiva nella deformazione orogenica dell'Appennino centro-meridionale (Calamita et al., 2007; Satolli & Calamita, 2008).

3.1.2.2. Punti di debolezza

- Il modello non considera gli effetti della sedimentazione sin-tettonica e della flessurazione litosferica sulle geometrie e sulle traiettorie dei sovrascorrimenti.
- Il modello non spiega la presenza di strutture a vergenza opposta, come le pieghe rovesciate e i retroscorrimenti, che sono state osservate in alcune aree dell'Appennino centro-meridionale (Calamita et al., 2004).
- Il modello non tiene conto della possibile influenza di altri fattori, come la variazione della geometria e della densità della litosfera in subduzione, sullo stile e sul tasso di deformazione orogenica (Argnani, 2005; Finetti et al., 2005a-b).

3.2. Confronto dei modelli

Entrambi gli articoli propongono un modello geologico strutturale per la catena appenninica centrale, basato sull'interpretazione del profilo sismico CROP 11 e di altre evidenze geologiche e geofisiche.

- Il modello di Patacca et al. (2008) interpreta la struttura di Casoli-Bomba come una pop-up structure, formata dalla convergenza di due faglie inverse con vergenza opposta, che ha incorporato una spessa sequenza sedimentaria paleozoica-triassica staccata dal basamento cristallino. Questo modello implica uno stile tettonico a thin-skin, con un accorciamento orogenico di circa 100 km.
- Il modello di Calamita et al. (2009) interpreta la struttura di Casoli-Bomba come una shortcut structure, formata dalla riattivazione inversa di faglie normali mesozoiche, che ha coinvolto anche il basamento cristallino. Questo modello implica uno stile tettonico a thick-skin, con un accorciamento orogenico di circa 60 km.

Come già evidenziato dal report di STRATA Georesearch del 2018, le principali differenze tra i due modelli sono essenzialmente 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 (f1 in **Figura 5**): 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 (t1 in **Figura 5**) e il suo andamento in profondità: faglia normale invertita vs thrust di short-cut.

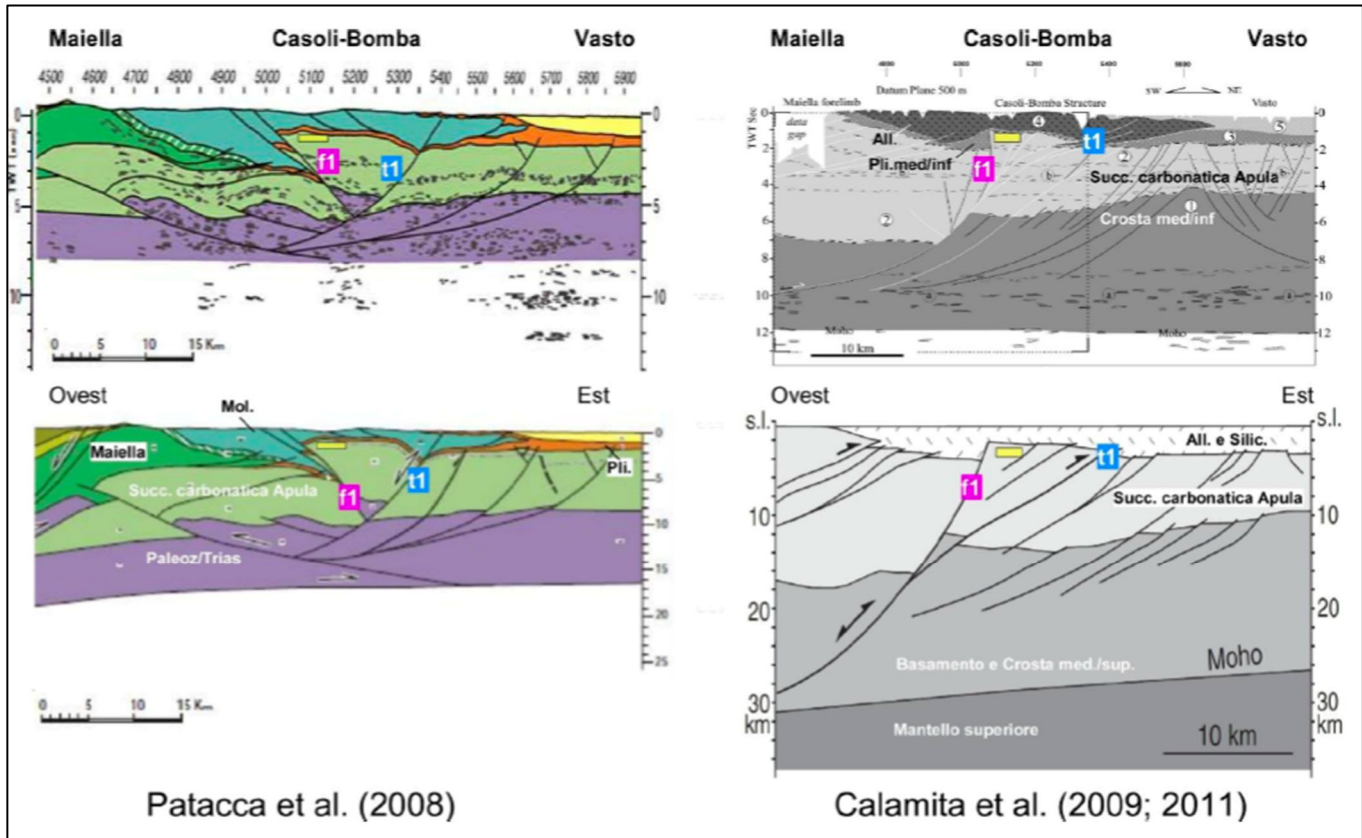


Figura 5: Confronto tra i modelli di Patacca e Calamita relativi alla struttura di Casoli-Bomba (da STRATA Georesearch, 2018).

Tuttavia, esistono dei punti di contatto tra i due modelli o dei dettagli che li rendono simili:

1. la posizione dei principali riflettori (il top e la base della successione sedimentaria della piattaforma Apula) risulta in generale d'accordo;
2. in entrambi i modelli, la faglia f1 (ad W della struttura), 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.
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.
5. Il lineamento tettonico f1, che rappresenta la differenza maggiore tra i due modelli, non costituisce la chiusura strutturale occidentale del giacimento di "Colle Santo", che invece risulta essere rappresentata da una faglia a circa 1,5 km a NE della faglia f1, e corrispondente ad un back-thrust di medie dimensioni, interpretato anche da ENI (Agip). Tale faglia non è presente nel modello di Patacca, che lavora a scale maggiori e non prevede tale livello di dettaglio.
6. Questo maggiore dettaglio nella delineazione delle faglie sulla struttura di Casoli-Bomba rende, da un punto di vista prettamente geometrico, la struttura definita da Calamita et al (2009) molto simile a quella elaborata da Patacca et al (2008) nell'area vicina al reservoir, perché delimitata essenzialmente da un thrust principale ed un back-thrust, come si vede in Figura 6.

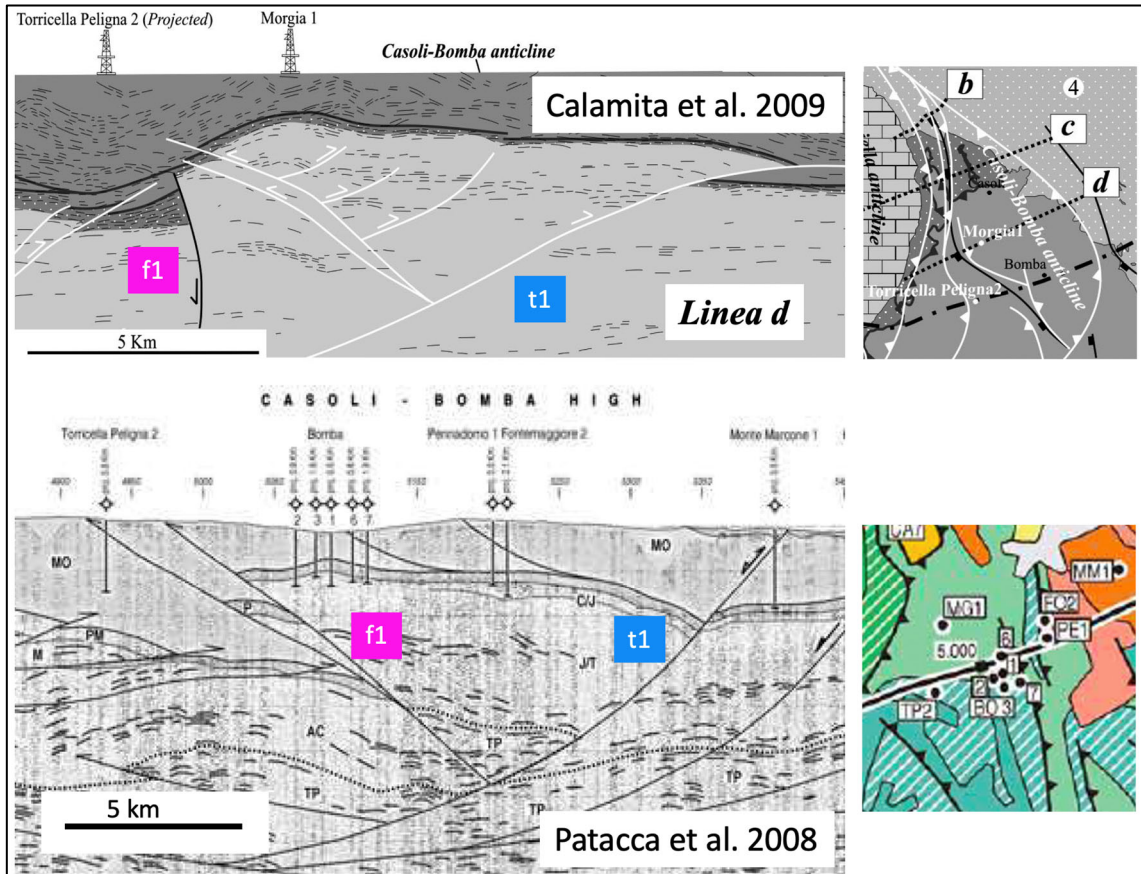


Figura 6: Confronto tra i modelli di Patacca (sotto) e Calamita (sopra) relativi alla struttura di Casoli-Bomba.

3.3. Modello adottato per la caratterizzazione statica del giacimento

A seguito di tutte le considerazioni fatte nei paragrafi precedenti, si ritiene che entrambi i modelli (Patacca e Calamita) siano validi, e che le incertezze relative al dato di sottosuolo non permettano di discriminare chiaramente tra i due modelli. D'altro lato, i punti di contatto individuati nel paragrafo precedente sono interessanti perché sostanzialmente vicini alla zona del giacimento e quindi all'interno del volume interessato dal modello di giacimento, mentre le differenze importanti riguardano elementi a scale e distanze maggiori, che per i nostri scopi possono essere ignorate.

Ad esempio, per gli scopi e alle scale della modellistica di giacimento, la dinamica della formazione della struttura (faglia normale invertita vs faglia di shortcut) non ha alcun peso, e le discrepanze strutturali più eclatanti si riscontrano a profondità elevate, fuori dai limiti spaziali del modello. Anche il timing di formazione della struttura (post- vs pre-alloctono) non ha importanza per la modellazione, essendo il giacimento già scoperto, il contatto gas-acqua individuato, ed essendo la funzionalità e potenzialità del sistema petrolifero già verificate.

In definitiva, la differenza principale tra i due modelli è sostanzialmente l'orientazione della faglia occidentale "f1", faglia di back-thrust con immersione adriatica per il modello di Patacca, e faglia normale immergente verso SW per Calamita. In entrambi casi la faglia è ad alto angolo vicino al giacimento di Colle Santo. Si è ritenuto utile inserire nel modello statico questa faglia con entrambe le geometrie ipotizzate. In questo modo è possibile fare delle considerazioni nel momento in cui sarà sviluppato il modello dinamico e geomeccanico, e si potrà dunque verificare se questa, nei diversi scenari/geometrie, possa in qualche modo subire l'effetto della variazione del campo di sforzi risultante dalla variazione della pressione in giacimento.

Per il resto il modello strutturale è stato costruito considerando una thrust fault principale ad est, che corrisponde alla faglia t1 che delimita la struttura di Casoli-Bomba, e un back-thrust che delimita il giacimento ad ovest. Tale framework è in linea con entrambi i modelli di riferimento.

Per quanto riguarda la configurazione 3D delle faglie e la loro estensione areale si è fatto riferimento al modello di Calamita che, come già scritto nei paragrafi precedenti, mostra più dettagli rispetto a quello di Patacca, come illustrato in **Figura 7**. Questi dati sono stati integrati con le interpretazioni fatte da AGIP/ENI del top dei carbonati con relative faglie per il giacimento di Colle Santo, il cui framework si è dimostrato coerente con il modello di Calamita e, anche se di scala nettamente inferiore, con il modello di Patacca.

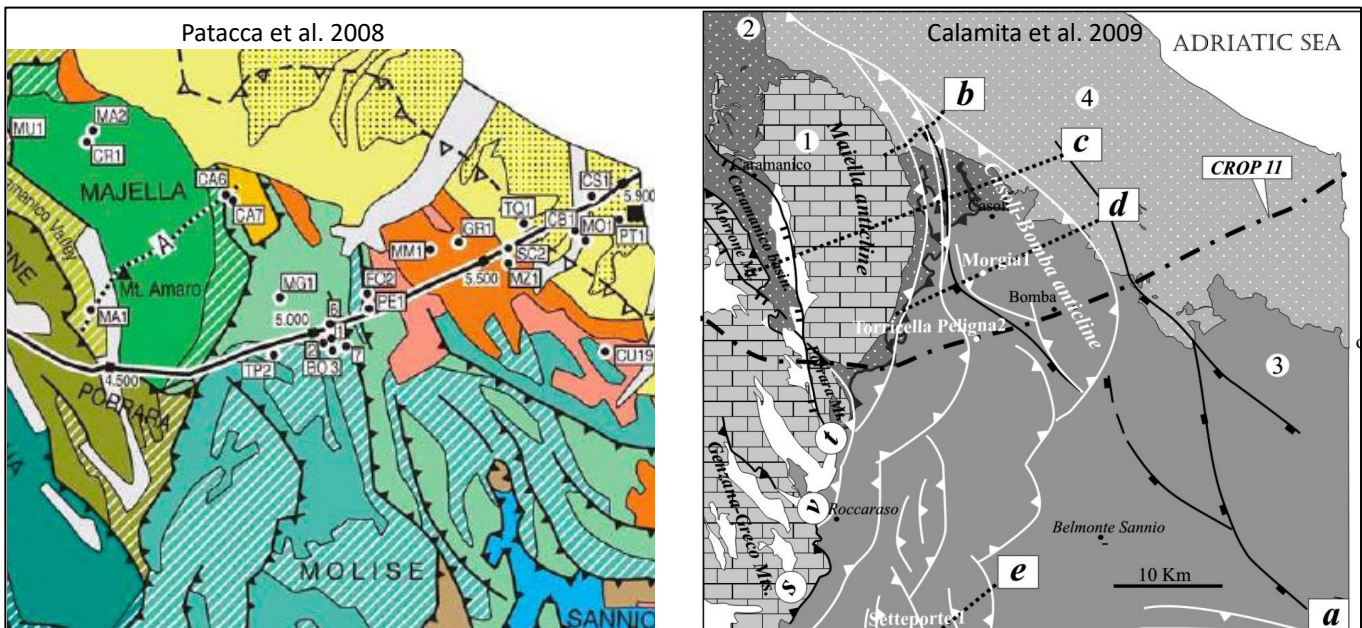


Figura 7: mappa geologico-strutturale dell'area di studio secondo il modello di Patacca (sinistra) e Calamita (destra).

4. Modello 3D di giacimento

Il modello 3D statico del giacimento, esteso per un'area di 24x24 km², è stato costruito con il software tNavigator® della Rock Flow Dynamics. Gli step chiave per la costruzione del modello sono stati:

- Raccolta dati e informazioni disponibili all'interno dell'area dell'istanza di concessione e caricamento sul software di modellizzazione
- Raccolta dati pubblici all'esterno dell'area di istanza, ed entro i confini della zona di interesse e poco oltre, per estendere il modello
- Creazione del modello strutturale a partire dai dati regionali discussi nel paragrafo precedente ed integrati successivamente con i dati locali interpretati da AGIP.
- Creazione del grid tridimensionale e del modello stratigrafico utilizzando i dati dei pozzi e le informazioni prese dai principali modelli stratigrafici disponibili.
- Creazione del modello petrofisico a partire dai dati e dalle analisi effettuate in passato.
- Stima dei volumi di gas in posto

4.1. Dati utilizzati

I dati utilizzati per la costruzione del modello statico sono:

- Dati di pozzo (**Figura 8**)
 - Localizzazione, dati di deviazione, marker formazionali e curve di log acquisiti per i pozzi all'interno della istanza di concessione Colle Santo:
 - Bomba 1
 - Bomba 2
 - Bomba 3
 - Bomba 6 (no log di pozzo, il reservoir non è stato attraversato)
 - Bomba 7
 - Montepallano 1 dir
 - Montepallano 2 dir
 - Pennadomo 3 (no log di pozzo, reservoir mineralizzato a gas solo nei primi metri)
 - Localizzazione, dati di deviazione e marker formazionali di 30 pozzi esterni all'istanza di concessione (dati pubblici da progetto VIDEPI) ed utilizzati per l'estensione del modello 3D
- Top dei carbonati miocenici (Formazione Bolognano) in profondità, scala 1:12500, con relative faglie, interpretate da AGIP su circa 40 linee sismiche 2D (**Figura 9**).
- Un DEM della NASA (NASA JPL, 2021) utilizzato come top del modello (**Figura 10**)
- Informazioni regionali derivanti da report dei titoli minerari cessati disponibili sul sito del progetto VIDEPI
- Estensione 2D delle faglie regionali estrapolate da Calamita et al. 2009 (**Figura 11**).
- Analisi petrofisiche precedenti (2005 e 2008)

- Dati estrapolati da tutti i report disponibili sul giacimento di Colle Santo

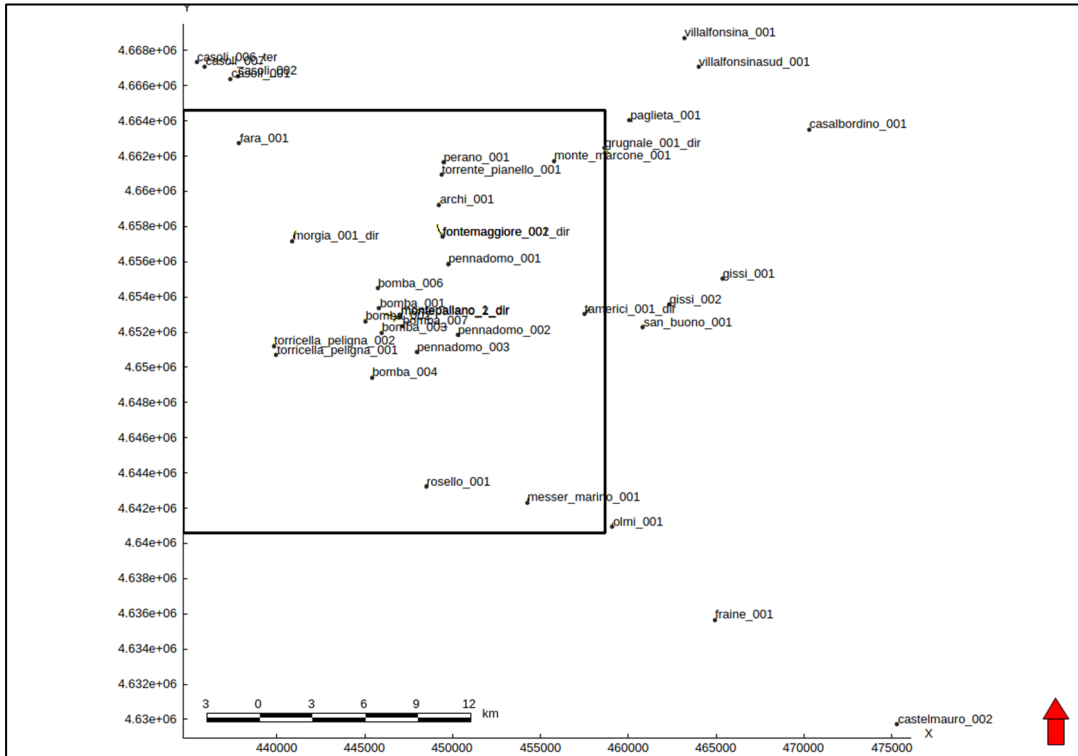


Figura 8: pozzi i cui dati sono stati utilizzati per la costruzione del modello 3D di giacimento.

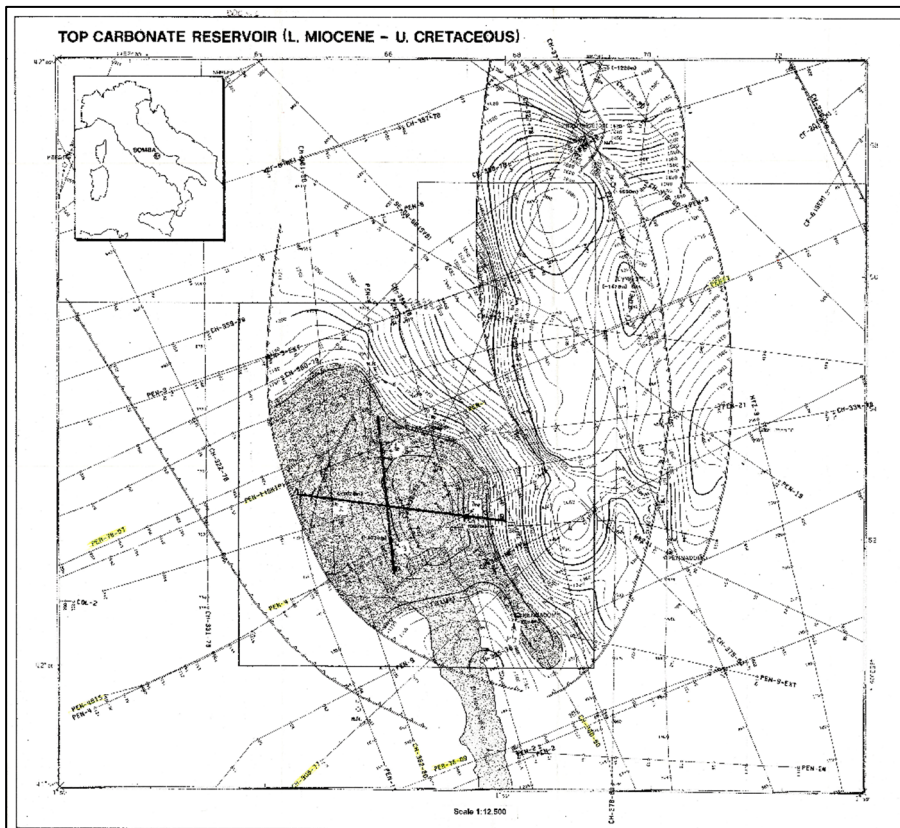


Figura 9: top strutturale dei carbonati miocenici (Formazione Bolognana) interpretato da AGIP.

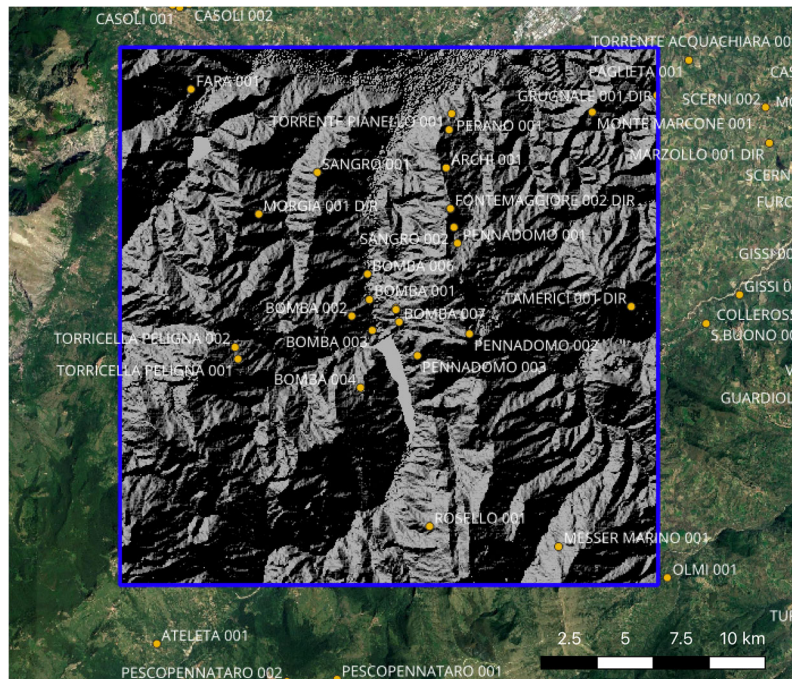


Figura 10: DEM NASA (NASA JPL 2021) utilizzato come top del modello statico esteso.

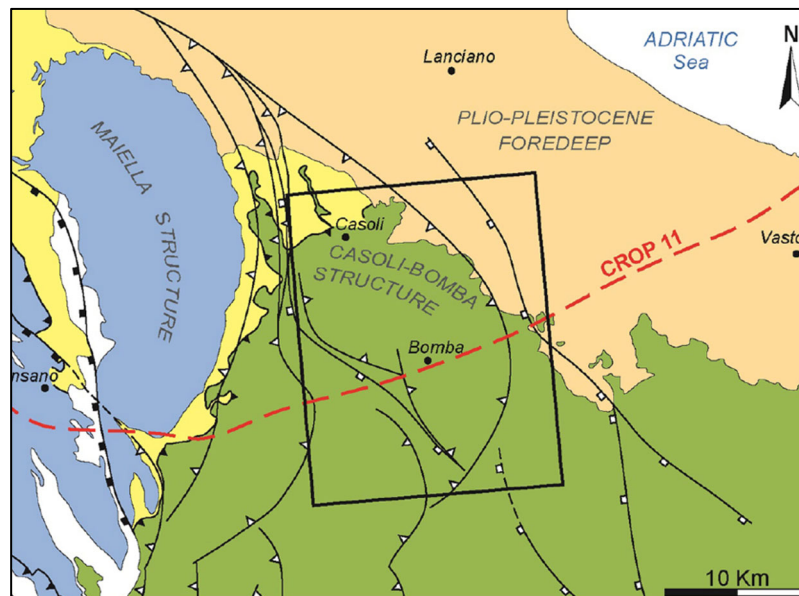


Figura 11: estensione areale delle faglie regionali (da Giani et al. 2017, modificato da Calamita et al. 2009).

4.2. Modello strutturale e stratigrafico

Il modello strutturale esteso del campo di Colle Santo è stato costruito (**Figura 12**) a partire dalle faglie a scala locale interpretate da AGIP al top dei Carbonati, integrate con le faglie a scala regionale tratte dal lavoro di Calamita et al. (2009), avendo come riferimento i due modelli discussi nel paragrafo 3. I risultati tridimensionali della modellizzazione sono mostrati in **Figura 13 a** per il modello di Patacca et al (2008) e in **Figura 13 b** per il modello di Calamita et al (2009). I nomi delle faglie principali regionali, t1 ed f1, sono stati tenuti dagli studi precedenti, come nel paragrafo 3 del presente documento, per questioni di chiarezza e consistenza.

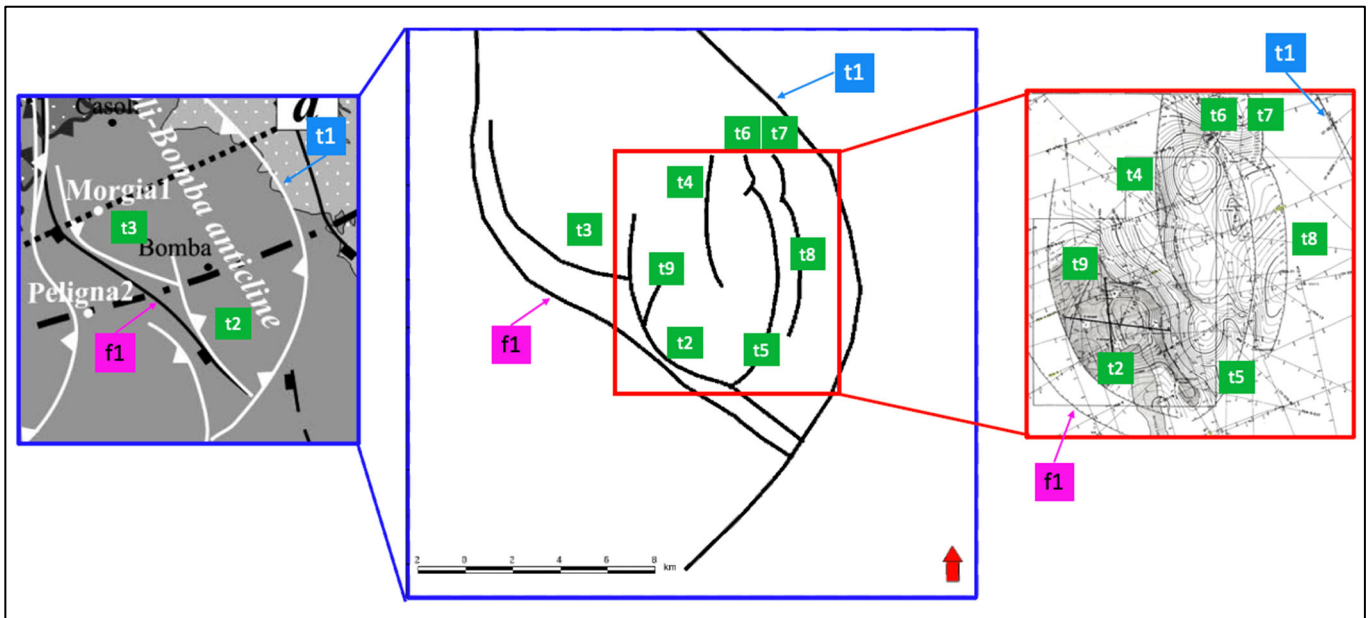


Figura 12: Faglie interpretate partendo dal modello regionale di Calamita et al (2009) integrata con il modello locale interpretato da AGIP. La faglia regionale f1 è stata interpretata sia come faglia normale immergente a SW (Calamita et al. 2009), che come back-thrust immergente a NE (Patacca et al., 2008).

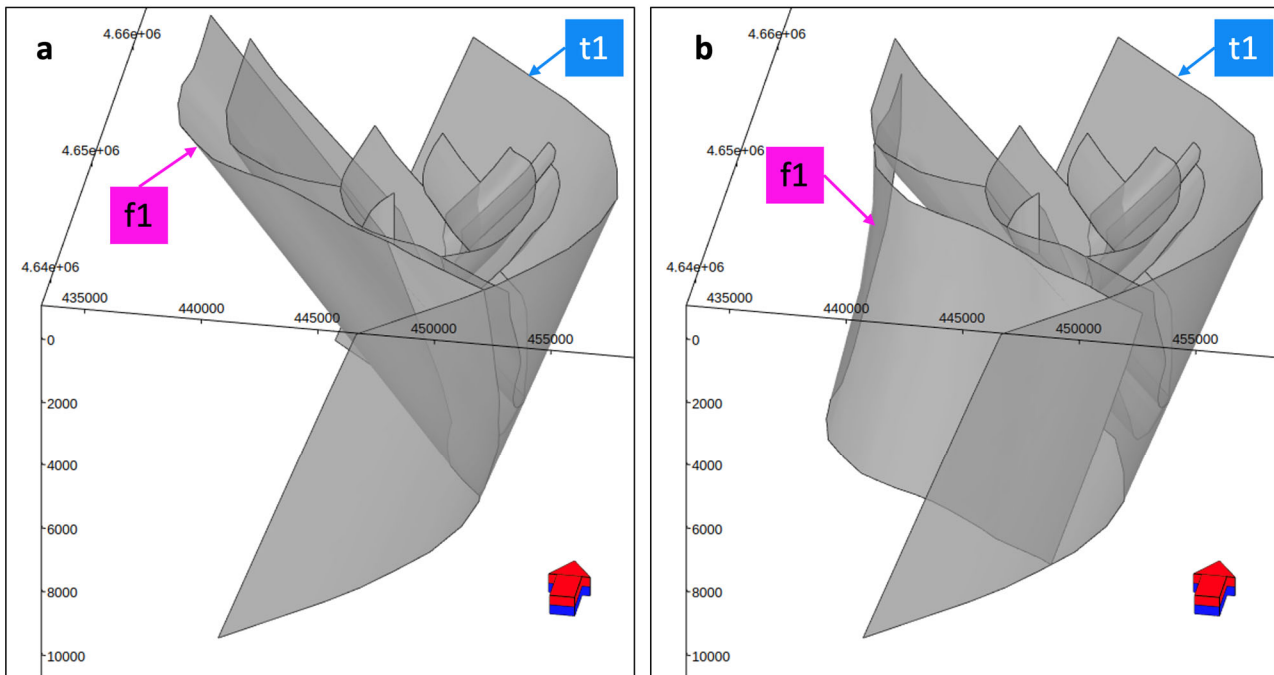


Figura 13: vista 3D delle faglie interpretate seguendo il modello di a) Patacca et al (2008) e di b) Calamita et al. (2009)

Il modello stratigrafico è stato ricostruito a scala locale e regionale a partire dai dati dei pozzi caricati e sulla base dei modelli stratigrafici presenti in letteratura (Vecsei et al., 1998; Festa et al., 2006; Patacca e Scandone, 2007; Patacca et al. 2008; Calamita et al., 2009 e 2011; Vezzani et al., 2010; Brandano et al., 2013).

Le formazioni attraversate dai pozzi all'interno dell'area del modello sono le seguenti:

1. Alluvione: depositi marini e alluvioni di età Quaternaria-Recente, prevalentemente sabbie (depositi marini) e sabbie ciottolose-siltose (depositi alluvionali); si sviluppano soprattutto verso il settore NE del modello con spessore massimo di 260m nel pozzo Monte Marcone 1.
2. Alloctono (Cretaceo-Miocene): marne e marne calcaree (Unità Molisane) e subordinate argille scagliose (Unità Sicilidi); presente in tutti i pozzi della zona di interesse, con spessori che variano dai 700m ai 300m. nella parte occidentale del modello i pozzi esistenti, Torricella Peligna 1 e 2, Bomba 4, non raggiungono la base della formazione, non fornendo il reale spessore della formazione in questa zona. Quello di tali pozzi è stato considerato come spessore minimo. La base dell'Alloctono corrisponde ad un sovrascorrimento a basso angolo a vergenza N-E. Tale sovrascorrimento è stato ricostruito come una superficie all'interno del modello.
3. Argille del Santerno (Pliocene inf.): argille e argille siltose; gli spessori di questa formazione variano molto, dai 33 metri nel pozzo Montepallano 2 dir ai 637 m del pozzo Archi 1. Al pozzo Morgia 1 dir, tale formazione non è presente.
4. Formazione Gessoso-Solfifera (Miocene sup.): evaporiti, prevalentemente gessi e anidriti, e subordinatamente marne gessose; spessori abbastanza uniformi tra i pozzi esistenti, circa 200 m, ma unità totalmente assente nella zona orientale del modello (Perano 1, Torrente Pianello 1, Monte Marcone 1, Rosello 1, Messer Marino 1).
5. Formazione Bolognana (Miocene medio-sup.): calcari argilloso-marnosi e in alcuni pozzi presenza di calcareniti fratturate; ha uno spessore medio di una trentina di metri, non è presente nei pozzi

Messer Marino 1 e Rosello 1, dove le Argille del Santerno poggiano direttamente sui calcari cretacei sottostanti di Monte Acuto/Cupello.

6. Calcari di Monte Acuto o Calcari di Cupello (la denominazione varia a seconda del pozzo che attraversa la formazione): successione carbonatica indifferenziata di piattaforma (Unità Apulo-Adriatiche deformate); in alcuni pozzi presenti calcari fratturati nella parte sommitale della formazione. Lo spessore di tale formazione non è conosciuto, visto che nessun pozzo ne ha mai toccato la base.

La mappa del top carbonati (top Formazione Bolognana) interpretata da AGIP su circa 40 linee sismiche 2D, è stata digitalizzata, caricata sul software di modellizzazione, aggiustata ai pozzi, ed estesa utilizzando i dati dei pozzi esistenti (**Figura 14**). La porzione ad ovest della faglia f1 è la più incerta, perché nessuno dei pozzi esistenti (Bomba-4, Torricella Peligna-1 e -2) ha perforato il reservoir, fermandosi tutti più superficialmente, all'interno dell'Alloctono (**Figura 16 e Figura 17**).

A presentare forti incertezze è anche l'area estremo nordoccidentale, dove è ubicato il pozzo Fara 1. Durante la perforazione di quest'ultimo si è osservato che in questa zona il top dei carbonati è in posizione molto più superficiale. Il pozzo insiste probabilmente sulla parte settentrionale della struttura di Casoli-Bomba. Quest'ultima, interessata dai pozzi di Casoli, si trova all'esterno dell'area coperta dal modello, in direzione nord, e non è dunque di interesse per questo studio. Per questo motivo le informazioni provenienti da questo pozzo (posto ad oltre 10km di distanza dal giacimento) non sono state prese in considerazione. Questa approssimazione, che coinvolge solo una porzione marginale del modello, è perfettamente giustificabile stanti gli scopi del presente progetto. In particolare, si ricorda qui che il principale obiettivo che si vuole raggiungere tramite l'ampia estensione dell'area considerata è quello di avere una adeguata distanza delle condizioni al contorno in fase di modellizzazione fluido-dinamica e geomeccanica, per evitare effetti di bordo ed altri artefatti.

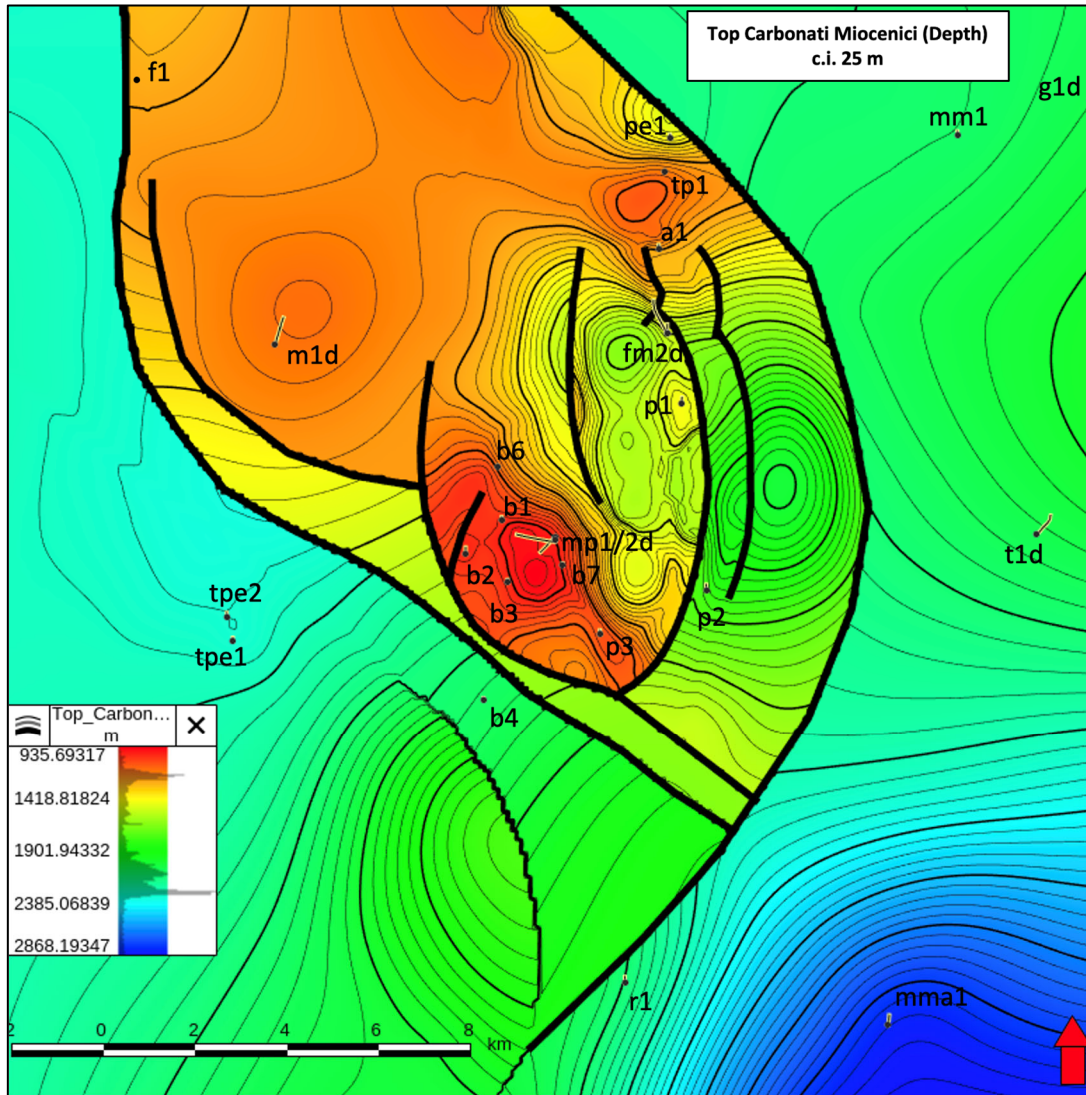


Figura 14: Top dei carbonati miocenici digitalizzato ed esteso al di fuori dell'area interpretata da AGIP. Pozzi: tpe (Torricella Peligna) 1 e 2; b (Bomba) 1,2,3,4,6,7; mp (Montepallano) 1dir e 2dir; fm2d (Fontemaggiore 2dir); p (Pennadomo) 1, 2 e 3; tp1 (Torrente Pianello 1); mm1 (Monte Marcone 1); t1d (Tamerici 1 dir); g1d (Grugnale 1 dir); mma1 (Messer Marino 1); r1 (Rosello 1); f1 (Fara 1).

Dal top dei carbonati sono stati creati successivamente le seguenti superfici utilizzando i marker formazionali e le relative informazioni derivate dai pozzi:

- Top Argille del Santerno
- Top Gessoso Solfifera
- Top Carbonati cretacei di Monte Acuto / Cupello

A completare la sequenza verticale sono stati poi creati il top Alluvione e il Top Alloctono che coincidono in parte con il livello del suolo modellato utilizzando il DEM della NASA.

In ultimo, sono state ricavate quelle che sono state interpretate come il top della roccia di copertura, in gran parte coincidente con il top della formazione dei calcari del Bolognana e rappresentata da calcari argilloso-marnosi, e il top del reservoir, che si trova all'interno del Bolognana o dei sottostanti calcari di

Monte Acuto/Cupello. Lo spessore del reservoir varia dai 75 m di Montepallano 1 dir ai 140 m di Bomba 7. Queste superfici sono state utilizzate alternativamente al top Bolognano e al top Calcari cretacei, per completare la zonazione più profonda del grid 3D (**Figura 15**, **Figura 16** e **Figura 17**).

Età	Formazione	Modello stratigrafico	Litologia
Quaternario - recente	Alluvione	Alluvione	sabbie e sabbie ciottoloso-siltose
Cretaceo - Miocene	Alloctono	Alloctono	marne e marne calcaree con subordinate argille
Pliocene Inferiore	Argille del Santerno	Argille del Santerno	argille
Miocene superiore	Gessoso Solfifera	Gessoso Solfifera	gessi e anidriti con sporadiche marne
Miocene	Bolognano	Roccia di copertura	calcari argilloso-marnosi
		Reservoir	calcari e calcareniti fratturati
Cretaceo	Calcari di Monte Acuto / Cupello	Calcari	calcari

Figura 15: schema del modello stratigrafico finale in relazione alle formazioni attraversate dai pozzi. Il top del reservoir è localizzato in alcuni pozzi nella formazione dei calcari del Bolognano e in altri in quella dei calcari di Monte Acuto/Cupello.

Il bottom del modello è stato posto a 10 km di profondità sotto il livello del mare. Non si è fatta nessuna distinzione nell'underburden dei vari carbonati mesozoici e non sono stati presi in considerazione i depositi indifferenziati paleozoico-triassici, presenti nelle interpretazioni di Patacca et al (2008) nella parte più profonda dell'unità di Casoli-Bomba, circa al di sotto di 8 km (**Figura 3**). Nel lavoro di Calamita et al (2009), l'intera successione viene indicata come successione carbonatica Apula Permo-Messiniana (**Figura 4**).

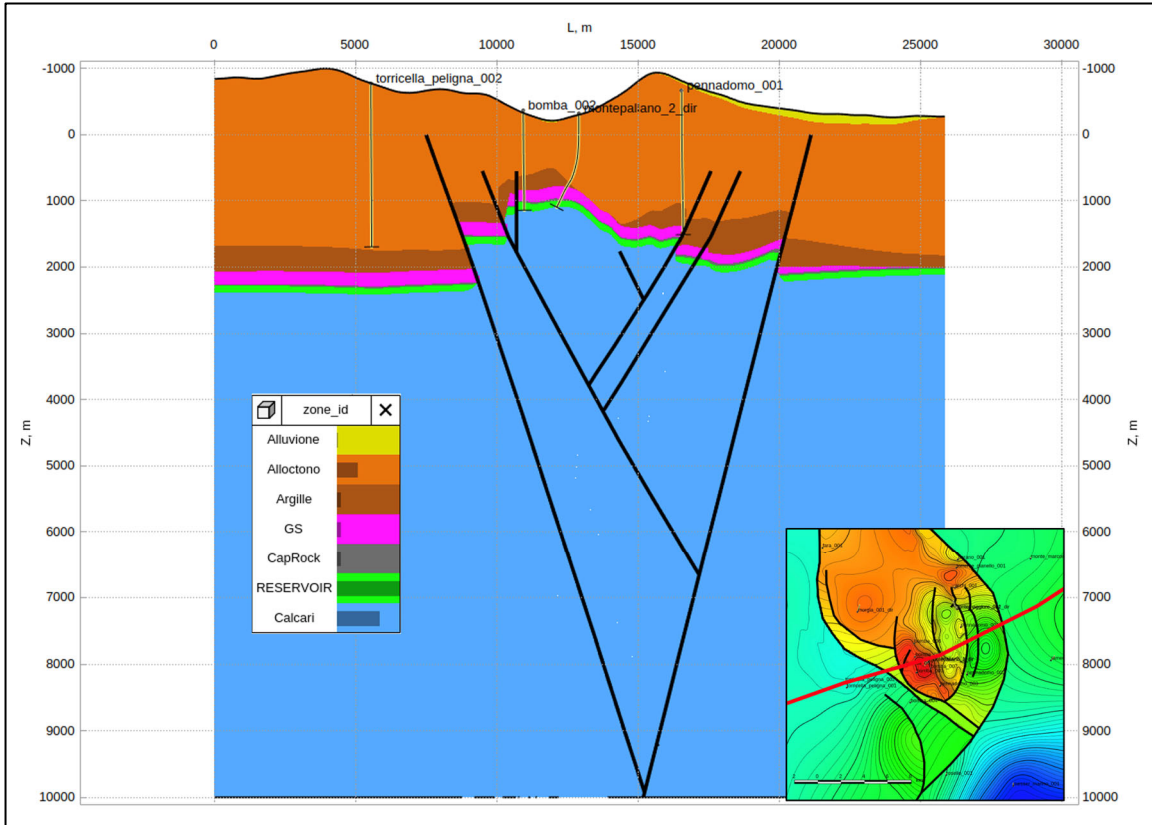


Figura 16: Sezione del grid con modello strutturale da Patacca et al. (2008) attraverso il CROP 11.

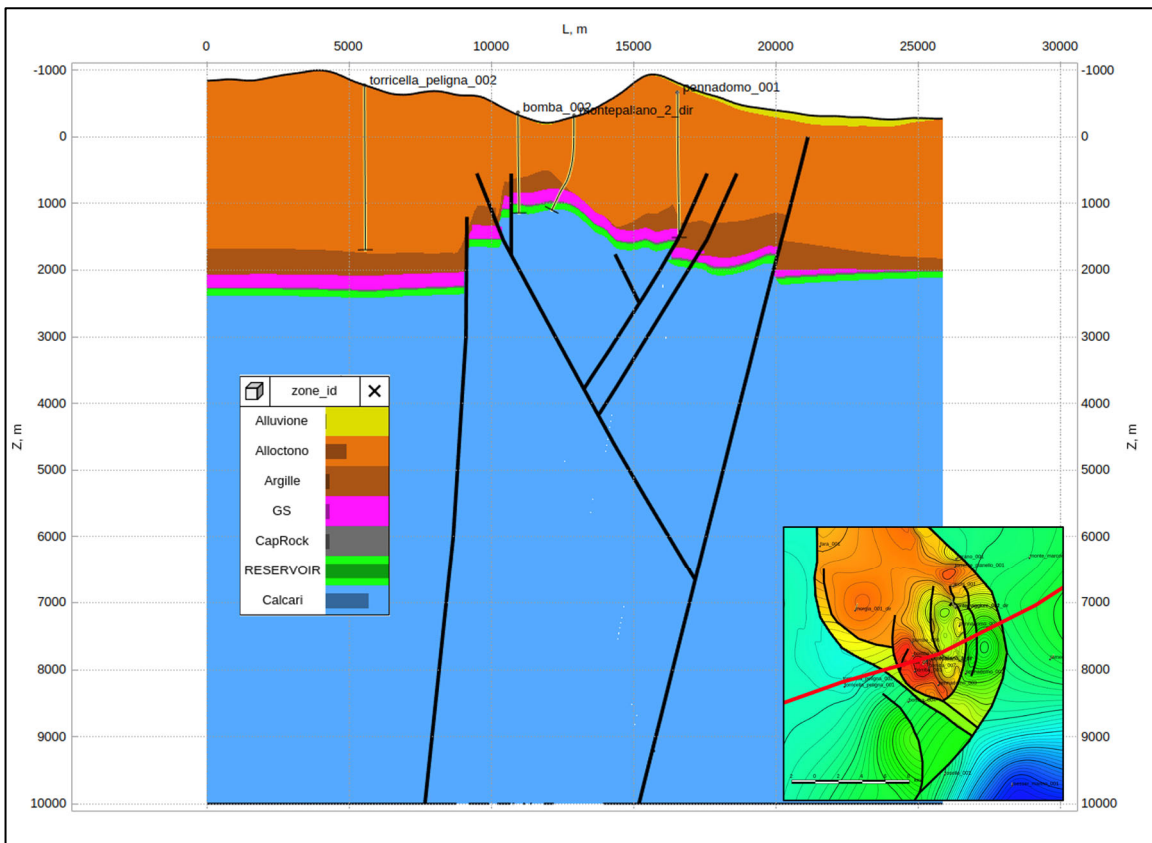


Figura 17: Sezione del grid con modello strutturale da Calamita et al. (2009) attraverso il CROP 11.

Il grid finale ha celle di dimensione 100x100 metri, mentre le diverse zone sono state suddivise verticalmente nel seguente modo:

ZONA	Layer	Spessore medio (m)
ALLUVIONE	1	104
ALLOCTONO	10	197
ARGILLE DEL SANTERNO	2	173
GESSOSO SOLFIFERA	2	63
ROCCIA DI COPERTURA	2	11
RESERVOIR	30	3
CALCARI	30	265

Tabella 1: layering applicato alle zone stratigrafiche

In definitiva il grid è costituito da 240x240 celle x 77 livelli, per un totale di 4361723 celle (alcuni livelli non si sviluppano sull'intera area).

Si è notato che il framework strutturale estremamente complesso porta a delle distorsioni all'interno del grid (**Figura 18 a**) impossibili da eliminare completamente. Queste distorsioni possono ovviamente provocare artefatti nella simulazione dinamica, così si è deciso di testare diverse soluzioni per ridurre le distorsioni, ed è stato appurato che le soluzioni migliori sono o ridurre di molto la profondità delle faglie e lo spessore del grid (fino a poche centinaia di metri attorno al reservoir) o usare faglie verticali (**Figura 18 b**). Si è optato dunque per tenere entrambe le soluzioni ma per preferire quella con le faglie verticali in modo da avere meno problemi possibili durante la fase di simulazione della produzione di gas e di conseguenza nella successiva simulazione di subsidenza. Questa approssimazione è ottimale, considerando che lo spessore medio del reservoir, tra i 70 e i 140 m, è trascurabile se paragonato allo spessore totale del grid di quasi 11000 metri. Le faglie inclinate verranno utilizzare per calcolare gli impatti della produzione su di esse, la loro stabilità e la slip tendency.

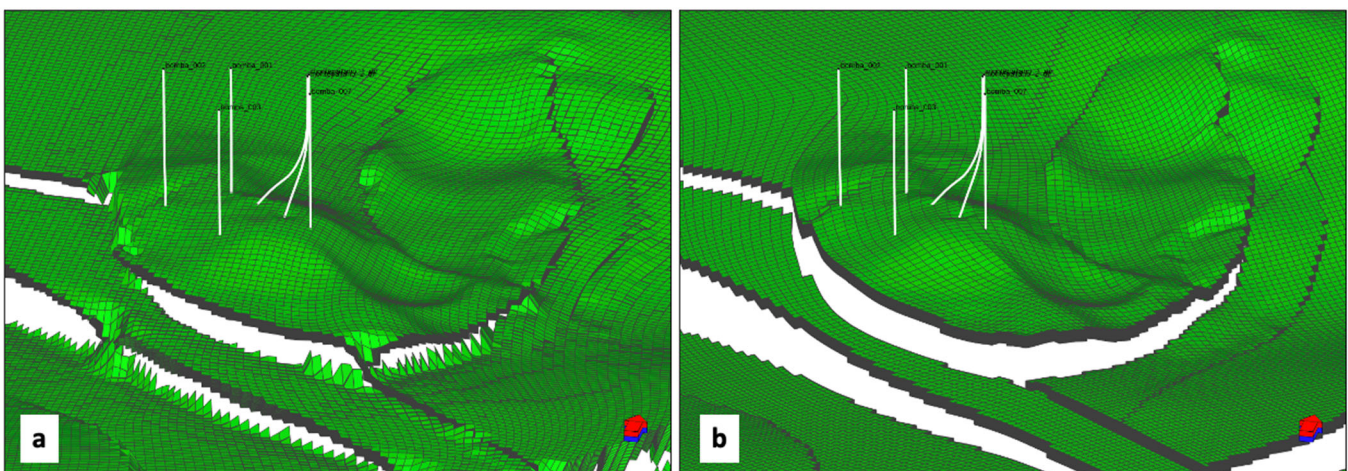


Figura 18: grid 3D zona Reservoir creato utilizzando a) faglie inclinate e b) faglie verticali.

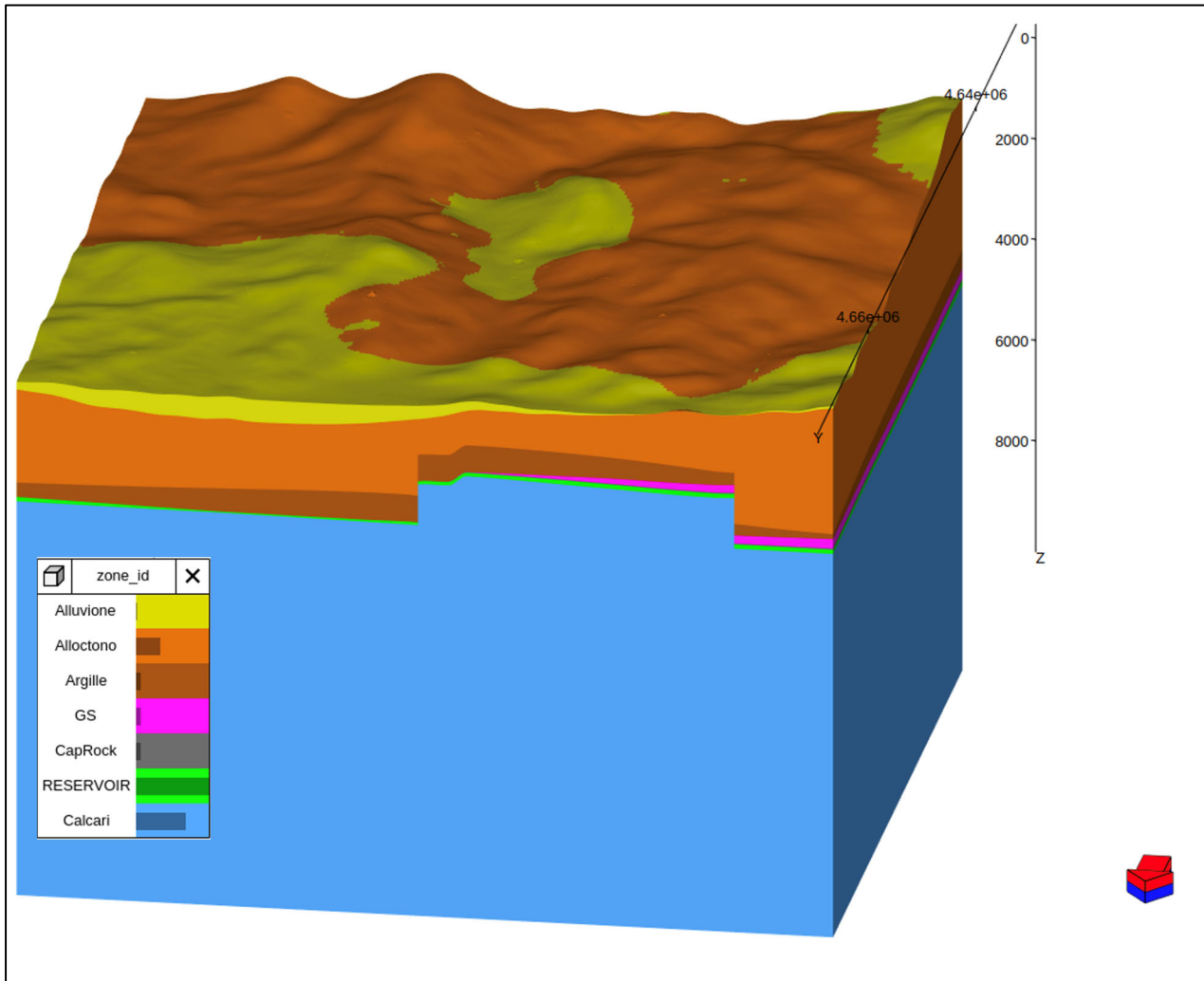


Figura 19: 3D grid con faglie verticali. Utile per simulazioni di produzione più robuste e senza artefatti.

4.3. Modello petrofisico

Per il modello petrofisico sono stati presi in considerazione gli studi precedenti (un'analisi del 2015 disponibile come comunicazione privata, e lo studio del 2008 di Bello) e caricati nel software di modellazione tutti i dati log disponibili dei 6 pozzi che hanno attraversato il reservoir:

- Bomba 1, 2, 3, 7
- Montepallano 1 dir e 2dir

Questo ha permesso la stima dei parametri petrofisici chiave: Porosità (PHI), Net-to-Gross (NG) e saturazione in acqua (Sw). Per i pozzi Bomba 1, Bomba 2 e Bomba 3 sono disponibili anche i dati convenzionali di carota. Bomba 1 è stato carotato al di sotto dell'intervallo coperto dai log in una porzione del serbatoio che è stata infine testata. Bomba 2 è stato carotato sia nella porzione di reservoir appartenente al Bologniano che in quella di Monte Acuto. Le carote di Bomba 3 infine coprono la maggior

parte del reservoir. Per questo motivo i dati di Bomba 3 sono stati utilizzati in tutte le precedenti analisi petrofisiche per calibrare i parametri chiave come porosità e permeabilità della roccia serbatoio.

L'ispezione visiva e le misurazioni della densità dei grani indicano che il reservoir primario è prevalentemente calcareo, come indicato dalla densità media di 2,706 g/cc (deviazione standard di 0,012 g/cc). Da un'analisi dettagliata dei dati di tutti i pozzi all'interno dell'area mineralizzata, il calcare è di tipo packstone e grainstone, biancastro-grigio, fossilifero, localmente brecciato, fratturato e vacuolare. Evidente è la presenza di una porosità secondaria, che dai calcoli effettuati nelle precedenti analisi petrofisiche (2005), attraverso il calcolo dell'indice di porosità secondaria sul pozzo Bomba-7, dovrebbe rappresentare all'incirca il 21% della porosità totale. Le fratture nei pozzi di Bomba sono descritte in genere come subverticali e in alcuni casi variamente orientate, mentre dall'analisi del Fullbore Formation Microimager (FMI) sul pozzo di Montepallano 2 dir, le fratture sono prevalentemente inclinate verso il basso ad un'angolazione di oltre 60° rispetto all'orizzontale.

Per quanto riguarda i dati log, per i pozzi di Bomba sono disponibili anche le curve derivanti dall'analisi petrofisica fatta nel 2005, che comprendono le curve di porosità totale ed efficace, e quelle di saturazione in acqua (S_w). Questi log non ci sono per i pozzi di Montepallano 1 dir e 2 dir, che sono i pozzi che verranno utilizzati per la simulazione di produzione del campo di Colle Santo. Per questi pozzi è disponibile solo il log di porosità calcolato dalla curva log del sonic, ma non è corretto usare questo tipo di dato assieme a porosità derivanti da curve log density come per i pozzi di Bomba, e soprattutto non è adeguato utilizzare un log di porosità da sonic (che misura la porosità totale primaria) per i pozzi di Montepallano che sono quelli che verranno messi in produzione. Per questo motivo è stato deciso di avvalersi delle misure di porosità stimate nello studio di giacimento di Bello (2008) e riportate in **Tabella 2**. In questo studio, il giacimento è stato diviso in 10 zone, di cui 2 tight (B e C). Le zone non sono sempre tutte presenti nei vari pozzi. Per ogni zona è stato calcolato il valore medio di porosità. Si ritiene che questi valori medi siano una buona rappresentazione della porosità efficace come somma di porosità primaria e secondaria. Da un confronto con le curve log disponibili (**Figura 20**, secondo track: porosità da Bello 2008 curva nera, porosità log curva rossa, porosità da analisi carote punti gialli), si vede come questi valori siano perfettamente in linea con le varie curve di porosità e con i dati di carota dove disponibili (Bomba 1, 2 e 3).

PHIE (%)	Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3	Bomba 4	MP 1 dir	MP 2 dir
A1a	10.6	7.6	5.4	8.9	3.1	5.4
A1b	11.8	7.6	9.4	assente	assente	assente
A2a	10.4	8.6	10.6	9.7	6.2	7.1
A2b	assente	assente	assente	assente	7.7	9.9
B	-	-	-	-	-	-
C1a	8.5	12.1	12.1	3.9	assente	7.7
C1b	7	assente	assente	assente	assente	assente
C1c	7.6	assente	assente	assente	assente	assente
C	-	-	-	assente	assente	assente
C2	11	10.9	11.5	4.3	8.1	9.8

Tabella 2: misure di porosità efficace (PHIE) dallo studio di Bello (2008)

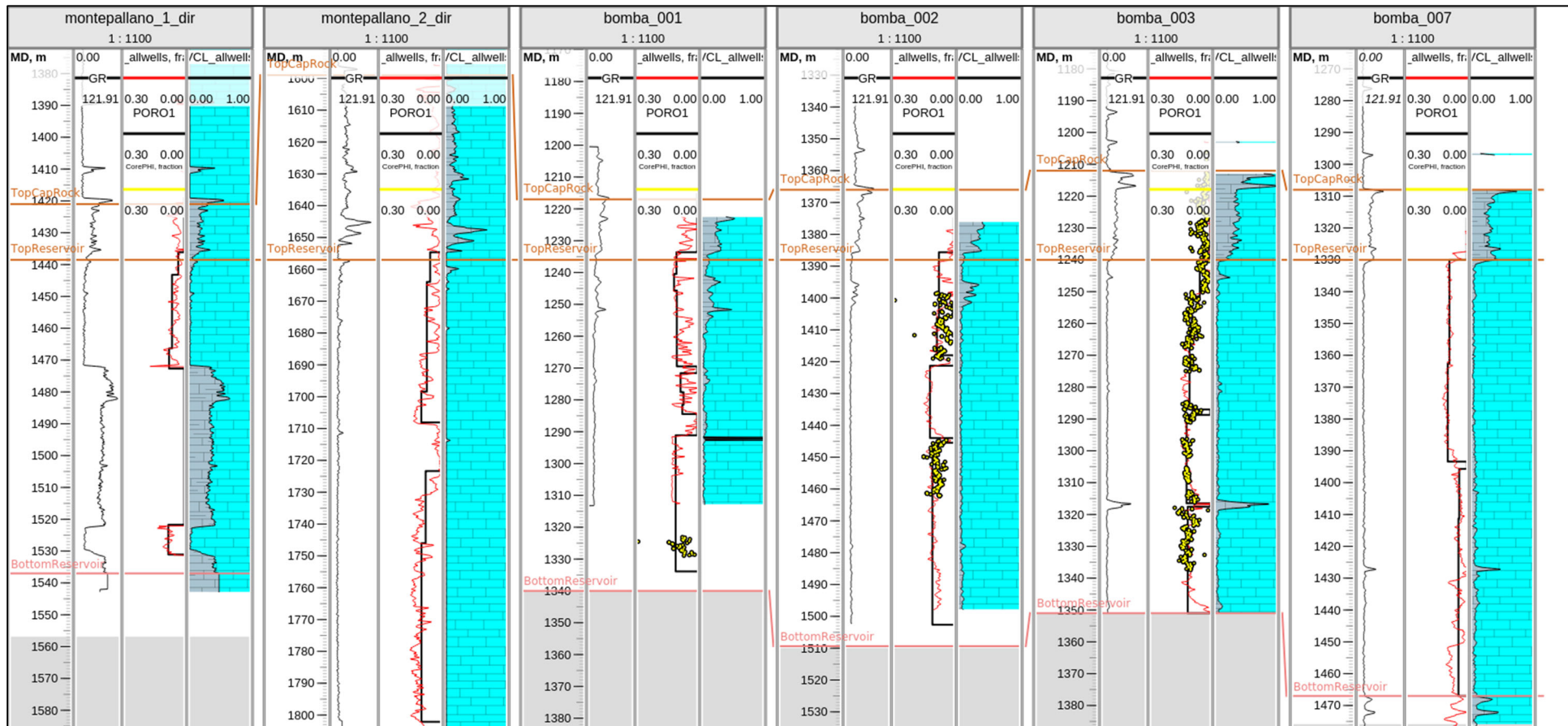


Figura 20: log principali per i pozzi di Montepallano e Bomba. Nel primo track c'è il gamma ray (GR), nel secondo la porosità da log (curva rossa), da studio Bello 2008 (curva nera) e da carota (punti gialli).

I valori di porosità efficace ai pozzi sono stati poi utilizzati per popolare l'intero grid, nella zone del reservoir.

Per fare ciò è stato eseguito un upscaling della porosità dei pozzi al grid, e questi valori sono stati distribuiti con una procedura geostatistica chiamata *Sequential Gaussian Simulation* (SGS) che è uno dei metodi più robusti ed utilizzati per gli studi di giacimento. Un recente studio (Trippetta et al. 2021) ha applicato l'algoritmo SGS per caratterizzare i calcari della formazione Bolognana, nell'area di Lettomanoppello-Fonte di Papa-Fonticelle a nord della Majella, mostrando risultati migliori rispetto al metodo kriging (uno tra i metodi geostatistici più robusti insieme all'SGS).

La distribuzione è stata realizzata con un variogramma di 400x400x5 m, in linea con quelli utilizzati per i calcari del Bolognana nei campi a nord della Majella (Brandano et al. 2012, Lipparini et al. 2018, Trippetta et al. 2021). Questa relativamente corta dimensione degli assi del variogramma ha permesso di tener conto della estrema variabilità che possono avere questi calcari in termini petrofisici da un pozzo all'altro. Oltre ad una distribuzione semplice, come descritta sopra, è stata eseguita una distribuzione con gli stessi parametri variografici e con un trend che tenesse conto di faglie e anticlinali. Questo permette di simulare un aumento della densità delle fratture e quindi della porosità secondaria, e di conseguenza della porosità efficace totale (primaria + secondaria), vicino alle zone di faglia e sulle zone di anticlinale (**Figura 21**).

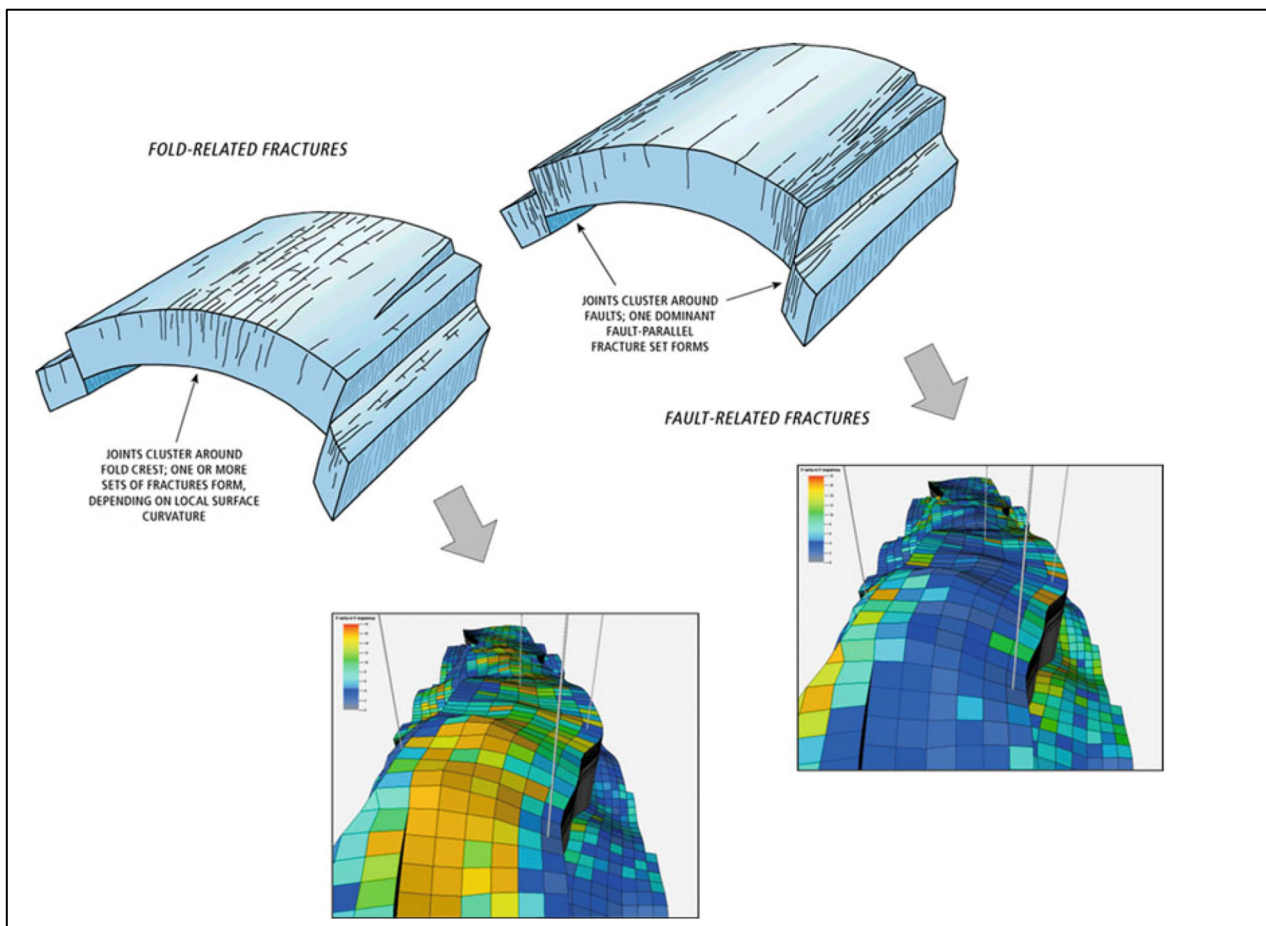


Figura 21: esempio di distribuzione di proprietà nel grid per simulare l'aumento della densità delle fratture legate ai piegamenti anticlinali e alle faglie (da Ringrose e Bentley, 2021)

Sono state testate diverse opzioni, con trend legati alle faglie, alle anticlinali, ad entrambi. Quest'ultimo caso è stato preso come caso chiave, perché più conservativo per gli scopi finali del presente progetto, ovvero la stima della subsidenza. I risultati finali della porosità distribuita con variogramma semplice e con variogramma con trend su faglie e anticlinali, sono mostrati rispettivamente in **Figura 22 a** e in **Figura 22 b**.

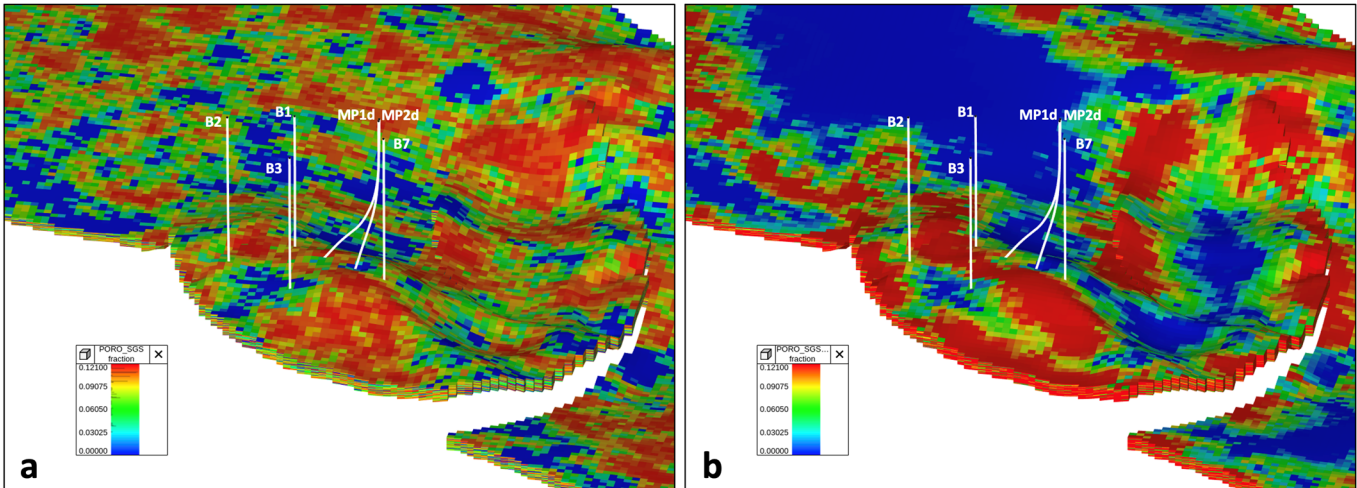


Figura 22: distribuzione dei dati di porosità dei pozzi nel grid con a) metodo SGS e b) metodo SGS con trend da faglie e cerniere anticlinali. Il grid visualizzato è filtrato per mostrare solo la zona del reservoir, nel segmento di maggiore interesse. Pozzi visualizzati: B (Bomba) 1,2,3,7; MP (Montepallano) 1d e 2d.

La robustezza del risultato in entrambe le modellizzazioni è ottima, come si può notare da un confronto tra i vari dati (log di pozzo, upscaled log, e grid) in **Figura 23** per la distribuzione SGS semplice e in **Figura 24** per la distribuzione SGS con trend. In quest'ultimo caso i dati sono filtrati e visualizzati solo nella zona mineralizzata, essendoci estese zone molto lontane dalle faglie e dalle anticlinali che hanno porosità basse e non permettono un confronto adeguato con i log dei pozzi (ad esempio le zone blu in **Figura 22 b**), e inoltre questo filtro permette di apprezzare meglio l'effetto del trend nella zona mineralizzata, che è all'interno di un anticlinale fagliata. Infatti, come si nota in figura, l'andamento delle porosità della distribuzione con trend è simile agli altri ma presenta una percentuale più alta di porosità elevata per simulare la fratturazione maggiore nelle zone di faglia e di anticlinale.

Per quanto riguarda invece il NG e la Sw, sono stati presi come riferimento i valori medi stimati nello studio di Bello (2008), che sono 54% per il NG e 20.9% per la Sw, quest'ultima ricavata dai dati relativi alle Special Core Analysis (SCAL) sulle carote dei pozzi Bomba 2 e Bomba 3.

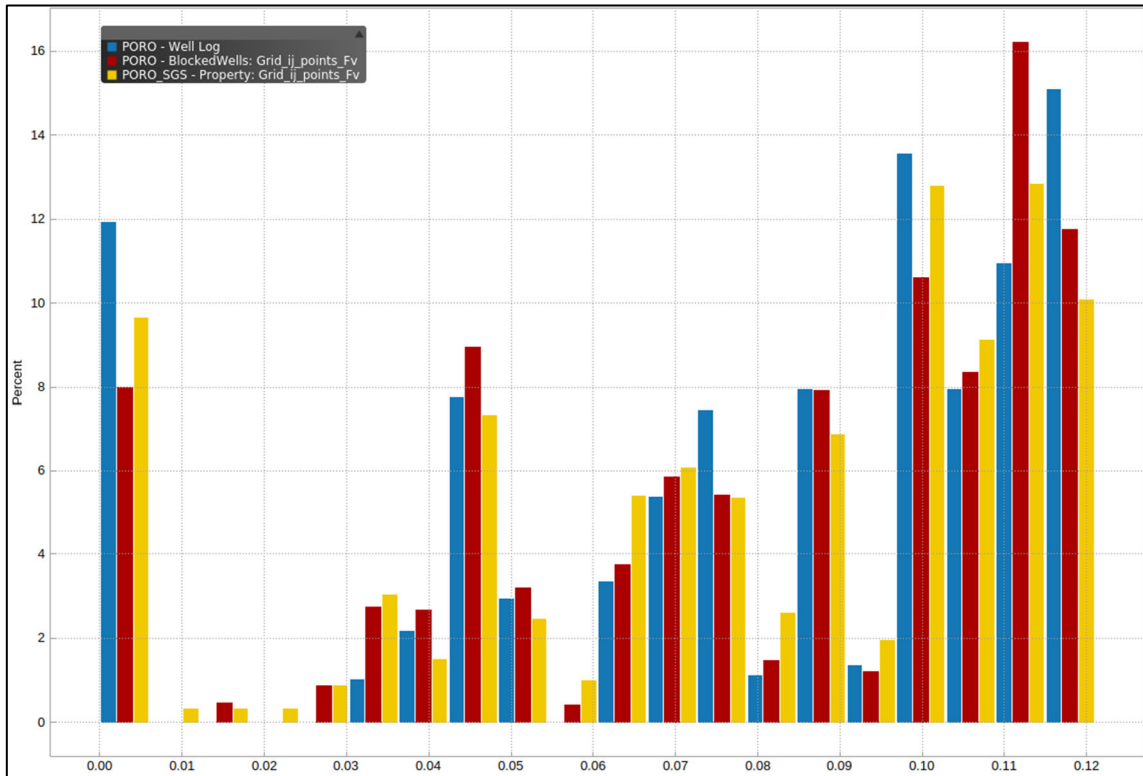


Figura 23: istogramma con distribuzione delle porosità per i log dei pozzi, i log con upscaling al grid, ed il grid con distribuzione SGS semplice

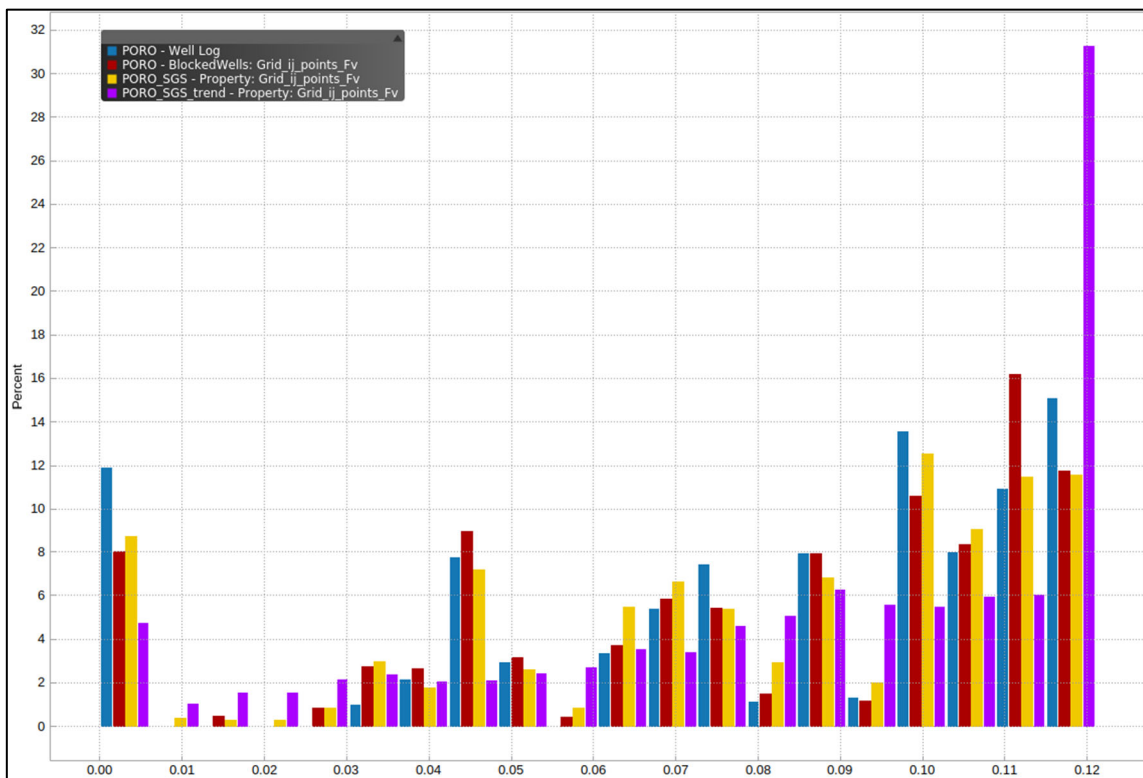


Figura 24: istogramma con distribuzione delle porosità per i log dei pozzi, i log con upscaling al grid, il grid con distribuzione SGS semplice, e il grid con distribuzione SGS con trend da faglie e cerniere anticlinaliche.

4.4. Contatto gas-acqua

La quota del contatto gas-acqua (gas-water-contact, GWC) è stato stimato dai dati dei DST effettuati sul pozzo Bomba 1 e confermato da tutti gli studi petrofisici e volumetrici precedenti.

La DST 2 con bottom dell'intervallo aperto alla produzione posizionato a 1095 m TVDss ha evidenziato solo produzione di gas, portando dunque alla definizione di un gas-down-to (GDT) robusto.

La DST 3 con bottom dell'intervallo aperto a 1120 m TVDss ha evidenziato produzione di gas con tracce d'acqua.

La DST 4 con intervallo aperto tra 1120 e 1142 m TVDss ha evidenziato solo produzione di acqua, consentendo pertanto di definire un water-up-to (WUT) alla profondità di 1120 m TVDss.

Sulla base dell'interpretazione di tali prove, la posizione del GWC è stata dunque fissata a una quota pari a 1120 m TVDss.

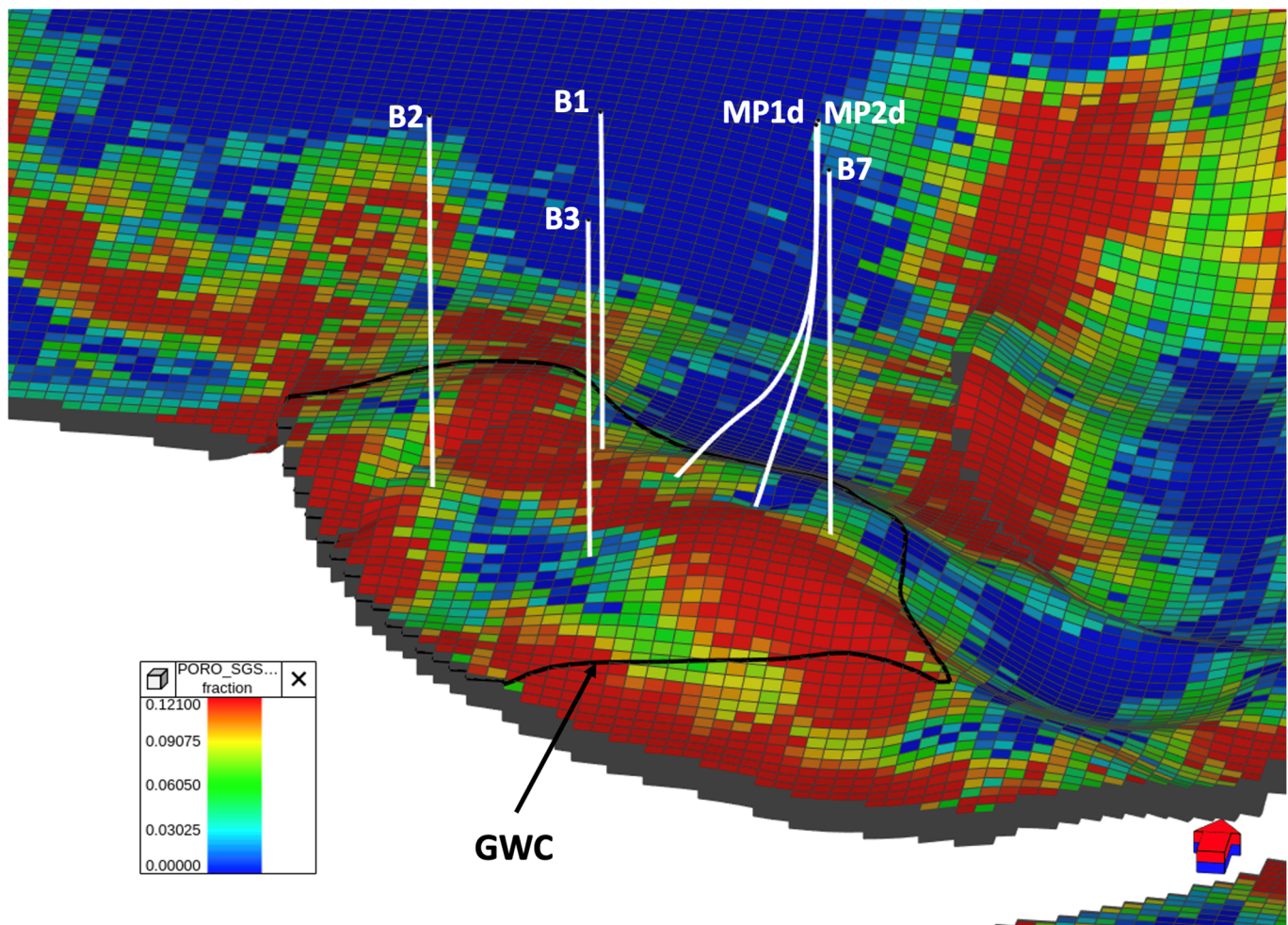


Figura 25: posizione del contatto gas-acqua (GWC) visualizzato dal grid di porosità calcolata con i trend a faglie e anticlinali. Pozzi visualizzati: B (Bomba) 1,2,3,7; MP (Montepallano) 1d e 2d.

4.5. *Calcolo volumi in posto*

La stima dei volumi originariamente in posto (gas originally in place, GOIP), è stata effettuata considerando la porosità ricavata sia da variogramma (modello 1, **Figura 22 a**), che da variogramma più trend (modello 2, **Figura 22 b**). I risultati sono i seguenti:

- GOIP Modello 1: 3046 MMsmc / 108 bcf
- GOIP Modello 2: 3321 MMsmc / 117 bcf

Questi numeri sono in linea con le stime precedenti di Bello (2008), 2945 MMsmc / 104 bcf, di Dream (2016), 3024 MMsmc / 107 bcf, e di RPS (2022), P90 2555 MMsmc / 90.3 bcf, P50 3229 MMsmc / 114 bcf.

5. Conclusioni

Il modello statico di giacimento del campo di Colle Santo è stato costruito con il fine di valutare le risorse di gas e per le successive analisi dinamiche e geomeccaniche sugli impatti della produzione e dello sfruttamento del campo. Il modello si estende su un'area di 24x24 km² ed è profondo circa 11 km.

Il primo step della modellizzazione statica è stato l'analisi bibliografica per la definizione del modello strutturale da adottare a livello regionale e da integrare con il modello locale interpretato da AGIP su circa 40 linee sismiche 2D.

L'ampia bibliografia visionata ha permesso di selezionare due modelli di riferimento, quello elaborato da Patacca et al. (2008) e quello di Calamita et al. (2009). Sebbene i due modelli presentino differenze marcate, elencate nel paragrafo 3.2, queste sono più incentrate sugli aspetti cinematici della struttura, mentre per quanto riguarda gli aspetti più puramente geometrici, sono state individuate delle forti analogie, che hanno permesso di costruire un modello strutturale in linea con entrambi i modelli selezionati. L'unica differenza sostanziale è la faglia occidentale denominata f1, che è un back-thrust con immersione adriatica per il modello di Patacca et al., e una faglia normale con immersione appenninica per Calamita et al. (2009). Si è ritenuto necessario tenere entrambe le configurazioni, per poter fare le opportune valutazioni nel momento in cui saranno sviluppati i modelli dinamico e geomeccanico. In particolare, si potrà così studiare se questa faglia possa subire l'effetto della variazione del campo di sforzi risultante dalla variazione della pressione in giacimento.

L'estensione delle faglie al di là della linea CROP 11 interpretata dagli autori dei due modelli di riferimento, è stata eseguita con riferimento al modello di Calamita che mostra più dettagli rispetto a quello di Patacca. Le faglie regionali sono state poi integrate con le interpretazioni fatte da AGIP/ENI del top dei carbonati miocenici (Formazione Bolognano) e delle relative faglie alla scala locale del giacimento di Colle Santo.

Il modello stratigrafico è stato costruito a partire dal top dei carbonati miocenici, che è stato esteso al di fuori dell'area interpretata utilizzando i profili dei pozzi presenti all'interno della istanza di concessione e pubblici (da progetto ViDEPI).

Il passo successivo è stato costruire il modello petrofisico, con particolare focus sulla distribuzione della porosità efficace, parametro chiave, all'interno del giacimento. Sono state riviste le analisi petrofisiche precedenti, i profili e il log dei pozzi all'interno dell'area mineralizzata e le relative analisi sulle carote prelevate. Tutti questi dati sono stati integrati per la definizione della distribuzione della porosità all'interno del giacimento. È stata inizialmente definita una distribuzione con procedura SGS (*Sequential Gaussian Simulation*) e variogramma 400x400x5 m (in linea anche con i dati di letteratura sulla stessa formazione in campi a nord della Majella), e successivamente sono stati testati diversi scenari con gli stessi parametri variografici ma con dei trend specifici per simulare una distribuzione delle fratture (ovvero della porosità secondaria) che si intensifica vicino ai lineamenti tettonici e le pieghe anticlinaliche. È stato scelto come modello di riferimento il caso più conservativo (ai fini della stima della subsidenza) che prevede entrambi i trend di fratturazione (faglia + anticlinale). Per gli altri parametri petrofisici chiave (NG, Sw) sono stati scelti i parametri medi stimati nelle precedenti analisi petrofisiche e dinamiche (Bello, 2008).



Engineering
Management
Contracting



Come ultimo step è stato definito il contatto gas acqua (GWC) dai dati DST del pozzo Bomba 1, e sono stati calcolati i volumi di gas originariamente in posto (GOIP) per i due casi di distribuzione della porosità, stimando valori che vanno da 3046 a 3321 MMsmc. Questi valori sono in linea con le precedenti valutazioni volumetriche.

Bibliografia

- Aghli G., Moussavi-Harami R., Mohammadian R. (2020). Reservoir heterogeneity and fracture parameter determination using electrical image logs and petrophysical data (a case study, carbonate Asmari Formation, Zagros Basin, SW Iran). *Pet. Sci.* 17, 51–69 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12182-019-00413-0>
- AGIP Mineraria (1966) – Bomba 1 well - Production test report, Chieti.
- AGIP Mineraria (1967) – Bomba 2 well - Capillary pressure curve & residual gas saturation, San Donato Milanese.
- AGIP Mineraria (1967) – Bomba 3 well - Capillary pressure curve & residual gas saturation, San Donato Milanese.
- AGIP S.p.A. (1986) – Previsioni preliminari di subsidenza per il campo di Bomba (CH), San Donato Milanese.
- AGIP S.p.A. (1989) – Previsioni preliminari di subsidenza per il campo di Bomba – Nota tecnica, San Donato Milanese.
- AGIP S.p.A. (1990) – Previsioni preliminari di subsidenza per il campo di Bomba per una produzione con portate superiori a 400000 Sm³/g, San Donato Milanese.
- Agriparadigma S.r.l. (2007) – Rapporti di prova sui campioni di gas prelevati ai pozzi Monte Pallano 1 e 2, Ravenna.
- Argnani, A. (2005). Possible record of a Triassic ocean in the Southern Apennines. *Bollettino Della Societa Geologica Italiana*, 124, 109–121.
- Bausà, J., Tavani, S., Storti, F. y Muñoz, J.A. (2011). Longitudinal fracture generation in the Fiastrone anticline, Sibillini thrust sheet, Northern Apennines (Italy). *Trabajos de Geología*. 29, 29 (sep. 2011).
- Bello G., Mari E. (1997) – Bomba field - Reservoir engineering study and development hypothesis, Parma.
- Bello G. (2007) – Monte Pallano field – Well Testing Interpretation (wells MP-1 & MP-2) & development hypothesis, Forest CMI S.p.A., Parma, December 2007.
- Bello G. (2008) – Monte Pallano” Field - 3D Reservoir Simulation Study prepared for Forest Oil, Forest CMI S.p.A., Parma, June 2008.
- Bello G. (2008) – Monte Pallano Field - 3D Reservoir Simulation Study - Sensitivity case prepared for Forest Oil, Forest CMI S.p.A., Parma.
- Billi A. (2005). Attributes and influence on fluid flow of fractures in foreland carbonates of southern Italy. *Journal of Structural Geology*, Volume 27, Issue 9, Pages 1630-1643, ISSN 0191-8141, <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2005.05.001>
- Billi A., Salvini F. (2003). Development of systematic joints in response to flexure-related fibre stress in flexed foreland plates: the Apulian forebulge case history, Italy. *Journal of Geodynamics*, Volume 36, Issue 4, 2003, Pages 523-536, ISSN 0264-3707, [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(03\)00086-3](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(03)00086-3)
- Billi A., Salvini F., Storti F. (2003). The damage zone-fault core transition in carbonate rocks: implications for fault growth, structure and permeability. *Journal of Structural Geology*, Volume 25, Issue 11, 2003, Pages 1779-1794, ISSN 0191-8141, [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(03\)00037-3](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(03)00037-3)

- Brandano M., L. Lipparini, V. Campagnoni, and L. Tomassetti (2012), Downslope-migrating large dunes in the Chattian carbonate ramp of the Maiella Mountains (Central Apennines, Italy): *Sedimentary Geology*, v. 255–256, p. 29–41, doi:10.1016/j.sedgeo.2012.02.002.
- Brandano, M., D. Scrocca, L. Lipparini, L. Petracchini, L. Tomassetti, V. Campagnoni, D. Meloni, and G. Mascaro, (2013). Physical stratigraphy and tectonic settings of Bolognano Fm (Maiella): A potential carbonate reservoir: *Journal of Mediterranean Earth Sciences*, v. 5, p. 151–176.
- Calamita F., Satolli S., Scisciani V., Esestime P., Pace P. (2011) – Contrasting styles of fault reactivation in curved orogenic belts: examples from the Central Apennines (Italy), *Geological Society of America, Bulletin* 123 (2011), pp. 1097–1111.
- Calamita, F., Esestime, 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. *Bollettino Della Societa Geologica Italiana*, 128(2), 381–394. <https://doi.org/10.3301/IJG.2009.128.2.381>
- Calamita, F., Viandante, M. G., Esestime, P., Paltrinieri, W., & Scisciani, V. (2007). The control of the Adria paleomargin architecture on the pre and post-Early Pliocene evolution of the Central-Southern Apennines. *Rendiconti Della Societa Geologica Italiana*, 4, 170–173.
- Calamita, F., Viandante, M. G., & Hegarty, K. (2004). Pliocene-Quaternary burial/exhumation paths of the Central Apennines (Italy): Implications for the definition of the deep structure of the belt. *Bollettino Della Societa Geologica Italiana*, 123, 503–512.
- Carminati, E.; Doglioni, C (2012). Alps vs. Apennines: The paradigm of a tectonically asymmetric. *Earth Earth Sci. Rev.* 2012, 112, 67–96.
- D'Ambrosio, A., Lipparini, L., Bigi, S., Cassola, T., Bambridge, V.R., Derks, J.F., Trippetta, F. (2021). Structural restoration and basin modelling of the central apennine orogen/foredeep/foreland system: New insights on the regional petroleum system. *Marine and Petroleum Geology* 127, 1-20.
- DREAM (2016). Campo di Colle Santo. Studio della subsidenza indotta dalla produzione del campo.
- Durante D.; Lipparini L.; Trippetta F.; Romi A, (2019). Best Modelling Approaches on Carbonate Reservoirs, a Case Study From the Majella Mountain, Italy. 81st EAGE Conference and Exhibition 2019
- Festa, A., Ghisetti, F., & Vezzani, L. (Eds.). (2006). Note illustrative della Carta geologica del Molise. Scala 1:100.00. Regione Molise, 93 pp.
- Finetti, I. R., Calamita, F., Uberto, C., Ben, A., Forlin, E., Pipan, M., Prizzon, A., Rusciadelli, G., & Scisciani, V. (2005a). Crustal geological section across central Italy from the Corsica Basin to the Adriatic Sea based on geological and CROP seismic data, in Finetti, I.R., ed., *Deep Seismic Exploration of the Central Mediterranean and Italy. CROP PROJECT*, Elsevier, 159–196.
- Finetti, I. R., Lentini F., Carbone S., Del Bene A., Di Stefano A., Guarnieri P., Pipan M., & Prizzon A. (2005b). Crustal Tectono-Satratigraphy and Geodynamics of the Southern Apennines from CROP and other Integrated Geophysical-Geological Data. *CROP PROJECT: Deep Seismic Exploration of the Central Mediterranean and Italy Elsevier*, Chapter(12), 225–263.
- Funiciello R., Mattei M., Capelli G., Corrado S., Mazza R., Storti F. (2008) – *Geologia regionale e idrogeologia dell'area Maiella-Bomba*, Relazione per Geocomp Corp., Universit. Roma TRE, Roma, November 2008.
- Geolog – Surface Logging (2007) – Forest – CMI S.p.A. – Monte Pallano 1 Dir – Final Well Report.

Geolog – Surface Logging (2007) – Forest – CMI S.p.A. – Monte Pallano 2 Dir – Final Well Report.

Lipparini L., Trippetta F., Ruggieri R., Brandano M., Romi A. (2018). Oil distribution in outcropping carbonate-ramp reservoirs (Maiella Mountain, Central Italy): Three-dimensional models constrained by dense historical well data and laboratory measurements. *AAPG Bulletin*, 102(7), 1273-1298.

Lipparini L., D'Ambrosio A., Trippetta F., Bigi S.; Derks J.F., Bambridge V.R., Cassola T (2021). A new regional petroleum systems model for Central Italy and the central Adriatic Sea supported by basin modelling and an analysis of hydrocarbon occurrences. *J. Pet. Geol.* 2021, 44, 461–485.

NASA JPL (2021). NASADEM Merged DEM Global 1 arc second V001. Distributed by OpenTopography. <https://doi.org/10.5069/G93T9FD9>. Accessed: 2023-11-02

Patacca E., Scandone P. (2007). Geology of the Southern Apennines. *Boll.Soc.Geol.It. (Ital.J.Geosci.)*, Spec. Issue No. 7 (2007), pp. 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(3). <https://doi.org/10.1029/2005TC001917>

Pierantoni, P. P., Deiana, G., Romano, A., Paltrinieri, W., Borraccini, F., & Mazzoli, S. (2005). Geometrie strutturali lungo la thrust zone del fronte montuoso umbro-marchigiano-sabino. *Italian Journal of Geosciences*, 124(2), 395–411.

Progetto ViDEPI, <https://www.videpi.com/videpi/videpi.asp>. Accessed: 2023-11-02

Ringrose P., Bentley M. (2021): *Reservoir Model Design*, 2 edn. Springer.

Romano V., Bigi S., Carnevale F., De'Haven Hyman J., Karra S., Valocchi A.J., Tartarello M.C., Battaglia M. (2020). Hydraulic characterization of a fault zone from fracture distribution. *Journal of Structural Geology*, Volume 135, 2020, 104036, ISSN 0191-8141, <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104036>

Satolli S., Calamita F. (2008). Differences and similarities between the central and the southern Apennines (Italy): Examining the Gran Sasso versus the Matese-Frosolone salients using paleomagnetic, geological, and structural data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B10). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2008JB005699>

Satolli S., Speranza F., Calamita F. (2005). Paleomagnetism of the Gran Sasso range salient (central Apennines, Italy): Pattern of orogenic rotations due to translation of a massive carbonate indenter. *Tectonics*, 24(4). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2004TC001771>

SEPM Spec. Publ., 60, 53-74. Vezzani, L., Festa, A., Ghisetti, F., 2010. Geology and Tectonic Evolution of the Central Southern Apennines. <https://doi.org/10.1130/SPE469>. Italy

Servizio Geologico d'Italia (2012) – Note illustrative del Foglio 361 Chieti, Carta Geologica d'Italia, 1:50.000, Servizio Geologico d'Italia, ISPRA, APAT, Roma.

Storti Fabrizio and Francesco Salvini; (2001). The evolution of a model trap in the central apennines, italy: fracture patterns, fault reactivation and development of cataclastic rocks in carbonates at the narni anticline. *Journal of Petroleum Geology* 24.

Strata Georesearch, Aprile 2018. 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”.

- Tomassi A.; Trippetta F.; Franco R.; Ruggieri R. (2022). From petrophysical properties to forward-seismic modeling of facies heterogeneity in the carbonate realm (Majella Massif, central Italy). *J. Pet. Sci. Eng.* 2022, 211, 110242.
- Trippetta F., Durante D., Lipparini L., Romi A., Brandano M (2021). Carbonate-ramp reservoirs modelling best solutions: Insights from a dense shallow well database in Central Italy. *Mar. Pet. Geol.* 2021, 126, 104931.
- Vecsei A., Sanders D., Bernoulli D., Eberli G.P. & Pignatti J.S. (1998) - Sequence stratigraphy and evolution of the Maiella carbonate platform margin, Cretaceous to Miocene, Italy. In (Eds.) *The Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins*,
- Volatili T., Zambrano M., Ciona A., Huisman B.A.H., Rustichelli A., Giorgioni M., Vittori S., Tondi E., (2019). From fracture analysis to flow simulations in fractured carbonates: The case study of the Roman Valley Quarry (Majella Mountain, Italy), *Marine and Petroleum Geology*, Volume 100, Pages 95-110, ISSN 0264-8172, <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.10.040>