



“CONCESSIONE DI COLTIVAZIONE IDROCARBURI S.ALBERTO”

OPERE PER LA MESSA IN PRODUZIONE DEL GIACIMENTO S.ALBERTO

COMUNE DI S. PIETRO IN CASALE- PROVINCIA DI BOLOGNA (BO)



A01

STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE

Procedura di V.I.A. ai sensi del D.Lgs. 152/2006 e ss.mm.ii.

A01b

Studio della subsidenza indotta dalla produzione del campo

POVALLEY OPERATIONS pty ltd

Via Ludovisi, 16 - 00187 ROMA
Tel.+39 (06) 42014968; Fax +39 (06) 48905824
Registro Imprese: 05584311004
www.povalley.com - info@povalley.com



CAMPO DI
SANTA MADDALENA

**Studio della subsidenza
indotta dalla produzione del
campo**

Ottobre 2014



INDICE

1	INTRODUZIONE	1
2	DATI GENERALI DEL CAMPO	2
3	MODELLO GEOLOGICO INTEGRATO	3
3.1	Inquadramento geologico	3
3.1.1	Assetto ed evoluzione tettonica e stratigrafica	4
3.2	Ricostruzione geologica 3D	5
3.2.1	Dataset	5
3.2.2	Modello strutturale	6
3.2.3	Modello stratigrafico	7
3.2.4	Grid geologico 3D	11
4	ANALISI DEL COMPORTAMENTO DINAMICO DEL GIACIMENTO	13
5	STUDIO GEOMECCANICO	15
5.1	Descrizione del software Reservoir Geomechanics (Petrel)	16
5.2	Definizione del modello	17
5.2.1	Grid	17
5.2.2	Faglie	17
5.2.3	Classificazione geomeccanica	17
5.2.4	Caratterizzazione geomeccanica	19
5.3	Inizializzazione del modello	21
5.4	Principi di analisi	22
5.4.1	Analisi effettuate	23
5.4.2	Time-step di analisi	23
5.5	Analisi dei risultati	24
6	CONCLUSIONI	27
7	BIBLIOGRAFIA	29



1 INTRODUZIONE

Il presente rapporto descrive i risultati dello studio condotto da DREAM s.r.l. per valutare la subsidenza potenzialmente indotta dalle future attività di produzione del giacimento di Santa Maddalena, sito all'interno della concessione Sant'Alberto (livello PL1-H mineralizzato a gas, blocco 5 del campo di San Pietro in Casale).

Il lavoro è stato articolato in due fasi: (1) costruzione del modello geologico del volume di interesse, comprendente i livelli mineralizzati a gas che costituiscono il *reservoir* di Santa Maddalena, (2) definizione del modello geomeccanico per la valutazione delle variazioni altimetriche del piano campagna indotte dalla produzione.

L'assetto stratigrafico e strutturale del sottosuolo a scala regionale utilizzato per generare un modello geologico esteso è stato ricostruito sulla base delle informazioni reperite dall'analisi delle fonti bibliografiche disponibili. La descrizione di dettaglio della porzione sommitale della Formazione Porto Corsini (Pliocene inferiore), mineralizzata a gas, che costituisce il *reservoir* di Santa Maddalena, e delle zone confinanti è stata effettuata sulla base dell'integrazione dei dati, messi a disposizione da Po Valley Operations, relativi alla concessione Sant'Alberto, dello studio del campo realizzato nel 2012 ("*Santa Maddalena field - Static and dynamic reservoir study*", febbraio 2012, DREAM s.r.l.) e dei dati di pozzo pubblici reperibili presso il sito dell'UNMIG (progetto VIDEPI).

Sulla base del modello geologico realizzato è stato definito il modello geomeccanico, caratterizzato utilizzando dati di letteratura su formazioni analoghe e le conoscenze degli autori. Non essendo tuttavia disponibili parametri geomeccanici ottenuti da acquisizione diretta (i.e. log o test di laboratorio sulle formazioni oggetto di studio), la risposta meccanica del sistema in funzione della produzione è stata determinata al variare dei parametri di deformazione (modulo di Young) sia delle formazioni interessate dalla produzione sia di tutta la sequenza stratigrafica sovrastante e sottostante. Grazie al modello dinamico calibrato già messo a punto da DREAM s.r.l. ("*Santa Maddalena field - Static and dynamic reservoir study*", febbraio 2012, DREAM s.r.l.), validato anche dall'acquisizione di un nuovo valore di pressione statica di giacimento nel settembre 2014, la riproduzione della variazione delle pressioni indotte a seguito della coltivazione storica del campo e la previsione del comportamento del giacimento al riprendere della produzione erano già disponibili.

2 DATI GENERALI DEL CAMPO

Il campo di Santa Maddalena è situato in Emilia-Romagna, in provincia di Bologna e posizionato a circa 15 km SW dalla città di Ferrara e 25 km NNE dalla città di Bologna. Il campo si inserisce all'interno dell'istanza di concessione di coltivazione Sant'Alberto e corrisponde al blocco 5 del giacimento di San Pietro in Casale (SPC) (Ecopetrol, 2002), già oggetto di coltivazione da parte di AGIP (fig. 1). In totale l'intero giacimento di San Pietro in Casale presenta dimensioni di circa 10 km in direzione E-O e 4 km in direzione N-S, con una estensione areale di circa 40 km².

La trappola, di dimensioni pari a circa 3.2 x 2.0 km², risulta essere di tipo strutturale. Essa corrisponde a un'anticlinale ad asse ONO-ESE delimitata a nord da un *thrust* a vergenza nord-orientale e a sud da un *backthrust*, entrambi di importanza regionale. Verso est e ovest tale trappola è delimitata da due faglie di importanza locale, perpendicolari ai *thrust* principali.

Il *reservoir* principale è rappresentato dal livello PL1-H, appartenente alla Formazione Porto Corsini (Pliocene inf.), ubicato a una profondità media di circa 850 m TVDss. Tale livello è stato storicamente prodotto attraverso i pozzi SPC-1, SPC-4, SPC-8 e SPC-9 a partire dal settembre 1960. All'interno della successione pliocenica è presente un ulteriore livello mineralizzato a gas, identificato come PL2-C, appartenente alla Formazione Porto Garibaldi; a causa delle proprietà petrofisiche scadenti e delle basse portate di gas erogate durante i test effettuati, tale livello non è mai stato messo in produzione. La copertura del giacimento (o *caprock*) è costituita dalle argille pleistoceniche della Formazione Argille del Santerno, continua al di sopra del giacimento, con spessori medi di circa 95 m nella zona del *reservoir*.

Alla data della scoperta del campo la pressione iniziale della formazione PL1-H (statica di fondo) alla profondità (*datum depth*) di 856 m TVDss era pari a 99.5 barsa. Il contatto gas/acqua originale è stato individuato alla profondità di 907 m TVDss.

Durante la prima fase di produzione storica, avviata nel settembre 1960 e conclusa nel gennaio 1976, dal blocco 5, livello PL1-H, è stato prodotto un volume di gas pari a 178.4 10⁶ m³_{sc}.

Nell'ambito del permesso di ricerca San Vincenzo nel periodo maggio-luglio 2004 è stato perforato il pozzo Santa Maddalena 1 (SM-1), risultato sterile, ed il successivo *side-track* Santa Maddalena 1dir (SM-1dir), risultato mineralizzato a gas sui due livelli PL1-H e PL2-C.

3 MODELLO GEOLOGICO INTEGRATO

Il modello geologico messo a punto nell'ambito del presente lavoro integra il precedente modello 3D statico di *reservoir* e il modello stratigrafico-strutturale a scala regionale. Il modello stratigrafico e strutturale a scala regionale è stato definito attraverso l'analisi dei dati di pozzo perforati nel campo di S. Pietro in Casale e nelle aree limitrofe (<http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it>) e sulla base della documentazione bibliografica relativa all'area oggetto di studio. Per la modellizzazione di dettaglio del *reservoir* di Santa Maddalena è stato fatto riferimento ai risultati dello studio DREAM del 2012.

3.1 Inquadramento geologico

Il giacimento di Santa Maddalena si colloca all'interno dell'avanfossa padana plio-pleistocenica, in prossimità del settore centrale della Dorsale Ferrarese.

I livelli mineralizzati a gas oggetto del presente studio appartengono alla parte sommitale della Formazione Porto Corsini, successione arenaceo-pelitica di origine torbiditica deposta lungo il fronte dei *thrust* appenninici sepolti e nell'*offshore* adriatico durante il Pliocene.

La successione terrigena di avanfossa è caratterizzata da una porzione basale prevalentemente argillosa (Pliocene inf.) passante verso l'alto a depositi torbiditici caratterizzati da prevalenti argille con subordinate intercalazioni di livelli sabbiosi discontinui (Pliocene inf. e medio-sup.). La successione prosegue nel Pleistocene inferiore con depositi di ambiente marino di piattaforma composti da sabbie con intercalazioni argillose, successivamente passanti nel Pleistocene superiore e nell'Olocene e a depositi continentali di piana alluvionale.

La struttura del giacimento è definita da un'anticlinale, appartenente al sistema della Dorsale Ferrarese, allungata con asse orientato in direzione ONO-ESE, delimitata a nord da un *thrust* frontale e a sud da un *backthrust*. Questi elementi strutturali si estendono a livello regionale e risultano legati agli eventi compressivi pliocenici che coinvolgono l'intera sequenza mesozoico-quadernaria.

All'interno del campo di S. Maddalena sono attivi due sistemi di faglie che dislocano il *top* e il *bottom* del giacimento con rigetti di ordine decametrico, il primo a direzione circa NNE-SSO, il secondo a direzione NNO-SSE. Due faglie a direzione media NNE-SSO delimitano la trappola a est e ovest. La roccia di copertura che sigilla la mineralizzazione è composta dalle argille plio-pleistoceniche della Formazione delle Argille del Santerno.

3.1.1 Assetto ed evoluzione tettonica e stratigrafica

A partire dal Miocene superiore, fino al Pleistocene, in corrispondenza del settore orientale della Pianura Padana si è sviluppato un sistema di pieghe e sovrascorrimenti legati alla tettonica compressiva appenninica.

Il complesso sepolto definisce tre archi, rispettivamente corrispondenti (da ovest verso est) alle pieghe del Monferrato, alle pieghe emiliane e alle pieghe ferraresi-romagnole. Queste ultime rappresentano l'elemento strutturale più esterno dell'Appennino settentrionale e al loro interno si distinguono le pieghe romagnole, più interne, e le pieghe ferraresi, più esterne. Tali piegamenti risultano essere fortemente tettonizzati da *thrust* e *backthrust* coevi che coinvolgono la successione stratigrafica a partire dai depositi pre-pliocenici fino ai depositi di avanfossa plio-pleistocenici (Dondi et al., 1982a; Boccaletti e Martelli, 2004) (fig. 2).

L'assetto strutturale dell'area oggetto di studio è il prodotto dell'evoluzione tettonica plio-pleistocenica dell'avanfossa padano-adriatica (Dondi et al., 1982a; Bigi et al., 1992; Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP, 1998; Toscani et al., 2009; Boccaletti et al., 2011). Come conseguenza del progressivo avanzamento verso N-NE del fronte appenninico, l'avanfossa pliocenica ha registrato l'instaurazione di aree depocentrali allungate in direzione circa NO-SE, confinate a S da alti strutturali controllati dai sovrascorrimenti appenninici, e a N-NO dal margine di avampaese. A tale sistema di sovrascorrimenti appartengono i due lineamenti tettonici che delimitano a N e a S il giacimento.

All'interno dell'area studiata la deformazione associata ai sovrascorrimenti ha coinvolto la successione stratigrafica a partire dai depositi miocenici fino ai depositi plio-pleistocenici. I rigetti di tali lineamenti tettonici, in riferimento alla superficie di base dei depositi pliocenici, può avere entità variabile, da alcune centinaia di metri ad oltre un chilometro.

A scala regionale l'entità della deformazione tende a diminuire significativamente verso la parte superiore della sequenza sedimentaria dalla Base del Pliocene fino alla Base delle Sabbie di Asti, in accordo con una diminuzione nel tempo della tettonica appenninica compressiva (Pieri e Groppi, 1981; Boccaletti e Martelli, 2004, Ghielmi et al., 2013).

Il substrato pre-pliocenico comprende dal basso stratigrafico verso l'alto stratigrafico: (1) le dolomie e i calcari di piattaforma dell' Eocene-Giurassico; (2) la sequenza marnosa di piattaforma esterna/scarpata dell'Eocene medio-Miocene superiore (Marne di Gallare); (3) la successione marnoso-evaporitica del Messiniano (Formazione Gessoso-solfifera) sviluppata solo localmente nel settore nord-occidentale dell'area; (4) una sequenza torbiditica di ambiente ipoalino tardo-messiniana (Formazione di Fusignano) (5) una successione di mare poco profondo prevalentemente argillosa con livelli marnoso-calcarei (Formazione a Colombacci) (Dondi et al., 1982b).

Successivamente alla messa in posto del substrato, all'inizio del Pliocene, una fase trasgressiva ha portato alla deposizione di una potente successione argillosa all'interno del bacino di avanfossa allungato in direzione da NO-SE e confinato a S da alti strutturali

e a N-NW dal margine di avampaese (Ghielmi et al., 2013). Dal Pliocene inferiore fino al Pliocene superiore, le aree depocentrali di tale bacino sono state inoltre caratterizzate dalla deposizione di potenti sequenze torbiditiche caratteristiche di grandi piane bacinali, assenti in corrispondenza degli alti strutturali interni e del margine di avampaese.

La successione stratigrafica pliocenica completa include dunque la sequenza prevalentemente argillosa delle Argille del Santerno (Pliocene inf. - Pleistocene inf.) e le sequenze torbiditiche delle Formazioni Porto Corsini (Pliocene medio-inf.) e Porto Garibaldi (Pliocene medio-sup.). Durante il Pleistocene inferiore questo settore dell'attuale Pianura Padana registra una fase regressiva passando da un ambiente di mare profondo a un ambiente marino poco profondo, con la deposizione delle Sabbie di Asti (*sensu* Dondi, 1982a), fino a continentale. In questo contesto vengono a depositarsi dapprima le sabbie di piattaforma del Pleistocene medio-inf. (Sabbie gialle, Boccaletti e Martelli, 2004) e successivamente, in discordanza, le sabbie costiere del Pleistocene medio (Sabbie di Imola, Cibirri e Segadelli, 2009) che testimoniano una ulteriore fase di sollevamento.

Il Pleistocene superiore vede la prosecuzione del sollevamento e l'instaurarsi di un ambiente deposizionale prevalentemente di tipo continentale con apporti sedimentari che provengono in prevalenza dai corsi d'acqua romagnoli e dal Po e dai suoi affluenti di destra (Sistema Emiliano-Romagnolo) (Boccaletti e Martelli, 2004) (fig. 3).

3.2 Ricostruzione geologica 3D

Il modello geologico 3D esteso è stato generato utilizzando il software *Petrel Geoscience* (V.2012.4), commercializzato dalla società *Schlumberger*.

Il giacimento di Santa Maddalena, oggetto del presente studio, ha dimensioni di circa 3.2 x 2.0 km² per un'estensione areale di circa 6.7 km². Arealmente il modello geologico esteso risulta avere dimensioni di 24 x 24.5 km², comprendendo verticalmente 4.5 km di sequenza stratigrafica. Tale estensione è sufficiente a garantire condizioni di bordo indisturbate in fase di simulazione geomeccanica.

Le principali caratteristiche stratigrafiche e strutturali a scala regionale sono state ricostruite e integrate con il modello stratigrafico e strutturale del giacimento sulla base dei dati di pozzo, dei profili geologici e dei modelli concettuali presenti in letteratura. Dal punto di vista geologico il modello include tutti gli elementi, strutturali e stratigrafici (già descritti nel paragrafo 3.1), che caratterizzano questo settore.

3.2.1 Dataset

I dati a disposizione per la costruzione del modello geologico 3D esteso, integrato con il modello 3D a scala di giacimento, sono rappresentati da:

- Set di log di potenziale spontaneo digitizzati riferiti alla zona di *reservoir*, forniti da Po Valley Operations, per i 6 pozzi ubicati all'interno della concessione Sant'Alberto – Campo di San Pietro in Casale (SPC 1, SPC 4, SPC 8, SPC 9, Santa Maddalena 1, Santa Maddalena 1dir) (*);
- Profili di 42 pozzi a scala 1:1000 reperiti presso la banca dati on-line dell'UNMIG, utilizzati per l'estensione del modello a scala regionale (Baricella 1, Baricella 2, Baricella 3, Malalbergo 23, Malalbergo 38, Marrara 1, Minerbio 10, Minerbio 12, Minerbio 13, Minerbio 18, Minerbio 22, Minerbio 24, Minerbio 26, Montalbano 17, Montalbano 20, Montalbano 21, Poggetto 1, Pieve di Cento 1, San Giorgio di Piano 1, Spada 1, SPC 1, SPC 2, SPC 3, SPC 4, SPC 5, SPC 6, SPC 7, SPC 8, SPC 9, SPC 10, SPC 11, SPC 12, SPC 13, SPC 14, SPC 15, SPC 16, SPC 17, SPC 18, SPC 19, SPC 20, SPC 21, SPC 22) (*);
- Interpretazione sismica delle superfici di *top* e *bottom reservoir* (Po Valley Operations, 2011)
- Studio di giacimento del campo di Santa Maddalena effettuato da DREAM nel 2012.
- Documentazione bibliografica relativa all'area oggetto di studio.

(*) SPC = San Pietro in Casale

3.2.2 Modello strutturale

All'interno dell'area modellizzata l'ubicazione e la geometria dei sovrascorrimenti regionali sono state definite sulla base del dato sismico, disponibile per la zona di *reservoir*, sulla base del dato di pozzo e in riferimento allo stato dell'arte (Pieri e Groppi, 1981; Cremonini e Ricci Lucchi, 1982; Bigi et al., 1992; Boccaletti e Martelli, 2004; Turrini et al., 2014).

A partire da mappe e sezioni geologiche reperite in bibliografia all'interno del modello 3D sono stati integrati i principali lineamenti tettonici (fig. 4). In particolare è stata ricostruita la geometria del sistema di sovrascorrimenti a vergenza settentrionale, caratterizzato da una direzione media NO-SE (*Thrust 2*, *Thrust 5*) e variabile localmente a circa E-O (*Thrust 1*). Di questi il sovrascorrimento denominato *Thrust 2* costituisce il limite nord della struttura di S. Pietro in Casale che ospita i livelli mineralizzati a gas pliocenici. E' stato inoltre integrato un ulteriore sovrascorrimento (*Thrust 4*), di importanza sia regionale sia locale (vedi limite est della struttura di San Pietro in Casale). Tale elemento è caratterizzato da direzione media da a NE-SO migrata a N-S nel tratto più settentrionale dell'area. Infine è presente un *backthrust* a direzione media NO-SE con vergenza verso S (*Thrust 3*) che delimita la struttura di S. Pietro in Casale a S.

Il sistema di sovrascorrimenti regionali controlla lo sviluppo di alti e bassi strutturali, a direzione media NO-SE, ben evidenziati dalla morfologia della superficie di base del

Pliocene ricostruita a partire dai dati bibliografici (fig. 5). Le dislocazioni associate a tali sovrascorrimenti raggiungono un massimo di oltre 1000 m, stimati rispetto alla superficie di “Base del Pliocene” in corrispondenza del sovrascorrimento più esterno (*Thrust 1*) situato nella parte N dell’area modellizzata. I due sovrascorrimenti che delimitano a N e a S il giacimento (*Thrust 2* e *Thrust 3*) producono dislocazioni sulla “Base del Pliocene” fino ad alcune centinaia di metri.

In riferimento alla zona di *reservoir*, all’interno del modello 3D è stato integrato il modello di faglie derivante dall’interpretazione sismica eseguita da Po Valley Operations (2011). Il *reservoir* risulta caratterizzato dalla presenza di due sistemi di faglie con direzione media da NNE-SSO a NNO-SSE (*Fault 1÷9*) (fig. 6). Tali faglie controllano il locale ribassamento del *top* e del *bottom* del giacimento con cinematismi di tipo estensionale. I rigetti sono di ordine decametrico e raggiungono un massimo di circa 60 m in corrispondenza della faglia che delimita a ovest il giacimento (*Fault 1*).

3.2.3 Modello stratigrafico

L’assetto stratigrafico a scala di *reservoir* e a scala regionale è stato definito sulla base dei dati di 42 pozzi (22 pozzi appartenenti al campo di San Pietro in Casale e 20 pozzi con dataset di pubblico dominio ubicati nelle aree limitrofe) (fig. 7), nonché dei modelli strutturali e stratigrafici dell’area (Pieri e Groppi, 1981; Dondi et al., 1982b; Boccaletti e Martelli, 2004).

Stratigrafia e correlazione di pozzo

Sulla base dell’analisi del dato di pozzo, la successione stratigrafica dell’area è stata suddivisa in 9 unità principali (fig. 8).

1. **Alluvioni**, corrispondenti a intercalazioni di sabbie e argille di ambiente continentale del Quaternario;
2. **Sabbie di Asti**, corrispondenti a sabbie con locali intercalazioni argillose di ambiente marino del Quaternario;
3. **Argille del Santerno**, corrispondenti a prevalenti argille con subordinate intercalazioni sabbiose del Pliocene superiore-Pleistocene inferiore;
4. **Formazione Porto Garibaldi**, corrispondente a sabbie torbiditiche con sottili intercalazioni argilloso-siltose del Pliocene medio-superiore;
5. **Argille del Santerno (caprock)**, corrispondenti a prevalenti argille con subordinate intercalazioni sabbiose del Pliocene inferiore-medio;
6. **Reservoir**, corrispondente a sabbie torbiditiche con sottili intercalazioni argilloso-siltose del Pliocene inferiore;



7. **Formazione Porto Corsini**, corrispondente a sabbie torbiditiche con sottili intercalazioni argilloso-siltose del Pliocene inferiore;
8. **Miocene indifferenziato**, corrispondente a marne argillose con intercalazioni sabbiose del Miocene;
9. **Calcari**, corrispondenti a calcari e dolomie del Giurassico-Eocene.

I depositi quaternari comprendono (1) le alluvioni recenti di ambiente continentale (bancate sabbiose e ghiaie di canale e conoide intercalate a livelli argillosi) e (2) i sottostanti depositi di ambiente marino costiero; questi ultimi corrispondono alle Sabbie di Asti (Pleistocene).

La sottostante successione plio-pleistocenica comprende quattro intervalli stratigrafici (dall'alto verso il basso stratigrafico):

- intervallo argilloso superiore, costituito da depositi di età Pliocene superiore-Pleistocene inferiore riferibili alla Formazione Argille del Santerno (3);
- intervallo torbiditico superiore, di età Pliocene medio-superiore, riferibili alla Formazione Porto Garibaldi (4);
- intervallo argilloso inferiore di età Pliocene inferiore, riferibili alla Formazione Argille del Santerno. Tali argille costituiscono la *caprock* del giacimento (5);
- intervallo torbiditico inferiore di età Pliocene inferiore, riferibile alla Formazione Porto Corsini. La parte superiore corrisponde al livello PL1-H, che rappresenta il *reservoir* del campo di S. Maddalena (6-7).

Infine, il substrato pre-pliocenico è stato suddiviso in due intervalli lito-stratigrafici (dall'alto verso il basso stratigrafico):

- Marne argillose di età Oligocene-Miocene (8) con locali intercalazioni calcaree (Formazione a Colombacci di età Messiniano sup.) o torbiditiche (Formazioni Fusignano e Marne di Gallare di età Eocene-Messiniano inf.). All'interno della successione miocenica è sviluppato un livello di marne gessose appartenente alla Formazione Gessoso-Solfifera osservabile al solo pozzo Spada 1 (tra 2290 e 2345 m TVDss di profondità). Tale livello è stato accorpato alle altre formazioni mioceniche a fronte dello spessore trascurabile rispetto a quello delle litologie circostanti e quindi anche dell'impatto irrilevante ai fini della simulazione geomeccanica.
- Calcari e dolomie di età Giurassico-Eocene (9).

L'analisi dei profili a scala 1:1000 ha evidenziato un *trend* regolare di assottigliamento verso nord della successione pleistocenica, che passa da spessori massimi di circa 1150 m, osservati al pozzo Minerbio 24, a spessori minimi di circa 150 m, osservati al pozzo Pieve di Cento 1.

Si è osservata inoltre una forte variabilità laterale di spessore nella successione pliocenica (da circa 180 m al pozzo Spada 1 a oltre 600 m del pozzo San Pietro in Casale 1); questa caratteristica è ben nota in letteratura a scala di bacino ed associata allo sviluppo delle sequenze torbiditiche, riferibili alle Formazioni Porto Corsini e Porto Garibaldi, in risposta alla distribuzione di aree depocentrali allungate in direzione E-O e NE-SO, come rappresentate dall'andamento della superficie di *top* del Miocene (fig. 5).

In corrispondenza degli alti strutturali più esterni (pozzi Spada 1 – Pieve di Cento 1, pozzi Poggetto 1 – San Pietro in Casale 9 – Malalbergo 38 – Marrara 1) la stratigrafia ai pozzi evidenzia spessori ridotti o nulli (tra 0 e 125 m) per la Formazione Porto Garibaldi e spessori ridotti (tra 100 e 350 m) per la Formazione Porto Corsini. La sequenza torbiditica raggiunge il massimo spessore ai pozzi Baricella 2 e San Giorgio di Piano 1, in corrispondenza della zona depocentrale individuabile nella zona sud del modello (fig. 5), dove si sono osservati spessori di circa 750 m per la Formazione Porto Garibaldi e di almeno 400 m per la Formazione Porto Corsini, la cui base non viene raggiunta dai due pozzi.

La successione miocenica è intercettata interamente dai soli pozzi Spada 1 e Marrara 1. Al pozzo Spada 1 risulta evidente l'effetto dovuto alla presenza di sovrascorrimenti che ne intersecano la traiettoria. Tali sovrascorrimenti producono il raddoppio stratigrafico delle formazioni mioceniche e la sovrapposizione dei calcari cretacei sui sedimenti di età serravalliana (fig. 9). Lo spessore stratigrafico della successione è stato osservato al pozzo Marrara 1 (circa 1350 m) dove non sono presenti fenomeni di ispessimento per effetti tettonici.

Negli allegati 1 e 2 sono riportate due sezioni stratigrafiche che illustrano la correlazione ai pozzi.

Superfici stratigrafiche

A integrazione del dato di pozzo, per ricostruire in modo accurato l'andamento della sequenza stratigrafica modellizzata, sono state utilizzate 4 superfici di riferimento.

Due superfici di significato regionale, "Top Sabbie di Asti" e "Base del Pliocene", sono state ricostruite a partire dalla cartografia geologica disponibile in letteratura, basata sull'analisi integrata di sezioni sismiche e dati di pozzo (Pieri e Groppi, 1981; Cremonini e Ricci Lucchi, 1982; Boccaletti e Martelli, 2004). Altre due superfici di significato regionale, "Top Argille del Santerno" e "Top Calcari", sono state ricostruite attraverso l'interpolazione dei tagli stratigrafici definiti dalla correlazione ai pozzi, rispettando i *trend* strutturali regionali.

Di seguito vengono discussi il significato e le modalità di ricostruzione delle superfici sopra menzionate (dall'alto al basso stratigrafico):

- *Top Sabbie di Asti*: tale orizzonte è stato costruito utilizzando come riferimento la geometria della superficie di *Base del Sintema Emiliano Romagnolo* (Boccaletti e Martelli, 2004); quest'ultimo è stato utilizzato per definire la

morfologia della superficie basale dei depositi alluvionali del Quaternario (“Top Sabbie di Asti”) (fig. 10).

- *Top Argille del Santerno*: tale orizzonte corrisponde al *top* della sequenza pliocenica di avanfossa. Analogamente a quanto descritto per la superficie base del Pliocene, la morfologia dell’orizzonte evidenzia la presenza di alti e bassi strutturali allungati in direzione circa NO-SE. Il piegamento risulta più blando rispetto alla superficie di base del Pliocene in accordo con una riduzione verso l’alto dell’intensità della deformazione (Ghielmi et al., 2013) (fig. 11).
- *Base del Pliocene* (Cremonini e Ricci Lucchi, 1982): tale orizzonte è stato utilizzato per la modellizzazione del *top* della successione miocenica. Stratigraficamente corrisponde alla base della Formazione Porto Corsini correlata ai pozzi. Nella fig. 5 è evidenziata la morfologia dell’orizzonte caratterizzato dallo sviluppo di alti e bassi strutturali allungati in direzione circa NO-SE controllati dai *thrust* regionali descritti in precedenza (sistema delle Pieghe Ferraresi). L’orizzonte è stato anche utilizzato come *trend* per l’estensione a scala regionale della mappa di *top* del *reservoir*, corrispondente al *top* della Formazione Porto Corsini.
- *Top Calcari*: in accordo con i modelli geologici regionali (Boccaletti e Martelli, 2004; Boccaletti et al., 2011) tale superficie non risulta interessata dalle dislocazioni associate ai sovrascorrimenti regionali integrati nel modello (fig. 12).

All’interno della sequenza plio-pleistocenica compresa tra le superfici “Base del Pliocene” e “Top Argille del Santerno” la zonazione di modello è stata definita attraverso l’utilizzo di mappe isocore costruite sulla base dei tagli ai pozzi nonché dei rapporti stratigrafici tra le varie unità.

La geometria interna del livello *reservoir* PL1-H è stata ricostruita attraverso l’utilizzo di mappe di isocore derivanti dal precedente modello statico (DREAM, 2012). Il livello è stato quindi esteso a scala regionale considerando un andamento di tipo conforme rispetto alla superficie di *top* della Formazione Porto Corsini nonché riferendosi ai tagli stratigrafici identificati nei profili 1:1000 di pubblico dominio, cioè quelli relativi ai pozzi perforati nelle zone limitrofe alla concessione di Sant’Alberto.

Stratigrafia di modello

La stratigrafia completa è stata ricostruita attraverso la suddivisione del volume modellizzato in 9 zone, ovvero nelle principali unità riconosciute dalle analisi del dato di pozzo (fig. 8).

Le figure 13 e 14 illustrano rispettivamente lo sviluppo 3D e una sezione N-S della sequenza modellizzata. Nelle tabelle da 1 a 9 sono riportati i tagli stratigrafici delle principali unità utilizzati nel presente studio, definiti dalla correlazione ai pozzi.

3.2.4 Grid geologico 3D

L'accuratezza del modello geologico a scala sia regionale sia di giacimento deve essere tale da consentire di rappresentare la geometria delle caratteristiche strutturali e stratigrafiche più significative della sequenza modellizzata. Dunque il principale aspetto tenuto in conto è stato quello di garantire la rappresentatività dell'assetto strutturale e stratigrafico sia a scala regionale sia a scala di giacimento. Inoltre il *grid* 3D è stato generato in modo da soddisfare i seguenti ulteriori requisiti:

- idoneità alla simulazione fluidodinamica a scala di giacimento;
- idoneità alla simulazione geomeccanica a scala regionale.

L'integrazione degli elementi strutturali nel *grid* è stata effettuata utilizzando la tecnica "stair-step", che consiste nel rappresentare i lineamenti tettonici seguendo i bordi delle celle. Tale configurazione consente di mantenere una conformazione regolare delle celle in prossimità delle faglie e, allo stesso tempo, di mantenere una geometria rappresentativa delle faglie stesse, come richiesto dallo scopo del presente studio.

Al fine di descrivere i fenomeni fluido-dinamici e tenso-deformativi è stata adottata una discretizzazione fitta all'interno della zona *reservoir*, nella *caprock* e nelle formazioni limitrofe. Nelle zone più esterne del modello, in particolare in corrispondenza delle formazioni profonde e periferiche rispetto ai livelli mineralizzati, è stata invece adottata una discretizzazione più lasca; questi volumi, infatti, non sono interessati in modo apprezzabile dagli effetti indotti dal disturbo di pressione e, nell'ottica della modellizzazione geomeccanica, hanno principalmente lo scopo di garantire condizioni al contorno indisturbate.

Il *grid* generato presenta una suddivisione areale con maglie quadrate di 30 x 30 m² in tutta la zona *reservoir* in modo da garantire un buon grado di dettaglio per l'analisi dei fenomeni tenso-deformativi pur contenendo i tempi di calcolo entro limiti accettabili. Le zone periferiche del modello sono state descritte adottando celle di dimensioni crescenti, secondo una progressione geometrica, a partire dalla zona centrale dove è collocato il giacimento (fig. 15). Il *grid* del modello a scala regionale risulta quindi costituito arealmente da 213 x 161 celle (rispettivamente direzioni I e J).

Verticalmente la zonazione geologica è stata ricostruita a partire dai tagli stratigrafici dei pozzi in accordo con i modelli geologici regionali descritti in letteratura.



Per il volume di giacimento è stata mantenuta la stessa discretizzazione verticale adottata nel precedente modello dinamico (DREAM, 2012). Nel resto del modello la discretizzazione verticale è stata infittita nella roccia di copertura e nelle zone prossime al giacimento.

Complessivamente, sono stati definiti 29 livelli. Il grigliato così definito risulta quindi costituito da 994497 celle.

4 ANALISI DEL COMPORTAMENTO DINAMICO DEL GIACIMENTO

Per descrivere il comportamento dinamico del giacimento di Santa Maddalena (blocco 5 del campo di San Pietro in Casale, livello PL1-H) (fig. 16) sono stati utilizzati i risultati forniti dal modello numerico messo a punto da Dream s.r.l. nel 2012 (“*Santa Maddalena field – Static and dynamic reservoir study*”, febbraio 2012). Il profilo di pressione statica acquisito al pozzo Santa Maddalena 1dir in data 19/09/2014 conferma l’andamento della pressione media di campo prevista dal modello del 2012.

Come descritto nel capitolo 3, ai fini della modellizzazione geomeccanica è stato creato un modello geologico 3D con estensione a scala regionale: soltanto la porzione centrale del modello, che corrisponde al culmine mineralizzato PL1-H e all’acquifero che delimita il giacimento, è stata considerata attiva al flusso (fig. 13). Tutto il resto del modello è stato ipotizzato totalmente saturo in acqua e popolato con valori di pressione idrostatica costanti nel tempo.

Al fine di contenere i tempi computazionali e, allo stesso tempo, riprodurre il comportamento storicamente osservato del campo in termini di pressioni e di avanzamento del fronte d’acqua, nel modello dinamico del 2012 si era dimostrato efficace utilizzare un acquifero infinito di tipo analitico (*Carter-Tracy*). Tuttavia, ai fini della valutazione del comportamento geomeccanico è necessario ricorrere ad una modellizzazione dell’acquifero di tipo volumetrico in modo da poter determinare la propagazione e l’evoluzione del disturbo di pressione anche nella porzione di roccia serbatoio occupata dall’acquifero che delimita il giacimento. Pertanto il modello dinamico del 2012 è stato adeguatamente esteso al fine di includere anche l’acquifero nel volume simulato. I sovrascorrimenti denominati *Thrust 2*, *Thrust 3* e *Thrust 4* costituiscono delle barriere al flusso e quindi sono stati assunti come limiti del nuovo modello rispettivamente in direzione nord, sud ed est (par. 3.2.2 “Modello strutturale”). Inoltre, analisi di sensitività preliminari hanno permesso di individuare la distanza oltre la quale il disturbo di pressione indotto all’interno dell’acquifero risulta di fatto trascurabile e, quindi, di definire l’estensione del volume di influenza in direzione ovest. È stato pertanto possibile ottimizzare l’estensione del volume del nuovo modello dinamico pur conservando tempi computazionali accettabili (fig. 17).

Il modello dinamico esteso è stato successivamente utilizzato per simulare l’evoluzione del disturbo di pressione nel solo acquifero, mentre per la descrizione del comportamento dinamico del giacimento è stato mantenuto il modello calibrato del 2012. In particolare l’arco temporale analizzato comprende la produzione storica dal 1960 al 1976, il periodo di chiusura del campo e la risposta futura del sistema nel periodo tra il 2016 e il 2030. Gli scenari di *forecast* sviluppati nello studio del 2012 prevedevano la messa in produzione del pozzo esistente SM-1d e stimavano un ulteriore recupero di gas pari a circa $50 \cdot 10^6 \text{ m}^3_{\text{SC}}$ in un arco temporale di circa 14 anni, fino al raggiungimento dei limiti economici imposti. Gli scenari si differenziavano per la scelta dei vincoli operativi e degli intervalli di completamento adottati per il pozzo SM-1d. Sulla base delle indicazioni fornite da Po Valley Operations, la presente analisi geomeccanica è stata effettuata con riferimento ai



risultati forniti dallo scenario C e considerando il 2016 come data di inizio del *forecast*. Inoltre, per verificare il comportamento del sistema all'instaurarsi di nuove condizioni di equilibrio a campo chiuso, il *forecast C* è stato esteso per altri 40 anni oltre il termine della produzione.

Partendo dal modello dinamico del 2012 e considerando l'estensione effettuata per la modellizzazione volumetrica dell'acquifero, sono state quindi generate le mappe delle pressioni interstiziali in corrispondenza delle fasi temporali più significative per l'analisi del comportamento geomeccanico delle formazioni, come descritto nel successivo paragrafo 5.4.

5 STUDIO GEOMECCANICO

L'obiettivo dello studio geomeccanico è stato quello di valutare l'evoluzione dei campi degli sforzi, delle deformazioni e degli spostamenti indotti nel giacimento di Santa Maddalena dalla produzione storica di gas e, soprattutto, dalla possibile attività di produzione futura del campo. Per questo scopo è stata condotta una modellazione ad elementi finiti in campo tridimensionale con il codice di calcolo *Petrel Reservoir Geomechanics* (Schlumberger), previa la caratterizzazione geomeccanica delle formazioni interessate dalla produzione nonché di tutta la sequenza stratigrafica sovrastante e sottostante.

La modellizzazione geomeccanica analizza il campo degli sforzi e delle deformazioni di un mezzo soggetto a variazioni di carico e a condizioni al contorno ed esamina gli sforzi indotti nel mezzo poroso in termini di sforzi efficaci, mentre i carichi sono rappresentati dalle variazioni degli sforzi efficaci indotte nella roccia serbatoio dalla diminuzione e/o dall'aumento della pressione interstiziale (incremento e/o diminuzione degli sforzi efficaci).

Per stimare la risposta in termini di deformabilità e resistenza delle formazioni interessate dalle operazioni di produzione è indispensabile poter disporre di una caratterizzazione geomeccanica appropriata del sistema. La caratterizzazione del giacimento e delle formazioni limitrofe è stata effettuata sulla base dei dati disponibili in letteratura e di esperienze pregresse su formazioni analoghe poiché non erano disponibili parametri geomeccanici ottenuti da acquisizione diretta (i.e. log o test di laboratorio sulle formazioni oggetto di studio).

La modellazione numerica dei fenomeni oggetto di studio ha richiesto la discretizzazione del volume di interesse secondo un reticolo sufficientemente fitto, particolarmente dettagliato nelle zone a maggior gradiente tensionale in modo tale da eliminare, o quantomeno minimizzare, eventuali problemi di convergenza numerica.

In fase di modellizzazione al mezzo discretizzato è stato attribuito lo stato tensionale iniziale. Il modello così inizializzato è stato quindi utilizzato per valutare la risposta del sistema in termini di variazioni altimetriche del piano campagna a seguito della produzione storica, durante la successiva ri-pressurizzazione del sistema ad opera dell'acquifero limitrofo e, infine, in relazione allo scenario di gestione futura del campo di Santa Maddalena.

I valori di subsidenza calcolati mediante la simulazione geomeccanica sono unicamente frutto della produzione del livello PL1-H del campo di Santa Maddalena, mentre gli effetti imputabili sia ad attività antropiche di altra natura sia a processi geologici/strutturali a scala regionale, oltre ad eventuali effetti dovuti alla produzione dei giacimenti limitrofi, non sono stati tenuti in conto per l'impossibilità di quantificare tali fenomeni.

5.1 Descrizione del software Reservoir Geomechanics (Petrel)

Il modello geomeccanico è stato realizzato con il simulatore *Reservoir Geomechanics*, commercializzato dalla società *Schlumberger*. Il software, integrato nella piattaforma *Petrel*, è totalmente compatibile con i software *Petrel Geoscience* e *Petrel Reservoir Engineering*, della stessa società, che consentono rispettivamente la costruzione del modello statico e la simulazione fluidodinamica.

Basandosi su un approccio ad elementi finiti (FEM) *Reservoir Geomechanics* consente di generare modelli numerici per analisi sia di tipo puramente geomeccanico sia di tipo accoppiato geomeccanico-fluidodinamico. L'approccio accoppiato è in grado di simulare la risposta di una formazione mineralizzata combinando l'aspetto dinamico, per l'analisi del moto dei fluidi nel mezzo poroso, e l'aspetto geomeccanico, per lo studio del comportamento tenso-deformativo dello stesso ammasso roccioso. L'accoppiamento avviene attraverso alcuni parametri, quali porosità e permeabilità, sensibili alle variazioni sia di pressione interstiziale sia dello stato tensionale della formazione. L'approccio accoppiato risulta quindi particolarmente utile nel settore petrolifero poiché permette di valutare gli effetti delle attività di produzione sullo stato tensionale della rocce allo scopo di verificare che non venga compromessa l'integrità delle formazioni (in particolare quella della copertura) e che non si raggiungano condizioni critiche in corrispondenza delle discontinuità del sistema (ovvero le faglie), ma anche perché consente di tener conto delle caratteristiche petrofisiche (in particolare, permeabilità e porosità) della roccia serbatoio.

Reservoir Geomechanics permette di considerare differenti livelli di interazione tra fenomeni geomeccanici e fluidodinamici, ovvero: analisi di tipo *iteratively coupling* o analisi di tipo *one-way coupling* (fig. 18). L'approccio *iteratively coupling* prevede la soluzione separata e sequenziale delle equazioni di modello: per ogni *time-step* di analisi si determina con *Petrel Reservoir Engineering*, tramite la soluzione delle equazioni di flusso, la variazione di pressione indotta dalle attività di produzione; la distribuzione delle pressioni così calcolata viene usata in *Reservoir Geomechanics* per determinare, in funzione della legge costitutiva selezionata, il nuovo stato di tensione che si instaura negli ammassi rocciosi e per aggiornare i valori delle variabili di accoppiamento (ovvero permeabilità e/o porosità). Al *time-step* successivo si esegue nuovamente l'analisi fluidodinamica con *Petrel Reservoir Engineering* utilizzando i valori aggiornati di permeabilità/porosità. Secondo l'approccio *one-way coupling*, invece, ad ogni *time-step* selezionato si determina con *Reservoir Geomechanics* lo stato tenso-deformativo indotto nel sistema a seguito di una determinata variazione di pressione calcolata mediante *Petrel Reservoir Engineering*. Anche se l'interazione tra l'aspetto tensionale e fluidodinamico sussiste, con differenti gradi di importanza, in ogni formazione mineralizzata, è generalmente riconosciuta la necessità di ricorrere ad un approccio complesso, quale quello di tipo *iteratively coupling*, solo laddove l'interconnessione tra l'aspetto geomeccanico e quello fluidodinamico risulti imprescindibile per riprodurre il comportamento del sistema e, quindi, parte essenziale del processo di *history match* (per esempio, nel caso di formazioni fortemente comprimibili).

5.2 Definizione del modello

5.2.1 Grid

Il *grid* utilizzato nello studio geomeccanico è quello ricavato dallo studio geologico e descritto al paragrafo 3.2.4.

5.2.2 Faglie

Dal punto di vista geomeccanico le faglie interne al giacimento (*Fault 1÷9*), i sovrascorrimenti (*Thrust 2, 3 e 4*) e l'acquifero che confinano il giacimento rappresentano un potenziale elemento di debolezza del sistema, poiché sottoposti a gradienti di pressione indotti dalle operazioni di produzione. I sovrascorrimenti *Thrust 1* e *Thrust 5*, invece, si trovano ad una distanza tale da non risentire di variazioni tensionali apprezzabili. Tuttavia, sono state inserite nel modello geomeccanico, oltre a tutte le faglie che interessano il giacimento, anche i lineamenti tettonici regionali *Thrust 1* e *Thrust 5* poiché concorrono a definire l'assetto strutturale del modello statico. Nella fig. 15 sono mostrate tutte le faglie prese in considerazione nel corso dell'analisi geomeccanica (in rosso sono indicati i sovrascorrimenti regionali ed in blu le faglie in zona *reservoir*).

Per quanto riguarda l'estensione verticale, tutti i sovrascorrimenti regionali considerati si estendono dalla parte basale delle argille del Santerno fino ai depositi miocenici, mentre le faglie interne al giacimento interessano solamente le formazione mineralizzata. A titolo esemplificativo viene riportata in fig. 19 una sezione del modello geomeccanico che riporta l'estensione qualitativa dei *Thrust 2* e *Thrust 3*.

5.2.3 Classificazione geomeccanica

Si è assunto che, alla scala del problema in esame, il sistema fosse assimilabile ad un mezzo continuo equivalente; le faglie che lo attraversano sono state considerate come discontinuità singolari.

Le formazioni modellizzate sono state distinte in 7 differenti classi, identificate in funzione della litologia e dei parametri geomeccanici e finalizzate alla descrizione del comportamento sforzi–deformazioni dell'ammasso roccioso (tab. 10). Sulla base di considerazioni litologiche derivanti dall'analisi dei profili 1:1000 dei pozzi perforati all'interno dell'area modellizzata sono stati individuati quattro litotipi dominanti: argille, sabbie, marne e rocce carbonatiche (i.e. calcari e dolomie). In fase di definizione del modello 3D è stata introdotta una certa semplificazione della stratigrafia soprattutto per quanto riguarda le formazioni basali pre-plioceniche, dettata sia da esigenze di modellizzazione sia dalla qualità e quantità dei dati disponibili. Infatti, le formazioni meglio caratterizzate (tramite letteratura) sono quelle sabbioso-argillose che costituiscono il giacimento e il terreno sovrastante fino al piano campagna: questo volume rappresenta la porzione di modello maggiormente interessata dai fenomeni oggetto di studio. Le

formazioni basali risultano scarsamente influenzate dalle operazioni di produzione e, comunque, non critiche dal punto di vista dell'analisi di subsidenza. Nell'ottica della modellizzazione, esse assolvono il compito principale di garantire le necessarie condizioni di contorno.

I termini "argille" e "sabbie" si riferiscono a terreni che si trovano a profondità superiori a 800 m e che quindi sono naturalmente soggetti a sforzi orizzontali (tensioni intermedie e minime) di ordine superiore a 8 MPa. Per questo motivo le caratteristiche meccaniche di questi terreni sono più assimilabili a quelle delle rocce che a quelle dei terreni sciolti.

I depositi alluvionali superficiali sono descritti dalla prima classe geomeccanica (livelli numerici 1 e 2).

Le Sabbie d'Asti sono descritte dalla classe geomeccanica 2 (livelli numerici da 3 a 5).

La formazione Argille del Santerno è descritta dalla classe geomeccanica 3 e delimita superiormente (livello numerico 6) ed inferiormente (livelli numerici 8 e 9) la Formazione Porto Garibaldi. La porzione inferiore delle Argille del Santerno rappresenta la *cap rock* del livello mineralizzato PL1-H oggetto di studio.

La Formazione Porto Garibaldi (livello numerico 7) è rappresentata dalla classe geomeccanica 4.

La Formazione Porto Corsini (livelli numerici dal 10 al 26) è descritta dalla quinta classe geomeccanica. Ad essa appartiene la formazione mineralizzata PL1-H (livelli numerici dal 10 al 23).

Il Miocene, composto da marne ed argille, è identificato dalla classe 6 (livelli numerici 27 e 28).

Infine, le formazioni basali del modello, composte da calcari e dolomie, (livello numerico 29), fino a una profondità di circa 4.5 km, sono definite dalla classe 7.

Nella fig. 8 è riportata una rappresentazione schematica della sequenza stratigrafica tipo ricavata nell'area di interesse e riprodotta nel modello geomeccanico.

Ad ogni classe sono stati assegnati i parametri di deformabilità e di resistenza e la legge di comportamento sforzi – deformazioni, assunta di tipo elastico-perfettamente plastico. Le proprietà assegnate ai terreni e alle rocce di ogni classe sono quindi:

- i. parametri di inizializzazione, per determinare lo stato tensionale della formazione indisturbata.
- ii. proprietà pseudo-elastiche. Per la fase elastica isotropa sono stati definiti: modulo di Young in funzione della profondità, rapporto di Poisson e coefficiente di Biot.
- iii. parametri di resistenza a taglio, assumendo come criterio di resistenza quello di Mohr-Coulomb. Per l'applicazione del criterio di Mohr-Coulomb sono stati inoltre definiti la coesione e l'angolo di resistenza a taglio.

Per una descrizione dettagliata dei sopracitati parametri meccanici delle rocce si rimanda a Fjær et al. (2008) e a Lancellotta (2004).

I criteri adottati per definire le proprietà pseudo-elastiche e i parametri di resistenza sono illustrati nei successivi paragrafi.

Nella tab. 11 sono riportati i parametri di deformazione, inizializzazione e resistenza per ciascuna classe geomeccanica di riferimento.

5.2.4 Caratterizzazione geomeccanica

A causa della mancanza di prove di laboratorio o dati log appropriati, i parametri di deformazione e resistenza sono stati definiti sulla base sia di casi analoghi derivanti dalla letteratura sia dalle conoscenze degli autori. Per la caratterizzazione della *cap rock* del giacimento di Santa Maddalena ci si è avvalsi dei risultati di prove di laboratorio condotte su campioni prelevati dalle Argille del Santerno ma in corrispondenza di altri giacimenti (Mauri, 2010 e Vigani, 2011).

Parametri di deformabilità dei mezzi porosi

Il comportamento sforzi-deformazioni dei terreni duri o rocce tenere che costituiscono il giacimento e le formazioni limitrofe è fortemente non lineare e dipendente dal comportamento meccanico del mezzo poroso.

Il campo di esistenza del modulo elastico del mezzo poroso può essere definito in funzione della profondità del mezzo e del livello di deformazione indotta dalla produzione, come mostrato nella fig. 20 (Davich, 2004). Per piccole deformazioni, dell'ordine delle unità di millesimi di m/m, il comportamento dell'ammasso roccioso è prevalentemente governato dai moduli elastici dinamici. Con l'aumentare delle deformazioni principali massime, i valori dei moduli elastici diminuiscono progressivamente, fino a raggiungere, a deformazioni dell'ordine del centesimo di m/m, quelli tipici dei moduli statici. Con un ulteriore aumento delle deformazioni principali massime, il comportamento del mezzo poroso diventa ancora più marcatamente non lineare fino al raggiungimento delle condizioni di plasticità, dove il valore del modulo elastico diventa trascurabile se si assume un comportamento del mezzo elastico-perfettamente plastico, ovvero pari a valori dell'ordine del decimo del modulo elastico statico iniziale se si assume un comportamento incoerente.

Il comportamento del giacimento oggetto di studio è stato esaminato facendo ricorso alle analisi di sensitività al fine di valutare l'impatto dei parametri elastici sulla subsidenza. Tenendo conto del campo di esistenza dei moduli elastici, la risposta del sistema è stata analizzata considerando sia parametri elastici statici, E_S , sia dinamici, E_D , secondo una ragione $E_D \sim 4E_S$. Va comunque sottolineato come, in genere, le variazioni di pressione imposte dalle attività di produzione, soprattutto in caso di volumi movimentati medio-bassi, inducono, sia in giacimento sia nelle formazioni limitrofe, deformazioni molto ridotte

dell'ordine di qualche millesimo di m/m. In tali condizioni, i parametri dinamici risultano quelli che più realisticamente riproducono il comportamento deformativo del sistema, mentre l'adozione di moduli elastici statici rappresenta lo scenario più cautelativo.

Per la definizione dei moduli elastici statici è stata adottata la seguente legge di tipo esponenziale che correla la compressibilità verticale uniassiale, c_M , e la tensione efficace verticale, σ'_v :

$$c_M = 1.3696 \cdot 10^{-2} \sigma'_v^{-1.1347} \quad (1)$$

Tale legge è frutto di studi a carattere sia sperimentale sia teorico effettuati presso il Dipartimento di Metodi e Modelli Matematici per le Scienze Applicate (DMMMSA) dell'Università di Padova (Teatini et al., 2011), tesi a valutare la compressibilità delle *cap rock* e degli acquiferi salini profondi presenti nel territorio italiano. È da notare che questi studi non introducono differenze nei valori dei moduli elastici tra le formazioni arenacee e argillose; questa semplificazione può ritenersi corretta dal momento che la differenza dei moduli pseudo-elastici relativi ai due litotipi è piuttosto limitata, soprattutto se confrontata con la dipendenza di entrambi i moduli dalla profondità a cui si trovano le formazioni in esame.

La relazione di tipo lineare riportata nella fig. 21 esprime, in accordo con l'equazione proposta da Teatini, l'andamento del modulo elastico statico, E_s , in funzione della profondità.

L'equazione (1) descrive il comportamento di un ammasso roccioso vergine in condizioni di carico assimilabili alle sollecitazioni indotte dalla produzione primaria, mentre in fase di ri-pressurizzazione del giacimento le formazioni sono soggette a sollecitazioni assimilabili a condizioni di scarico. Di conseguenza per simulare correttamente la risposta del sistema in fase di chiusura del campo, durante la quale si assiste ad una marcata ri-pressurizzazione del sistema imputabile alla spinta dell'acquifero limitrofo, i moduli elastici delle sabbie e delle argille sono stati aumentati. In particolare, nello scenario statico (E_s) i moduli elastici sono stati triplicati durante la fase di scarico (i.e. ri-pressurizzazione), in linea con gli studi condotti da Baù et al. (2002) e Ferronato et al. (2003a, b), mentre nel caso dinamico (E_D) i moduli elastici dinamici in condizioni di scarico sono stati duplicati in linea con gli studi di Mauri (2010) e Vigani (2011). La variazione litologica che sussiste tra le formazioni sommitali (ovvero sabbie-argille) e la sequenza del Miocene e la sequenza basale del Giurassico-Eocene (ovvero Marne e Calcari) influenza in modo non trascurabile la risposta elastica del sistema: questo comportamento è stato riprodotto incrementando notevolmente i valori del modulo di Young nei *layer* inferiori, come mostrato nella fig. 22.

Gli altri parametri di deformazione, ovvero i coefficienti di Poisson e di Biot, sono stati definiti considerando il sistema isotropo sulla base dei dati disponibili in letteratura (Fjær et al., 2008; Lancellotta, 2004) e delle conoscenze degli autori.

Parametri di resistenza dei mezzi porosi

I parametri di resistenza sono relativi al criterio di Mohr-Coulomb: i valori di coesione e dell'angolo di attrito sono stati definiti in funzione della litologia e della profondità delle formazioni. Per quanto riguarda le formazioni argillose, come già ricordato, i valori sono stati ricavati dalle prove geotecniche di laboratorio disponibili sulle Argille del Santerno prelevate in corrispondenza di altri giacimenti (Mauri, 2010 e Vigani, 2011), mentre i valori dei parametri di resistenza delle sabbie e dei carbonati basali sono stati determinati sulla base dei dati disponibili in letteratura (Fjær et al., 2008; Lancellotta, 2004) e dalle conoscenze degli autori.

Parametri di deformabilità e resistenza delle faglie

I parametri geomeccanici utilizzati per caratterizzare le faglie sono: la rigidezza normale e di taglio e i parametri di resistenza a taglio (tab. 12). In particolare, al contatto tra le pareti delle faglie si è imposta una brusca riduzione della resistenza di tipo coesivo, in considerazione dei notevoli rigetti. La rigidezza di taglio è stata determinata simulando un fenomeno di scorrimento a grande scala, mentre la rigidezza normale è stata assunta circa 2.5 volte maggiore della rigidezza di taglio, in accordo con i dati reperiti dalla bibliografia (Roest et al., 1999).

5.3 Inizializzazione del modello

Il modello, popolato secondo i criteri definiti nei paragrafi precedenti, permette di calcolare sia il campo tensionale sia la distribuzione delle pressioni interstiziali che competono alle formazioni indisturbate in funzione della profondità, della tipologia della formazione e dei fluidi saturanti.

Il campo delle pressioni originali è stato definito in funzione dei valori misurati in corrispondenza del giacimento al momento della scoperta. La pressione originale della formazione mineralizzata PL1-H era pari a 99.5 barsa alla profondità (*datum depth*) di 856 m TVDss. Per calcolare la pressione originale che compete alle celle di modello mineralizzate ad acqua si è di conseguenza assunto un gradiente idrostatico pari a 0.1 bar/m. La falda idrica superficiale è stata ipotizzata coincidente con il livello del mare. Sulla base di questi dati tutte le celle del modello mineralizzate ad acqua sono state popolate con valori di pressione calcolati secondo il gradiente idrostatico, mentre le pressioni delle celle nei livelli mineralizzati sono state calcolate secondo il gradiente del gas, definito sulla base della *Gas Gravity* e delle curve di B_g del gas prodotto, delle profondità del contatto gas-acqua originale e del valore di pressione iniziale al *datum*. Per quanto concerne il campo tensionale originale, non essendo disponibili informazioni circa l'orientamento e l'entità degli sforzi principali, il modello è stato inizializzato assegnando uno stato tensionale gravitazionale. Si è ipotizzato, quindi, che lo stress verticale fosse uguale alla tensione massima principale, σ_1 , e che il campo di sollecitazione fosse anisotropo nel piano orizzontale secondo il rapporto:

$$\frac{\sigma_h'}{\sigma_v'} = 0.8 \quad \text{e} \quad \frac{\sigma_H'}{\sigma_v'} = 0.9 \quad (2)$$

5.4 Principi di analisi

L'analisi delle variazioni del campo tensionale e deformativo indotte dalla produzione di gas e dalle successive fasi di ri-persurizzazione dovute all'effetto dell'acquifero attivo è stata effettuata avvalendosi dell'approccio geomeccanico-fluidodinamico di tipo *one-way coupling*. Questa metodologia di analisi consente di studiare il comportamento geomeccanico delle formazioni profonde in base all'evoluzione delle pressioni nel tempo.

Secondo l'approccio *one-way coupling* ad ogni *time-step* di analisi viene calcolata la distribuzione delle pressioni interstiziali, indotte dalla produzione di gas, nella formazione mineralizzata e nell'acquifero circostante. La pressione nella formazione indisturbata resta costante ed uguale al valore iniziale (fig. 23). Sulla base della variazione delle pressioni rispetto al passo temporale precedente si determina la corrispondente variazione dello stato tenso-deformativo del sistema mediante simulazione geomeccanica. Raggiunto il nuovo equilibrio geomeccanico, per ogni *time-step* di analisi, vengono quindi verificate le condizioni di sicurezza del sistema in termini di resistenza meccanica agli sforzi di taglio e di trazione e vengono calcolate le deformazioni e quindi gli spostamenti delle rocce in profondità nonché come tali deformazioni si propagano in superficie (fig. 24).

Lo studio geomeccanico è stato effettuato considerando una legge costitutiva di tipo elasto-plastico al fine di evidenziare eventuali fenomeni di plasticizzazione.

Poiché l'analisi è condotta in campo tridimensionale, la funzione di plasticità è definita sui tre assi degli sforzi principali ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$). La funzione di plasticità, definita dal criterio di Mohr-Coulomb, è identificata dalla superficie di una piramide a base esaedrica, che ha come asse la retta $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. In corrispondenza del punto $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, σ_1 è il valore della resistenza a compressione uniassiale assegnata alla massa rocciosa. Allo stesso modo σ_2 , in corrispondenza del punto $\sigma_1 = \sigma_3 = 0$, e σ_3 , in corrispondenza del punto $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$, assumono il valore della resistenza a compressione monoassiale. L'inclinazione dei sei spigoli della superficie è pari a:

$$\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (3)$$

dove φ è l'angolo di attrito.

La formula (4) esprime la relazione, nel criterio di Mohr-Coulomb, tra la resistenza a compressione semplice, σ_c , la coesione, c , e l'angolo d'attrito, φ :

$$\sigma_c = \frac{2c \cos\varphi}{1 - \sin\varphi} \quad (4)$$

Gli stati tensionali elastici si trovano all'interno del solido, mentre i punti che si trovano sulla sua superficie rappresentano una condizione di plasticità (fig. 25). Dal momento che il modello costitutivo scelto è elastico-perfettamente plastico, non si ha né incrudimento né rammollimento, per cui tutti gli stati tensionali rappresentati da punti che si trovano al di fuori di detto solido sono non compatibili con l'equilibrio del sistema.

Per verificare la condizione di stabilità dello stato tensionale in un punto, si determina la minima distanza dalla superficie di plasticità, denominata *failure*. Per ogni analisi è possibile rappresentare, per ogni elemento o cella del sistema, il valore della corrispondente *failure*: valori negativi di *failure* denotano un comportamento stabile, mentre valori prossimi allo zero segnalano una possibile evoluzione verso la plasticità (Fjær et al., 2008).

5.4.1 *Analisi effettuate*

L'analisi dell'evoluzione delle tensioni e delle deformazioni indotte nel giacimento e nelle formazioni circostanti dalle operazioni di produzione e dalle successive fasi di ri-pressurizzazione che si manifestano a campo chiuso a causa della spinta dell'acquifero è stata condotta al fine di valutare il fenomeno della subsidenza.

L'effetto principale della produzione, che provoca un aumento delle tensioni efficaci nella zona di produzione, è quello di indurre spostamenti verticali diretti verso il basso. Questi spostamenti sono massimi al contatto tra il giacimento e la *cap rock* e vanno via via riducendosi nel propagarsi verso la superficie, fino a raggiungere un valore minimo sul piano campagna (fenomeno della subsidenza). La fase di ri-pressurizzazione del giacimento induce un parziale recupero della subsidenza iniziale.

Poiché il comportamento sforzi – deformazioni delle rocce è marcatamente non lineare, anche in fase elastica, è stata svolta un'analisi di sensitività mirata a definire l'effetto, in termini di subsidenza, della variazione dei moduli elastici dell'intero sistema. In particolare, come precedentemente accennato, sono stati analizzati due casi, che differiscono sostanzialmente nella definizione dei moduli elastici (par. 5.2.4 - *Parametri di deformabilità dei mezzi porosi*):

- Caso statico: moduli elastici pari ai valori statici di riferimento;
- Caso dinamico: moduli elastici dinamici circa pari a 4 volte i valori statici di riferimento.

La risposta del sistema è stata analizzata durante il periodo compreso tra l'inizio della produzione storica (1960) e la fine del *forecast C* esteso per ulteriori 40 anni (2070).

5.4.2 *Time-step di analisi*

L'evoluzione della subsidenza è stata valutata adottando 11 passi temporali scelti in funzione dell'andamento della pressione media di giacimento nel tempo (fig. 26). Nel periodo di produzione storica eni la massima *depletion* misurata è stata pari a 30 barsa

(1969). Nel successivo periodo di chiusura la pressione media di campo è risalita fino a circa 93 bar @ 2016 a seguito della spinta dell'acquifero. Lo scenario di *forecast* analizzato stima una diminuzione di circa 10 barsa (2023) a seguito della ri-messa in produzione del campo da parte di Po Valley Operations tramite il pozzo Santa Maddalena 1dir. Negli anni successivi al termine di questa seconda fase di produzione, con la chiusura dell'unico pozzo attivo, la pressione del sistema risale progressivamente fino a stabilizzarsi asintoticamente a circa 94 bar @ 2070.

Per descrivere il comportamento geomeccanico nel periodo della produzione storica eni sono stati adottati 3 *time-step* (dal t_0 @ 09/1960 al t_2 @ 02/1976). La fase di ri-pressurizzazione successiva è stata analizzata secondo un *time-stepping* di circa 9 anni (dal t_3 @ 1/1984 al t_5 @ 7/2004). La fase di *forecast* è stata discretizzata adottando un *time-stepping* di circa 7 anni per descrivere la ri-messa in produzione del sistema (dal t_6 @ 04/2016 al t_8 @ 03/2030), mentre per analizzare i successivi 40 anni a campo chiuso sono stati individuati 2 *time-step* di 20 anni ciascuno (t_9 @ 03/2050 e t_{10} @ 03/2070). Nella tabella 13 sono riassunti i *time-step* di analisi adottati per la simulazione geomeccanica.

5.5 Analisi dei risultati

Le figure 27÷31 mostrano l'evoluzione della pressione media al *top* del giacimento per i *time-step* di analisi più significativi, mentre le figure 32÷51 illustrano l'evoluzione dello spostamento verticale indotto sul piano campagna in termini di cono di subsidenza nell'ipotesi di parametri elastici statici e dinamici. Le figure sono distinte in due sequenze: la prima si riferisce al periodo di gestione storica del campo di Santa Maddalena da parte di eni e gli spostamenti verticali sono riferiti alla posizione del piano campagna nel 1960, ovvero prima dell'avvio della produzione; la seconda, invece, si riferisce alla futura gestione del campo da parte di Po Valley Operations e gli spostamenti verticali sono riferiti alla posizione del piano campagna nel 2016, ovvero prima dell'avvio della seconda fase produzione. Sulla sinistra di ciascuna figura è visualizzata la mappa con le isocline degli spostamenti verticali in superficie, la proiezione delle faglie presenti in giacimento e indicazione dei pozzi del campo. Sulla destra di ciascuna figura viene rappresentata una sezione verticale del cono subsidenza, lungo la sezione AA'.

La fig. 52 descrive l'evoluzione temporale della pressione media di giacimento e del relativo spostamento verticale indotto sul piano campagna, mettendo a confronto i risultati del "caso statico" e del "caso dinamico" distinti in funzione del periodo di gestione eni e Po Valley Operations. Durante la produzione storica la riduzione di pressione causa un progressivo aumento della subsidenza fino al massimo spostamento verticale raggiunto alla fine della produzione dai pozzi SPC-4, SPC-8 e SPC-9 (1969): per una *depletion* massima di 30 bar con il caso statico si è stimato uno spostamento verticale massimo del piano campagna pari a -13.29 mm, mentre con il caso dinamico lo spostamento verticale massimo risulta pari a -3.23 mm. La ri-pressurizzazione del sistema, ad opera del

supporto fornito dall'acquifero durante la chiusura del campo tra il 1976 (fine produzione pozzo SPC-1) e il 2016, genera un *rebound* del piano campagna che, di conseguenza, si posiziona rispettivamente a -9.85 mm per il caso statico e a -1.97 mm per il caso dinamico rispetto alla posizione originale.

Durante la gestione di Po Valley Operations la futura produzione del giacimento tramite il pozzo SM-1d (*forecast* 2016-2030) provocherebbe una *depletion* massima (al 2023) di circa 10 bar e, di conseguenza, uno spostamento verticale massimo inferiore a quello della fase di produzione storica e pari a -1.85 mm nel caso statico e -0.67 mm nel caso dinamico. La successiva ri-pressurizzazione del campo, che avrebbe luogo già durante la coda della produzione (dal 2023) e poi durante la successiva chiusura del campo (dal 2030 al 2070), riporterebbe la quota altimetrica prossima a quella di inizio coltivazione del giacimento dal pozzo SM-1d (ovvero dell'anno 2016). In particolare tra il 2023 e il 2070 il terreno subirebbe un sollevamento massimo di 2.1 mm nel caso statico e di 0.8 mm nel caso dinamico.

L'estensione del cono di subsidenza in fase di *forecast* è stata stimata assumendo una soglia minima di spostamento verticale pari a -1 mm. Nel caso statico, a fine produzione futura (2023), si ha un raggio massimo pari a 2 km (fig. 38); nel caso dinamico i valori di spostamento verticale sono sempre minori della soglia minima assunta.

I risultati della simulazione geomeccanica mostrano come l'ipotesi statica sia la più conservativa, mentre adottando parametri dinamici il cono di subsidenza calcolato risulta più limitato con spostamento verticale massimo 4-5 volte inferiore rispetto al caso statico. Le tabelle 14 e 15 riassumono i valori massimi di spostamento verticale in corrispondenza dei passi temporali di analisi più significativi, sia nell'ipotesi di parametri statici sia dinamici.

Ad ulteriore conferma della rappresentatività dei risultati ottenuti, va sottolineato il comportamento teorico marcatamente non lineare sforzi-deformazioni delle rocce serbatoio e delle formazioni circostanti, il quale dipende dall'entità della deformazione indotta nei mezzi porosi. Quando il sistema viene sottoposto a deformazioni estremamente limitate (cioè 10^{-3} m/m), i moduli elastici dinamici sono i più adatti a descrivere la risposta elastica del mezzo poroso. All'aumentare delle deformazioni (fino a 10^{-2} m/m) sono i valori dei parametri elastici statici quelli che meglio descrivono il comportamento del sistema. Le deformazioni indotte nel giacimento di Santa Maddalena e nelle formazioni circostanti a causa della produzione storica così come le deformazioni potenzialmente causate dalla gestione futura del campo sono dell'ordine di 10^{-3} m/m, secondo i risultati della simulazione (fig. 53 a, b). L'evoluzione della subsidenza relativa alla caratterizzazione elastica dinamica risulta quindi essere quella più realistica, mentre i risultati dell'ipotesi statica rappresentano gli scenari più conservativi e permettono di definire un *range* di variazione in termini di spostamento verticale ed estensione areale del cono di subsidenza.

In relazione alla subsidenza indotta, si rileva come l'Eurocodice (1997, 1996) indichi come valore ammissibile di rotazione relativa delle strutture 1/300; lo stesso valore,



ovvero valori compresi tra 1/500 e 1/150 sono riportati, anche in base all'osservazione di edifici esistenti, su numerosi articoli di riferimento della letteratura scientifica del settore geotecnico (Lancellotta, 2004). Altri lavori indicano i cedimenti differenziali massimi ammissibili in 20-60 mm, in funzione della tipologia delle fondazioni e della natura dei terreni. È evidente, quindi, che gli spostamenti del piano campagna indotti dalle attività di produzione potrebbero indurre rotazioni relative o cedimenti differenziali delle strutture largamente inferiori ai valori limite accettabili.

6 CONCLUSIONI

La potenziale ripresa delle operazioni di produzione del livello PL1-H del giacimento di Santa Maddalena (blocco 5 del campo di San Pietro in Casale) ha richiesto l'analisi del comportamento tenso-deformativo della roccia serbatoio e delle formazioni incassanti al fine di prevedere l'evoluzione degli spostamenti indotti sul piano campagna. A questo scopo è stato messo a punto un modello geomeccanico basato su un modello geologico a larga scala che comprende il dettaglio dei livelli mineralizzati a gas del campo di Santa Maddalena.

I dati messi a disposizione da Po Valley Operations sono stati arricchiti grazie ad una dettagliata analisi bibliografica. In particolare, le informazioni ottenute dai set di log forniti per i pozzi di giacimento sono state integrate ed estese a scala regionale avvalendosi delle sezioni sismiche regionali e dei dati di pozzo reperiti presso la banca dati UNMIG.

Il modello dinamico calibrato messo a punto da DREAM s.r.l. nel 2012 ("*Santa Maddalena field – Static and dynamic reservoir study*", febbraio 2012) è stato adottato come riferimento per la descrizione l'evoluzione delle pressioni in giacimento, mentre la propagazione del disturbo di pressione nell'acquifero che delimita il giacimento è stata descritta simulando un acquifero di tipo volumetrico (i cui effetti sono equivalenti all'acquifero analitico inizialmente definito nel modello dinamico del 2012).

Non essendo disponibili misure dirette (acquisite in pozzo o tramite prove di laboratorio) dei parametri di deformabilità e di resistenza delle formazioni oggetto di studio, la caratterizzazione del modello geomeccanico è stata effettuata utilizzando i dati disponibili in letteratura su formazioni analoghe e le conoscenze degli autori.

Nel presente studio il modello geomeccanico è stato utilizzato per stimare il fenomeno di subsidenza indotto dalla produzione primaria e dalle future attività di gestione del campo. Il problema è stato affrontato secondo la filosofia delle analisi di sensitività al fine di valutare l'impatto dei parametri più critici (ovvero i moduli elastici) sul fenomeno della subsidenza. È stato quindi definito un possibile intervallo di variazione dell'evoluzione del cono di subsidenza nel tempo (in termini di spostamento verticale massimo) in funzione dello scenario di *forecast*, concordato con Po Valley Operations.

Le variazioni di pressione indotte dalle attività di produzione, soprattutto nell'ipotesi di volumi movimentati medio-bassi come quelli del caso oggetto di studio, inducono deformazioni molto ridotte, dell'ordine di qualche millesimo di m/m, sia in giacimento sia nelle formazioni limitrofe. In tali condizioni i parametri dinamici risultano quelli che più realisticamente riproducono il comportamento deformativo del sistema, mentre l'adozione di moduli elastici statici comporta lo scenario più cautelativo.

Considerando l'ipotesi più realistica, ovvero quella che fa riferimento ai parametri elastici dinamici, al termine della produzione storica ad opera di eni (1960-1969) lo spostamento verticale massimo simulato è risultato di circa -3.23 mm; la variazione massima indotta dalle operazioni di produzione futura ad opera di Po Valley Operations (2016-2023) è stimata pari a -0.67 mm. A valle della produzione, la ri-pressurizzazione ad

opera dell'acquifero causa un progressivo *rebound* del piano campagna fino a raggiungere una nuova condizione di equilibrio dinamico con valori massimi puntuali di circa +0.11 mm@2070 rispetto alla posizione della superficie nel 2016.

L'estensione del cono di subsidenza è stata stimata in fase di *forecast* assumendo una soglia minima di spostamento verticale pari a -1 mm. Nel caso statico, a fine produzione futura (2023), si ha un raggio massimo pari a 2 km; nel caso dinamico i valori di spostamento verticale risultano sempre minori della soglia minima assunta.

Considerando i valori ammissibili di rotazione relativa delle strutture riportati nell'Eurocodice e in numerosi articoli tecnici di settore, gli spostamenti del piano campagna indotti dalla coltivazione futura del giacimento di Santa Maddalena potrebbero indurre rotazioni relative o cedimenti differenziali delle strutture largamente inferiori ai valori limite accettabili.

I risultati di subsidenza ottenuti della simulazione geomeccanica considerano unicamente gli effetti della produzione del livello PL1-H del campo di Santa Maddalena, mentre non contemplano gli effetti imputabili sia ad attività antropiche di altra natura sia a processi geologici/strutturali a scala regionale, né gli effetti dovuti alla produzione dei giacimenti limitrofi.

Il modello geomeccanico costituisce un valido strumento previsionale che dovrà tuttavia essere ulteriormente affinato sulla base della caratterizzazione diretta delle formazioni chiave, ovvero giacimento e roccia di copertura.

7 BIBLIOGRAFIA

- Baù D., Ferronato M., Gambolati G., and Teatini P., 2002. Basin-scale compressibility of the Northern Adriatic by the radioactive marker technique, *Géotechnique*, 52(8), 605–616.
- Bigi G., Cosentino D., Parotto M., Sartori R., Scandone P., (1992) – Modello strutturale tridimensionale d'Italia in scala 1: 500.000. CNR - Centro Nazionale delle Ricerche, Roma.
- Boccaletti M., Martelli L., (2004) – Carta sismo-tettonica della Regione Emilia-Romagna, scala 1:250.000 e note illustrative. Selca, Firenze.
- Cerrina Feroni, A., Leoni, L., Martelli, L., Martinelli, P., Ottira, G. and Sarti, G. (2001) – The Romagna Apennines, Italy: an eroded duplex. *Geol. J.*, vol. 36, pp. 39–54.
- Cibin U., Segadelli S. (2009) – Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50000, foglio 203 Poggio Renatico. Regione Emilia-Romagna. Servizio geologico, sismico e dei suoli, Bologna, p. 104.
- Cremonini G., Ricci Lucchi F. (1982) – Guida alla geologia del margine appenninico-padano. Guide Geologiche Regionali, Soc. Geol. It., p 248.
- Dondi, L., Mostardini, F., Rizzini, A. (1982a) – Evoluzione sedimentaria e paleogeografica nella Pianura Padana. In: Cremonini G., Ricci Lucchi F. (Eds.), Guida alla Geologia del margine appenninico-padano. Guide Geologiche Regionali, Soc. Geol. It., pp. 205-236.
- Dondi, L., Mostardini, F., Rizzini, A. (1982b) – Lessico delle Formazioni del bacino padano orientale. In: Cremonini G., Ricci Lucchi F. (Eds.), Guida alla Geologia del margine appenninico-padano. Guide Geologiche Regionali, Soc. Geol. It., pp. 47-58.
- DREAM s.r.l., (2012) – Relazione “Santa Maddalena field - Static and dynamic reservoir study”, Febbraio 2012.
- ECOPETROL, “Permesso ‘SAN VINCENZO’ (2002) – Studio statico e dinamico dell'ex Giacimento ‘San Pietro in Casale’ per NORTHSUN Italia” – March - July 2002 – Ecopetrol s.r.l.
- Eurocodice 6 (1996). Progettazione delle strutture in muratura: Regole generali per strutture di muratura armata e non armata, UNI EN 1996-1-1:2006 Parte 1-1.
- Eurocodice 7 (1997). Progettazione geotecnica: Regole generali, UNI EN 1997-1:2005 Parte 1.
- Ferronato M., Gambolati G. and Teatini P. and Baù D., 2003a. Interpretation of radioactive marker measurement to evaluate compaction in the Northern Adriatic gas field, SPE Reservoir Evaluation & Engineering.
- Ferronato M., Gambolati G. and Teatini P., 2003b. Unloading-reloading uniaxial compressibility of deep reservoirs by marker measurements, 11th International FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini Island, Greece.
- Fjær, P., Raaen A. M., Horsrud E., Risnes R., Holt R.M. (2008). Petroleum Related Rock Mechanics. Elsevier (2nd Edition). ISBN 978-0-444-50260-5.
- Gambolati G., Teatini P., Ferronato M., 2007. Linee guida per lo studio dei fenomeni di subsidenza nell'ambito di progetti di sviluppo sostenibile di campi ad olio o gas.

Rapporto tecnico 1/2007. Dipartimento di Metodi e Modelli Matematici per le Scienze Applicate.

- Ghielmi M., Minervini M., Nini C., Rogledi S., Rossi M. (2013) - Late Miocene-Middle Pleistocene sequences in the Po Plain-Northern Adriatic Sea (Italy): the stratigraphic record of modification phases affecting a complex foreland basin. *Mar. Pet. Geol.*, vol.42, pp.50–81
- Lancellotta R. (2004). *Geotecnica*, III edizione Zanichelli
- Massoli D., Koyi H.A., Barchi M.R. (2006) – Structural evolution of a fold and thrust belt generated by multiple decollements: analogue models and natural examples from the Northern Apennines (Italy). *J Struct Geol*, vol.28, pp. 185–199.
- Mauri A., 2010. Caratterizzazione fisico – meccanica delle argille di Santerno, tetto del giacimento petrolifero di Sergnano (CR), Degree thesis, University of Milano
- Pieri M., Groppi, G. (1981) – Subsurface geological structure of the Po Plain, Italy. Pubblicazione 414. Progetto Finalizzato Geodinamica, C.N.R., pp. 1-13.
- Regione Emilia-Romagna e ENI-AGIP (1998) – Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna. Ed. S.EL.CA., Firenze, p. 120.
- Ricci Lucchi F., Colalongo M.L., Cremonini G., Gasperi G., Iaccarino S., Papani G., Raffi I., Rio D. (1982) – Guida alla geologia del margine appenninico-padano. *Guide Geologiche Regionali*, Soc. Geol. Ital., pp. 17-46.
- Roest J.P.A., Mulders F.M.M., Kuilman W. (1999). Data-limited geomechanical modelling for investigating induced seismicity mechanisms. Delft University of Technology, Delft, Netherlands. ISRM-Congress, Paris, August 1999.
- Schlumberger, “Petrel Reservoir Geomechanics User’s Guide”, 2013.
- Teatini P., Gambolati G., Ferronato M., Settari A., Walters D. (2011). Land uplift due to subsurface fluid injection, *Journal of Geodynamics* 51, 1–16.
- Teatini P., Castelletto N., Ferronato M., Gambolati G., Janna C., Cairo E., Marzorati D., Colombo D., Ferretti A., Bagliani A., Bottazzi F.(2011). Geomechanical response to seasonal gas storage in depleted reservoirs: A case study in the Po River basin, Italy. *Journal of Geophysical Research*, 116, F02002. Doi: 10.1029/2010JF001793.
- Toscani G., Burrato P., Di Bucci D., Seno S., Valensise G. (2008) – Plio-Quaternary tectonic evolution of the Northern Apennines thrust fronts (Bologna-Ferrara section, Italy): seismotectonic implications. *Boll. Soc. Geol. Ital.*, 128 (2008), pp. 605–613.
- Turrinia C., Lacombe O., Roured F. (2014) – Present-day 3D structural model of the Po Valley basin, Northern Italy. *Marine and Petroleum Geology*, Volume 56, September 2014, pp. 266–289.
- UNMIG (<http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/>) consultato in giugno 2014.
- Vigani G., 2011. Caratterizzazione fisico – meccanica delle argille di Santerno, letto del giacimento petrolifero di Sergnano (CR), Degree thesis, University of Milano



FIGURE

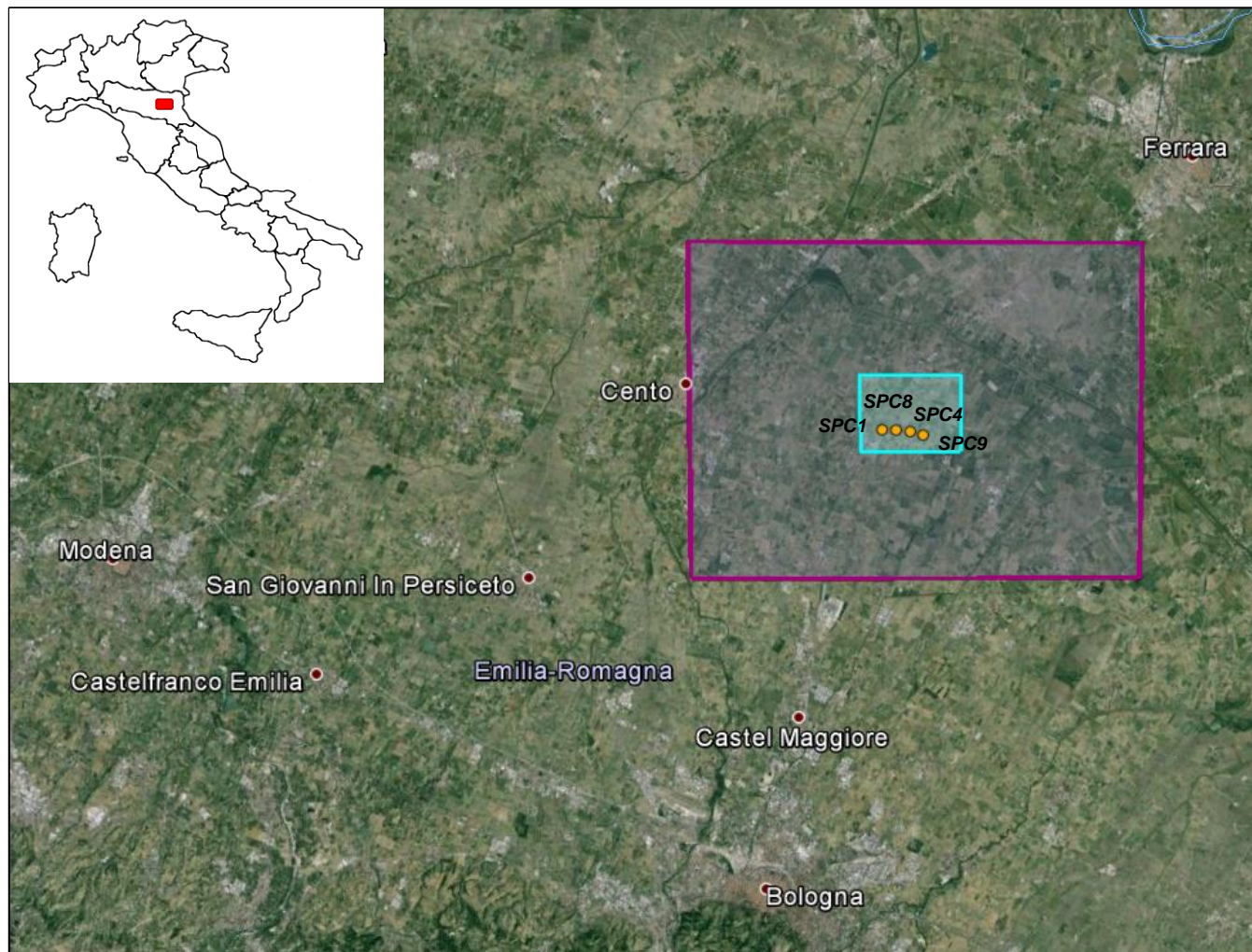


Figura 1 – Ubicazione dell' Istanza di Concessione di Coltivazione S. Alberto all'interno della quale ricade il campo di S. Maddalena (azzurro) e perimetro del modello statico esteso a scala regionale (viola).

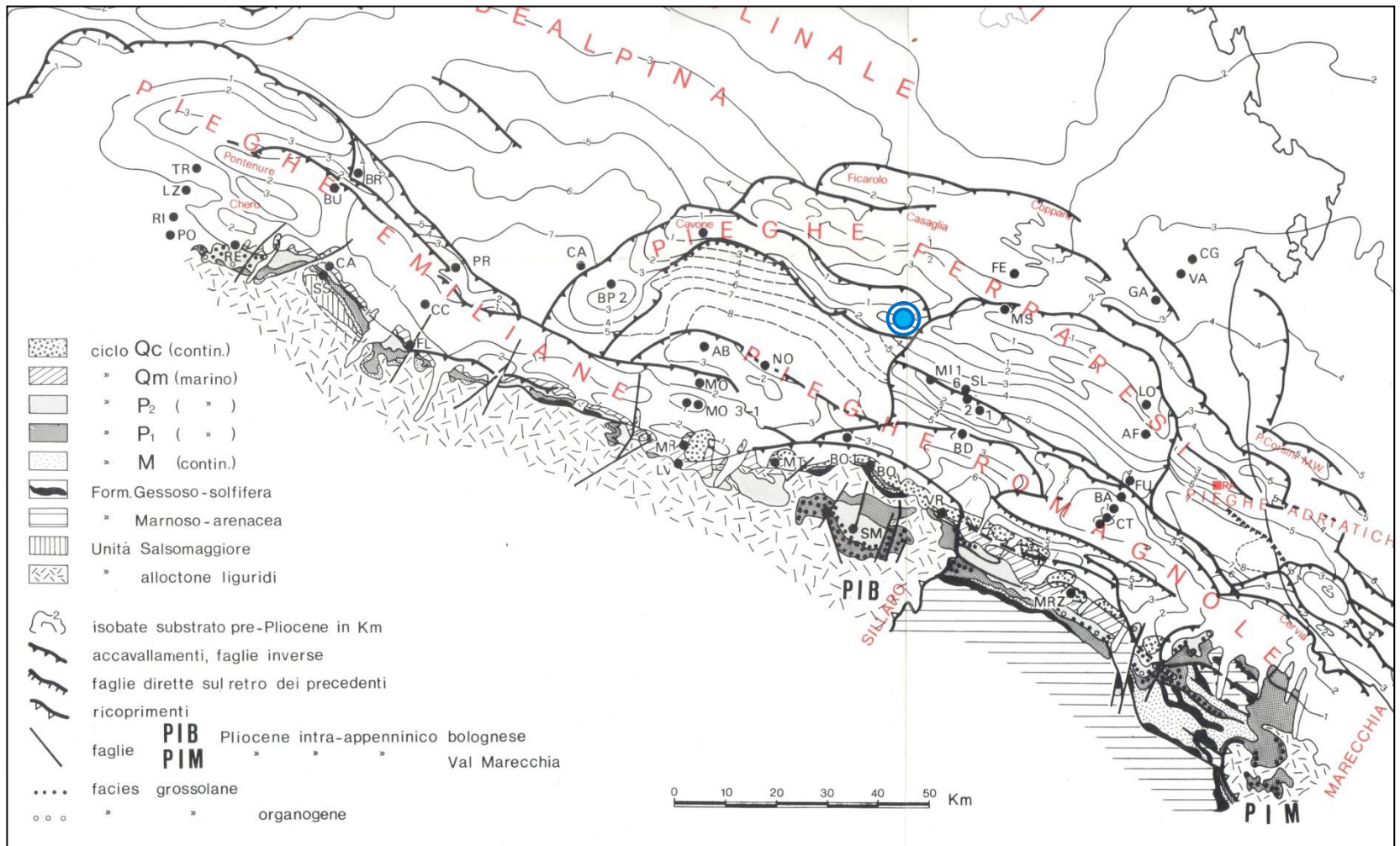


Figura 2 – Schema geologico-strutturale del settore nord-appenninico (da Pieri e Groppi, 1981 modif.). In evidenza l'ubicazione del campo di S. Maddalena.

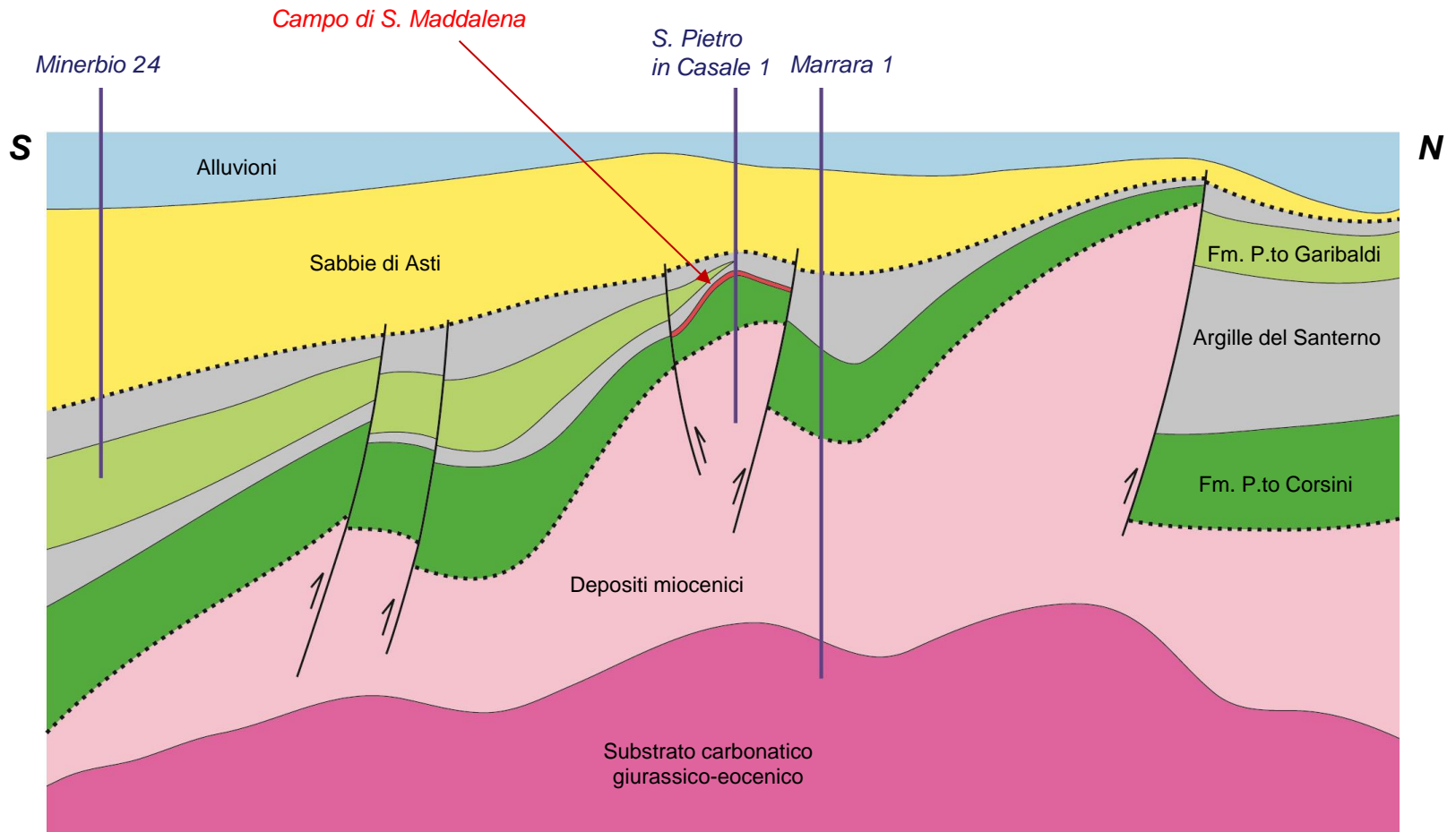


Figura 3 – Modello stratigrafico-strutturale semplificato (non in scala).

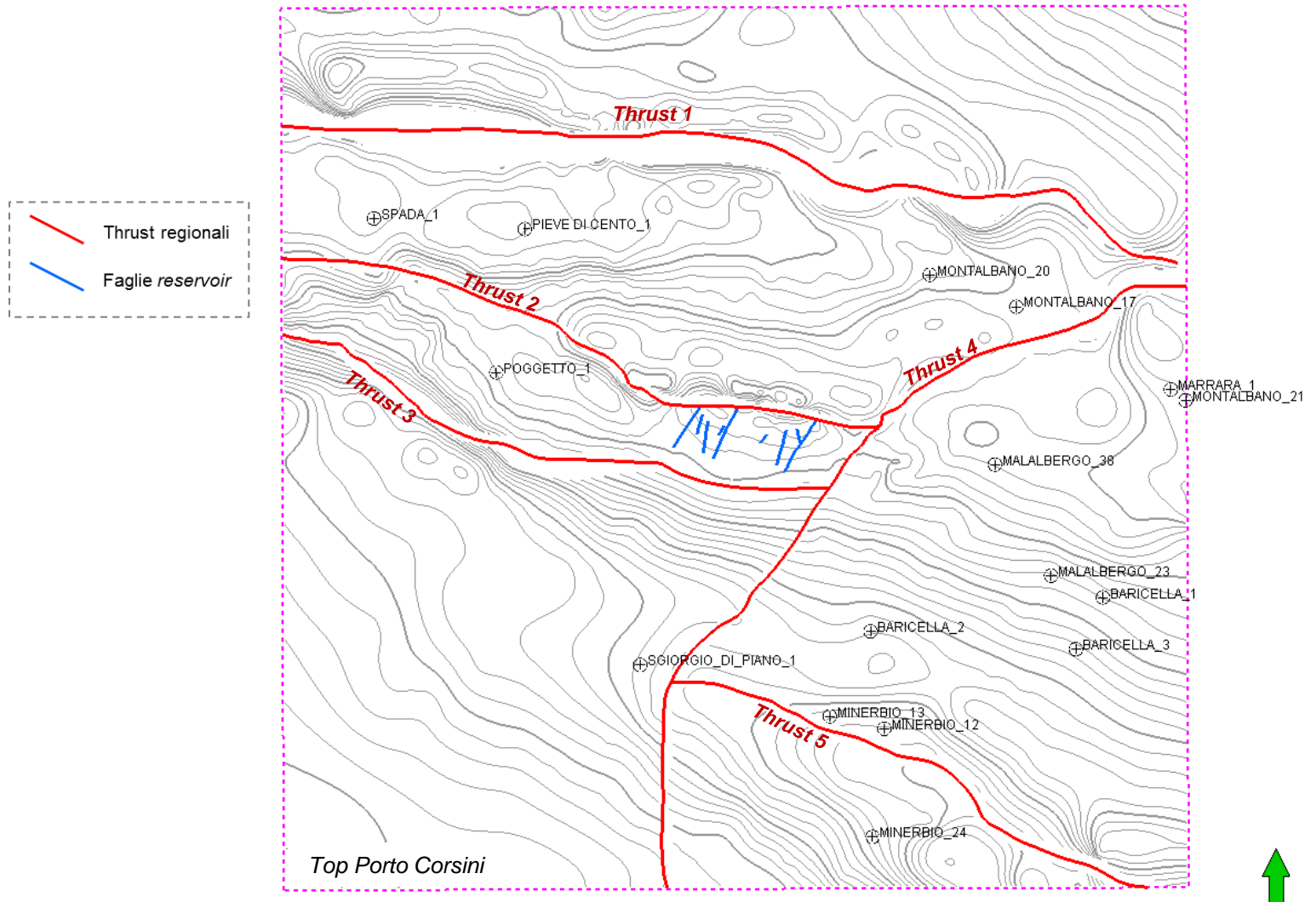


Figura 4 – Faglie introdotte nel modello 3D con l'ubicazione di alcuni pozzi di riferimento. In rosso i sovrascorrimenti regionali. In blu le faglie interne al giacimento.

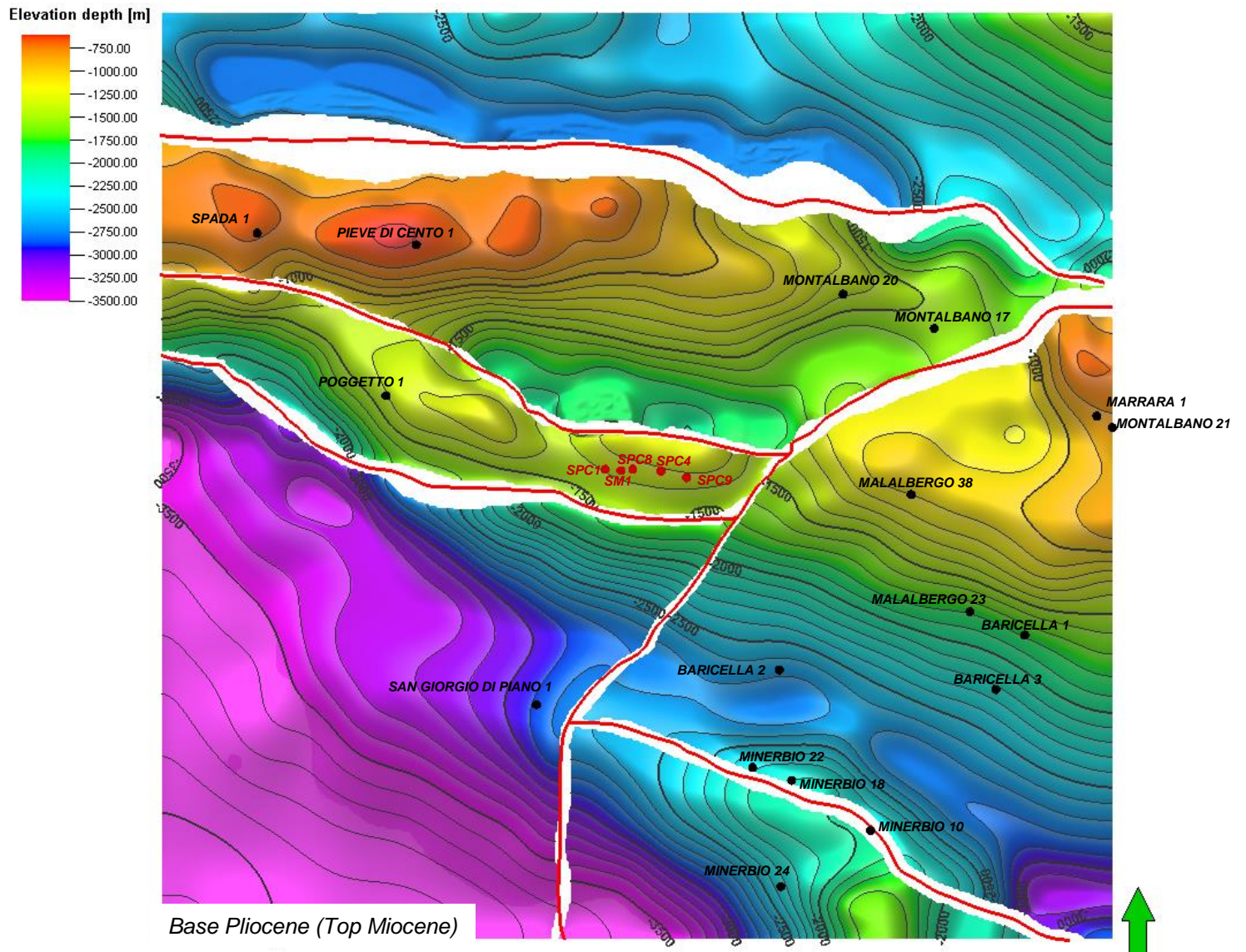


Figura 5 – Mappa della base dei depositi pliocenici (top del Miocene) con alcuni pozzi di riferimento. In rosso i sovrascorrimenti regionali.

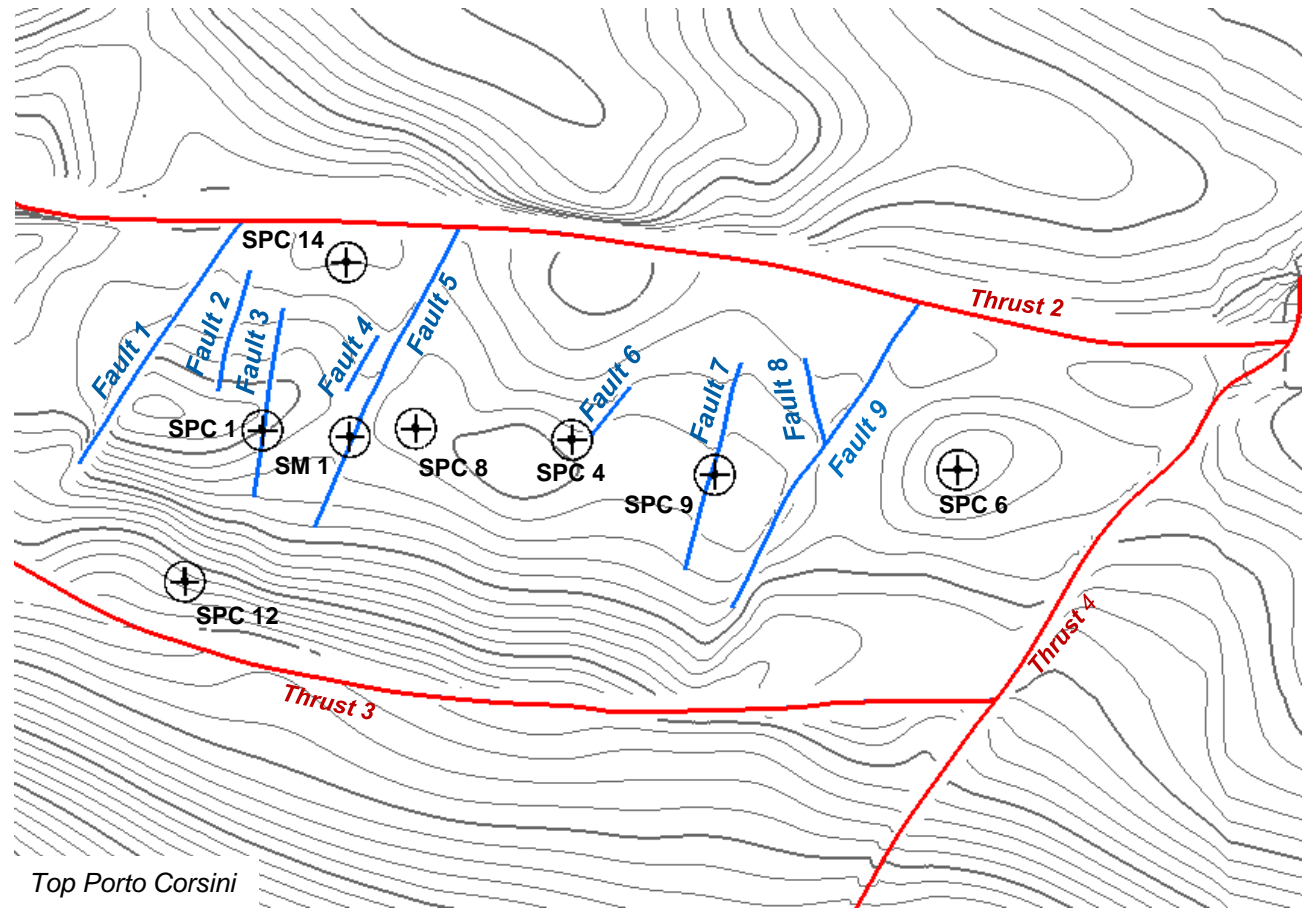
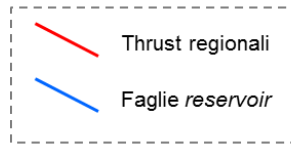


Figura 6 – Faglie introdotte nel modello 3D con l'ubicazione di alcuni pozzi di riferimento; dettaglio in zona reservoir.

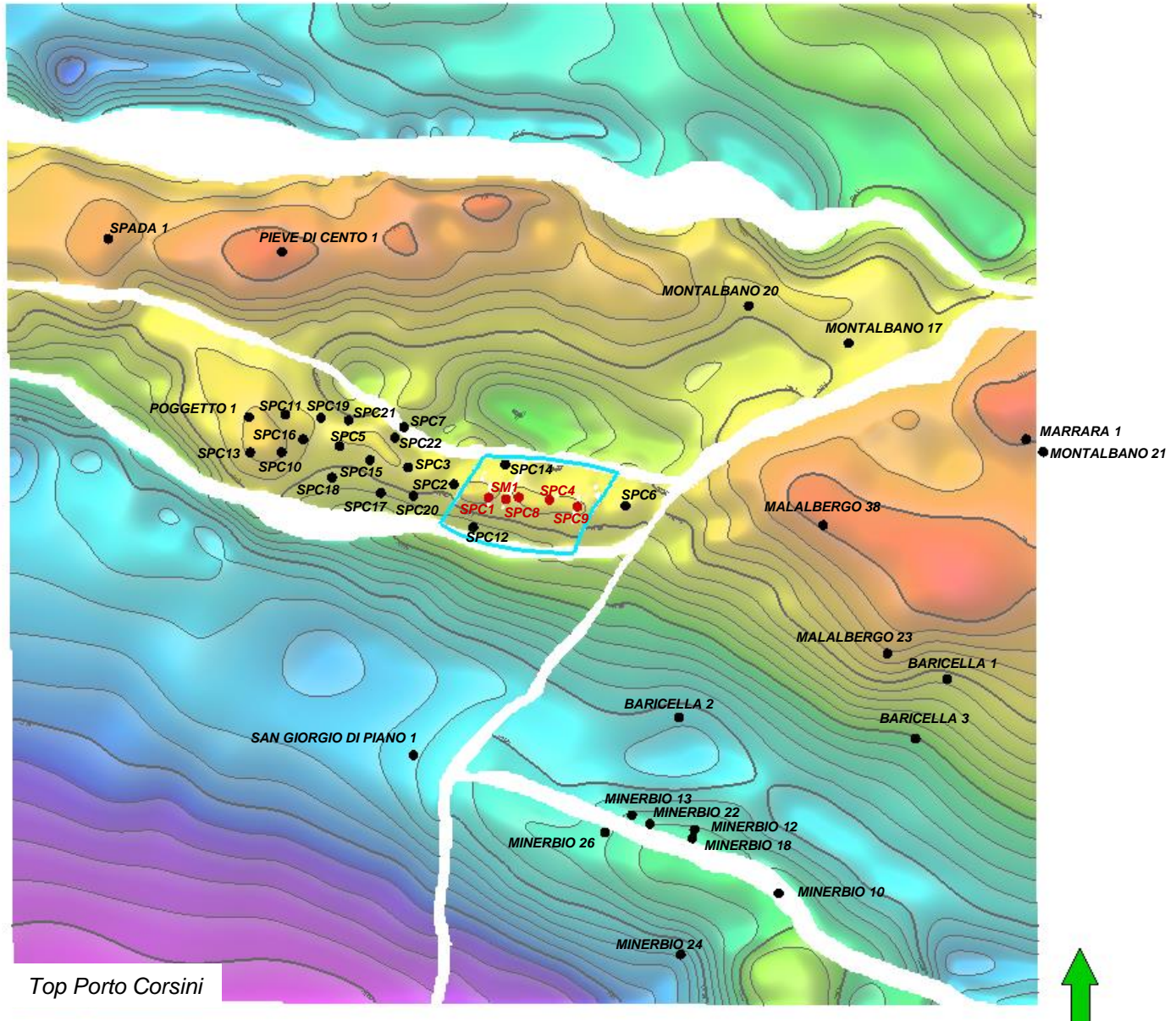
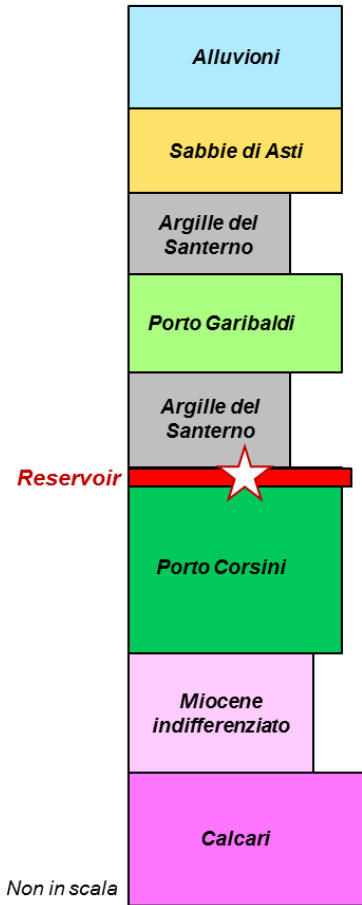


Figura 7 – Ubicazione dei pozzi utilizzati per la costruzione del modello 3D.



ZONA DI MODELLO	LITOLOGIA	ETÀ
Alluvioni	Intercalazioni di sabbie e argille	Quaternario - Pleistocene
Sabbie di Asti	Sabbie con locali intercalazioni argillose	
Argille del Santerno	Argille prevalenti con intercalazioni sabbiose	Pliocene superiore - Pleistocene
Fm. Porto Garibaldi	Sabbie torbiditiche con sottili livelli argilloso-siltosi	Pliocene medio - superiore
Argille del Santerno (caprock)	Argille prevalenti con intercalazioni sabbiose	Pliocene medio - inferiore
Reservoir		
Fm. Porto Corsini	Sabbie torbiditiche con sottili livelli argilloso-siltosi	Pliocene inferiore
Miocene	Marne e argille con intercalazione di livelli sabbiosi	Miocene
Calcari	Calcari e dolomie	Giurassico - Eocene

Figura 8 – Zonazione stratigrafica adottata per la costruzione del modello 3D a scala regionale.

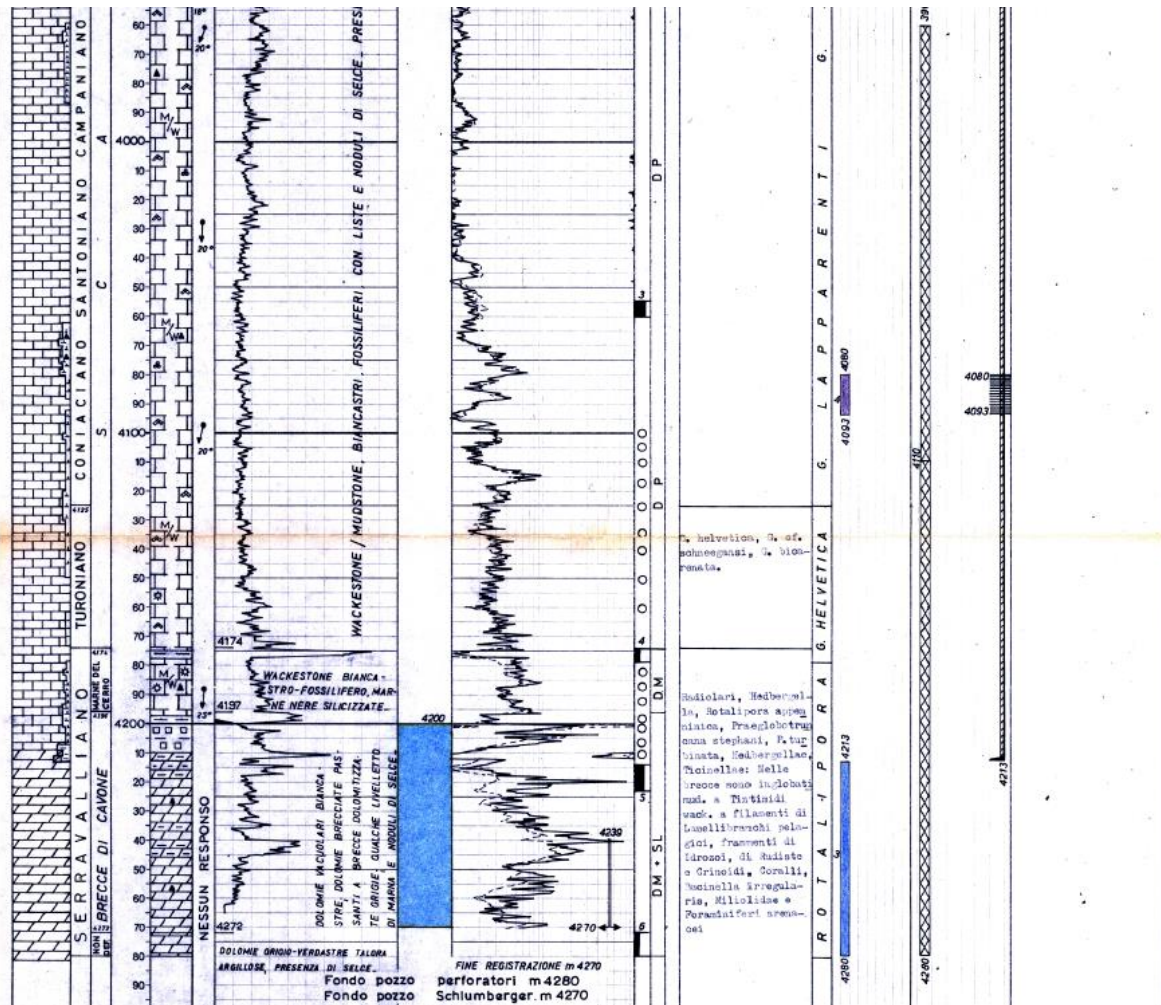


Figura 9 – Dettaglio del profilo 1:1000 del pozzo Spada 1.



Elevation depth [m]

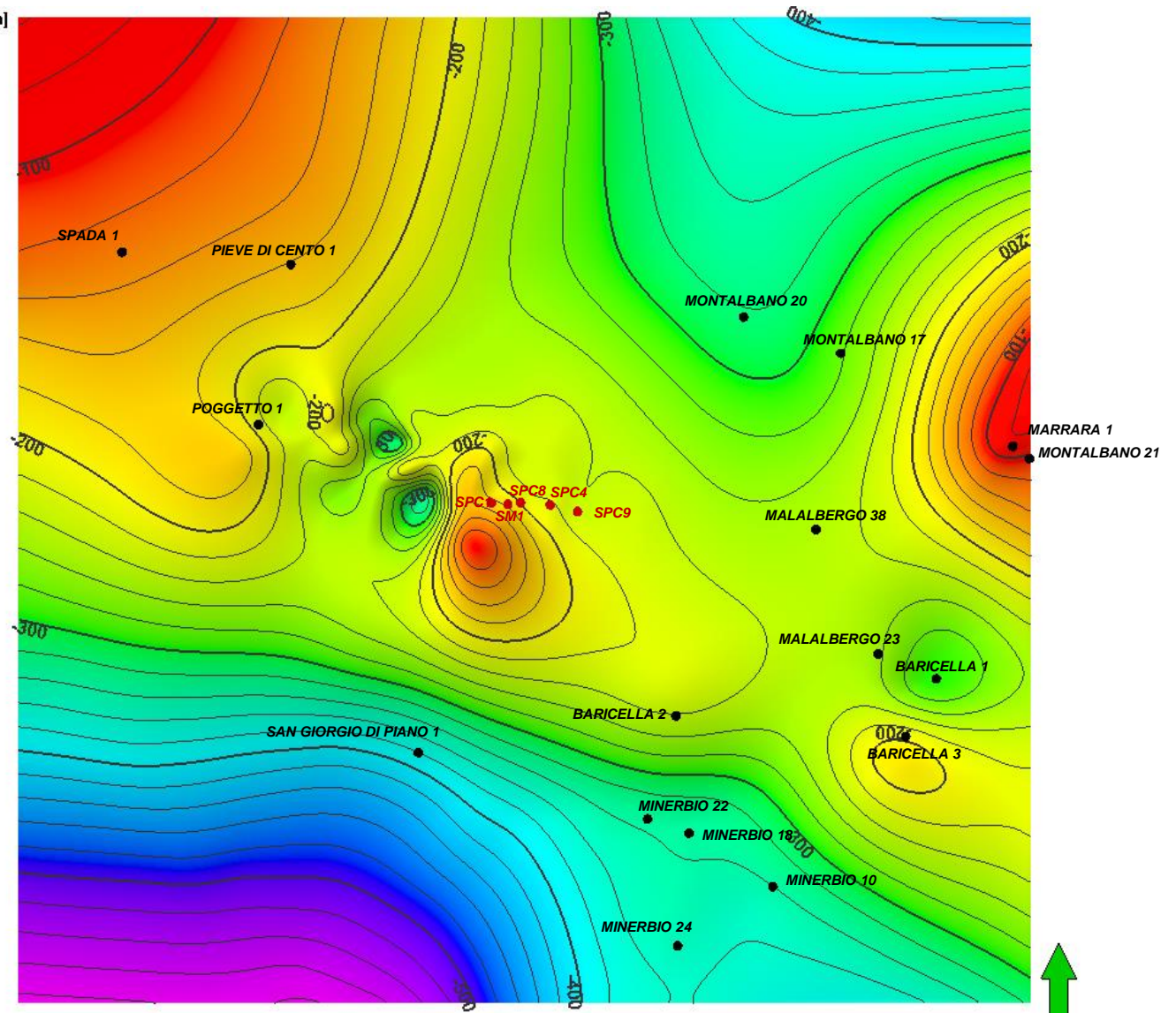
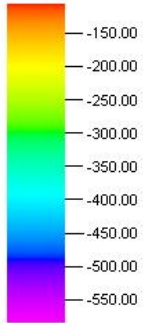


Figura 10 – Mappa delle isobate del Top Sabbie di Asti utilizzata per la costruzione del modello 3D con indicati alcuni pozzi di riferimento.

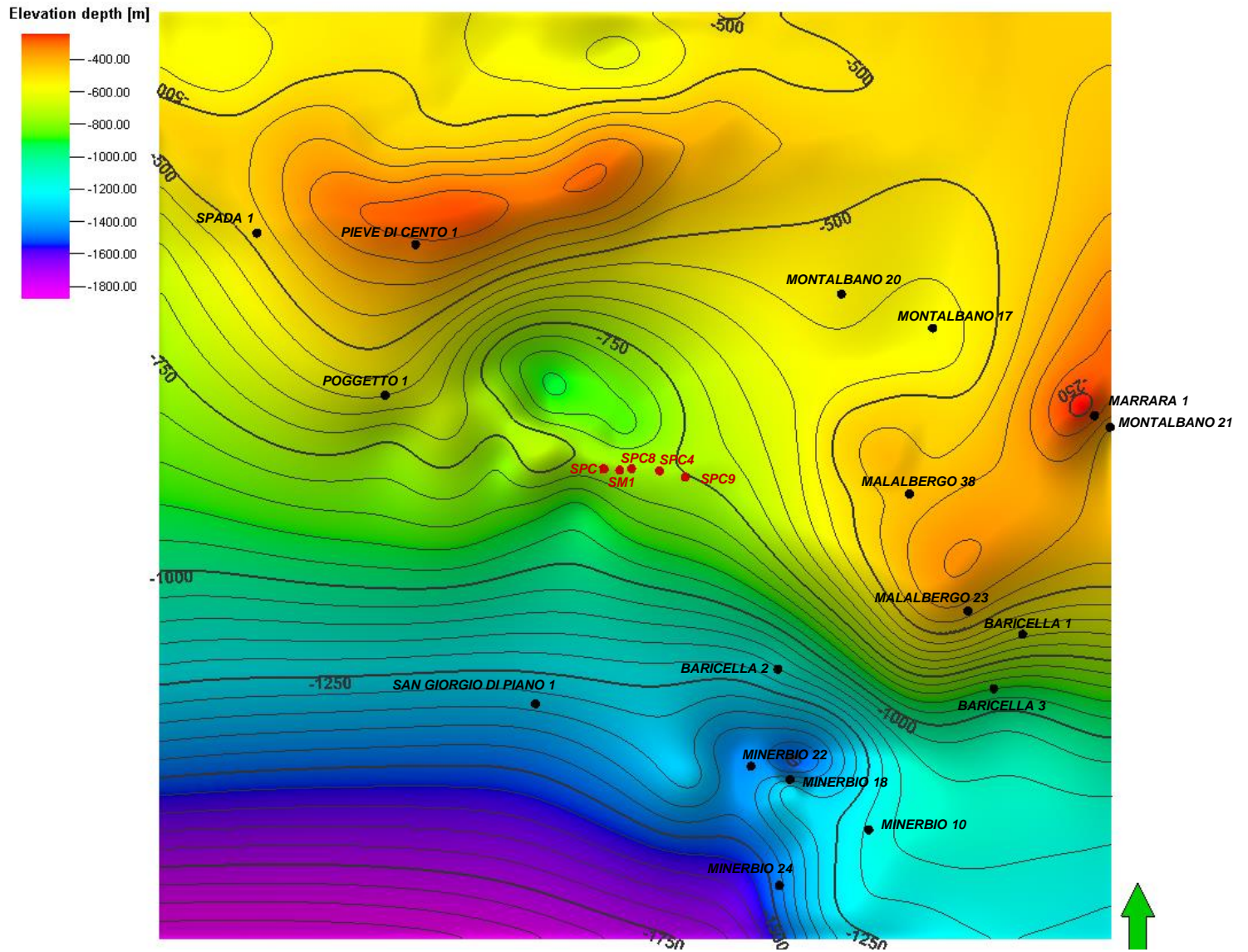


Figura 11 – Mappa delle isobate del Top Argille del Santerno utilizzata per la costruzione del modello 3D con indicati alcuni pozzi di riferimento.

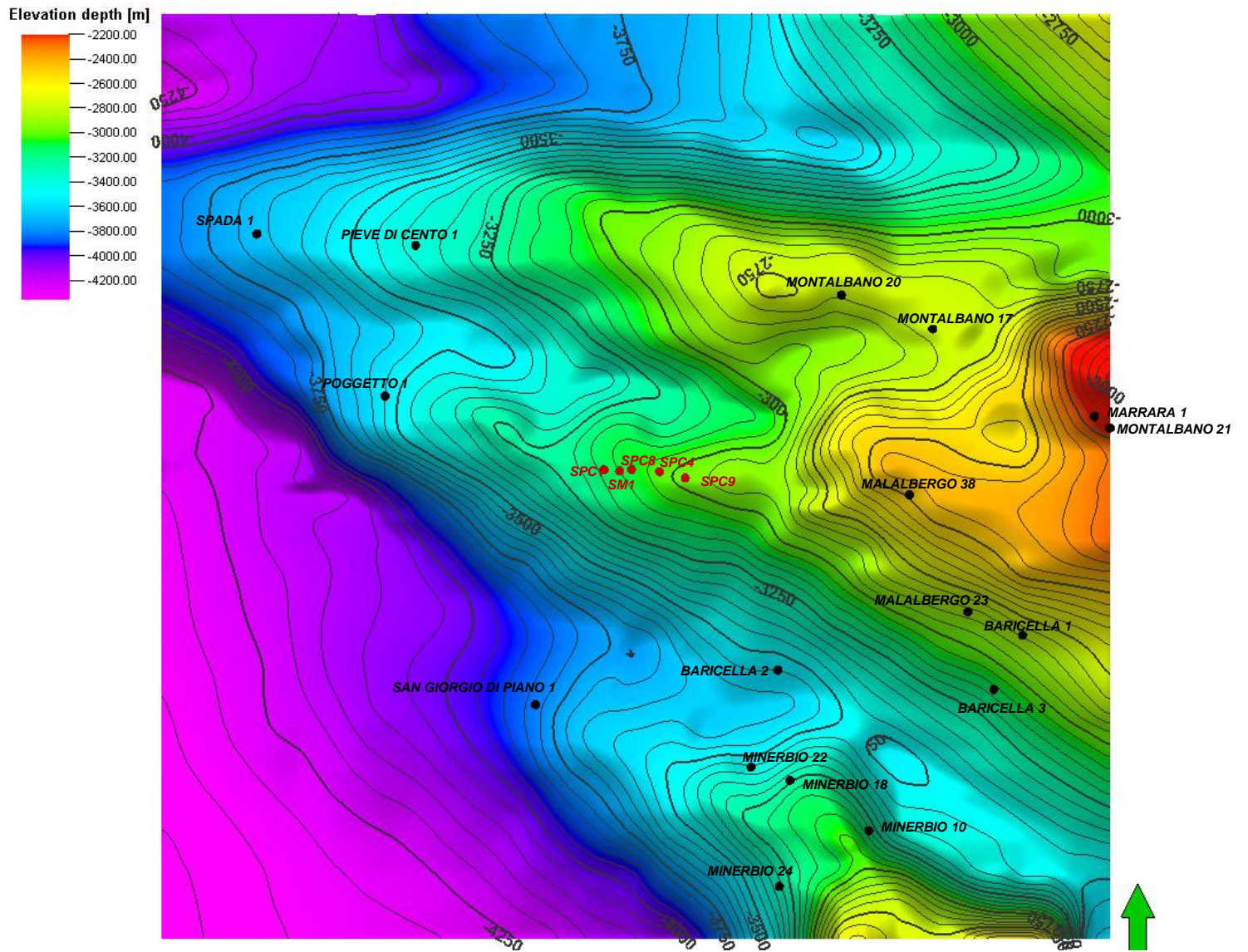


Figura 12 – Mappa delle isobate del Top dei Calcari utilizzata per la costruzione del modello 3D con indicati alcuni pozzi di riferimento.

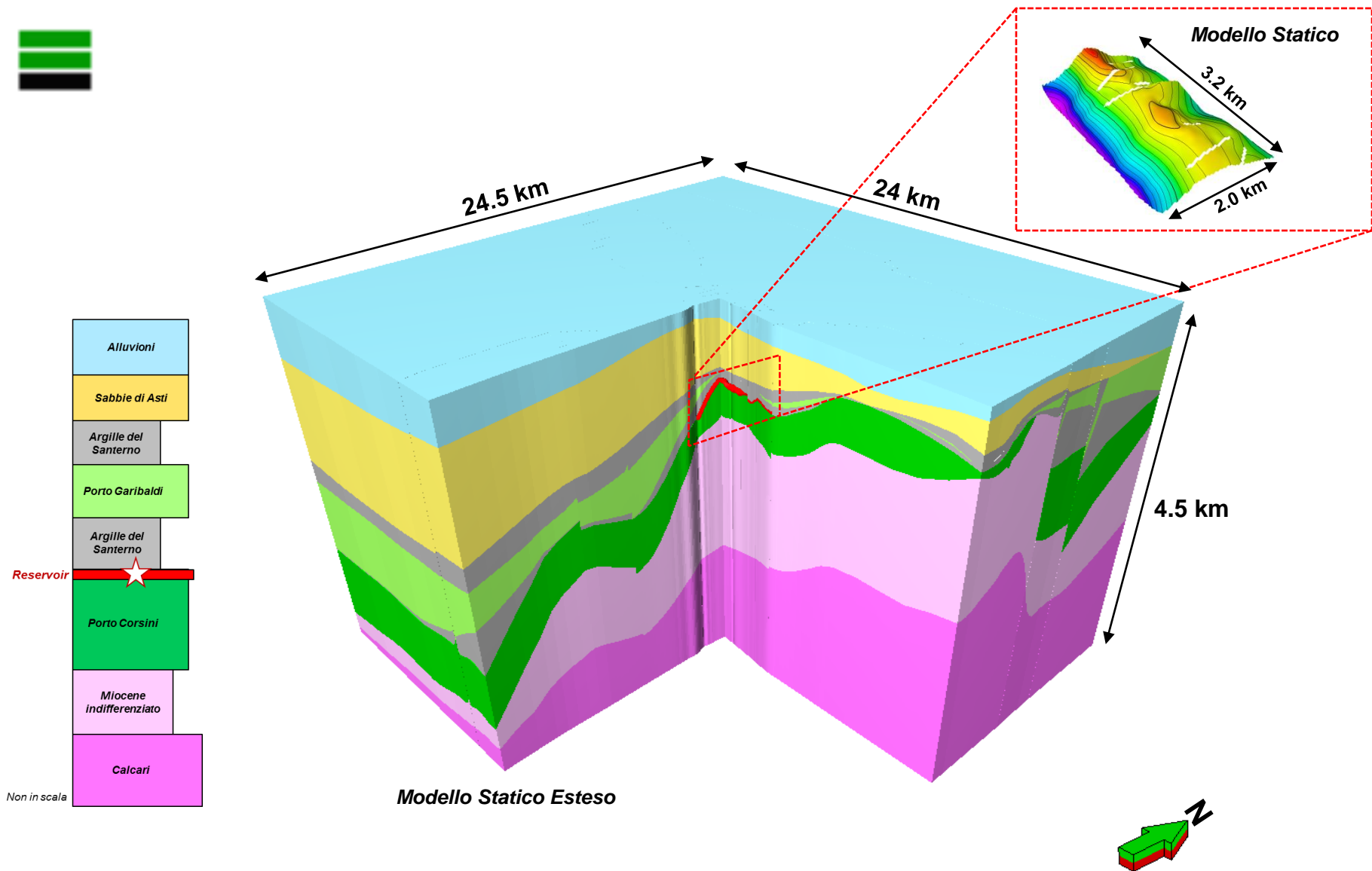


Figura 13 – Estensione e dimensioni del modello geologico 3D.

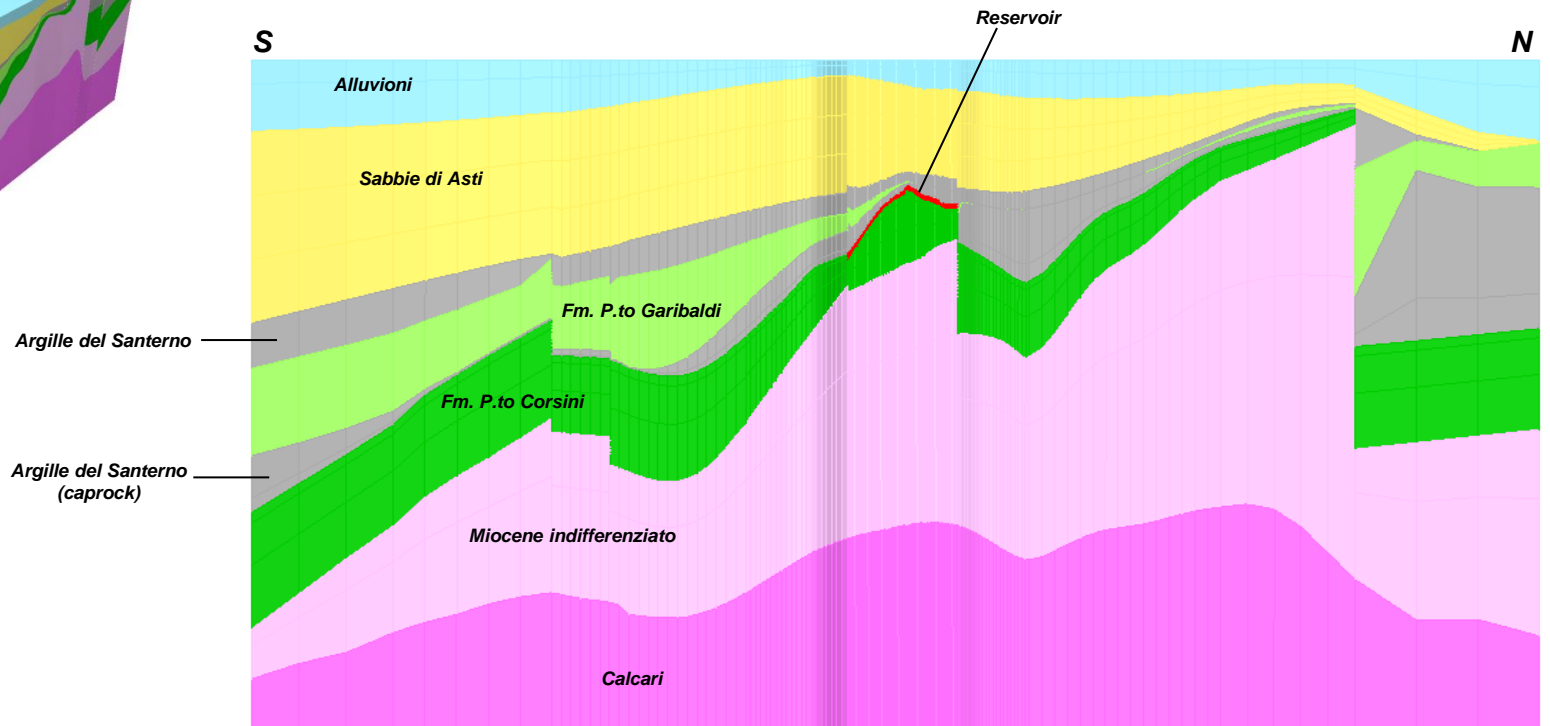
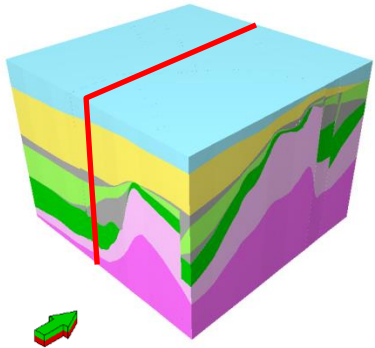


Figura 14 – Sezione N-S del modello geologico 3D in corrispondenza del *reservoir*.

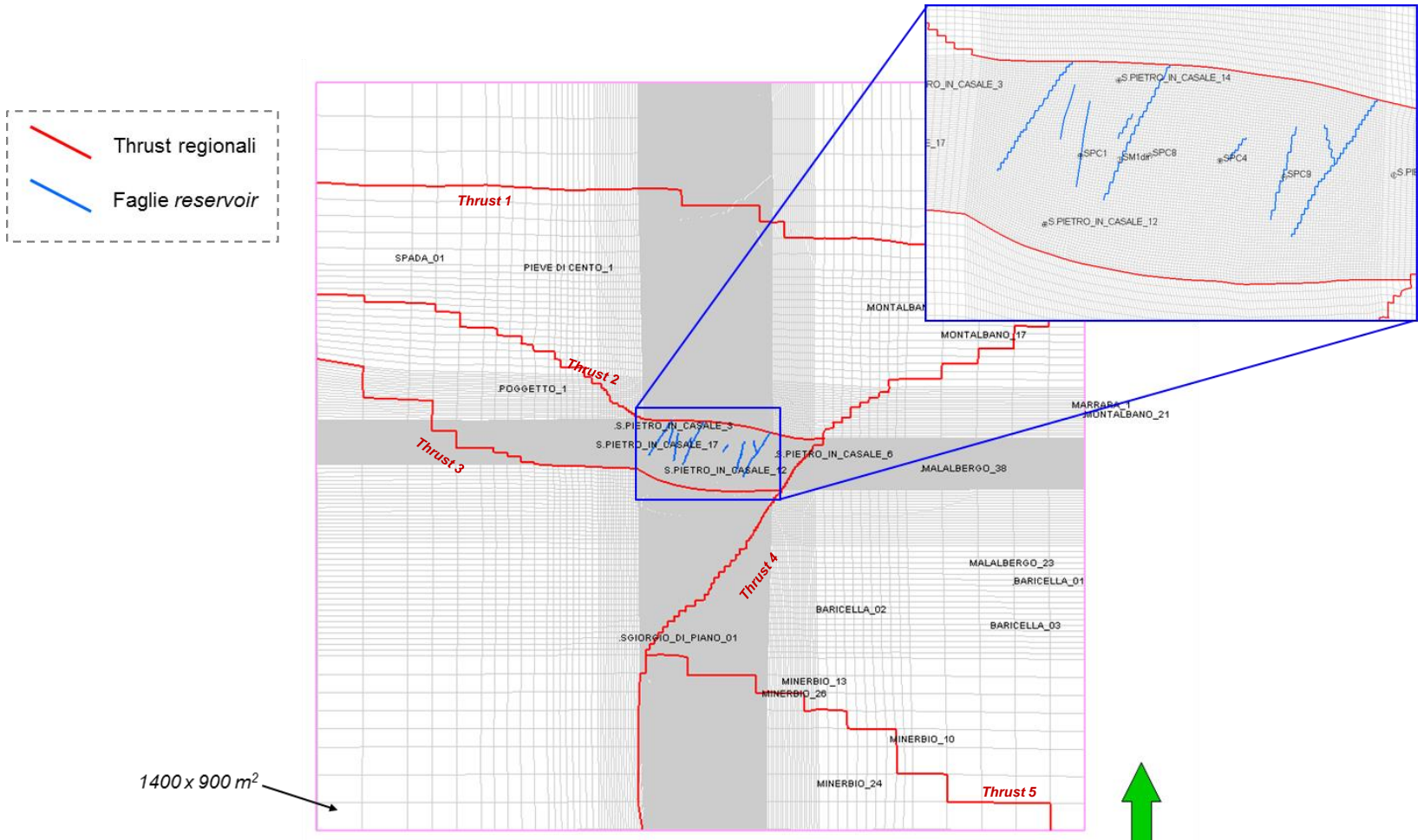


Figura 15 – Discretizzazione areale del grigliato e integrazione del modello di faglie con il dettaglio della zona *reservoir*.

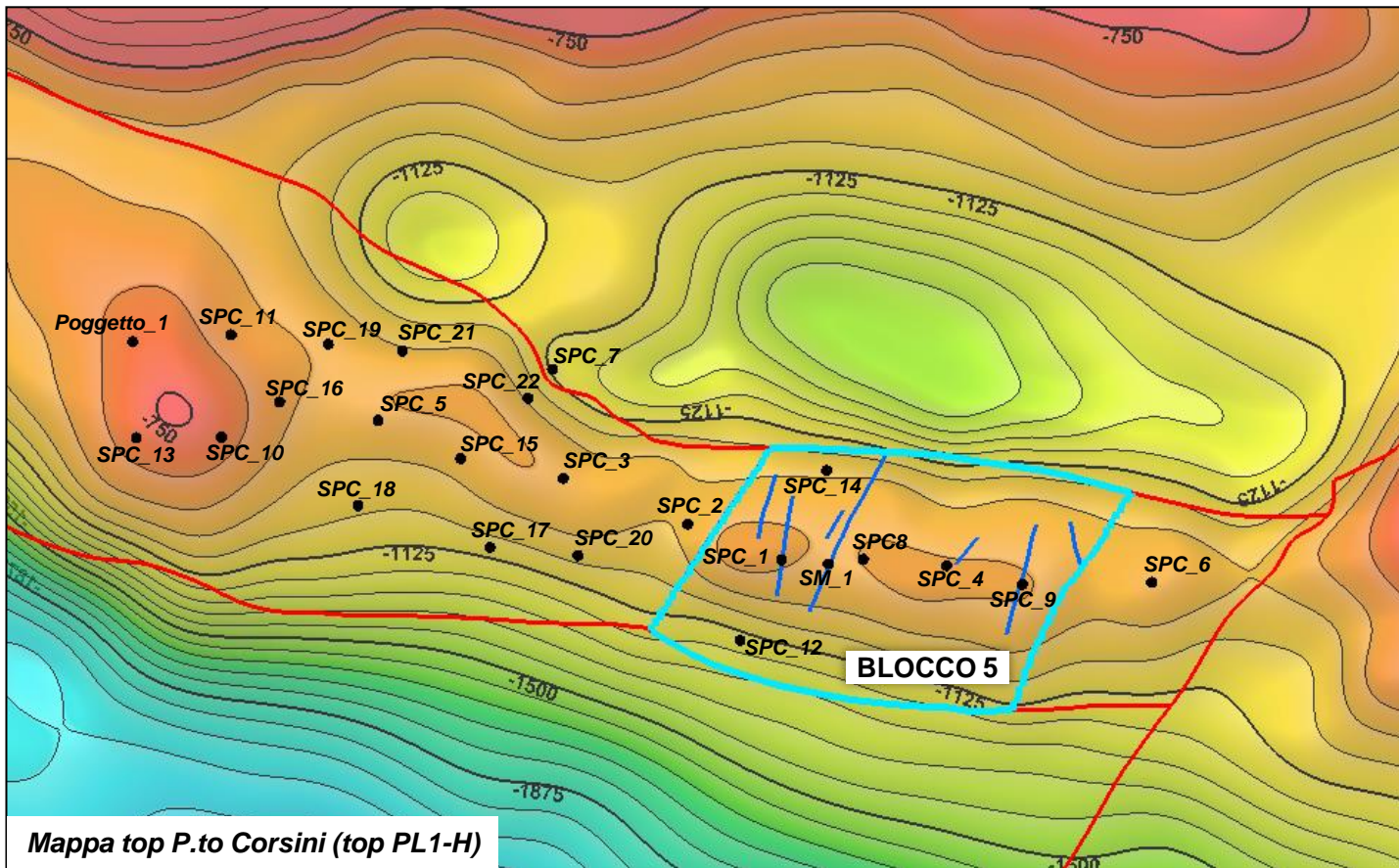
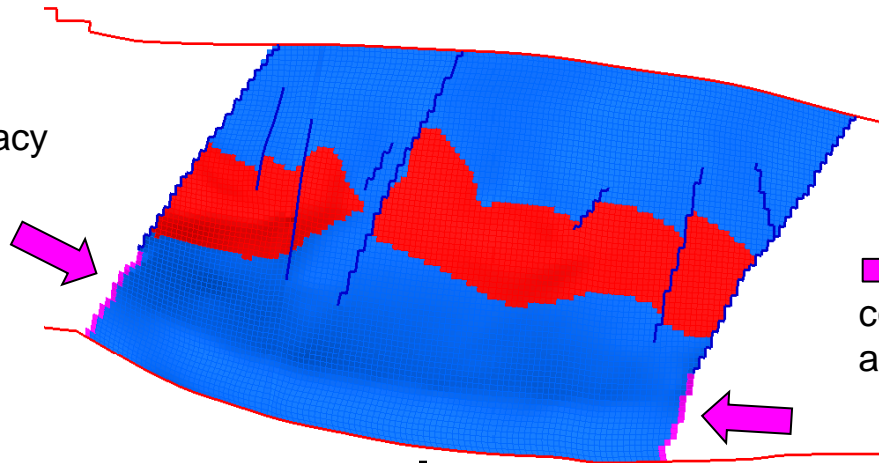


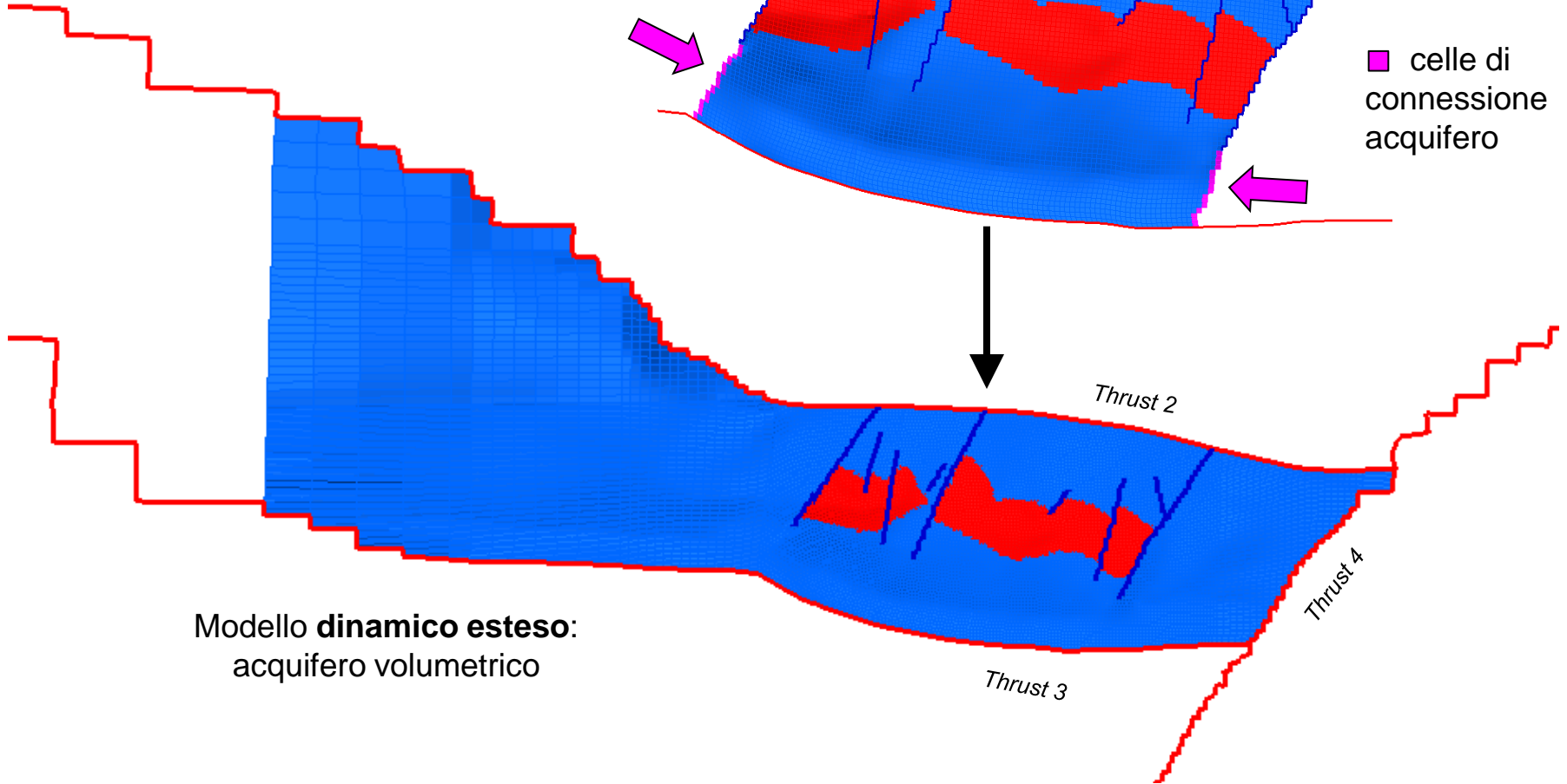
Figura 16 – Ubicazione del giacimento di Santa Maddalena (azzurro) corrispondente al Blocco 5 del campo di San Pietro in Casale.



Modello **dinamico** @ 2012:
acquifero analitico di Carter-Tracy

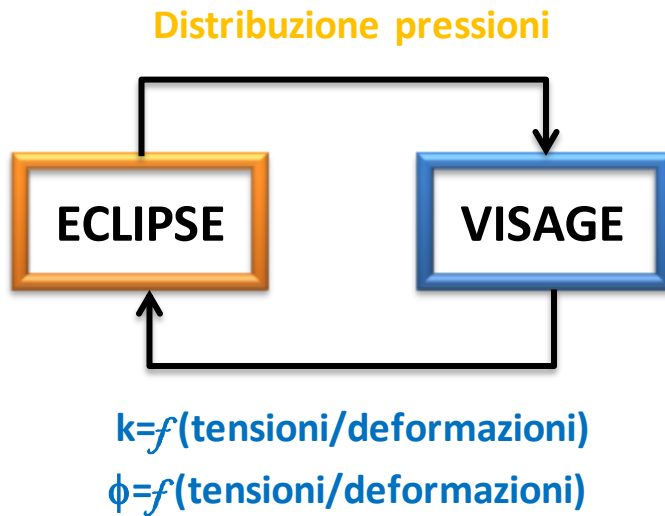


■ celle di
connessione
acquifero

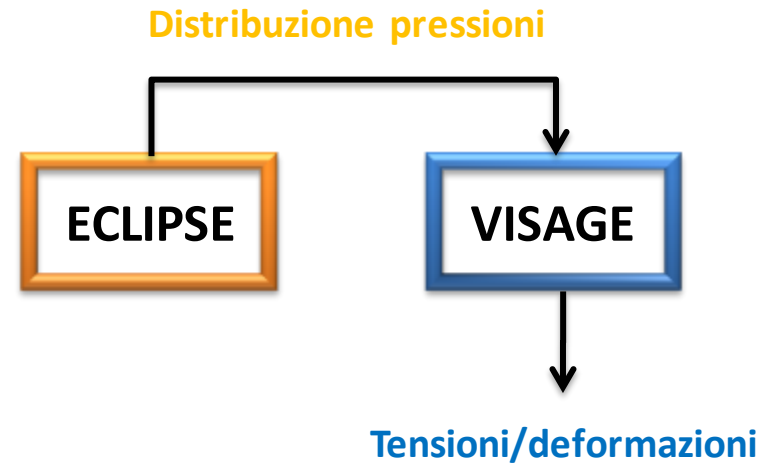


Modello **dinamico esteso**:
acquifero volumetrico

Figura 17 – Modello dinamico esteso: acquifero volumetrico.



(a)



(b)

Figura 18 – Schema esplicativo per l'approccio *iteratively coupling* (a) e *one-way coupling* (b).

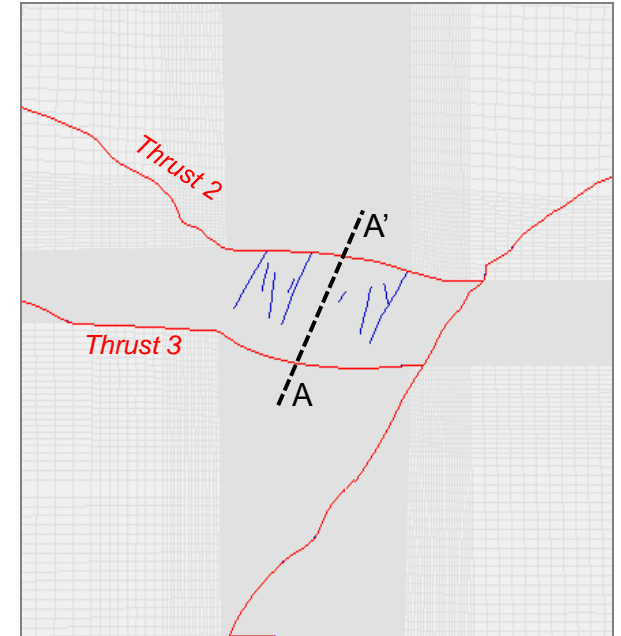
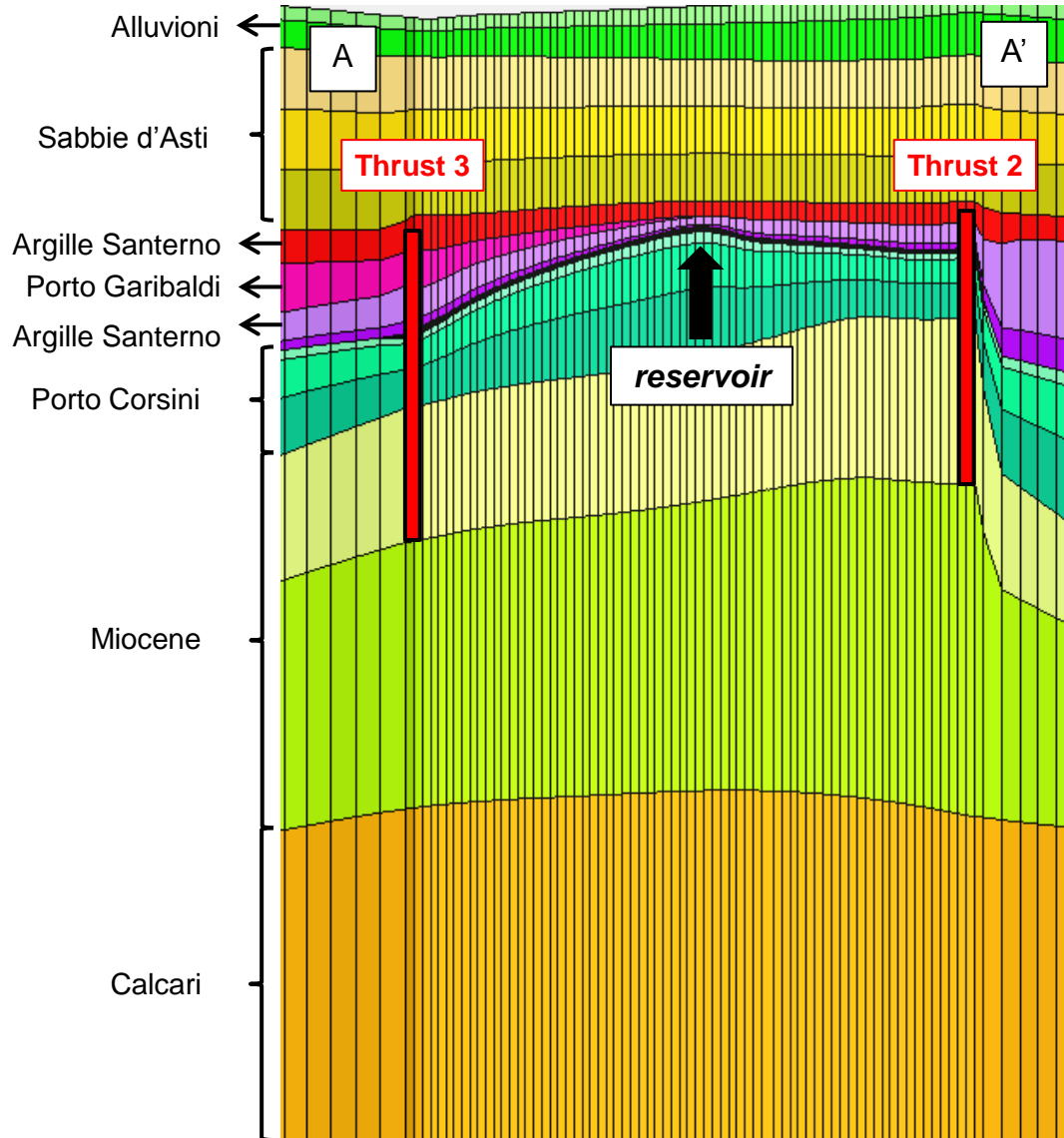


Figura 19 – Sezione verticale del modello geomeccanico che riporta l'estensione delle faglie.

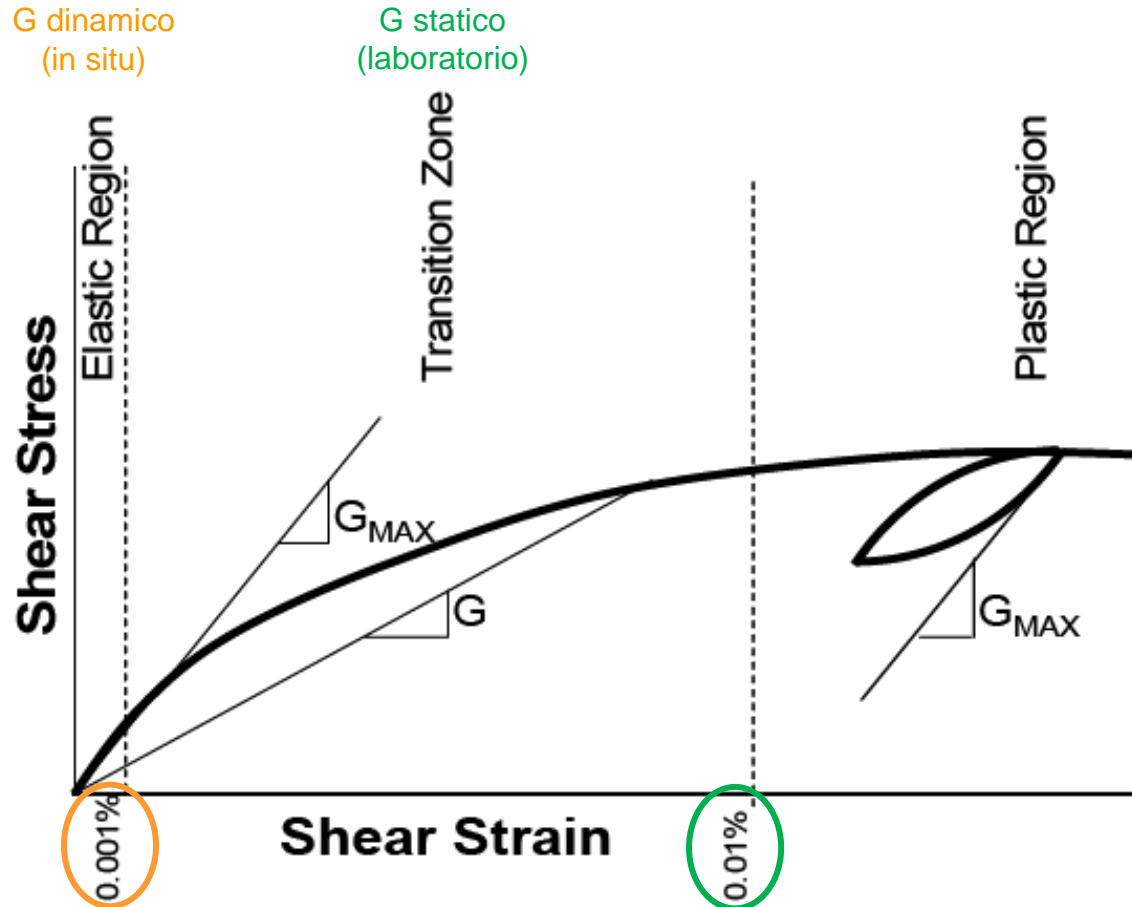


Figura 20 – Variazione del modulo elastico a taglio, G , in funzione del livello di deformazione (Davich, 2004).

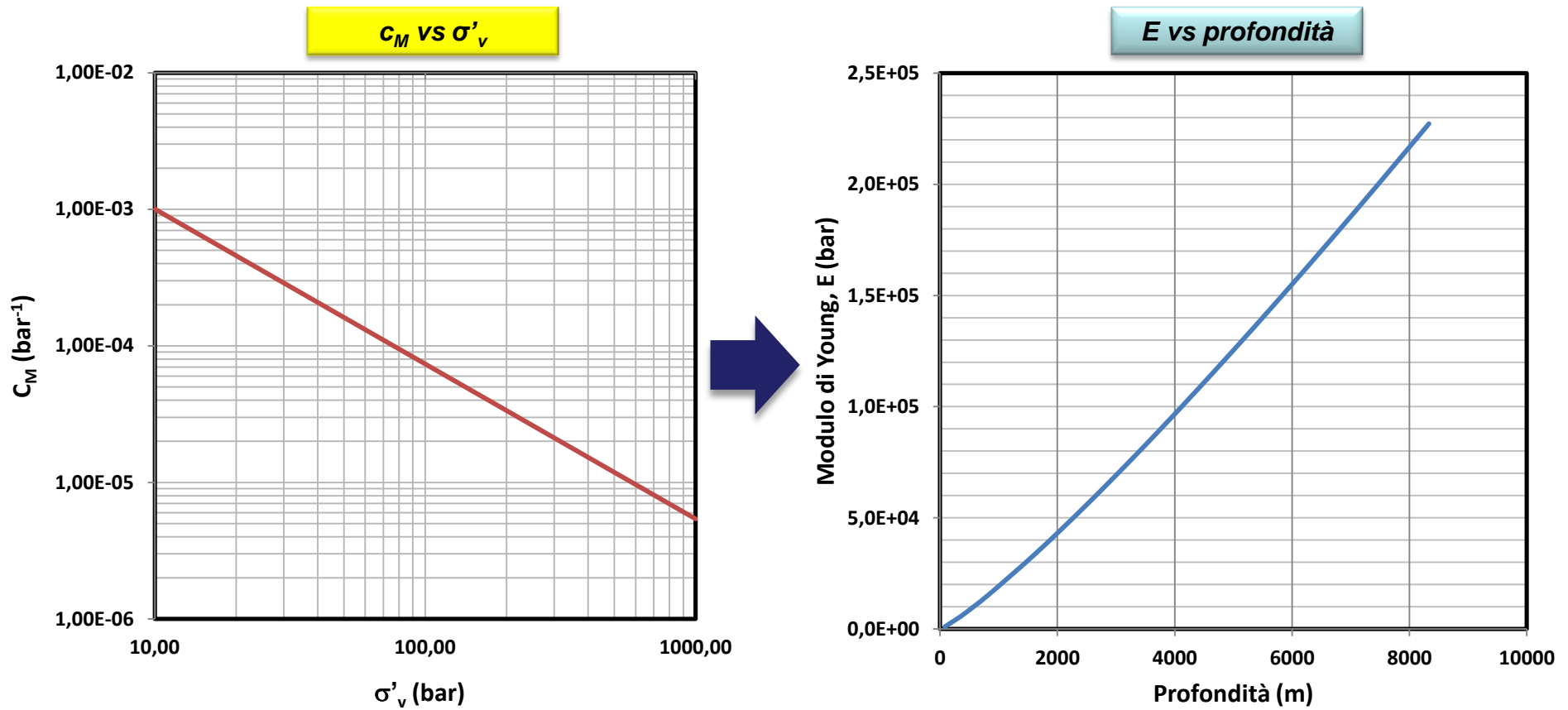


Figura 21 – Compressibilità della roccia in funzione dello stress verticale (Teatini et al., 2011) e conseguente modulo elastico in funzione della profondità.

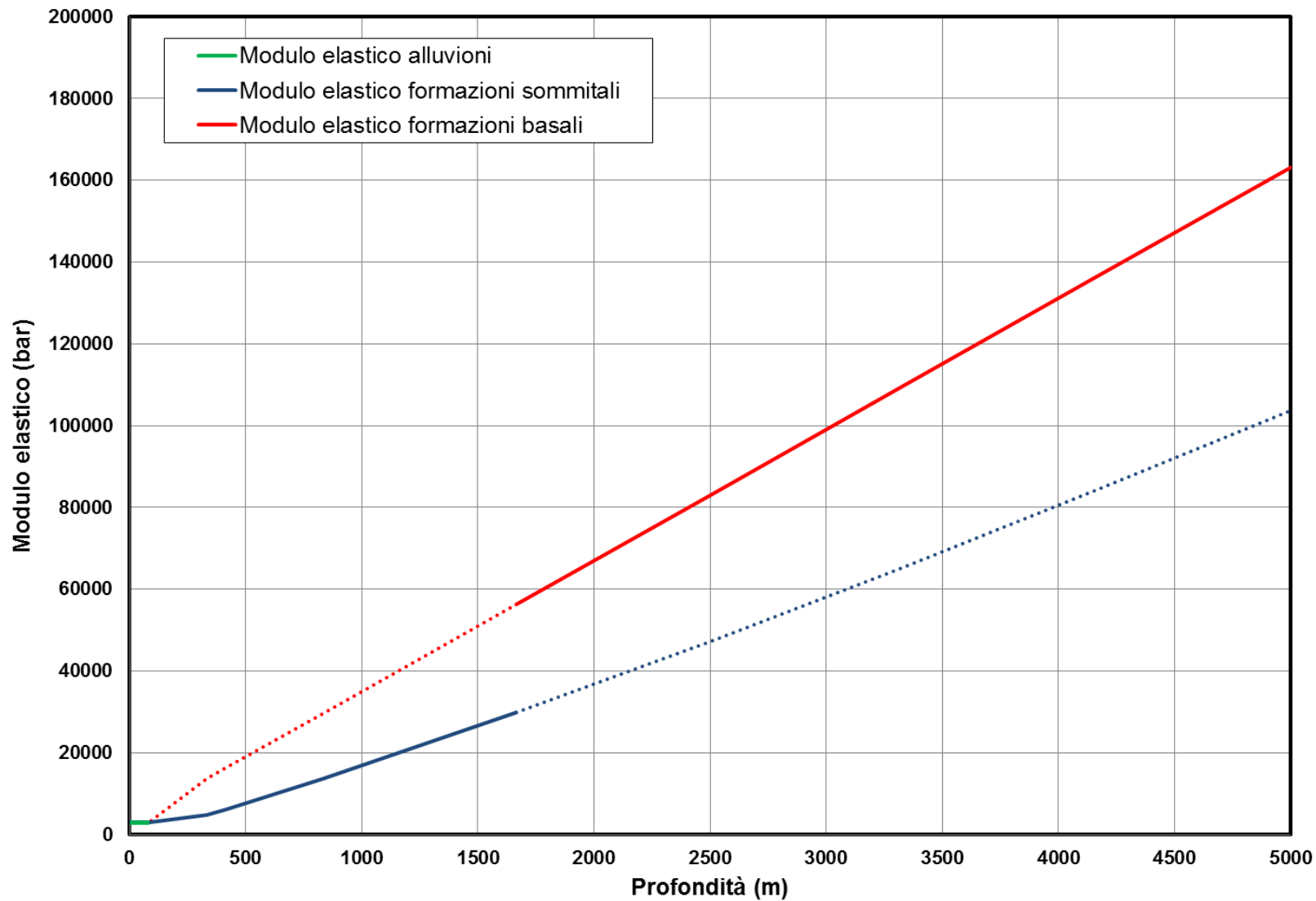
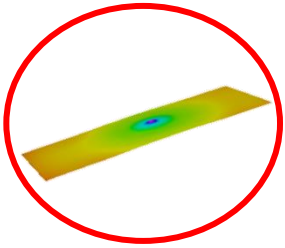


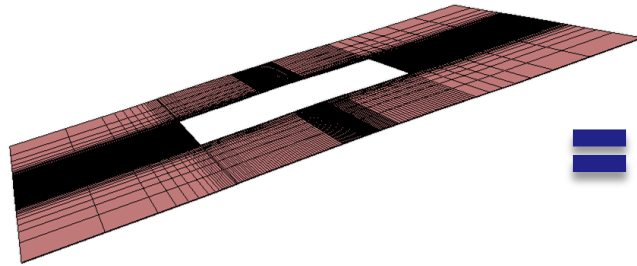
Figura 22 – Relazioni modulo elastico-profondità utilizzate per i differenti litotipi analizzati.



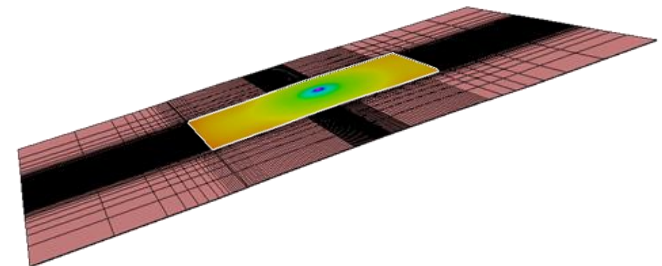
Giacimento + acquifero



Mapa di pressione
(Modello dinamico)

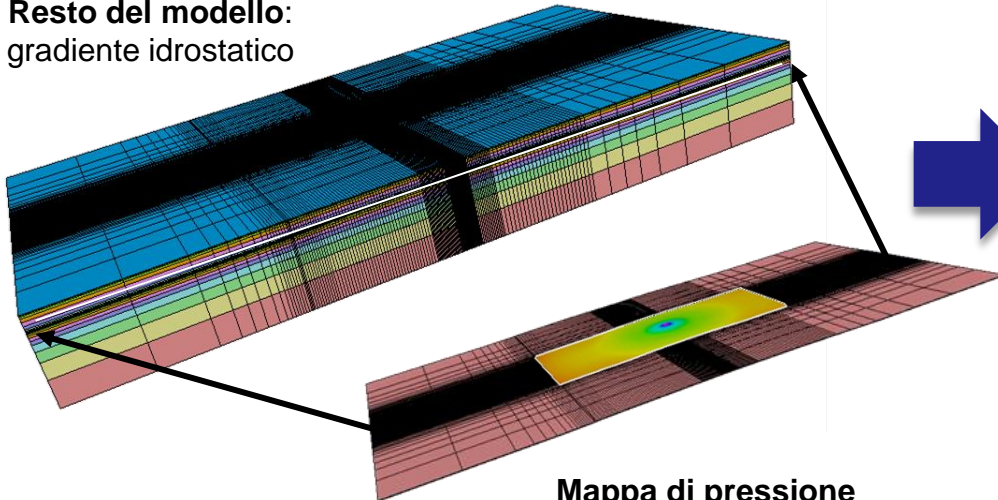


Gradiente idrostatico

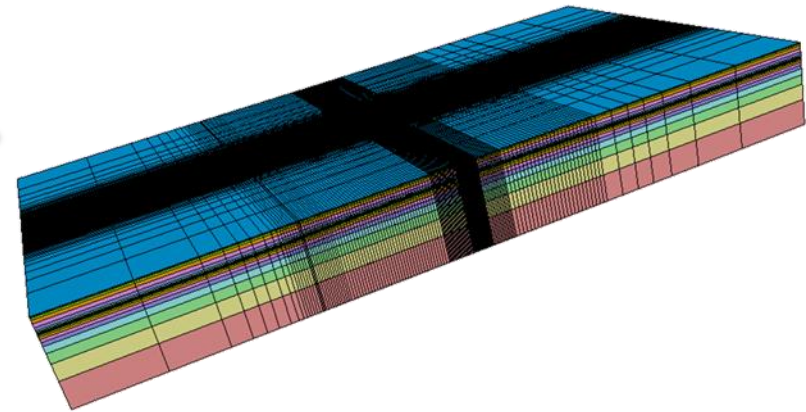


Mapa di pressione
(Modello geomeccanico)

Resto del modello:
gradiente idrostatico



Mapa di pressione
della Formazione P.to
Corsini, livello PL1-H



Modello geomeccanico completo
popolato con valori di pressione

Figura 23 – Definizione delle mappe di pressione per ciascun *time-step* di analisi.

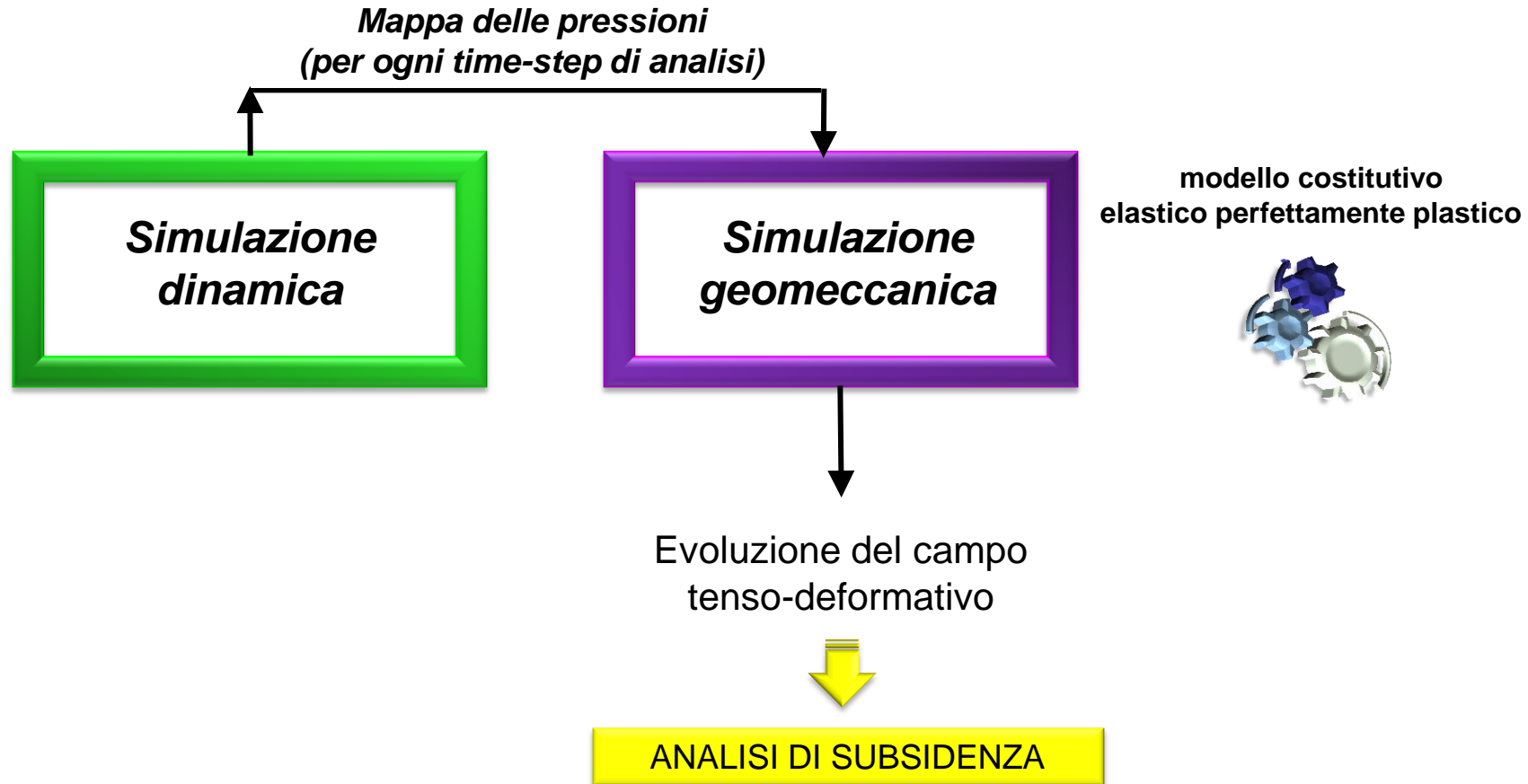


Figura 24 – Approccio *one-way coupling*.

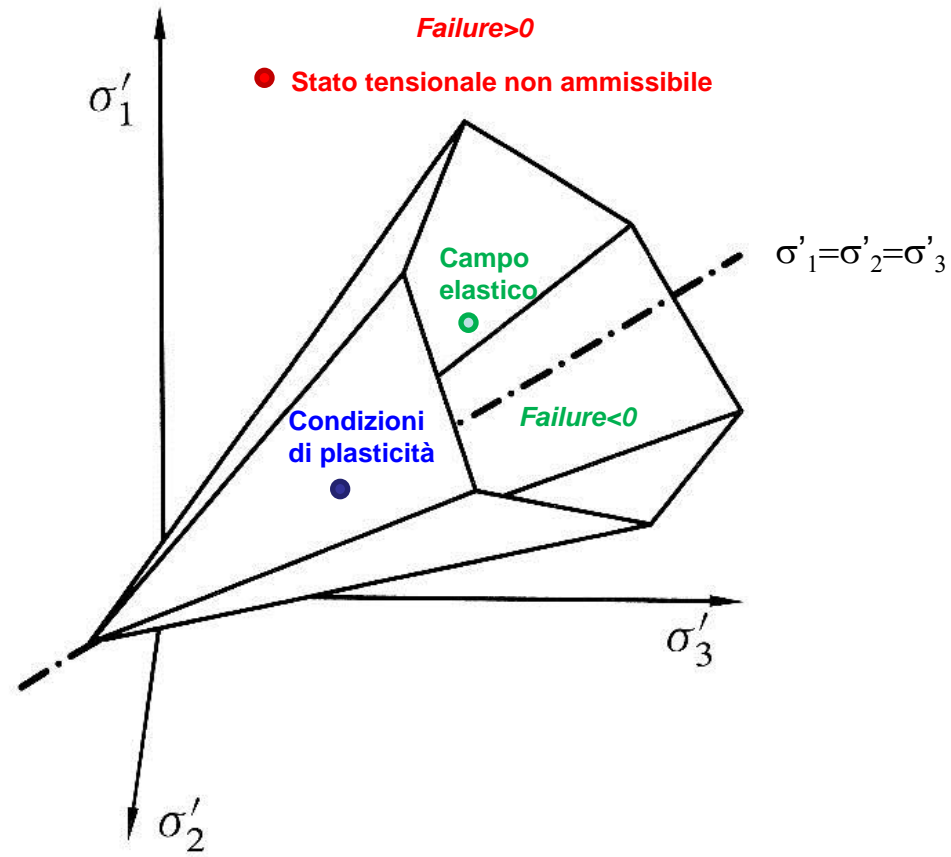


Figura 25 – Criterio di Mohr-Coulomb sul piano delle tensioni principali (Fjær, 2008).

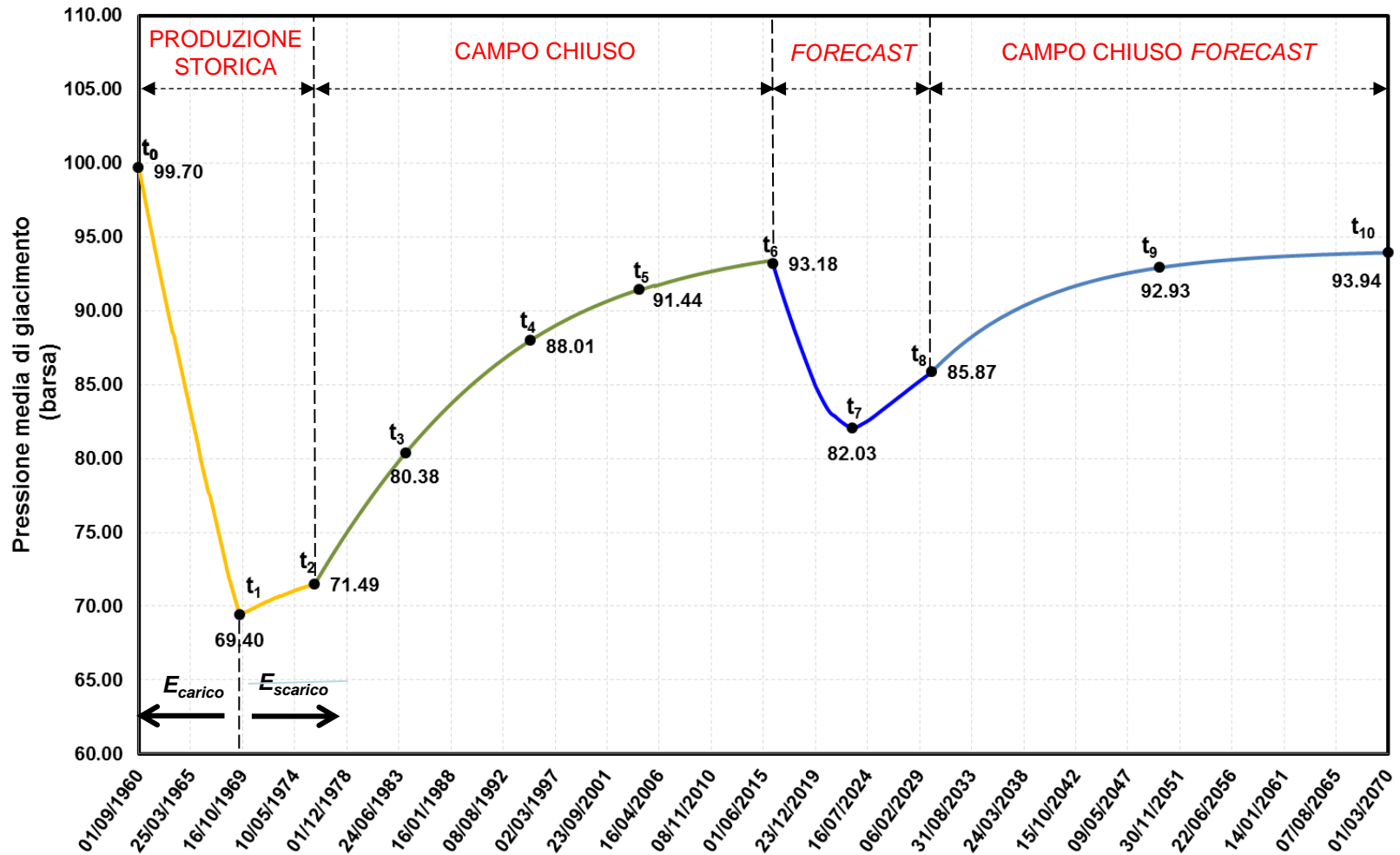
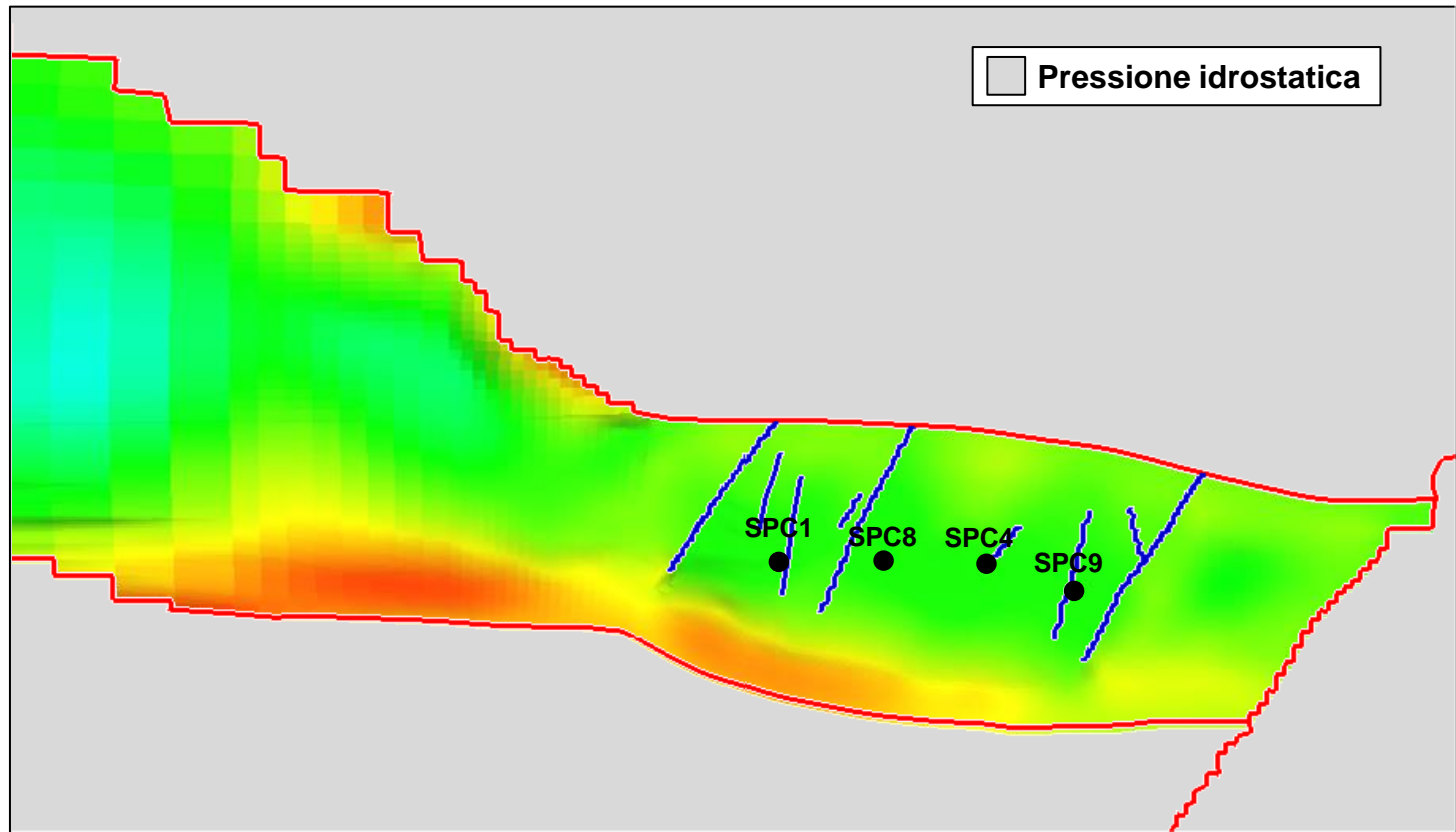


Figura 26 – Andamento della pressione media di giacimento in funzione del tempo.



Pressione (bar)

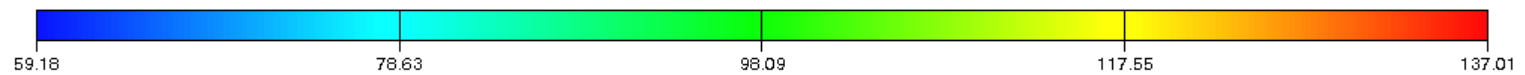
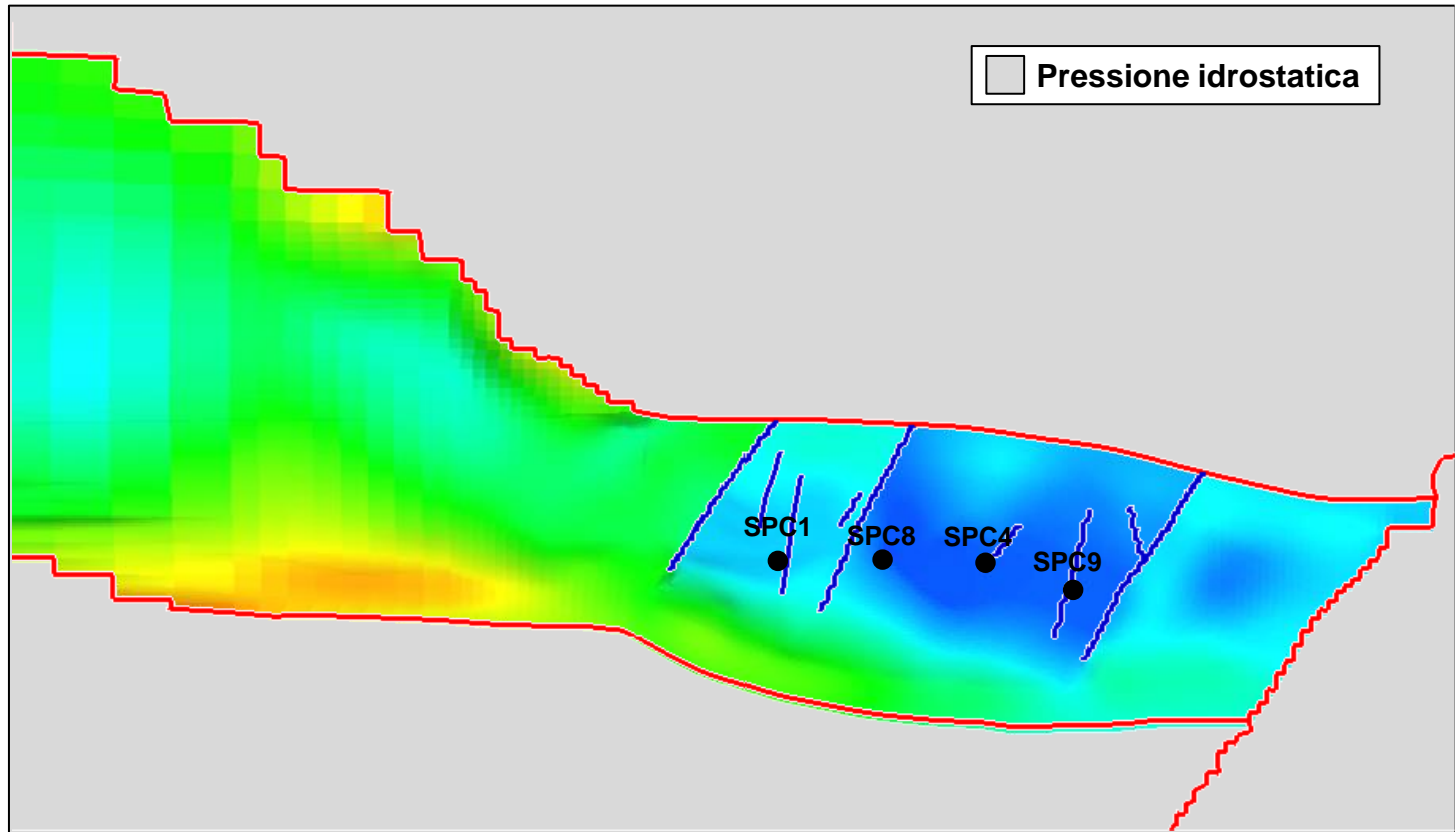


Figura 27 – Distribuzione della pressione media al top del giacimento (condizioni iniziali - 1960).



Pressione (bar)

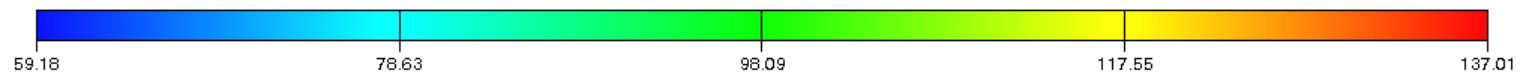
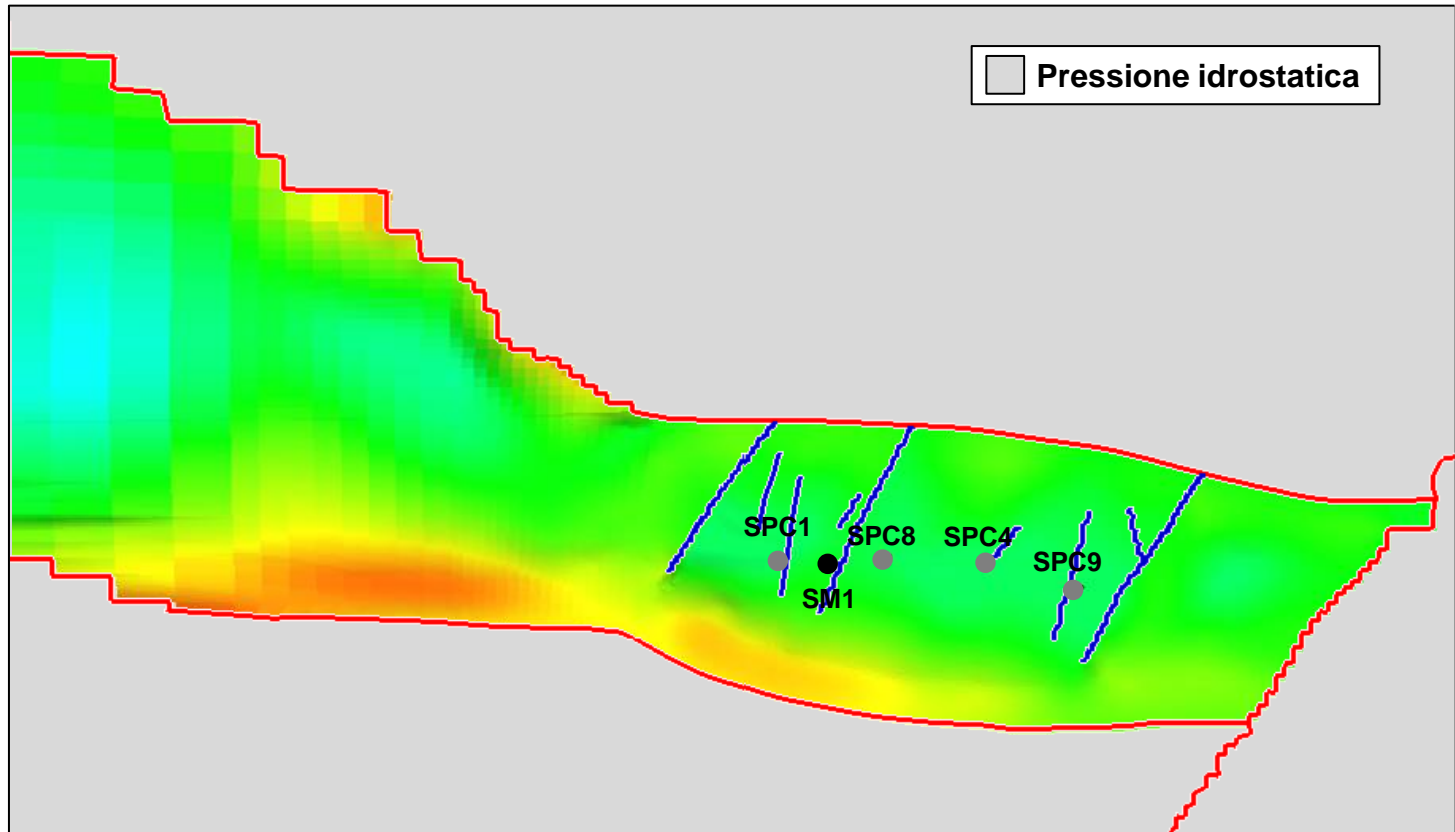


Figura 28 – Distribuzione della pressione media al top del giacimento (*max depletion* produzione storica - 1969).



Pressione (bar)

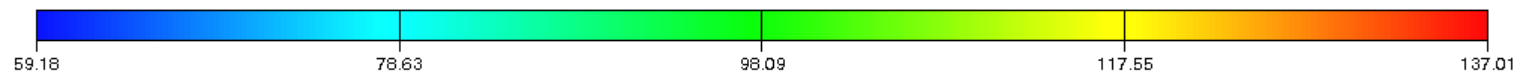
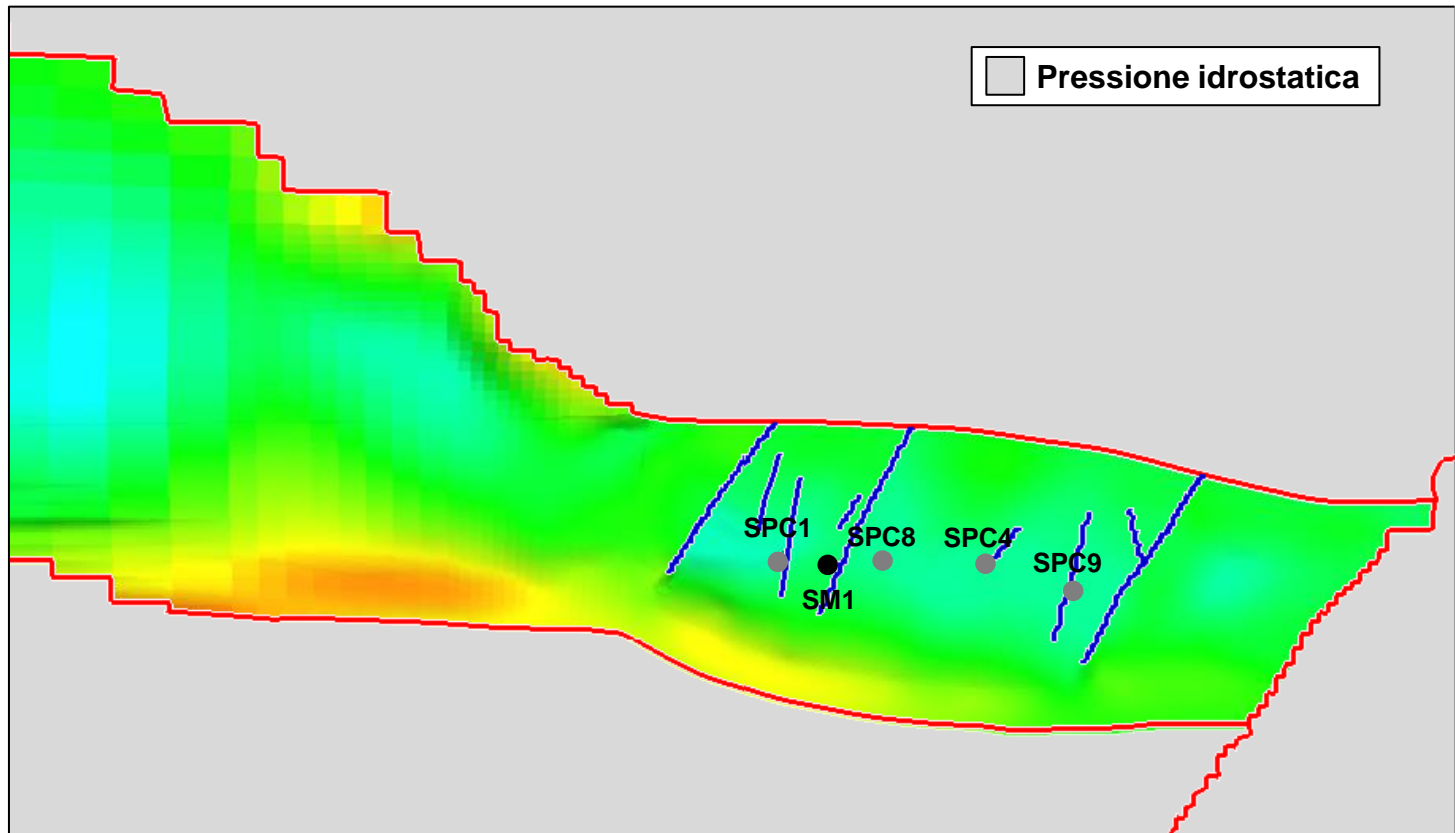


Figura 29 – Distribuzione della pressione media al top del giacimento (inizio produzione *forecast* - 2016).



Pressione (barsa)

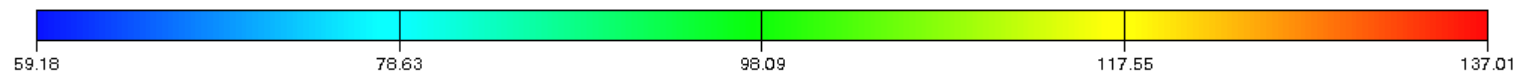
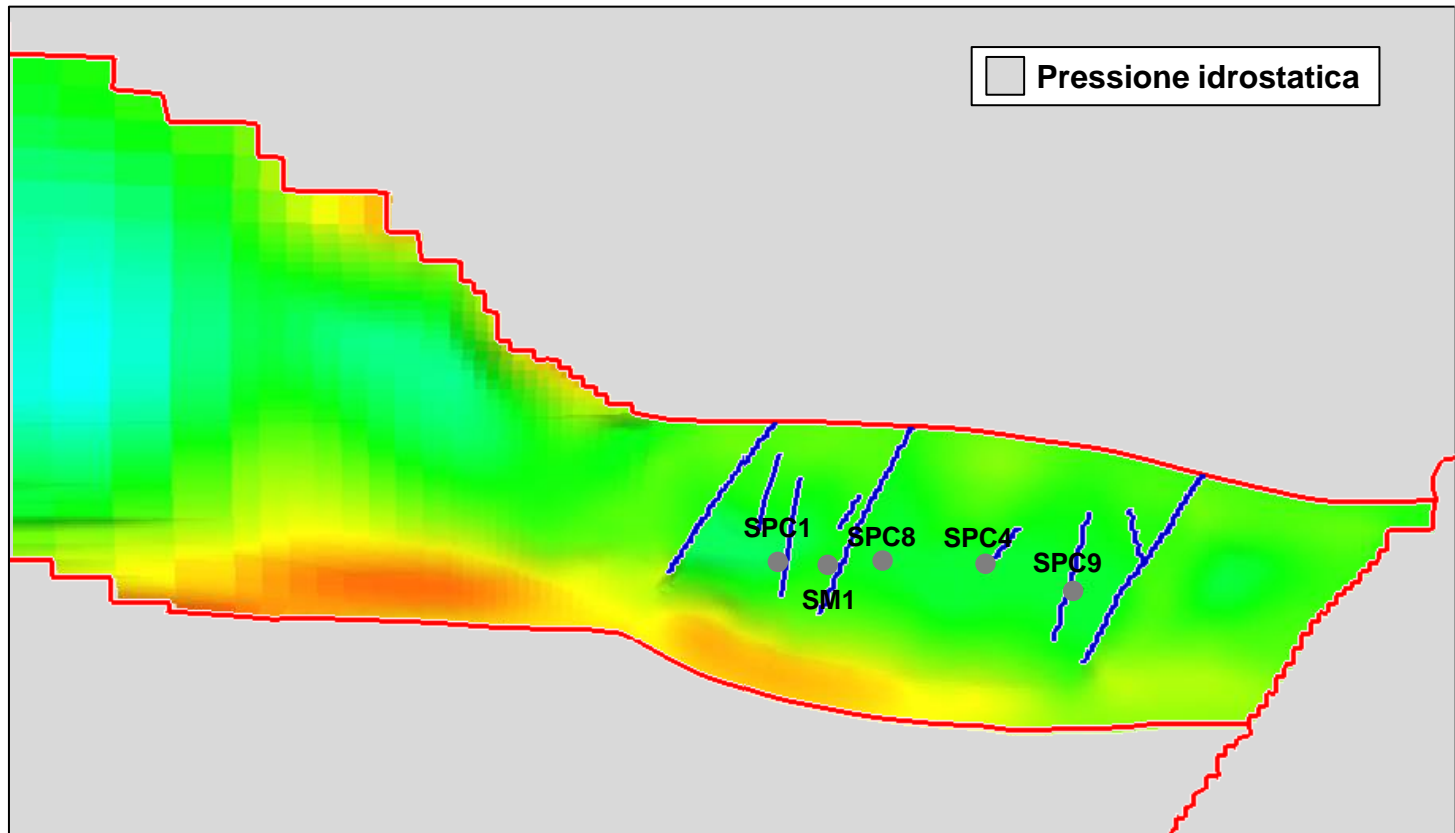


Figura 30 – Distribuzione della pressione media al top del giacimento (*max depletion forecast - 2023*).



Pressione (bar)

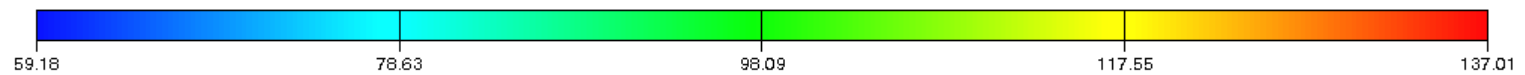
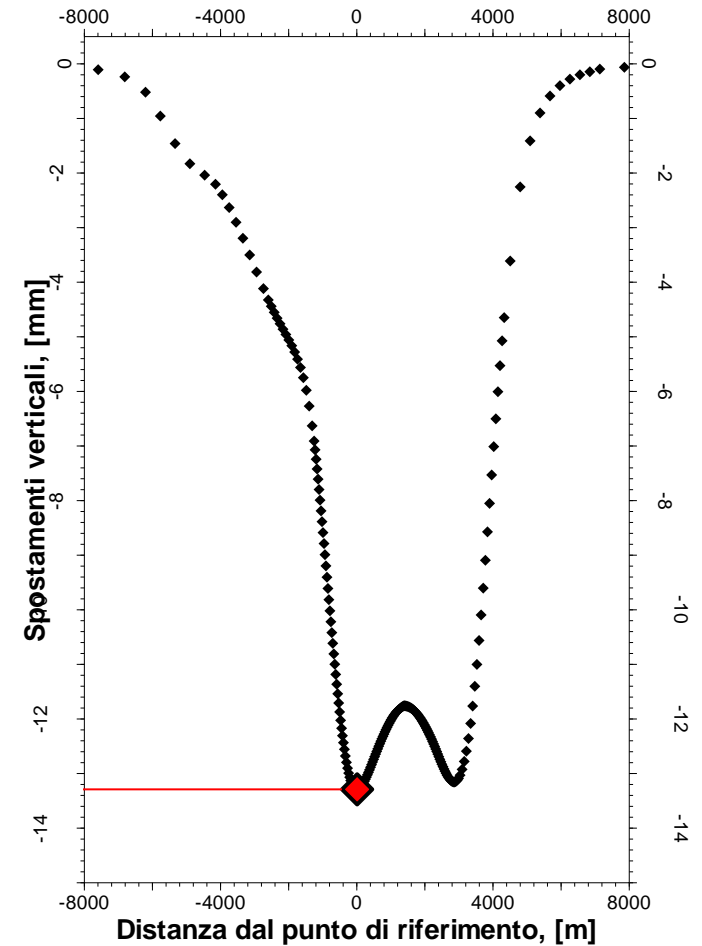
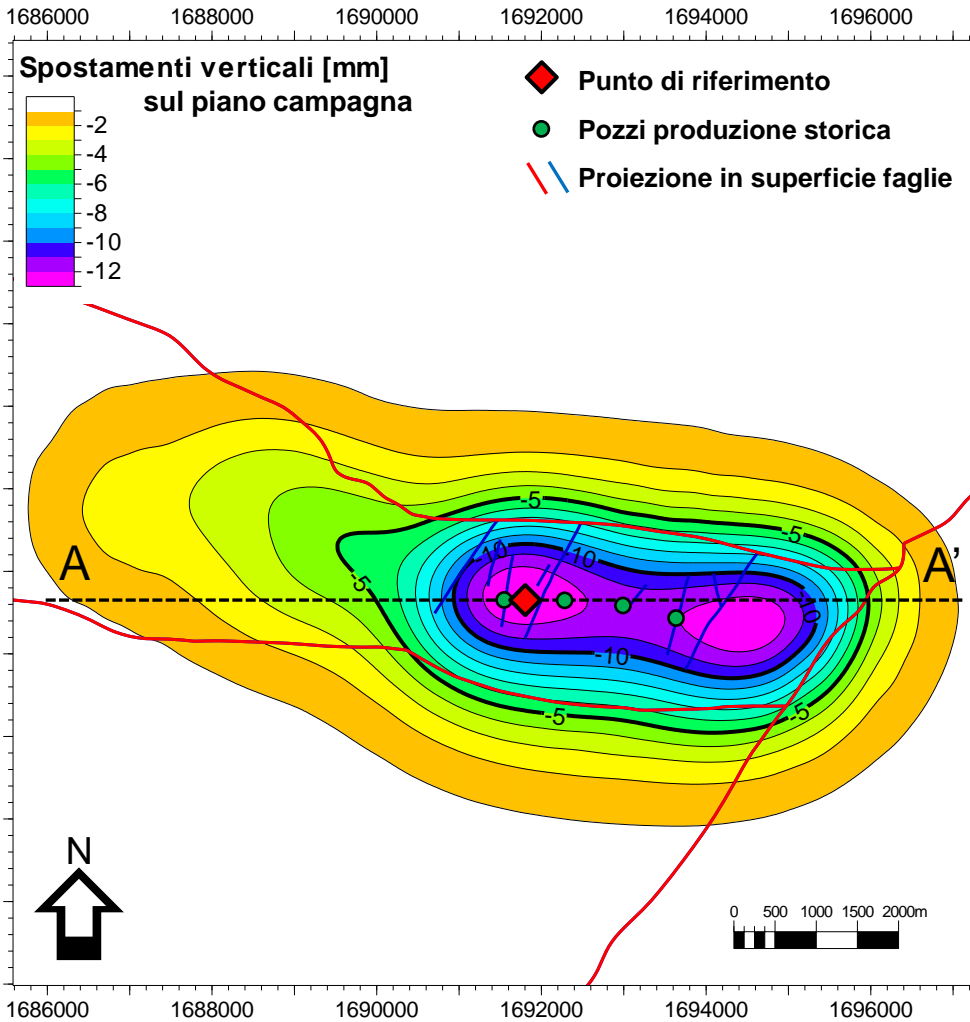


Figura 31 – Distribuzione della pressione media al top del giacimento (estensione *forecast* - 2070).



Caso statico – Gestione eni

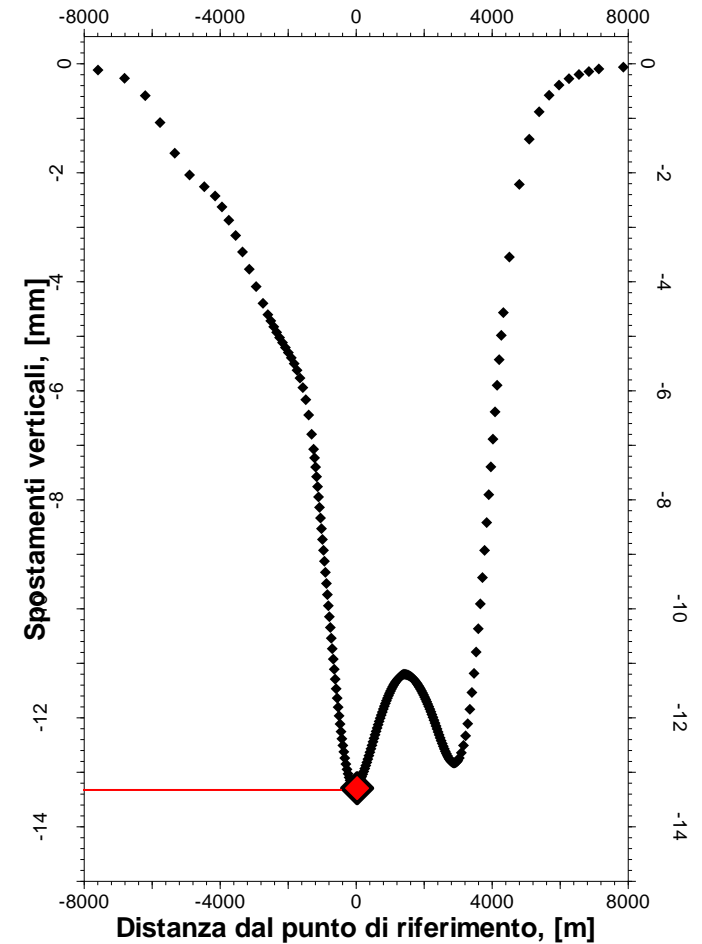
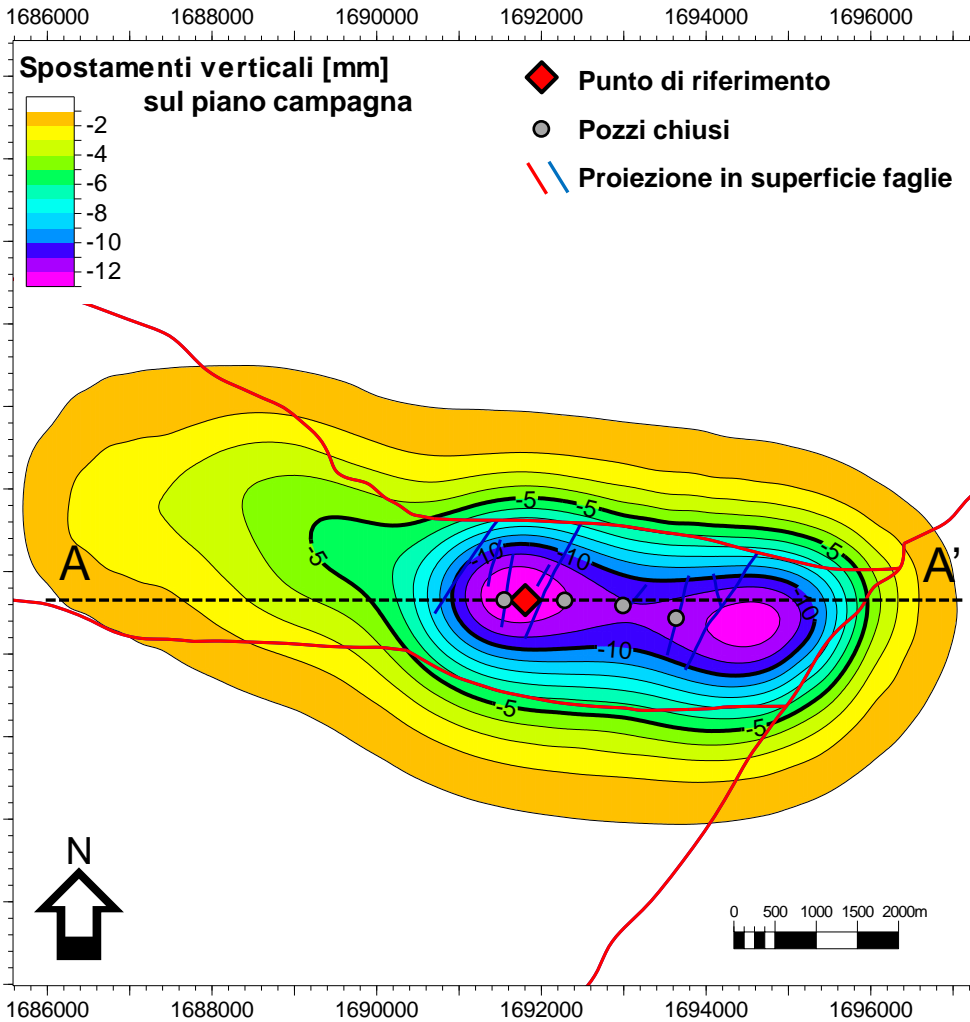


Spostamento verticale massimo -13.29 mm (1960-1969)

Figura 32 – Cono di subsidenza indotto sul piano campagna nel periodo compreso tra l'inizio della produzione storica eni (1960) e la *max depletion* in produzione (1969) nel caso statico.



Caso statico - Gestione eni

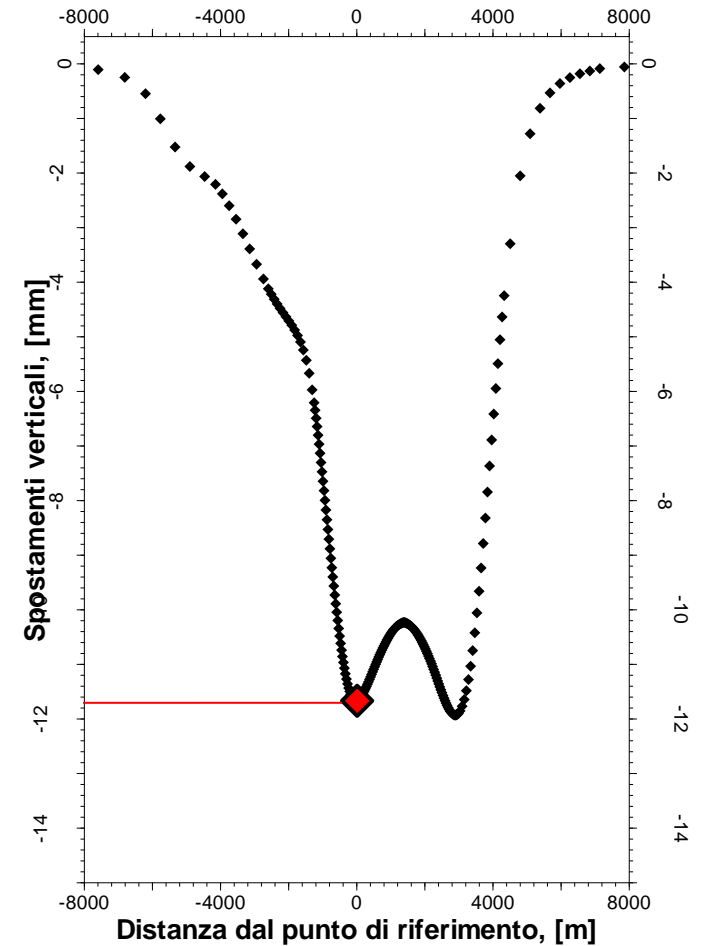
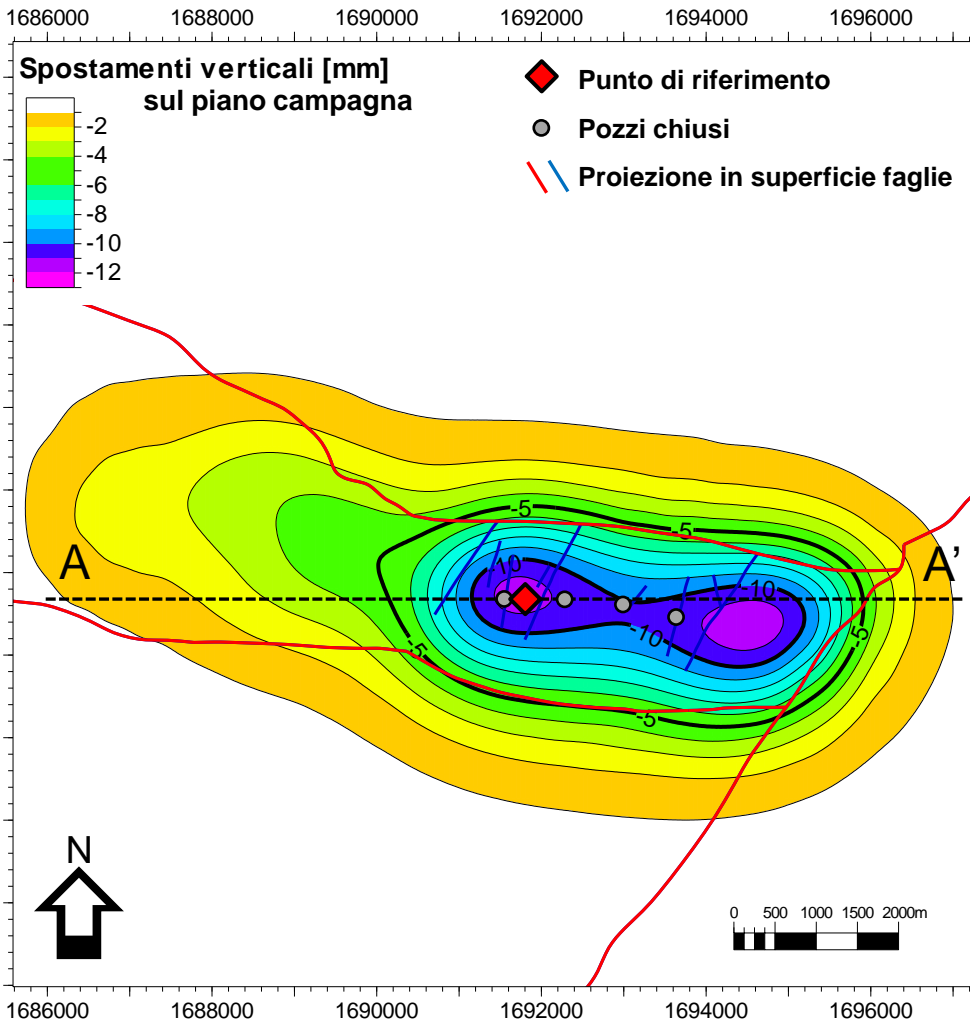


Spostamento verticale massimo -13.24 mm (1960-1976)

Figura 33 – Cono di subsidenza indotto sul piano campagna nel periodo compreso tra l'inizio della produzione storica eni (1960) e la fine produzione storica eni (1976) nel caso statico.



Caso statico - Gestione eni

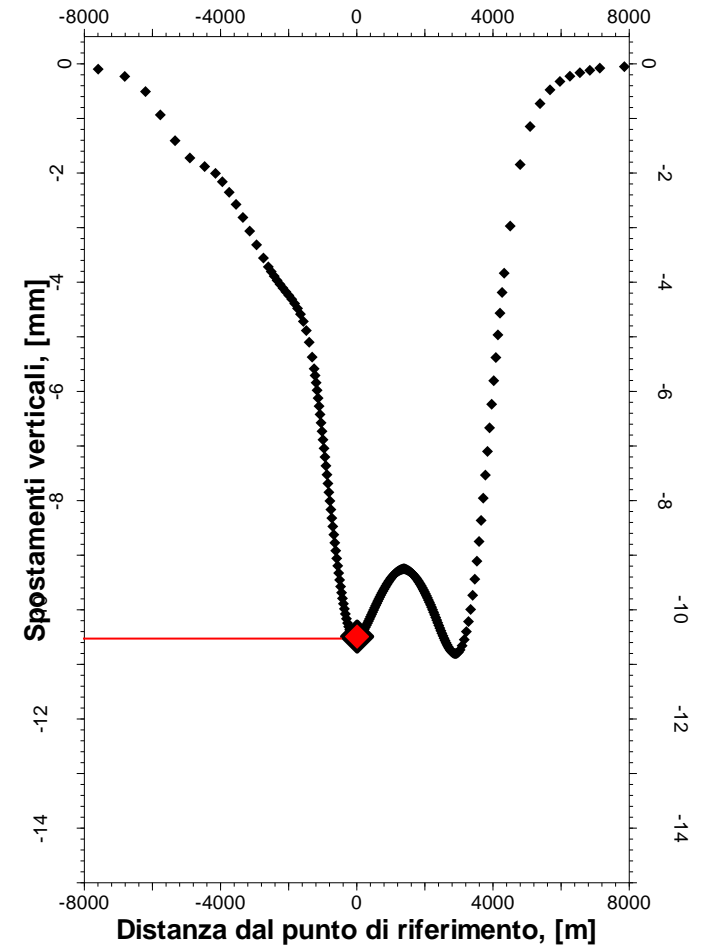
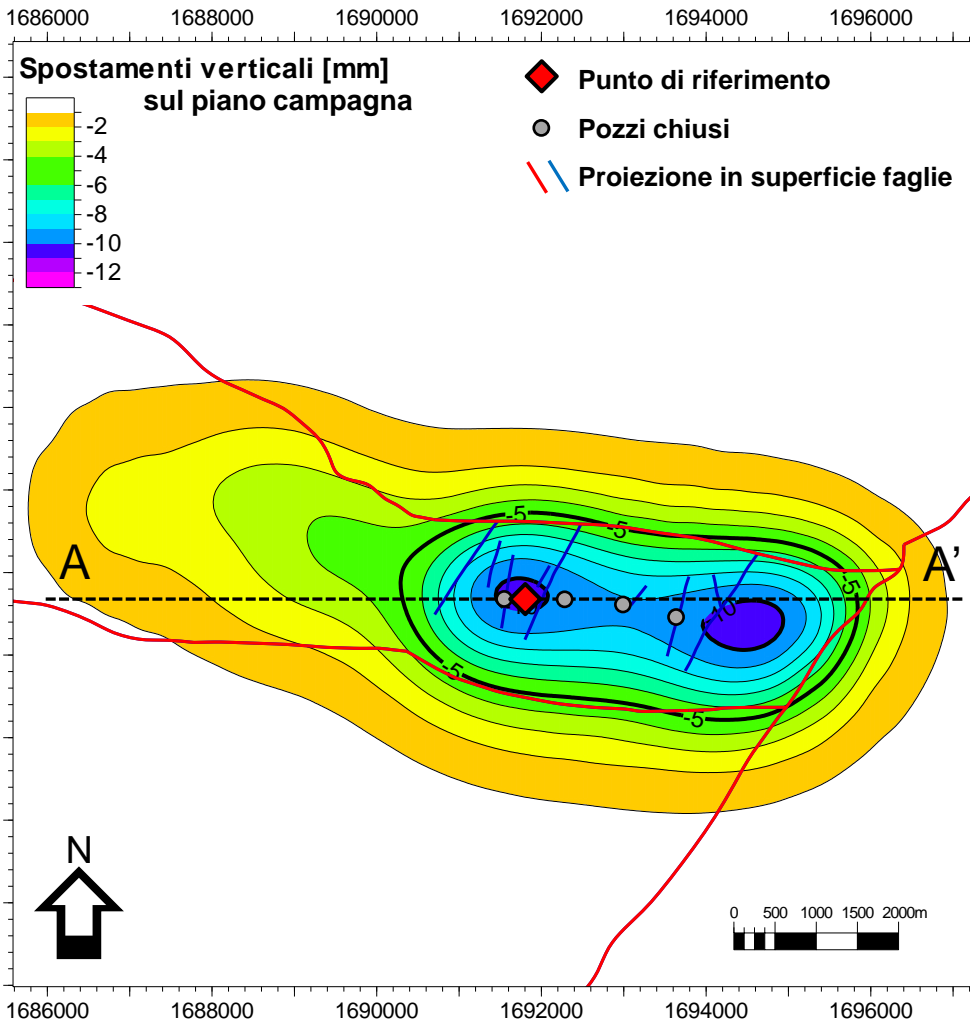


Spostamento verticale massimo -11.95 mm (1960-1984)

Figura 34 – Cono di subsidenza indotto sul piano campagna nel periodo compreso tra l'inizio della produzione storica eni (1960) e la chiusura del campo (1984) nel caso statico.



Caso statico - Gestione eni

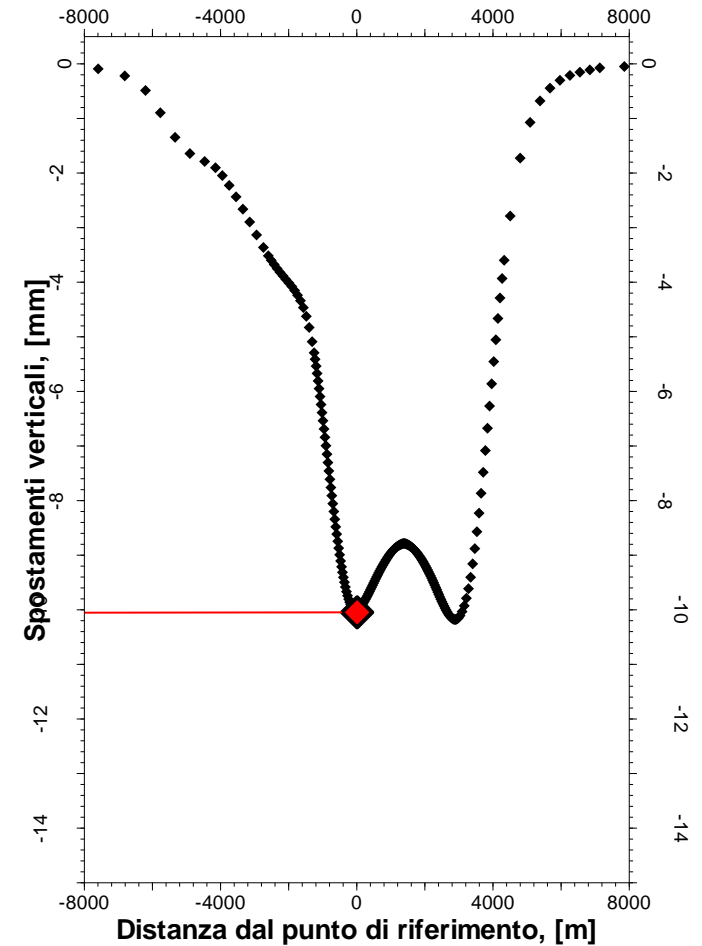
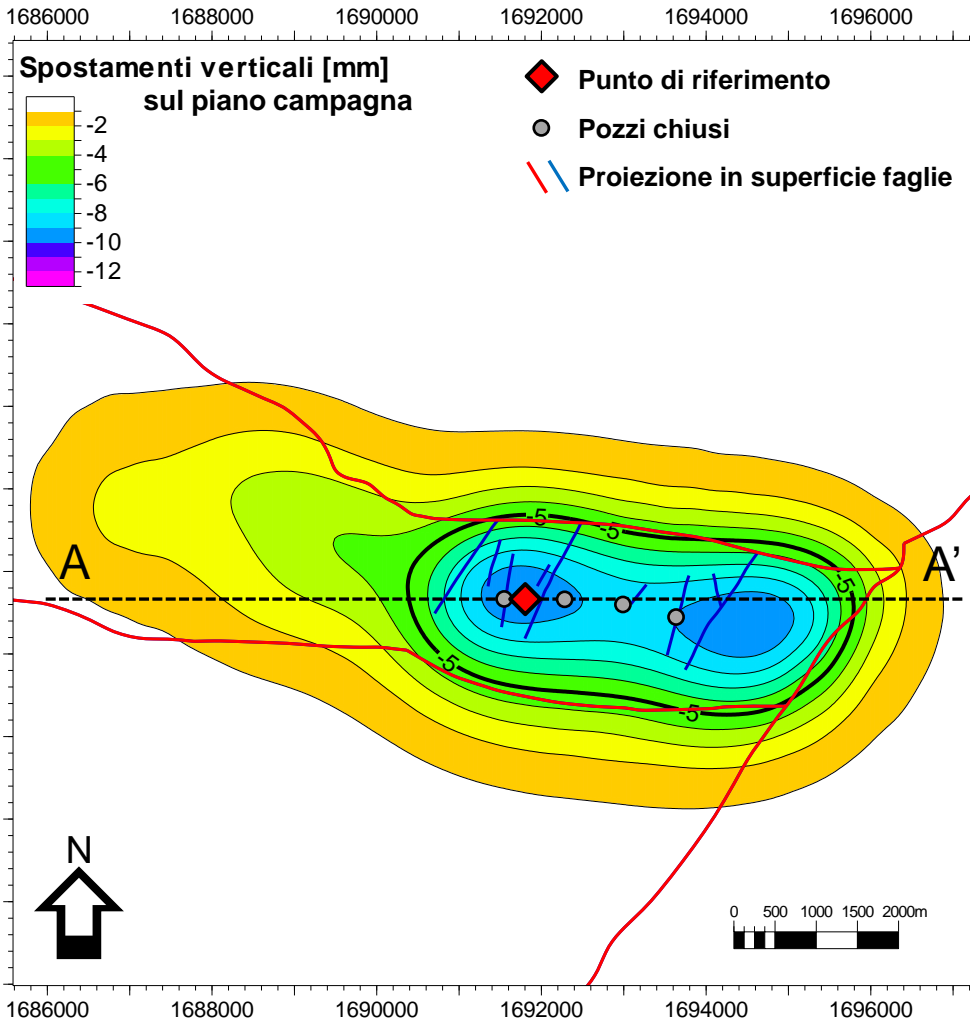


Spostamento verticale massimo -10.82 mm (1960-1995)

Figura 35 – Cono di subsidenza indotto sul piano campagna nel periodo compreso tra l'inizio della produzione storica eni (1960) e la chiusura del campo (1995) nel caso statico.



Caso statico - Gestione eni

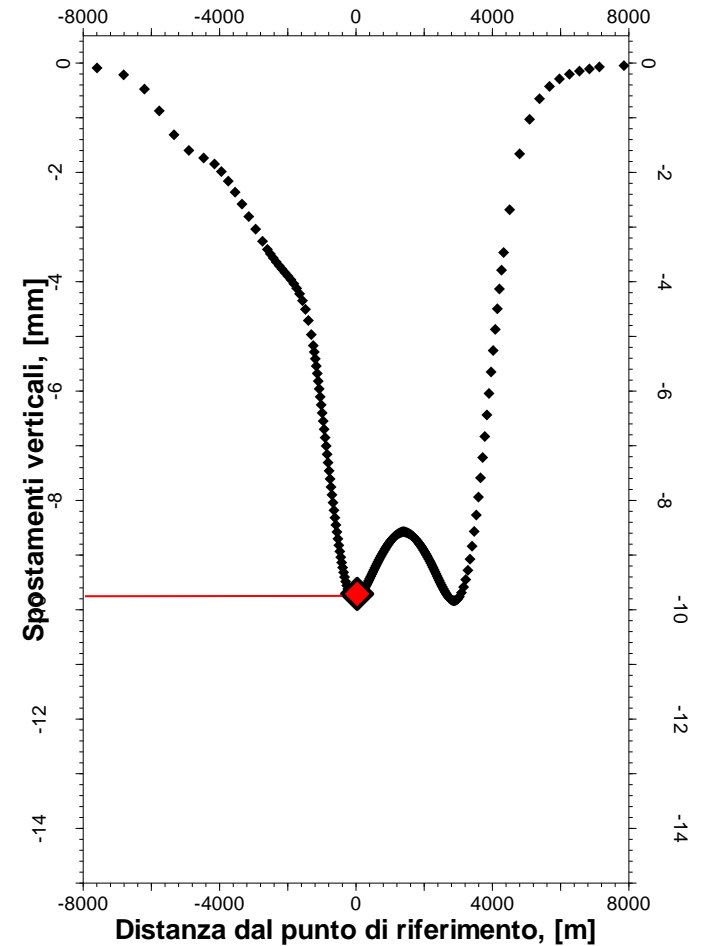
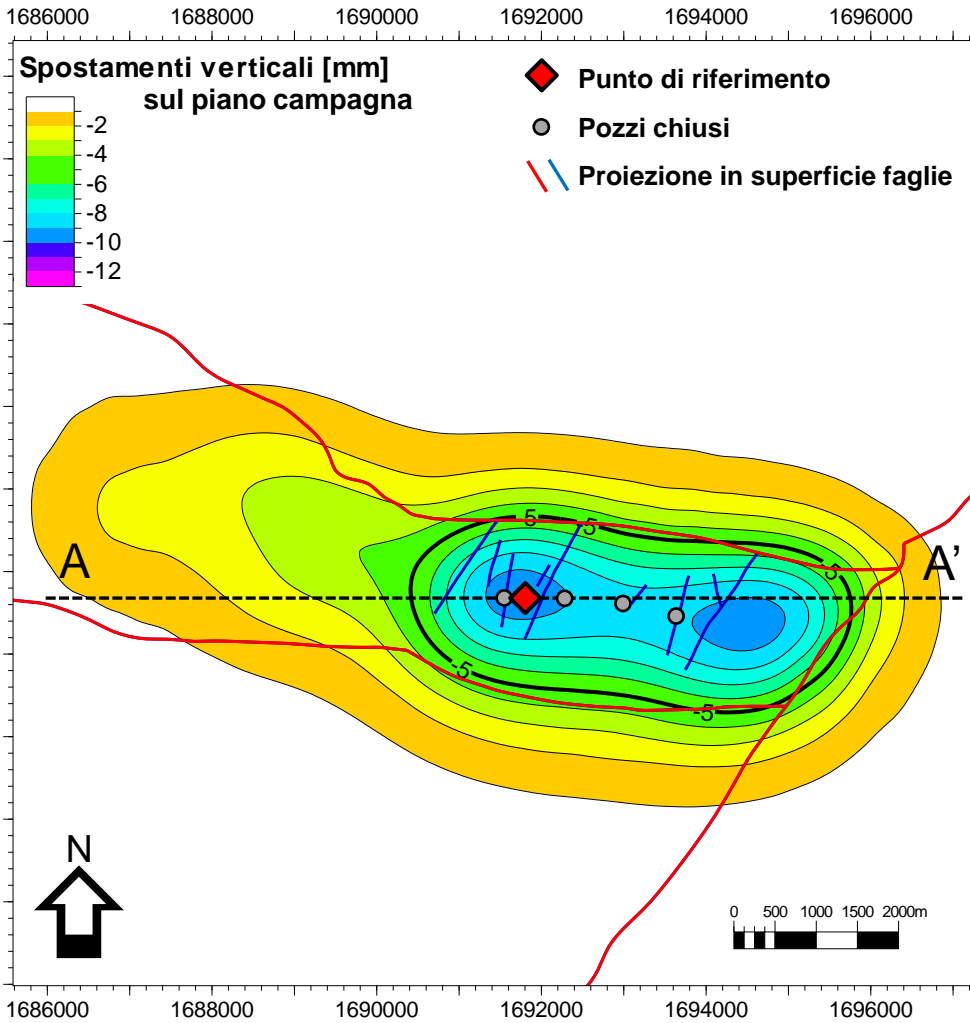


Spostamento verticale massimo -10.20 mm (1960-2004)

Figura 36 – Cono di subsidenza indotto sul piano campagna nel periodo compreso tra l'inizio della produzione storica eni (1960) e la chiusura del campo (2004) nel caso statico.



Caso statico - Gestione eni

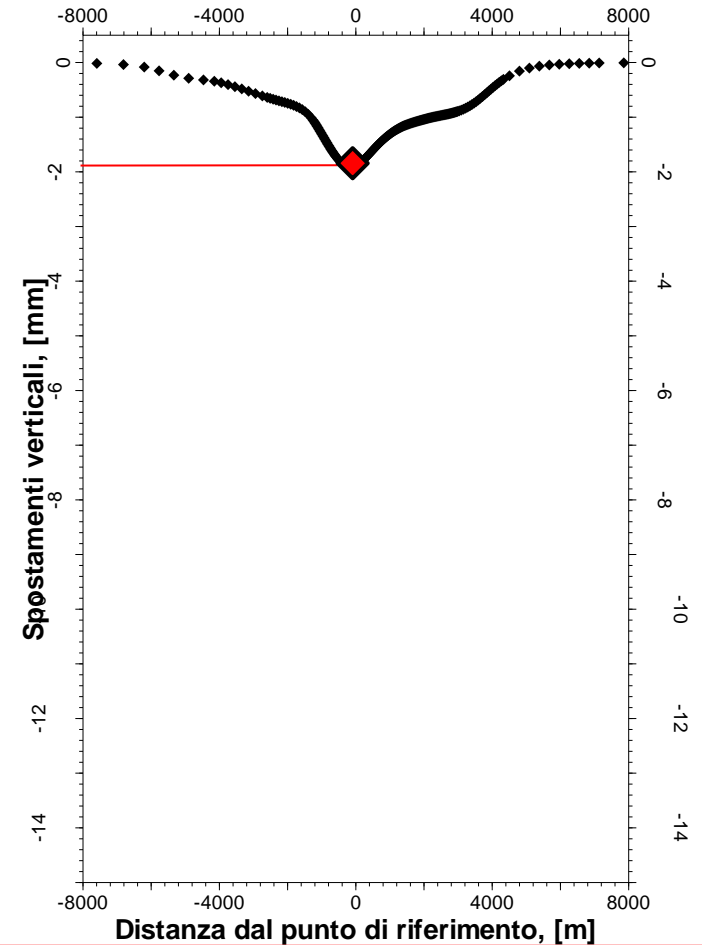
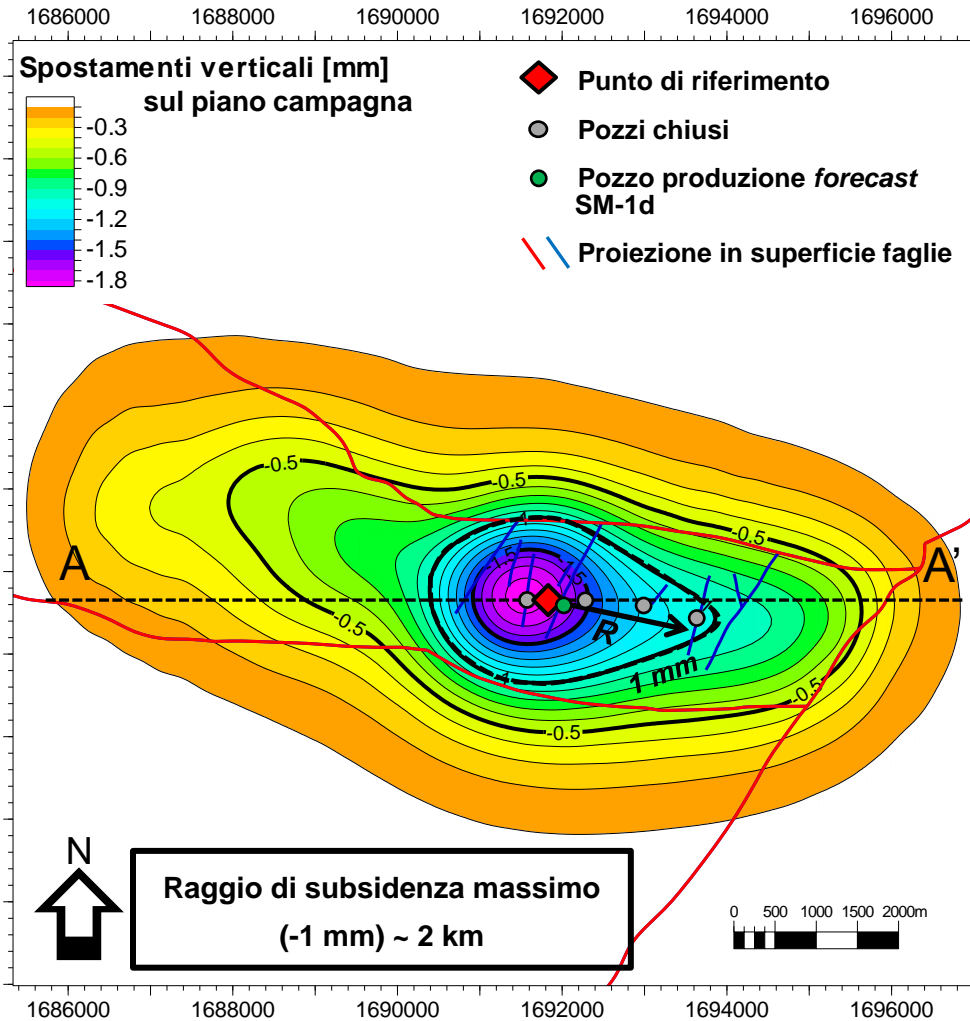


Spostamento verticale massimo -9.85 mm (1960-2016)

Figura 37 – Cono di subsidenza indotto sul piano campagna nel periodo compreso tra l'inizio della produzione storica eni (1960) e la chiusura del campo (2016) nel caso statico.



Caso statico – Gestione Po Valley

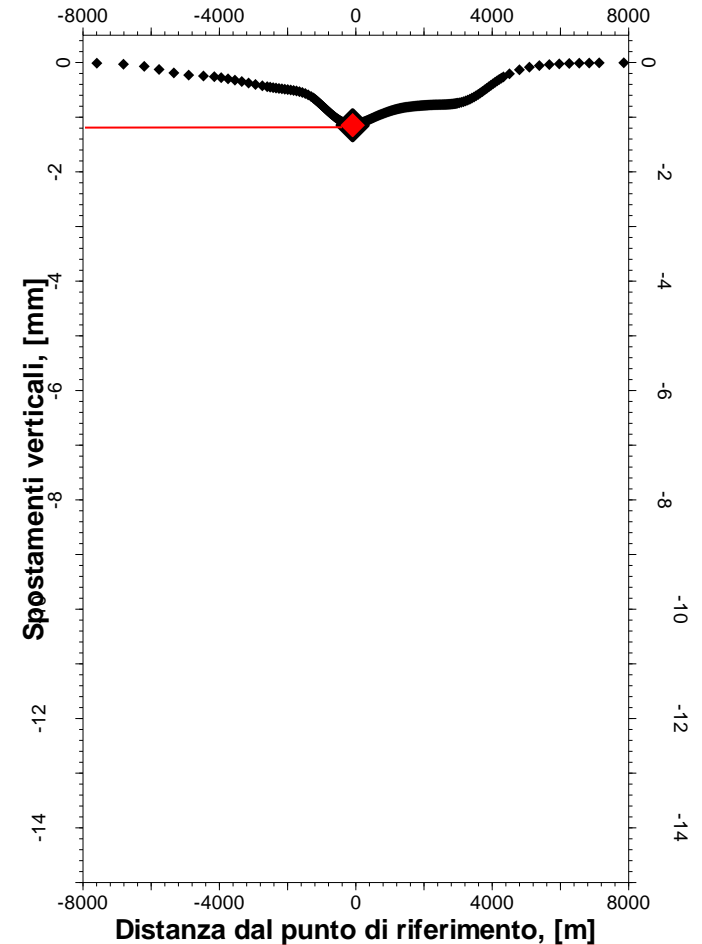
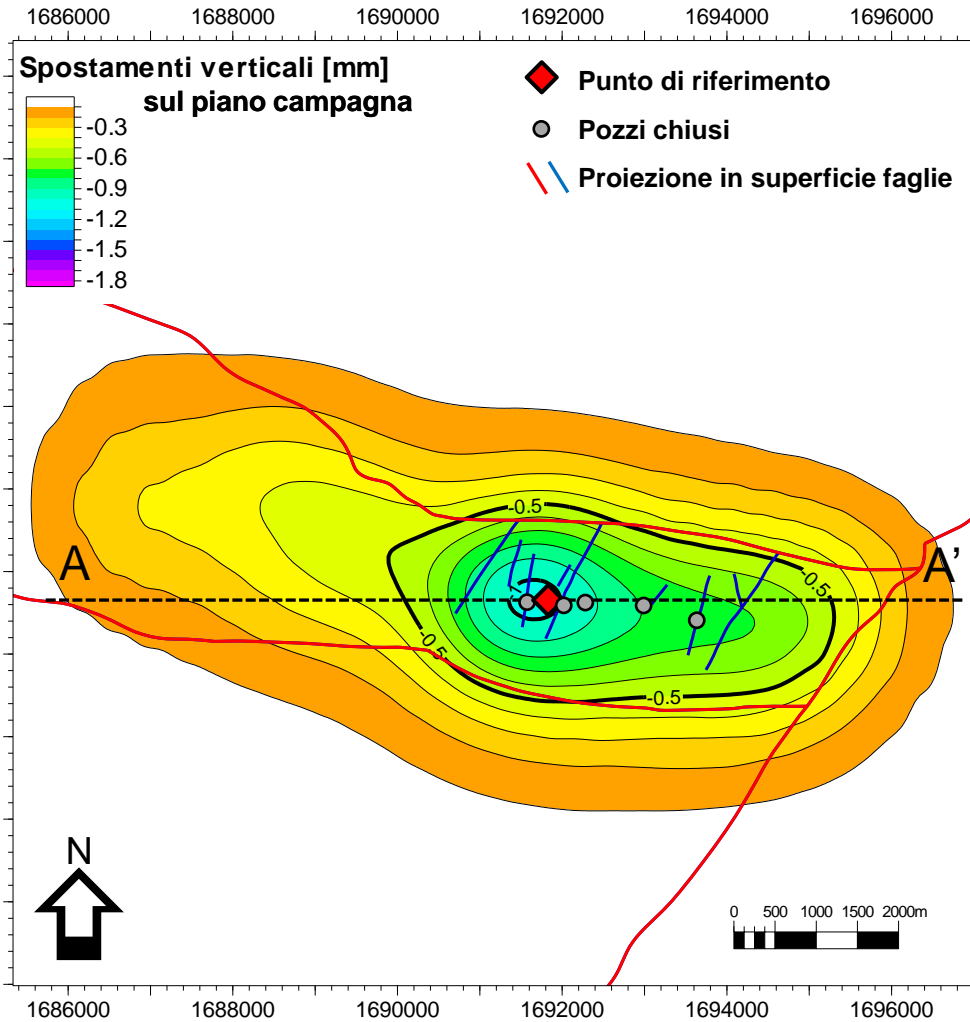


Spostamento verticale massimo -1.85 mm (2016-2023)

Figura 38 – Cono di subsidenza indotto sul piano campagna nel periodo compreso tra l'inizio della produzione *forecast* ad opera di Po Valley (2016) e la *max depletion* in produzione *forecast* (2023) nel caso statico.



Caso statico - Gestione Po Valley

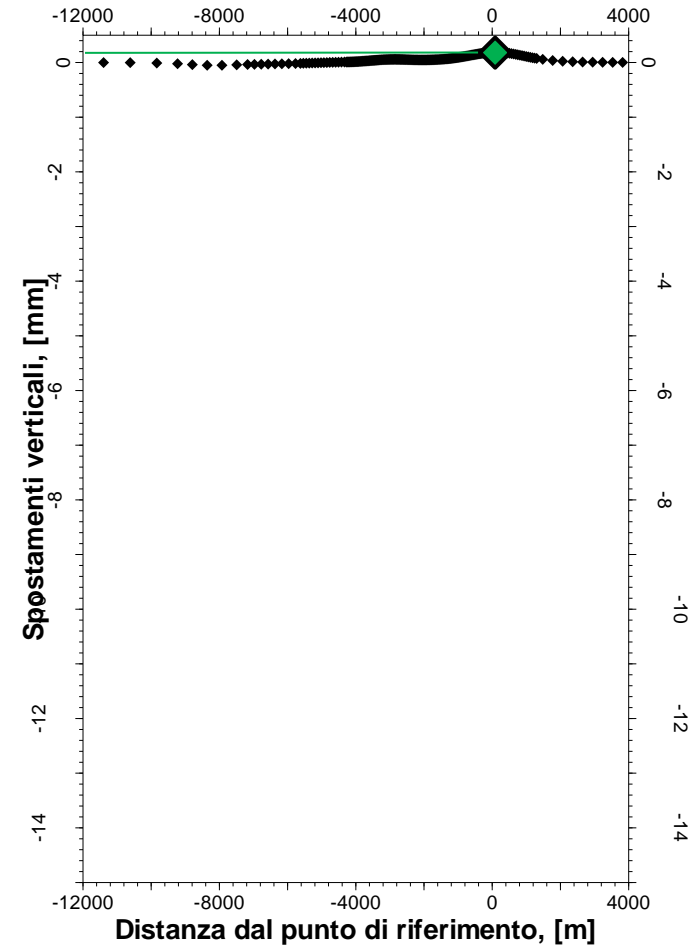
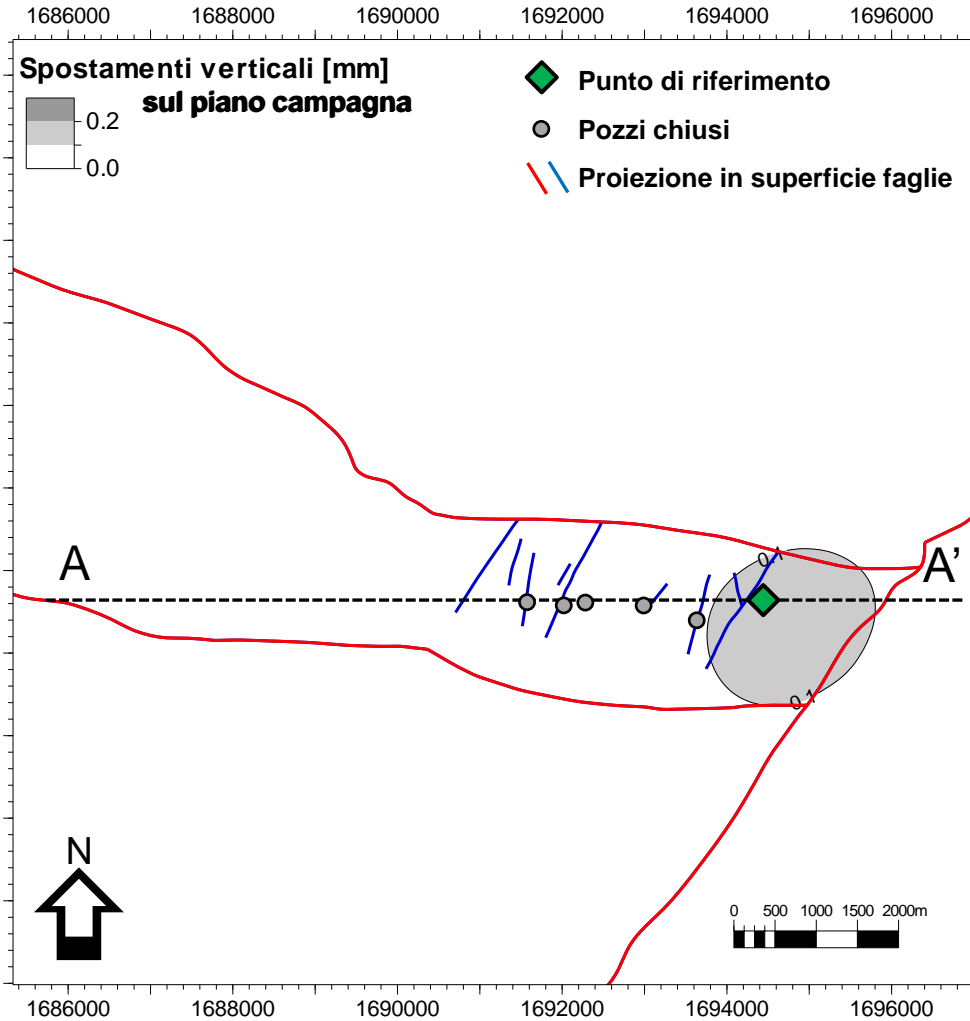


Spostamento verticale massimo -1.08 mm (2016-2030)

Figura 39 – Cono di subsidenza indotto sul piano campagna nel periodo compreso tra l'inizio della produzione forecast ad opera di Po Valley (2016) e la fine produzione forecast (2030) nel caso statico.



Caso statico - Gestione Po Valley

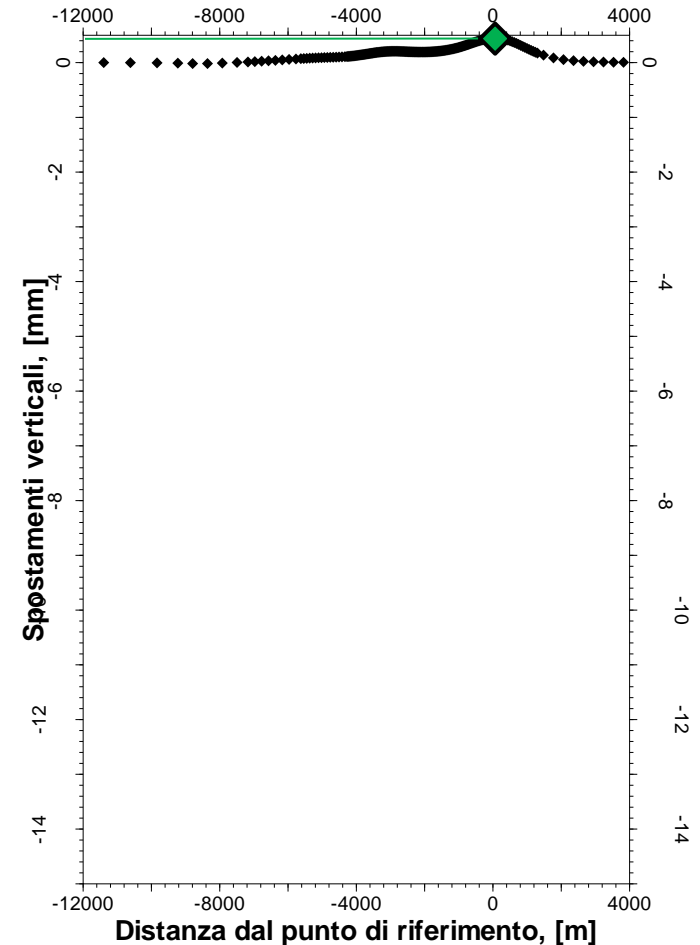
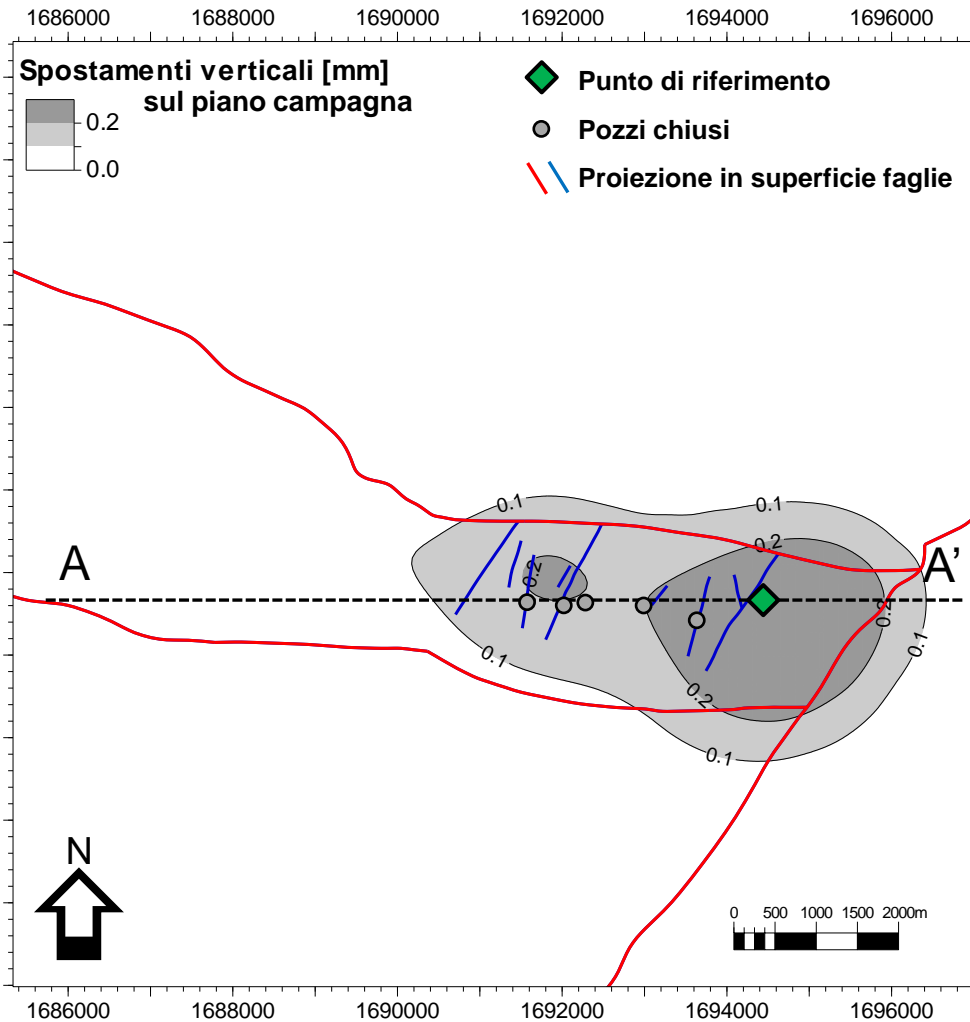


Spostamento verticale massimo +0.11 mm (2016-2050)

Figura 40 – Cono di subsidenza indotto sul piano campagna nel periodo compreso tra l'inizio della produzione *forecast* ad opera di Po Valley (2016) e la chiusura del campo *forecast* (2050) nel caso statico.



Caso statico - Gestione Po Valley

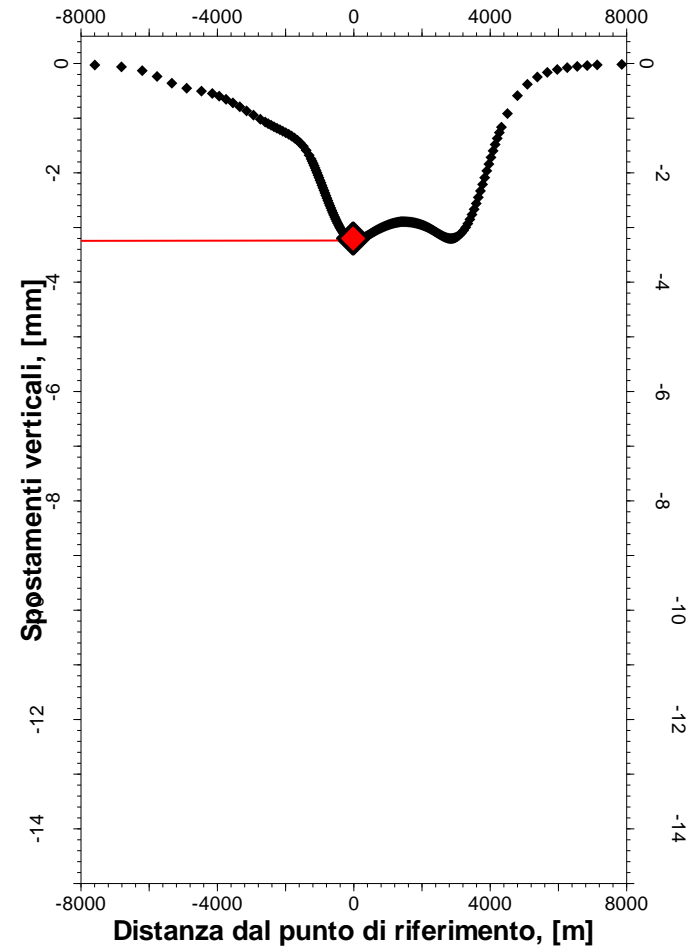
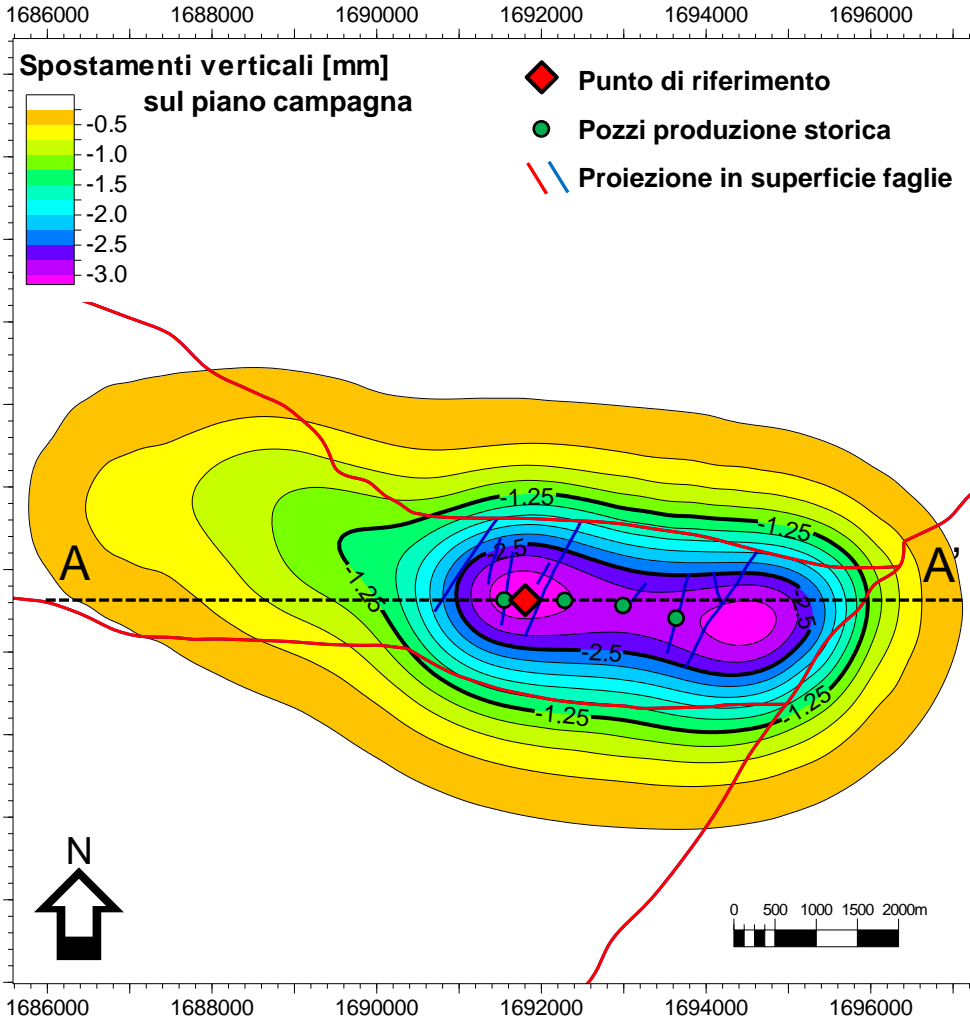


Spostamento verticale massimo +0.25 mm (2016-2070)

Figura 41 – Cono di subsidenza indotto sul piano campagna nel periodo compreso tra l'inizio della produzione *forecast* ad opera di Po Valley (2016) e la chiusura del campo *forecast* (2070) nel caso statico.



Caso dinamico - Gestione eni

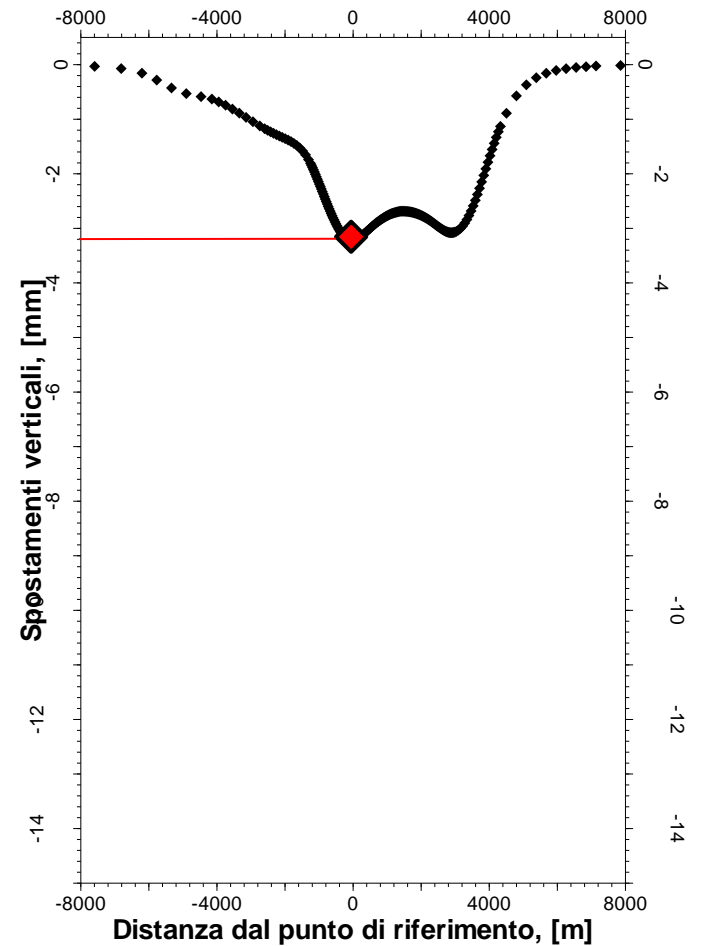
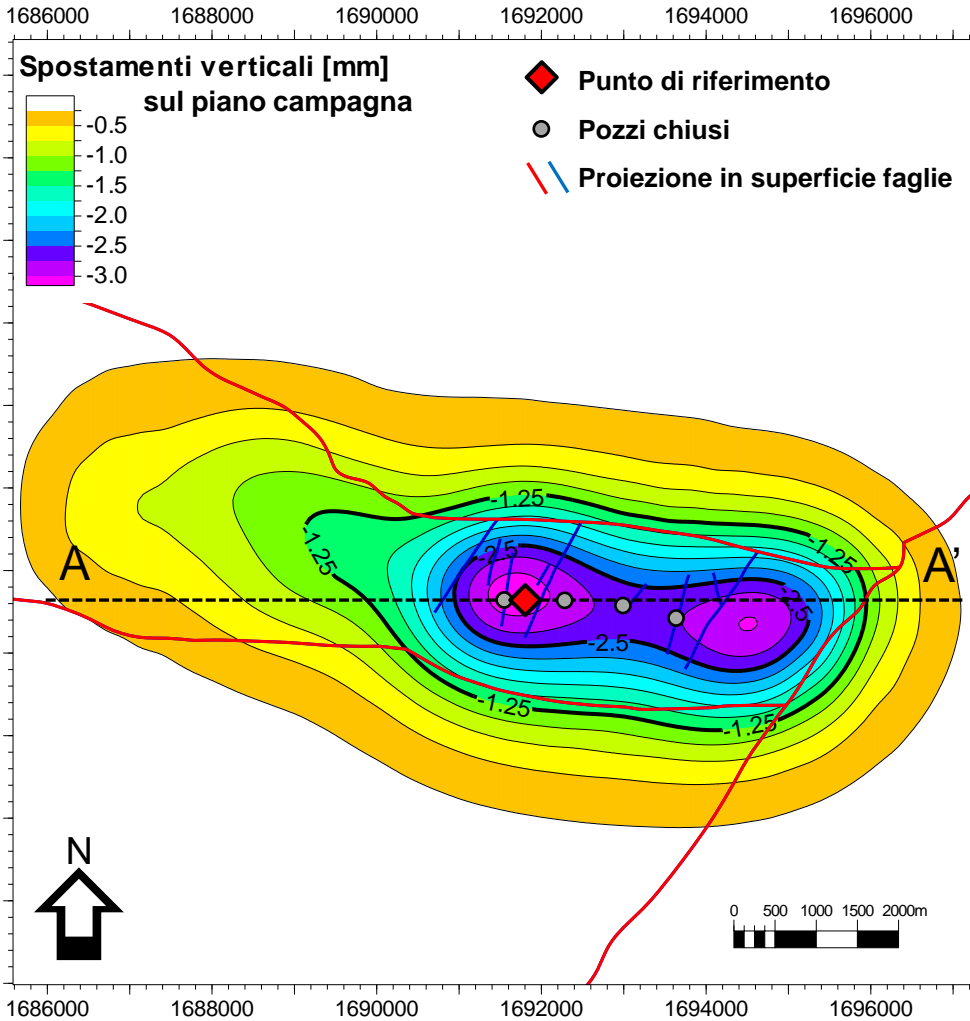


Spostamento verticale massimo -3.23 mm (1960-1969)

Figura 42 – Cono di subsidenza indotto sul piano campagna nel periodo compreso tra l'inizio della produzione storica eni (1960) e la max depletion in produzione (1969) nel caso dinamico.



Caso dinamico - Gestione eni

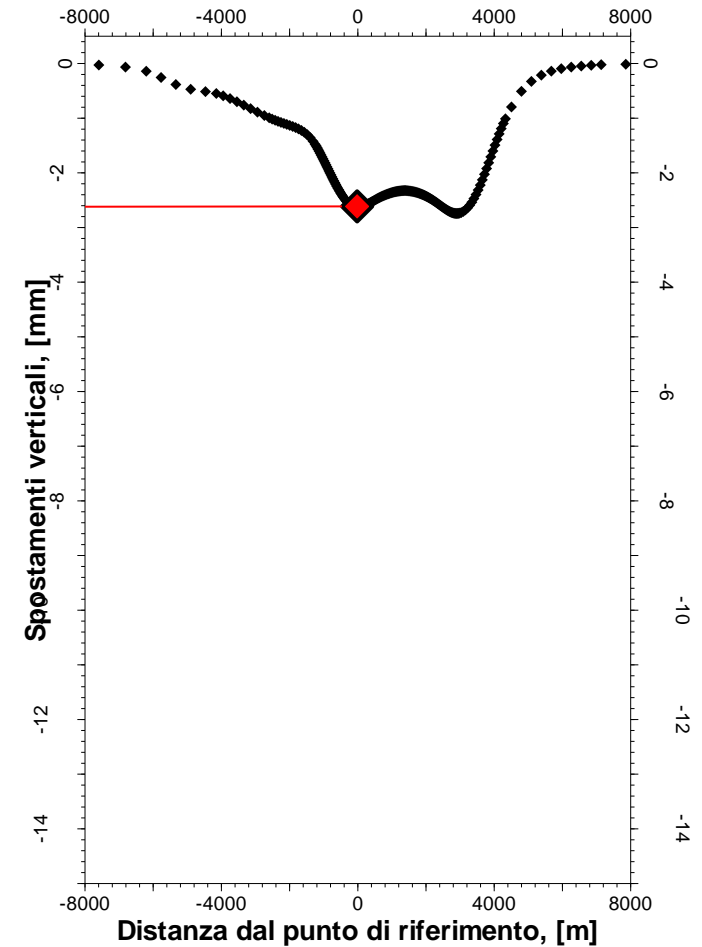
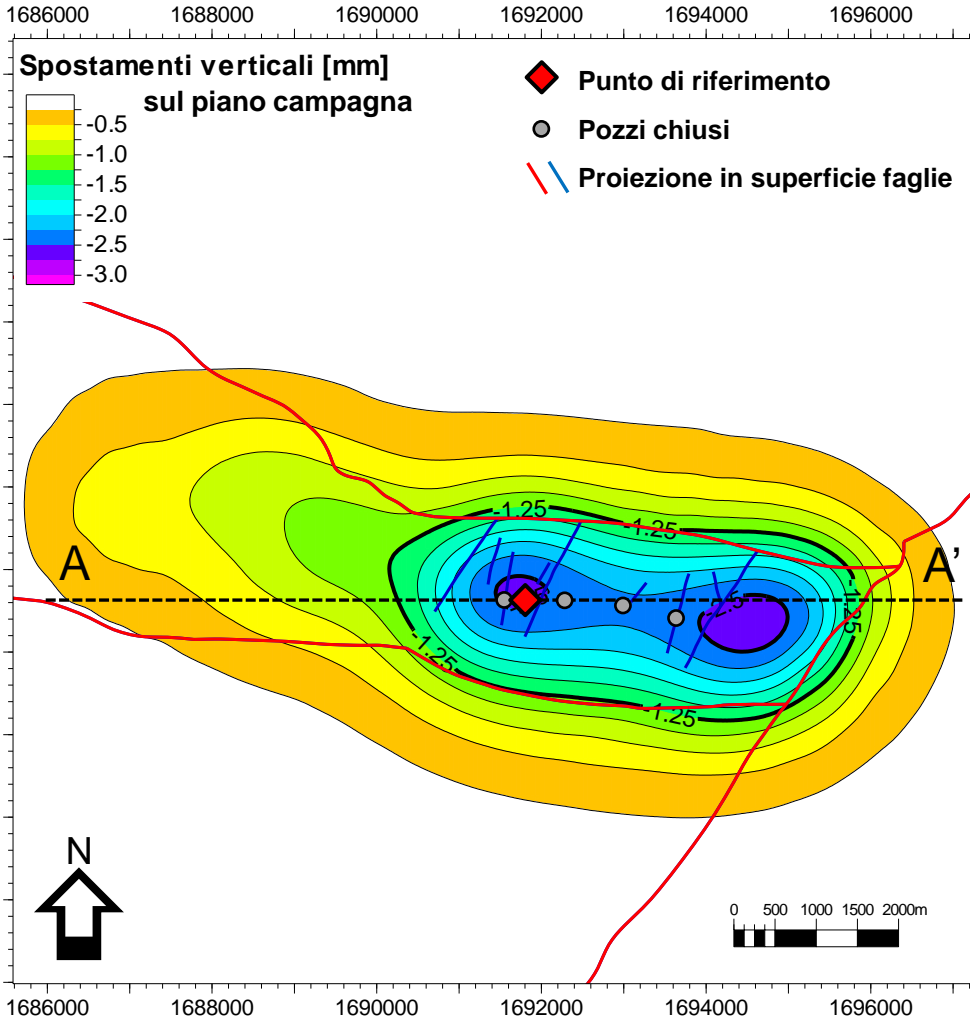


Spostamento verticale massimo -3.21 mm (1960-1976)

Figura 43 – Cono di subsidenza indotto sul piano campagna nel periodo compreso tra l'inizio della produzione storica eni (1960) e la fine produzione storica eni (1976) nel caso dinamico.



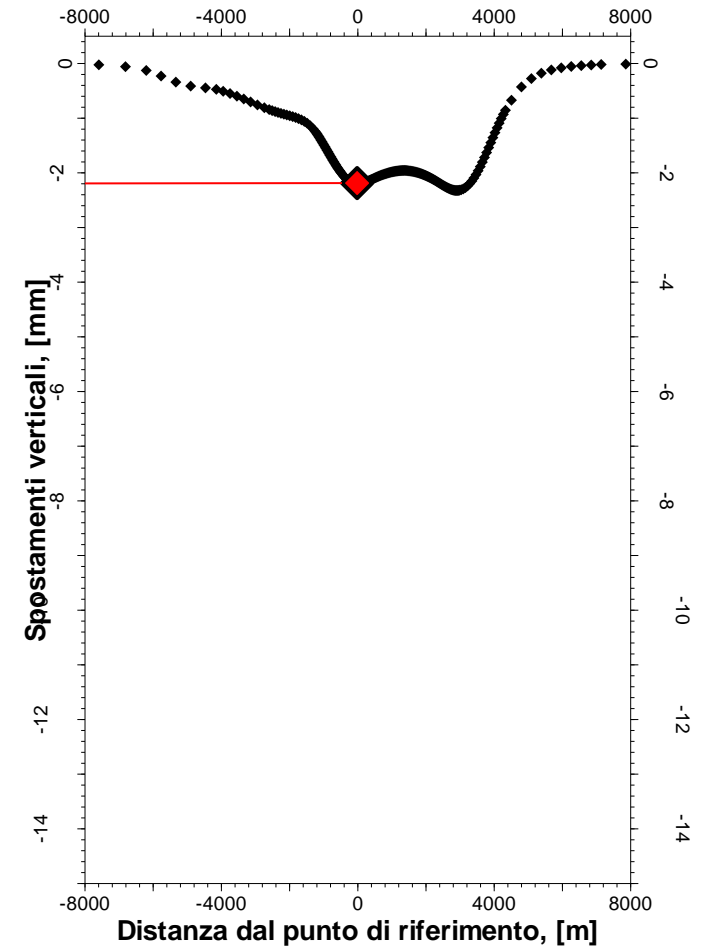
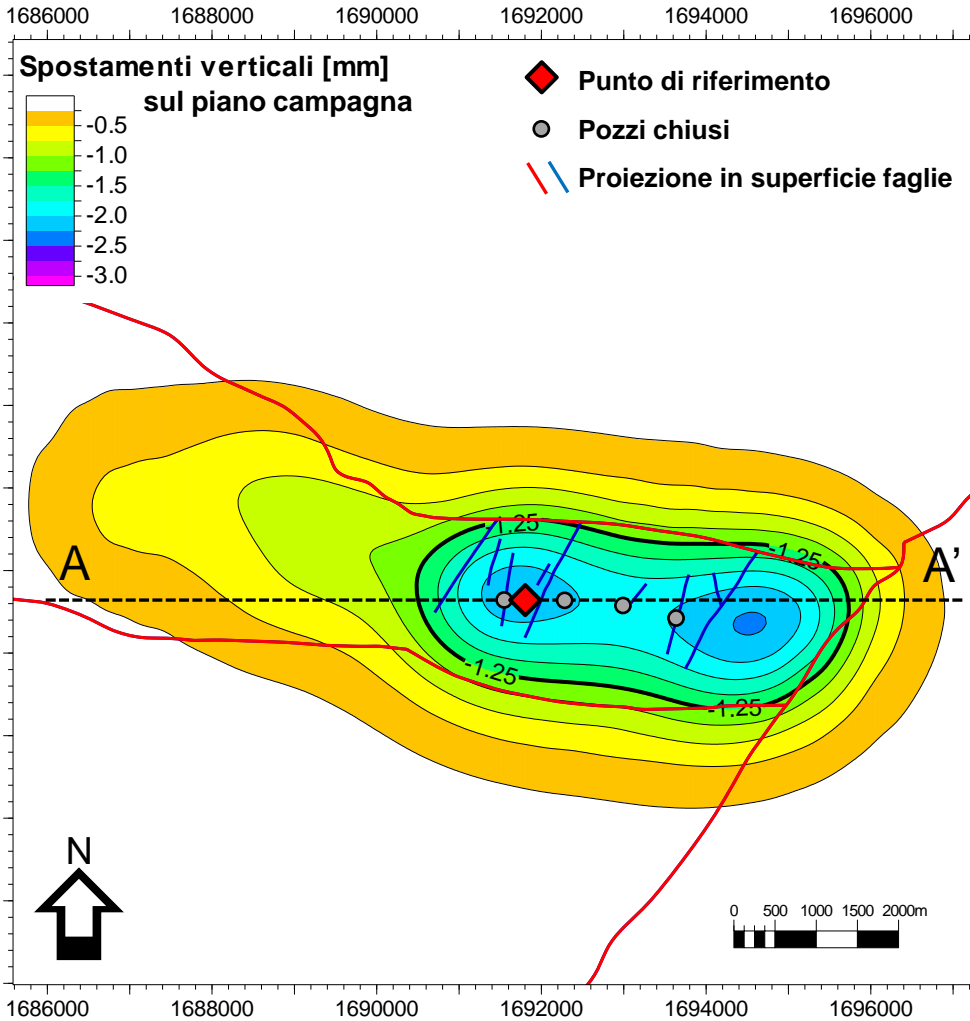
Caso dinamico - Gestione eni



Spostamento verticale massimo -2.75 mm (1960-1984)

Figura 44 – Cono di subsidenza indotto sul piano campagna nel periodo compreso tra l'inizio della produzione storica eni (1960) e la chiusura del campo (1984) nel caso dinamico.

Caso dinamico - Gestione eni

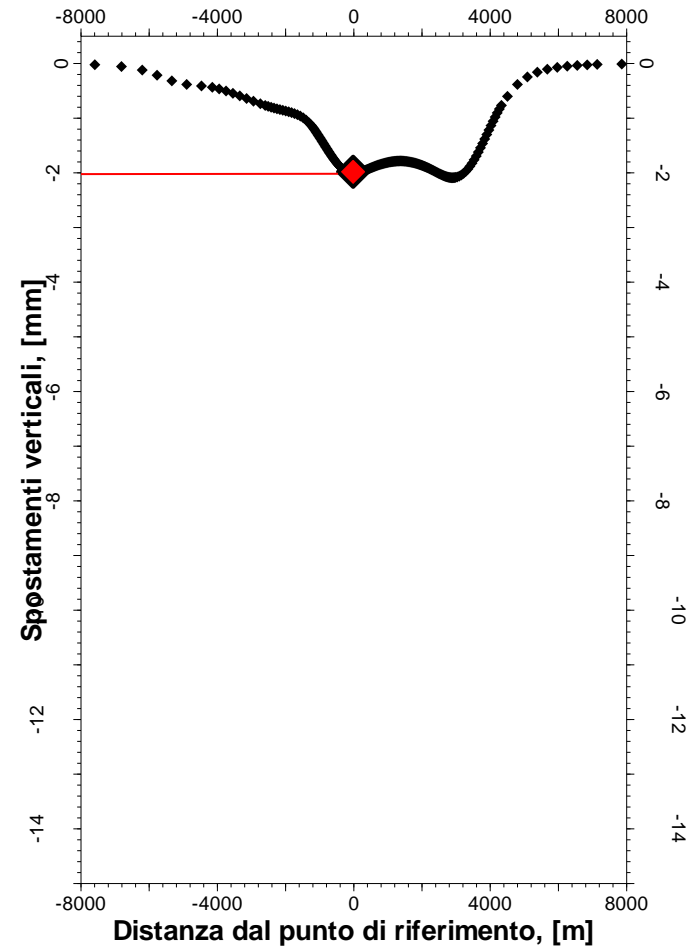
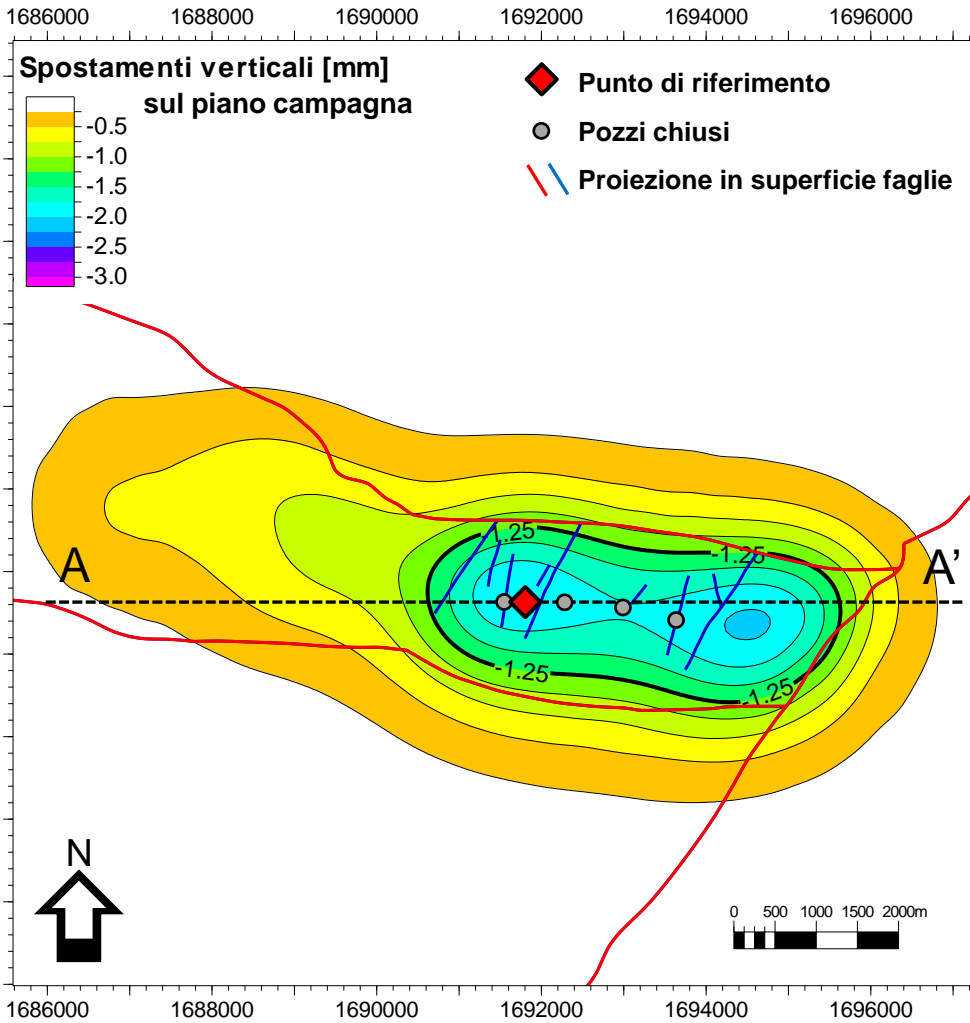


Spostamento verticale massimo -2.33 mm (1960-1995)

Figura 45 – Cono di subsidenza indotto sul piano campagna nel periodo compreso tra l’inizio della produzione storica eni (1960) e la chiusura del campo (1995) nel caso dinamico.



Caso dinamico - Gestione eni

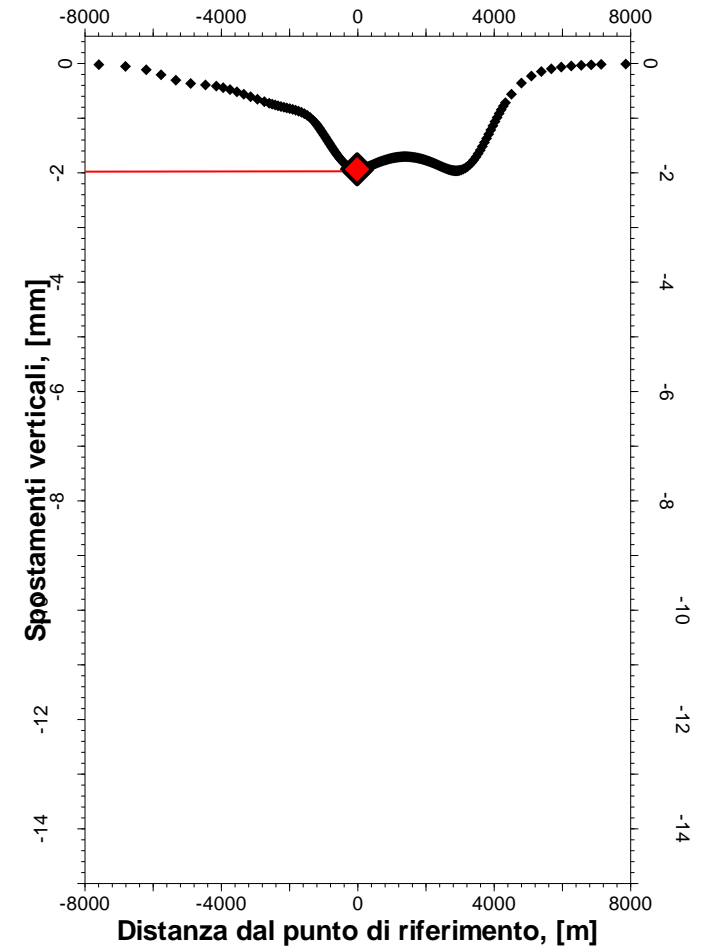
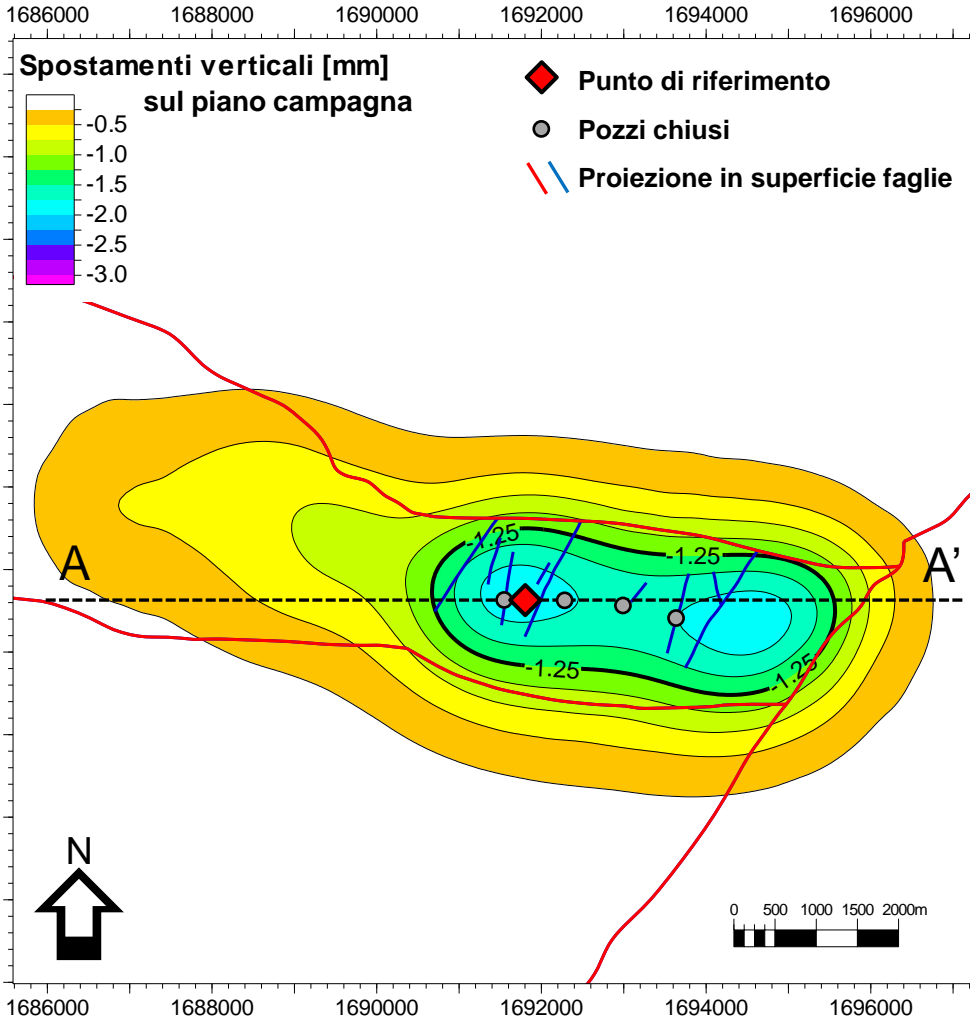


Spostamento verticale massimo -2.09 mm (1960-2004)

Figura 46 – Cono di subsidenza indotto sul piano campagna nel periodo compreso tra l'inizio della produzione storica eni (1960) e la chiusura del campo (2004) nel caso dinamico.



Caso dinamico – Gestione eni

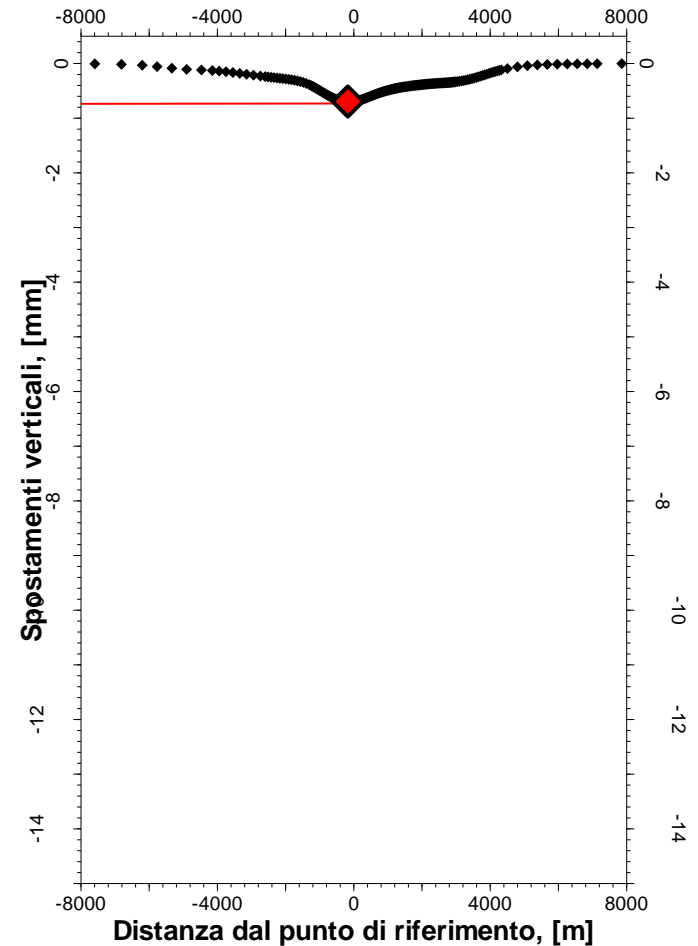
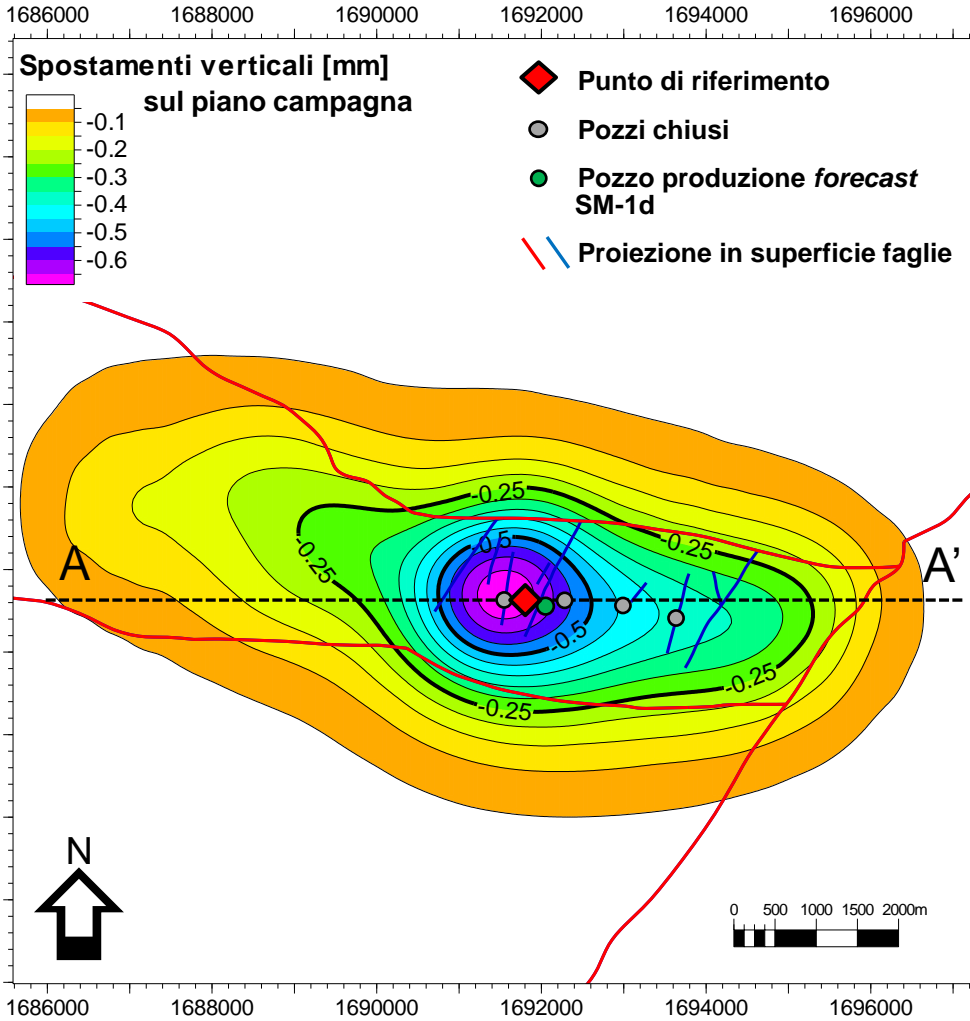


Spostamento verticale massimo -1.97 mm (1960-2016)

Figura 47 – Cono di subsidenza indotto sul piano campagna nel periodo compreso tra l'inizio della produzione storica eni (1960) e la chiusura del campo (2016) nel caso dinamico.



Caso dinamico - Gestione Po Valley

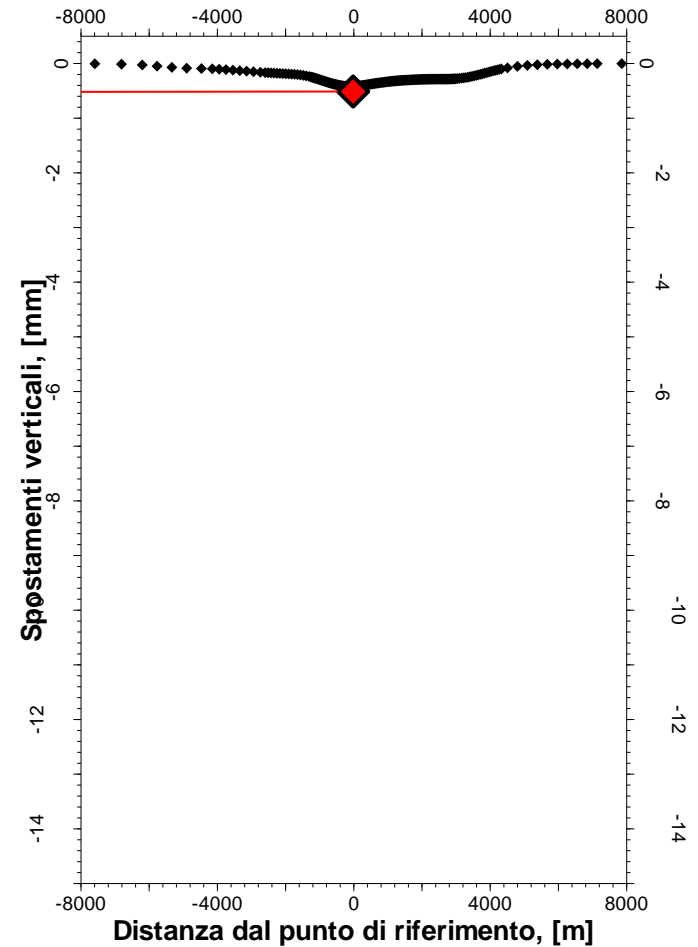
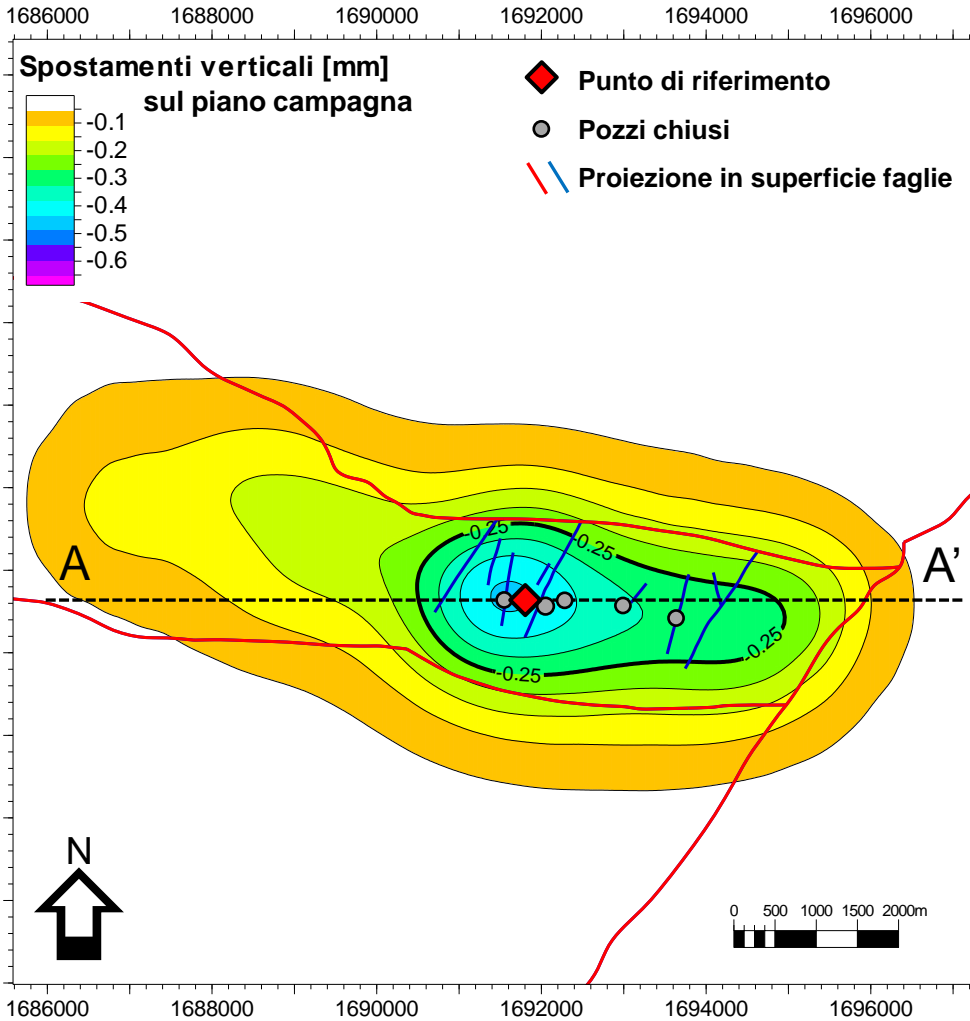


Spostamento verticale massimo -0.67 mm (2016-2023)

Figura 48 – Cono di subsidenza indotto sul piano campagna nel periodo compreso tra l'inizio della produzione *forecast* ad opera di Po Valley (2016) e la *max depletion* in produzione *forecast* (2023) nel caso dinamico.



Caso dinamico - Gestione Po Valley

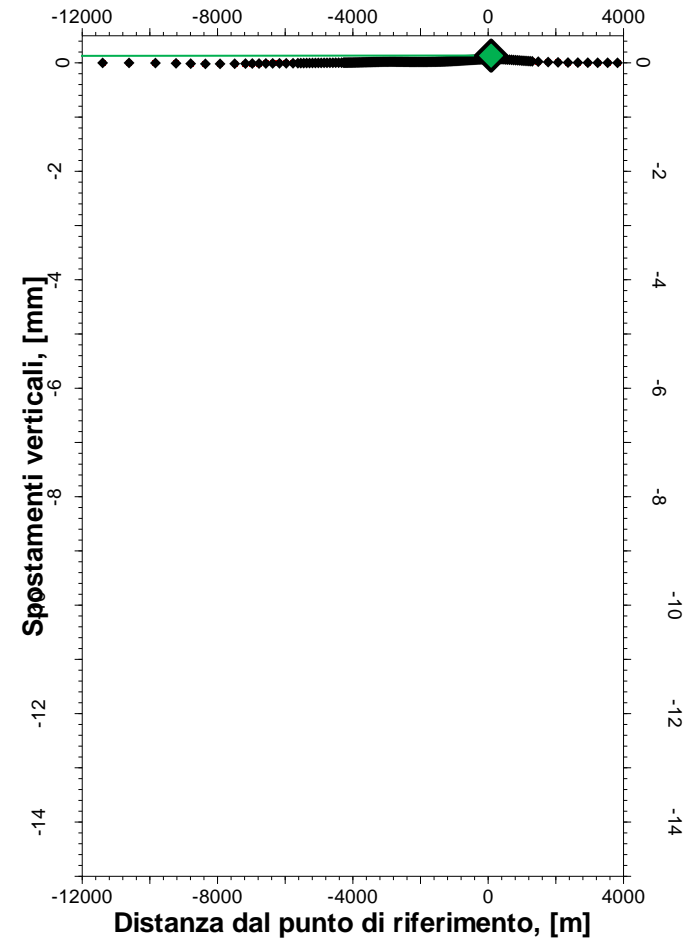
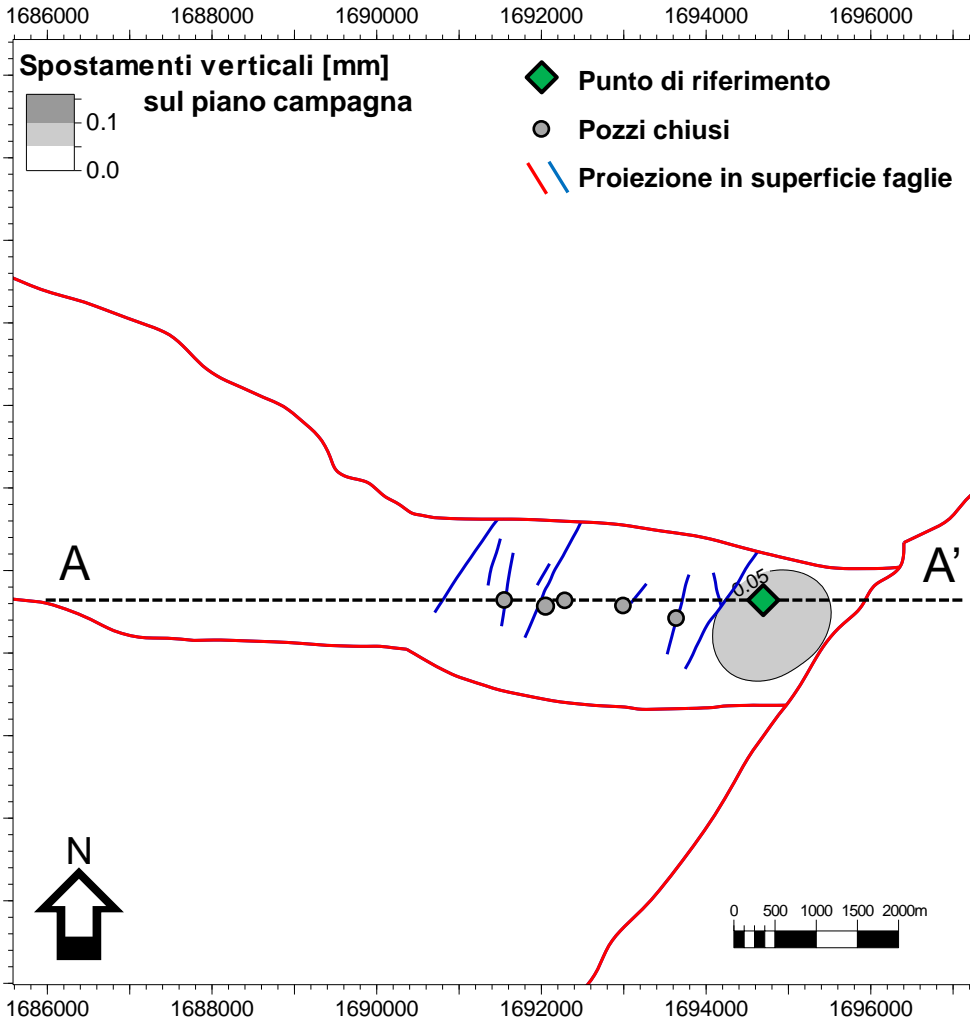


Spostamento verticale massimo -0.38 mm (2016-2030)

Figura 49 – Cono di subsidenza indotto sul piano campagna nel periodo compreso tra l'inizio della produzione forecast ad opera di Po Valley (2016) e la fine produzione forecast (2030) nel caso dinamico.



Caso dinamico - Gestione Po Valley

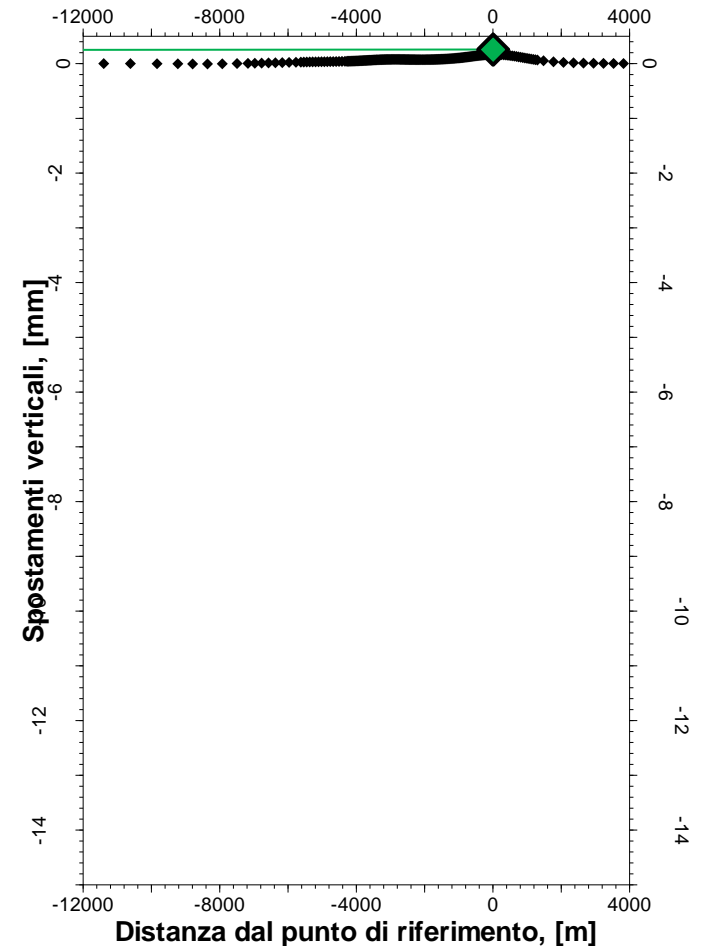
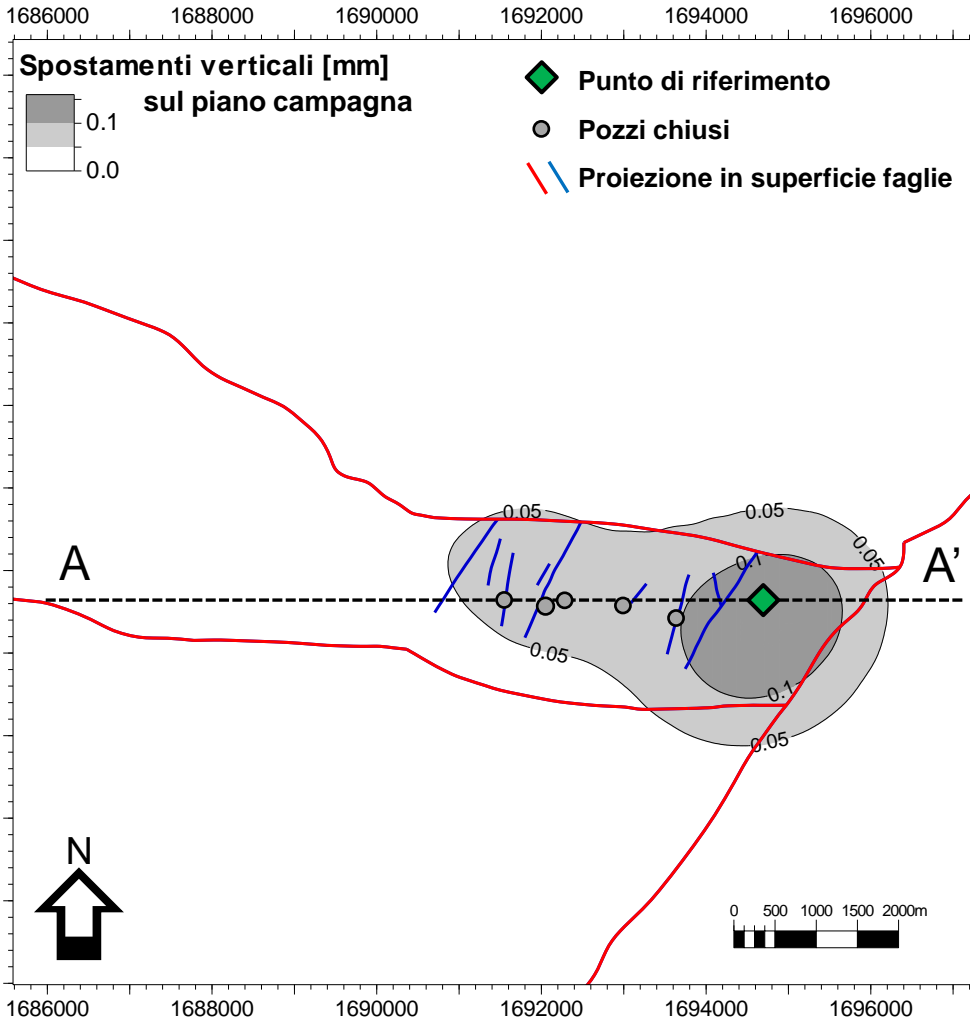


Spostamento verticale massimo +0.06 mm (2016-2050)

Figura 50 – Cono di subsidenza indotto sul piano campagna nel periodo compreso tra l'inizio della produzione *forecast* ad opera di Po Valley (2016) e la chiusura del campo *forecast* (2050) nel caso dinamico.



Caso dinamico - Gestione Po Valley

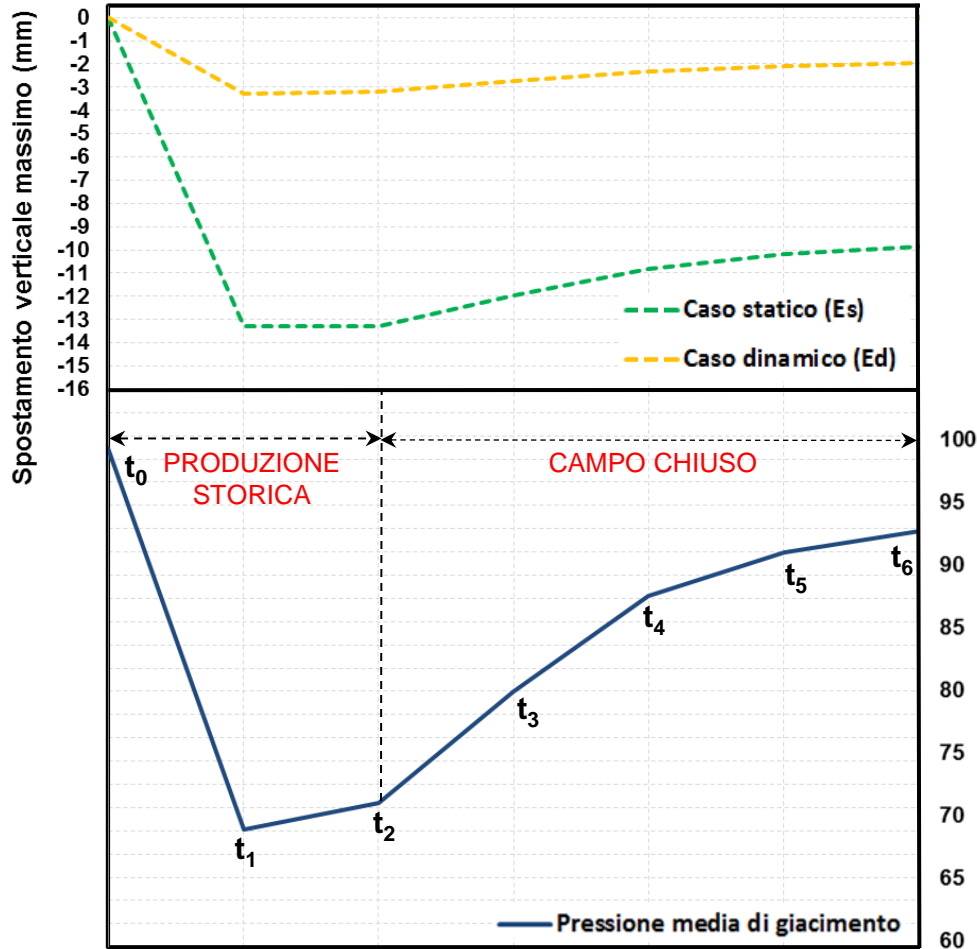


Spostamento verticale massimo +0.11 mm (2016-2070)

Figura 51 – Cono di subsidenza indotto sul piano campagna nel periodo compreso tra l'inizio della produzione *forecast* ad opera di Po Valley (2016) e la chiusura del campo *forecast* (2070) nel caso dinamico.



Gestione eni



Gestione Po Valley

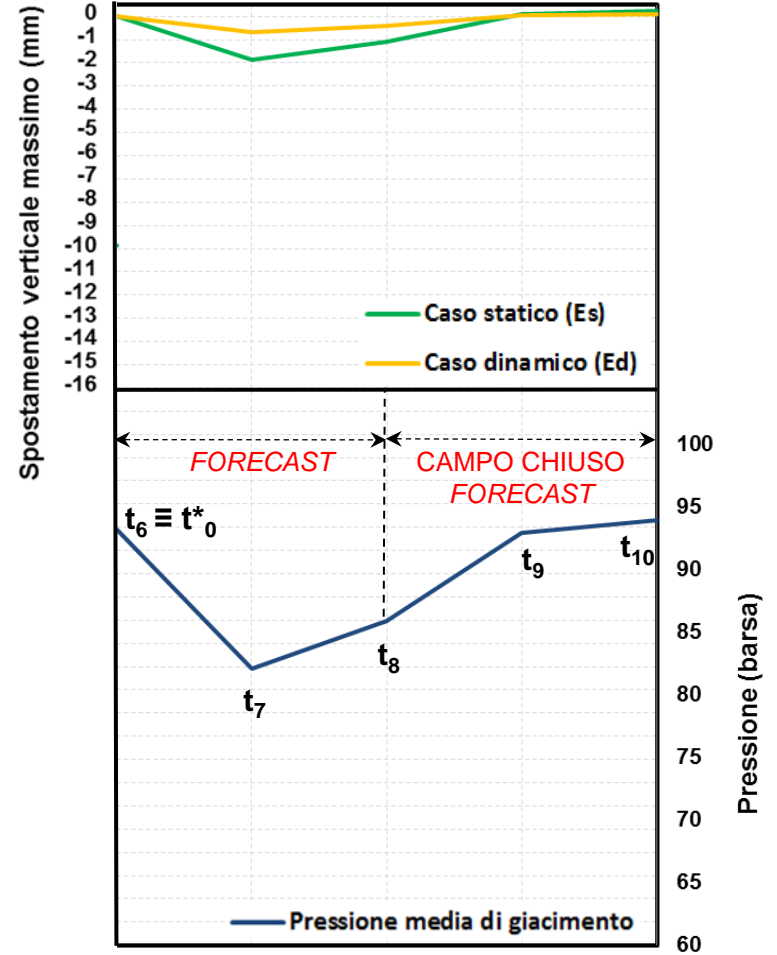
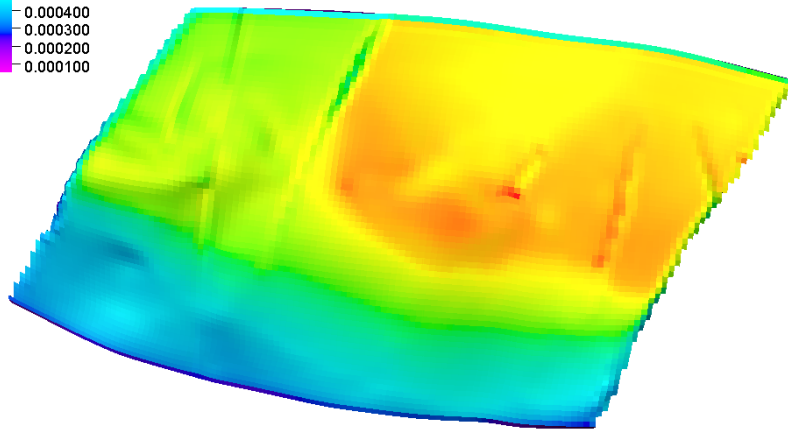
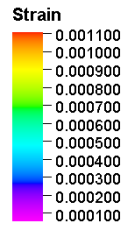
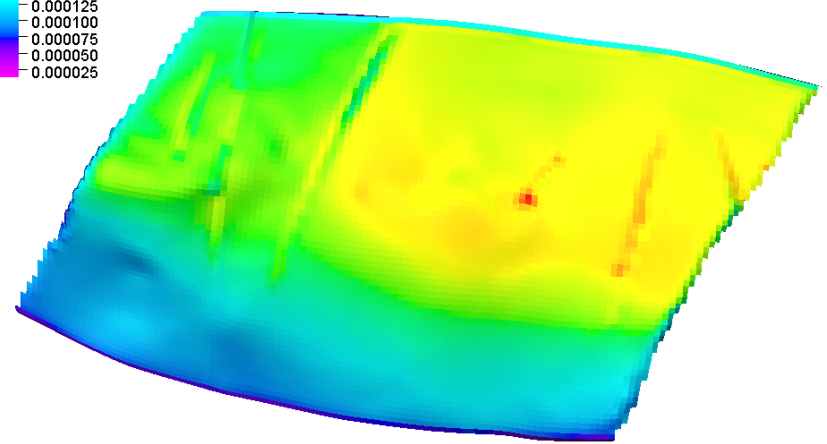
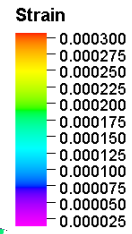


Figura 52 – Evoluzione temporale della pressione media di giacimento e del relativo spostamento verticale indotto sul piano campagna.



(a)



(b)

Figura 53 – Deformazioni verticali al *top* del giacimento per il “caso statico” (a) e “dinamico” (b).



TABELLE



Tabella 1 – Tagli stratigrafici zona Alluvioni

POZZO	RT [m]	TOP [m] MD	BOTTOM [m] MD	TOP [m] TVDSS	BOTTOM [m] TVDSS
BARICELLA_01	12.2	0.0	307.8	-12.2	295.6
BARICELLA_02	17.7	0.0	259.4	-17.7	241.7
BARICELLA_03	14.1	0.0	220.5	-14.1	206.4
MALALBERGO_23	12.1	0.0	270.3	-12.1	258.3
MALALBERGO_38	0.0	0.0	250.2	0.0	250.2
MARRARA_1	27.7	0.0	115.5	-27.7	87.8
MINERBIO_10	20.7	0.0	360.8	-20.7	340.1
MINERBIO_12	19.7	0.0	355.4	-19.7	335.7
MINERBIO_13	18.7	0.0	352.8	-18.7	334.1
MINERBIO_18	20.0	0.0	355.3	-20.0	335.3
MINERBIO_22	20.7	-	-	-	-
MINERBIO_24	20.7	0.0	374.0	-20.7	353.3
MINERBIO_26	17.7	0.0	365.0	-17.7	347.3
MONTALBANO_17	11.6	0.0	293.6	-11.6	282.0
MONTALBANO_20	11.8	0.0	329.1	-11.8	317.3
MONTALBANO_21	19.8	0.0	123.7	-19.8	103.9
PIEVE DI CENTO_1	36.5	0.0	197.7	-36.5	161.2
POGGETTO_1	31.7	0.0	-	-31.7	-
SGIORGIO_DI_PIANO_01	23.8	0.0	403.8	-23.8	380.0
SPADA_01	24.9	-	-	-	-

POZZO	RT [m]	TOP [m] MD	BOTTOM [m] MD	TOP [m] TVDSS	BOTTOM [m] TVDSS
SANTA MADDALENA_1	21.7	-	-	-	-
SANTA MADDALENA_1dir	21.7	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_1	25.5	0.0	198.6	-25.5	173.1
S.PIETRO IN CASALE_2	18.5	0.0	193.5	-18.5	175.0
S.PIETRO IN CASALE_3	31.7	0.0	251.1	-31.7	219.4
S.PIETRO IN CASALE_4	18.2	0.0	234.6	-18.2	216.4
S.PIETRO IN CASALE_5	31.9	0.0	251.2	-31.9	219.3
S.PIETRO IN CASALE_6	16.2	0.0	249.3	-16.2	233.1
S.PIETRO IN CASALE_7	17.9	0.0	271.2	-17.9	253.3
S.PIETRO IN CASALE_8	19.2	0.0	219.7	-19.2	200.5
S.PIETRO IN CASALE_9	19.7	0.0	252.4	-19.7	232.7
S.PIETRO IN CASALE_10	17.2	0.0	243.9	-17.2	226.7
S.PIETRO IN CASALE_11	13.0	0.0	249.6	-13.0	236.6
S.PIETRO IN CASALE_12	33.2	0.0	150.8	-33.2	117.6
S.PIETRO IN CASALE_13	31.2	0.0	220.2	-31.2	189.0
S.PIETRO IN CASALE_14	35.2	0.0	251.1	-35.2	215.9
S.PIETRO IN CASALE_15	14.0	0.0	277.1	-14.0	263.1
S.PIETRO IN CASALE_16	14.0	0.0	247.6	-14.0	233.6
S.PIETRO IN CASALE_17	20.2	0.0	284.6	-20.2	264.5
S.PIETRO IN CASALE_18	16.2	0.0	279.9	-16.2	263.8
S.PIETRO IN CASALE_19	16.7	0.0	220.3	-16.7	203.6
S.PIETRO IN CASALE_20	20.1	0.0	345.7	-20.1	325.7
S.PIETRO IN CASALE_21	17.0	0.0	269.4	-17.0	252.4
S.PIETRO IN CASALE_22	17.4	0.0	325.4	-17.4	308.0



Tabella 2 – Tagli stratigrafici zona Sabbie di Asti

POZZO	RT [m]	TOP [m] MD	BOTTOM [m] MD	TOP [m] TVDSS	BOTTOM [m] TVDSS
BARICELLA_01	12.2	307.8	648.3	295.6	636.1
BARICELLA_02	17.7	259.4	1171.6	241.7	1153.9
BARICELLA_03	14.1	220.5	913.3	206.4	899.2
MALALBERGO_23	12.1	270.3	441.7	258.3	429.7
MALALBERGO_38	0.0	250.2	436.9	250.2	436.9
MARRARA_1	27.7	115.5	306.8	87.8	279.1
MINERBIO_10	20.7	360.8	1211.4	340.1	1190.7
MINERBIO_12	19.7	355.4	1516.7	335.7	1497.0
MINERBIO_13	18.7	352.8	1468.7	334.1	1450.0
MINERBIO_18	20.0	355.3	1357.2	335.3	1337.2
MINERBIO_22	20.7	-	1458.2	-	1437.5
MINERBIO_24	20.7	374.0	1528.7	353.3	1508.0
MINERBIO_26	17.7	365.0	1387.8	347.3	1370.1
MONTALBANO_17	11.6	293.6	581.0	282.0	569.4
MONTALBANO_20	11.8	329.1	545.5	317.3	533.7
MONTALBANO_21	19.8	123.7	428.0	103.9	408.2
PIEVE DI CENTO_1	36.5	197.7	347.4	161.2	310.9
POGGETTO_1	31.7	-	630.3	-	598.6
SGIORGIO_DI_PIANO_01	23.8	403.8	1354.8	380.0	1331.0
SPADA_01	24.9	-	500.9	-	476.0

POZZO	RT [m]	TOP [m] MD	BOTTOM [m] MD	TOP [m] TVDSS	BOTTOM [m] TVDSS
SANTA MADDALENA_1	21.7	-	-	-	-
SANTA MADDALENA_1dir	21.7	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_1	25.5	198.6	790.4	173.1	764.9
S.PIETRO IN CASALE_2	18.5	193.5	782.7	175.0	764.2
S.PIETRO IN CASALE_3	31.7	251.1	752.5	219.4	720.8
S.PIETRO IN CASALE_4	18.2	234.6	781.9	216.4	763.7
S.PIETRO IN CASALE_5	31.9	251.2	738.7	219.3	706.8
S.PIETRO IN CASALE_6	16.2	249.3	738.2	233.1	722.0
S.PIETRO IN CASALE_7	17.9	271.2	877.6	253.3	859.8
S.PIETRO IN CASALE_8	19.2	219.7	781.7	200.5	762.5
S.PIETRO IN CASALE_9	19.7	252.4	773.1	232.7	753.4
S.PIETRO IN CASALE_10	17.2	243.9	684.8	226.7	667.6
S.PIETRO IN CASALE_11	13.0	249.6	709.5	236.6	696.5
S.PIETRO IN CASALE_12	33.2	150.8	900.0	117.6	866.8
S.PIETRO IN CASALE_13	31.2	220.2	744.6	189.0	713.4
S.PIETRO IN CASALE_14	35.2	251.1	873.8	215.9	838.6
S.PIETRO IN CASALE_15	14.0	277.1	756.4	263.1	742.4
S.PIETRO IN CASALE_16	14.0	247.6	701.9	233.6	687.9
S.PIETRO IN CASALE_17	20.2	284.6	810.3	264.5	790.2
S.PIETRO IN CASALE_18	16.2	279.9	763.3	263.8	747.1
S.PIETRO IN CASALE_19	16.7	220.3	737.3	203.6	720.6
S.PIETRO IN CASALE_20	20.1	345.7	789.7	325.7	769.7
S.PIETRO IN CASALE_21	17.0	269.4	798.4	252.4	781.4
S.PIETRO IN CASALE_22	17.4	325.4	819.8	308.0	802.4



Tabella 3 – Tagli stratigrafici zona Argille del Santerno

POZZO	RT [m]	TOP [m] MD	BOTTOM [m] MD	TOP [m] TVDSS	BOTTOM [m] TVDSS
BARICELLA_01	12.2	648.3	737.7	636.1	725.5
BARICELLA_02	17.7	1171.6	1262.3	1153.9	1244.6
BARICELLA_03	14.1	913.3	1010.1	899.2	996.0
MALALBERGO_23	12.1	441.7	532.8	429.7	520.7
MALALBERGO_38	0.0	436.9	456.0	436.9	456.0
MARRARA_1	27.7	306.8	401.0	279.1	373.3
MINERBIO_10	20.7	1211.4	1295.2	1190.7	1274.5
MINERBIO_12	19.7	1516.7	1557.4	1497.0	1537.7
MINERBIO_13	18.7	1468.7	1507.9	1450.0	1489.2
MINERBIO_18	20.0	1357.2	1418.3	1337.2	1398.3
MINERBIO_22	20.7	1458.2	1498.9	1437.5	1478.2
MINERBIO_24	20.7	1528.7	1561.6	1508.0	1540.9
MINERBIO_26	17.7	1387.8	1436.6	1370.1	1418.9
MONTALBANO_17	11.6	581.0	586.6	569.4	575.0
MONTALBANO_20	11.8	545.5	552.7	533.7	540.9
MONTALBANO_21	19.8	428.0	508.5	408.2	488.7
PIEVE DI CENTO_1	36.5	347.4	355.0	310.9	318.5
POGGETTO_1	31.7	630.3	749.5	598.6	717.8
SGIORGIO_DI_PIANO_01	23.8	1354.8	1401.8	1331.0	1378.0
SPADA_01	24.9	500.9	530.8	476.0	505.9

POZZO	RT [m]	TOP [m] MD	BOTTOM [m] MD	TOP [m] TVDSS	BOTTOM [m] TVDSS
SANTA MADDALENA_1	21.7	-	852.4	-	830.7
SANTA MADDALENA_1dir	21.7	-	992.1	-	830.9
S.PIETRO IN CASALE_1	25.5	790.4	858.7	764.9	833.2
S.PIETRO IN CASALE_2	18.5	782.7	884.1	764.2	865.6
S.PIETRO IN CASALE_3	31.7	752.5	834.2	720.8	802.5
S.PIETRO IN CASALE_4	18.2	781.9	854.9	763.7	836.7
S.PIETRO IN CASALE_5	31.9	738.7	830.1	706.8	798.2
S.PIETRO IN CASALE_6	16.2	738.2	834.4	722.0	818.2
S.PIETRO IN CASALE_7	17.9	877.6	1017.7	859.8	999.8
S.PIETRO IN CASALE_8	19.2	781.7	846.5	762.5	827.3
S.PIETRO IN CASALE_9	19.7	773.1	821.0	753.4	801.2
S.PIETRO IN CASALE_10	17.2	684.8	728.0	667.6	710.8
S.PIETRO IN CASALE_11	13.0	709.5	814.4	696.5	801.4
S.PIETRO IN CASALE_12	33.2	900.0	1017.2	866.8	984.0
S.PIETRO IN CASALE_13	31.2	744.6	764.6	713.4	733.4
S.PIETRO IN CASALE_14	35.2	873.8	941.7	838.6	906.5
S.PIETRO IN CASALE_15	14.0	756.4	842.8	742.4	828.8
S.PIETRO IN CASALE_16	14.0	701.9	828.9	687.9	814.9
S.PIETRO IN CASALE_17	20.2	810.3	934.4	790.2	914.3
S.PIETRO IN CASALE_18	16.2	763.3	889.5	747.1	873.3
S.PIETRO IN CASALE_19	16.7	737.3	836.2	720.6	819.6
S.PIETRO IN CASALE_20	20.1	789.7	922.2	769.7	902.2
S.PIETRO IN CASALE_21	17.0	798.4	879.4	781.4	862.4
S.PIETRO IN CASALE_22	17.4	819.8	867.3	802.4	849.9



Tabella 4 – Tagli stratigrafici zona Porto Garibaldi

POZZO	RT [m]	TOP [m] MD	BOTTOM [m] MD	TOP [m] TVDSS	BOTTOM [m] TVDSS
BARICELLA_01	12.2	737.7	1039.1	725.5	1026.9
BARICELLA_02	17.7	1262.3	2026.2	1244.6	2008.5
BARICELLA_03	14.1	1010.1	1528.1	996.0	1514.0
MALALBERGO_23	12.1	532.8	697.6	520.7	685.5
MALALBERGO_38	0.0	456.0	456.0	456.0	456.0
MARRARA_1	27.7	401.0	401.0	373.3	373.3
MINERBIO_10	20.7	1295.2	-	1274.5	-
MINERBIO_12	19.7	1557.4	-	1537.7	-
MINERBIO_13	18.7	1507.9	-	1489.2	-
MINERBIO_18	20.0	1418.3	-	1398.3	-
MINERBIO_22	20.7	1498.9	-	1478.2	-
MINERBIO_24	20.7	1561.6	1848.7	1540.9	1828.0
MINERBIO_26	17.7	1436.6	1708.9	1418.9	1691.2
MONTALBANO_17	11.6	586.6	799.6	575.0	788.0
MONTALBANO_20	11.8	552.7	808.8	540.9	797.0
MONTALBANO_21	19.8	508.5	508.5	488.7	488.7
PIEVE DI CENTO_1	36.5	355.0	481.9	318.5	445.4
POGGETTO_1	31.7	749.5	776.0	717.8	744.3
SGIORGIO_DI_PIANO_01	23.8	1401.8	2132.7	1378.0	2108.9
SPADA_01	24.9	530.8	530.8	505.9	505.9

POZZO	RT [m]	TOP [m] MD	BOTTOM [m] MD	TOP [m] TVDSS	BOTTOM [m] TVDSS
SANTA MADDALENA_1	21.7	852.4	-	830.7	-
SANTA MADDALENA_1dir	21.7	992.1	1005.2	830.9	840.0
S.PIETRO IN CASALE_1	25.5	858.7	865.3	833.2	839.8
S.PIETRO IN CASALE_2	18.5	884.1	884.1	865.6	865.6
S.PIETRO IN CASALE_3	31.7	834.2	834.2	802.5	802.5
S.PIETRO IN CASALE_4	18.2	854.9	854.9	836.7	836.7
S.PIETRO IN CASALE_5	31.9	830.1	830.1	798.2	798.2
S.PIETRO IN CASALE_6	16.2	834.4	834.4	818.2	818.2
S.PIETRO IN CASALE_7	17.9	1017.7	1096.4	999.8	1078.6
S.PIETRO IN CASALE_8	19.2	846.5	846.5	827.3	827.3
S.PIETRO IN CASALE_9	19.7	821.0	821.0	801.2	801.2
S.PIETRO IN CASALE_10	17.2	728.0	728.0	710.8	710.8
S.PIETRO IN CASALE_11	13.0	814.4	814.4	801.4	801.4
S.PIETRO IN CASALE_12	33.2	1017.2	1096.1	984.0	1062.9
S.PIETRO IN CASALE_13	31.2	764.6	764.6	733.4	733.4
S.PIETRO IN CASALE_14	35.2	941.7	941.7	906.5	906.5
S.PIETRO IN CASALE_15	14.0	842.8	842.8	828.8	828.8
S.PIETRO IN CASALE_16	14.0	828.9	832.6	814.9	818.6
S.PIETRO IN CASALE_17	20.2	934.4	989.7	914.3	969.6
S.PIETRO IN CASALE_18	16.2	889.5	966.6	873.3	950.5
S.PIETRO IN CASALE_19	16.7	836.2	836.2	819.6	819.6
S.PIETRO IN CASALE_20	20.1	922.2	929.2	902.2	909.2
S.PIETRO IN CASALE_21	17.0	879.4	879.4	862.4	862.4
S.PIETRO IN CASALE_22	17.4	867.3	867.3	849.9	849.9



Tabella 5 – Tagli stratigrafici zona Argille del Santerno (*caprock*)

POZZO	RT [m]	TOP [m] MD	BOTTOM [m] MD	TOP [m] TVDSS	BOTTOM [m] TVDSS
BARICELLA_01	12.2	1039.1	1087.7	1026.9	1075.5
BARICELLA_02	17.7	2026.2	2087.7	2008.5	2070.0
BARICELLA_03	14.1	1528.1	1528.1	1514.0	1514.0
MALALBERGO_23	12.1	697.6	710.5	685.5	698.4
MALALBERGO_38	0.0	456.0	476.0	456.0	476.0
MARRARA_1	27.7	401.0	513.7	373.3	486.0
MINERBIO_10	20.7	-		-	
MINERBIO_12	19.7	-		-	
MINERBIO_13	18.7	-		-	
MINERBIO_18	20.0	-		-	
MINERBIO_22	20.7	-		-	
MINERBIO_24	20.7	1848.7	2208.2	1828.0	2187.5
MINERBIO_26	17.7	1708.9	1744.8	1691.2	1727.1
MONTALBANO_17	11.6	799.6	959.5	788.0	947.9
MONTALBANO_20	11.8	808.8	980.0	797.0	968.2
MONTALBANO_21	19.8	508.5	596.0	488.7	576.2
PIEVE DI CENTO_1	36.5	481.9	493.4	445.4	456.9
POGGETTO_1	31.7	776.0	813.4	744.3	781.7
SGIORGIO_DI_PIANO_01	23.8	2132.7	2143.2	2108.9	2119.4
SPADA_01	24.9	530.8	574.4	505.9	549.5

POZZO	RT [m]	TOP [m] MD	BOTTOM [m] MD	TOP [m] TVDSS	BOTTOM [m] TVDSS
SANTA MADDALENA_1	21.7	-	940.0	-	918.3
SANTA MADDALENA_1dir	21.7	1005.2	1026.1	840.0	854.5
S.PIETRO IN CASALE_1	25.5	865.3	901.0	839.8	875.5
S.PIETRO IN CASALE_2	18.5	884.1	989.6	865.6	971.1
S.PIETRO IN CASALE_3	31.7	834.2	934.8	802.5	903.1
S.PIETRO IN CASALE_4	18.2	854.9	913.2	836.7	895.0
S.PIETRO IN CASALE_5	31.9	830.1	926.8	798.2	894.9
S.PIETRO IN CASALE_6	16.2	834.4	897.6	818.2	881.4
S.PIETRO IN CASALE_7	17.9	1096.4	1222.8	1078.6	1205.0
S.PIETRO IN CASALE_8	19.2	846.5	911.5	827.3	892.3
S.PIETRO IN CASALE_9	19.7	821.0	901.6	801.2	881.9
S.PIETRO IN CASALE_10	17.2	728.0	784.7	710.8	767.5
S.PIETRO IN CASALE_11	13.0	814.4	905.0	801.4	892.0
S.PIETRO IN CASALE_12	33.2	1096.1	1195.8	1062.9	1162.6
S.PIETRO IN CASALE_13	31.2	764.6	797.3	733.4	766.1
S.PIETRO IN CASALE_14	35.2	941.7	1011.4	906.5	976.2
S.PIETRO IN CASALE_15	14.0	842.8	965.8	828.8	951.8
S.PIETRO IN CASALE_16	14.0	832.6	907.0	818.6	893.0
S.PIETRO IN CASALE_17	20.2	989.7	1099.4	969.6	1079.3
S.PIETRO IN CASALE_18	16.2	966.6	1042.5	950.5	1026.4
S.PIETRO IN CASALE_19	16.7	836.2	921.5	819.6	904.8
S.PIETRO IN CASALE_20	20.1	929.2	1012.3	909.2	992.3
S.PIETRO IN CASALE_21	17.0	879.4	990.3	862.4	973.3
S.PIETRO IN CASALE_22	17.4	867.3	991.6	849.9	974.2



Tabella 6 – Tagli stratigrafici zona *Reservoir*

POZZO	RT [m]	TOP [m] MD	BOTTOM [m] MD	TOP [m] TVDSS	BOTTOM [m] TVDSS
BARICELLA_01	12.2	1087.7	1087.7	1075.5	1075.5
BARICELLA_02	17.7	2087.7	2087.7	2070.0	2070.0
BARICELLA_03	14.1	1528.1	1528.1	1514.0	1514.0
MALALBERGO_23	12.1	710.5	710.5	698.4	698.4
MALALBERGO_38	0.0	476.0	476.0	476.0	476.0
MARRARA_1	27.7	513.7	513.7	486.0	486.0
MINERBIO_10	20.7	-	-	-	-
MINERBIO_12	19.7	-	-	-	-
MINERBIO_13	18.7	-	-	-	-
MINERBIO_18	20.0	-	-	-	-
MINERBIO_22	20.7	-	-	-	-
MINERBIO_24	20.7	2208.2	2208.2	2187.5	2187.5
MINERBIO_26	17.7	1744.8	1744.8	1727.1	1727.1
MONTALBANO_17	11.6	959.5	959.5	947.9	947.9
MONTALBANO_20	11.8	980.0	980.0	968.2	968.2
MONTALBANO_21	19.8	596.0	596.0	576.2	576.2
PIEVE DI CENTO_1	36.5	493.4	493.4	456.9	456.9
POGGETTO_1	31.7	813.4	833.1	781.7	801.4
SGIORGIO_DI_PIANO_01	23.8	2143.2	2143.2	2119.4	2119.4
SPADA_01	24.9	574.4	574.4	549.5	549.5

POZZO	RT [m]	TOP [m] MD	BOTTOM [m] MD	TOP [m] TVDSS	BOTTOM [m] TVDSS
SANTA MADDALENA_1	21.7	940.0	964.7	918.3	943.0
SANTA MADDALENA_1dir	21.7	1026.1	1065.0	854.5	881.6
S.PIETRO IN CASALE_1	25.5	901.0	931.0	875.5	905.5
S.PIETRO IN CASALE_2	18.5	989.6	1001.7	971.1	983.2
S.PIETRO IN CASALE_3	31.7	934.8	968.7	903.1	937.0
S.PIETRO IN CASALE_4	18.2	913.2	928.8	895.0	910.6
S.PIETRO IN CASALE_5	31.9	926.8	968.4	894.9	936.5
S.PIETRO IN CASALE_6	16.2	897.6	930.2	881.4	914.0
S.PIETRO IN CASALE_7	17.9	1222.8	1245.9	1205.0	1228.1
S.PIETRO IN CASALE_8	19.2	911.5	931.5	892.3	912.3
S.PIETRO IN CASALE_9	19.7	901.6	919.2	881.9	899.5
S.PIETRO IN CASALE_10	17.2	784.7	820.2	767.5	803.0
S.PIETRO IN CASALE_11	13.0	905.0	926.2	892.0	913.2
S.PIETRO IN CASALE_12	33.2	1195.8	1229.6	1162.6	1196.4
S.PIETRO IN CASALE_13	31.2	797.3	816.6	766.1	785.4
S.PIETRO IN CASALE_14	35.2	1011.4	1037.0	976.2	1001.8
S.PIETRO IN CASALE_15	14.0	965.8	978.0	951.8	964.0
S.PIETRO IN CASALE_16	14.0	907.0	937.4	893.0	923.4
S.PIETRO IN CASALE_17	20.2	1099.4	1136.2	1079.3	1116.0
S.PIETRO IN CASALE_18	16.2	1042.5	1052.3	1026.4	1036.2
S.PIETRO IN CASALE_19	16.7	921.5	929.6	904.8	912.9
S.PIETRO IN CASALE_20	20.1	1012.3	1023.5	992.3	1003.5
S.PIETRO IN CASALE_21	17.0	990.3	1017.9	973.3	1000.9
S.PIETRO IN CASALE_22	17.4	991.6	1025.5	974.2	1008.1



Tabella 7 – Tagli stratigrafici zona Porto Corsini

POZZO	RT [m]	TOP [m] MD	BOTTOM [m] MD	TOP [m] TVDSS	BOTTOM [m] TVDSS
BARICELLA_01	12.2	1087.7	-	1075.5	-
BARICELLA_02	17.7	2087.7	-	2070.0	-
BARICELLA_03	14.1	1528.1	-	1514.0	-
MALALBERGO_23	12.1	710.5	-	698.4	-
MALALBERGO_38	0.0	476.0	-	476.0	-
MARRARA_1	27.7	513.7	864.9	486.0	837.2
MINERBIO_10	20.7	-	-	-	-
MINERBIO_12	19.7	-	-	-	-
MINERBIO_13	18.7	-	-	-	-
MINERBIO_18	20.0	-	-	-	-
MINERBIO_22	20.7	-	-	-	-
MINERBIO_24	20.7	2208.2	-	2187.5	-
MINERBIO_26	17.7	1744.8	-	1727.1	-
MONTALBANO_17	11.6	959.5	-	947.9	-
MONTALBANO_20	11.8	980.0	-	968.2	-
MONTALBANO_21	19.8	596.0	769.3	576.2	749.5
PIEVE DI CENTO_1	36.5	493.4	630.2	456.9	593.7
POGGETTO_1	31.7	813.4	-	781.7	-
SGIORGIO_DI_PIANO_01	23.8	2143.2	-	2119.4	-
SPADA_01	24.9	574.4	682.6	549.5	657.7

POZZO	RT [m]	TOP [m] MD	BOTTOM [m] MD	TOP [m] TVDSS	BOTTOM [m] TVDSS
SANTA MADDALENA_1	21.7	940.0	-	918.3	-
SANTA MADDALENA_1dir	21.7	1026.1	-	854.5	-
S.PIETRO IN CASALE_1	25.5	901.0	1402.3	875.5	1376.8
S.PIETRO IN CASALE_2	18.5	989.6	-	971.1	-
S.PIETRO IN CASALE_3	31.7	934.8	1340.5	903.1	1308.8
S.PIETRO IN CASALE_4	18.2	913.2	-	895.0	-
S.PIETRO IN CASALE_5	31.9	926.8	-	894.9	-
S.PIETRO IN CASALE_6	16.2	897.6	-	881.4	-
S.PIETRO IN CASALE_7	17.9	1222.8	-	1205.0	-
S.PIETRO IN CASALE_8	19.2	911.5	-	892.3	-
S.PIETRO IN CASALE_9	19.7	901.6	-	881.9	-
S.PIETRO IN CASALE_10	17.2	784.7	-	767.5	-
S.PIETRO IN CASALE_11	13.0	905.0	-	892.0	-
S.PIETRO IN CASALE_12	33.2	1195.8	-	1162.6	-
S.PIETRO IN CASALE_13	31.2	797.3	-	766.1	-
S.PIETRO IN CASALE_14	35.2	1011.4	-	976.2	-
S.PIETRO IN CASALE_15	14.0	965.8	-	951.8	-
S.PIETRO IN CASALE_16	14.0	907.0	-	893.0	-
S.PIETRO IN CASALE_17	20.2	1099.4	-	1079.3	-
S.PIETRO IN CASALE_18	16.2	1042.5	-	1026.4	-
S.PIETRO IN CASALE_19	16.7	921.5	-	904.8	-
S.PIETRO IN CASALE_20	20.1	1012.3	-	992.3	-
S.PIETRO IN CASALE_21	17.0	990.3	-	973.3	-
S.PIETRO IN CASALE_22	17.4	991.6	-	974.2	-



Tabella 8 – Tagli stratigrafici zona Miocene

POZZO	RT [m]	TOP [m] MD	BOTTOM [m] MD	TOP [m] TVDSS	BOTTOM [m] TVDSS
BARICELLA_01	12.2	-	-	-	-
BARICELLA_02	17.7	-	-	-	-
BARICELLA_03	14.1	-	-	-	-
MALALBERGO_23	12.1	-	-	-	-
MALALBERGO_38	0.0	-	-	-	-
MARRARA_1	27.7	864.9	2212.9	837.2	2185.2
MINERBIO_10	20.7	-	-	-	-
MINERBIO_12	19.7	-	-	-	-
MINERBIO_13	18.7	-	-	-	-
MINERBIO_18	20.0	-	-	-	-
MINERBIO_22	20.7	-	-	-	-
MINERBIO_24	20.7	-	-	-	-
MINERBIO_26	17.7	-	-	-	-
MONTALBANO_17	11.6	-	-	-	-
MONTALBANO_20	11.8	-	-	-	-
MONTALBANO_21	19.8	769.3	-	749.5	-
PIEVE DI CENTO_1	36.5	630.2	-	593.7	-
POGGETTO_1	31.7	-	-	-	-
SGIORGIO_DI_PIANO_01	23.8	-	-	-	-
SPADA_01	24.9	682.6	3695.6	657.7	3670.7

POZZO	RT [m]	TOP [m] MD	BOTTOM [m] MD	TOP [m] TVDSS	BOTTOM [m] TVDSS
SANTA MADDALENA_1	21.7	-	-	-	-
SANTA MADDALENA_1dir	21.7	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_1	25.5	1402.3	-	1376.8	-
S.PIETRO IN CASALE_2	18.5	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_3	31.7	1340.5	-	1308.8	-
S.PIETRO IN CASALE_4	18.2	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_5	31.9	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_6	16.2	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_7	17.9	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_8	19.2	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_9	19.7	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_10	17.2	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_11	13.0	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_12	33.2	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_13	31.2	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_14	35.2	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_15	14.0	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_16	14.0	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_17	20.2	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_18	16.2	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_19	16.7	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_20	20.1	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_21	17.0	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_22	17.4	-	-	-	-



Tabella 9 – Tagli stratigrafici zona Calcari

POZZO	RT [m]	TOP [m] MD	BOTTOM [m] MD	TOP [m] TVDSS	BOTTOM [m] TVDSS
BARICELLA_01	12.2	-	-	-	-
BARICELLA_02	17.7	-	-	-	-
BARICELLA_03	14.1	-	-	-	-
MALALBERGO_23	12.1	-	-	-	-
MALALBERGO_38	0.0	-	-	-	-
MARRARA_1	27.7	2212.9	-	2185.2	-
MINERBIO_10	20.7	-	-	-	-
MINERBIO_12	19.7	-	-	-	-
MINERBIO_13	18.7	-	-	-	-
MINERBIO_18	20.0	-	-	-	-
MINERBIO_22	20.7	-	-	-	-
MINERBIO_24	20.7	-	-	-	-
MINERBIO_26	17.7	-	-	-	-
MONTALBANO_17	11.6	-	-	-	-
MONTALBANO_20	11.8	-	-	-	-
MONTALBANO_21	19.8	-	-	-	-
PIEVE DI CENTO_1	36.5	-	-	-	-
POGGETTO_1	31.7	-	-	-	-
SGIORGIO_DI_PIANO_01	23.8	-	-	-	-
SPADA_01	24.9	3695.6	-	3670.7	-

POZZO	RT [m]	TOP [m] MD	BOTTOM [m] MD	TOP [m] TVDSS	BOTTOM [m] TVDSS
SANTA MADDALENA_1	21.7	-	-	-	-
SANTA MADDALENA_1dir	21.7	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_1	25.5	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_2	18.5	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_3	31.7	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_4	18.2	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_5	31.9	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_6	16.2	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_7	17.9	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_8	19.2	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_9	19.7	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_10	17.2	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_11	13.0	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_12	33.2	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_13	31.2	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_14	35.2	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_15	14.0	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_16	14.0	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_17	20.2	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_18	16.2	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_19	16.7	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_20	20.1	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_21	17.0	-	-	-	-
S.PIETRO IN CASALE_22	17.4	-	-	-	-



Tabella 10 – Sequenza stratigrafica, litotipi, livelli numerici e relative classi geomeccaniche.

ETÀ	SEQUENZA STRATIGRAFICA	LITOLOGIA	LIVELLI NUMERICI	CLASSI GEOMECCANICHE
Quaternario - Pleistocene	Alluvioni	Sabbie con intercalazioni argillose	1-2	1
	Sabbie d'Asti		3-5	2
Pliocene superiore - Pleistocene	Argille Santerno	Argille prevalenti con intercalazioni sabbiose	6	3
Pliocene medio - superiore	Fm. Porto Garibaldi	Sabbie torbiditiche con sottili livelli argilloso-siltosi	7	4
Pliocene medio - inferiore	Argille Santerno (<i>cap rock</i>)	Argille prevalenti con intercalazioni sabbiose	8-9	3
Pliocene inferiore	<i>Reservoir</i>	Sabbie torbiditiche con sottili livelli argilloso-siltosi	10-23	5
	Fm. Porto Corsini		24-26	
Miocene	Miocene indifferenziato	Marne e argille con intercalazione di livelli sabbiosi	27-28	6
Giurassico - Eocene	Calcari	Calcari e dolomie	29	7



Tabella 11 – Definizione dei parametri geomeccanici per le classi geomeccaniche di riferimento.

Classe geomeccanica	Livello numerico	PARAMETRI DI DEFORMAZIONE			PARAMETRI DI INIZIALIZZAZIONE					PARAMETRI DI RESISTENZA	
		Modulo di Young (bar)	Coeff. di Poisson (-)	Coeff. di Biot (-)	Densità roccia (g/cm3)	Coeff. stress orizzontale min** (-)	Coeff. stress orizzontale max ** (-)	Azimuth stress orizzontale (°)	Inclinazione e stress verticale (°)	Coesione (bar)	Angolo d'attrito (°)
1	1-2	Funzione della profondità e della litologia delle formazioni	0.39	1.0	2.20	0.8	0.9	90	90	4	38
2	3-5				2.10					6	36
3	6				2.18					15	20
4	7				2.20					12	35
3	8-9				2.18					15	20
5	10-23*				2.20					12	35
	24-26										
6	27-28				2.40					20	35
7	29				2.60					40	45

(*) livello mineralizzato PL1-H

(**) rapporto tra stress efficace orizzontale minimo e stress efficace verticale

(***) rapporto tra stress efficace orizzontale massimo e stress efficace verticale



Tabella 12 – Definizione dei parametri geomeccanici per le faglie.

RIGIDEZZA NORMALE (bar/m)	RIGIDEZZA A TAGLIO (bar/m)	COESIONE (bar)	ANGOLO D'ATTRITO (°)	RESISTENZA A TRAZIONE (bar)
30000	12000	0.01	30	0.01

Tabella 13 – *Time-step* di analisi.

TIME-STEP	DATA	PERIODO	DESCRIZIONE
t ₀	01/09/1960	PRODUZIONE STORICA	Inizio produzione
t ₁	18/07/1969		Massima <i>depletion</i> (fine produzione SPC-4, SPC-8 e SPC-9)
t ₂	05/02/1976		Fine produzione (SPC-1)
t ₃	26/01/1984	CAMPO CHIUSO	Campo chiuso (8 anni)
t ₄	12/01/1995		Campo chiuso (19 anni)
t ₅	23/07/2004		Campo chiuso (28 anni)
t ₆	01/04/2016	FORECAST	Inizio produzione
t ₇	01/04/2023		Massima <i>depletion</i>
t ₈	01/03/2030		Fine produzione
t ₉	01/03/2050	CAMPO CHIUSO FORECAST	Campo chiuso (20 anni)
t ₁₀	01/03/2070		Campo chiuso (40 anni)



Tabella 14 – Risultati dell’analisi di subsidenza per il «caso statico».

Massimo spostamento verticale (mm)			
GESTIONE ENI		GESTIONE PO VALLEY	
1960-1969	1960-2016	2016-2023	2016-2070
-13.29	-9.85	-1.85	+0.25

Tabella 15 – Risultati dell’analisi di subsidenza per il «caso dinamico».

Massimo spostamento verticale (mm)			
GESTIONE ENI		GESTIONE PO VALLEY	
1960-1969	1960-2016	2016-2023	2016-2070
-3.23	-1.97	-0.67	+0.11