

SUBSURFACE GEOLOGY AND GEOPHYSICS



Concessione “San Potito e Cotignola Stoccaggio”

Modellazione geomeccanica della fase sperimentale di stoccaggio nel giacimento BB1 di San Potito a pressione massima di fondo pari al 120% della originaria pressione statica di fondo ($P_{\max}=1.2 P_i$)

Redatto da: F. L. Guido e A. Ponza

Verificato da: V. Picotti

Bologna, 27 luglio 2017



EXECUTIVE SUMMARY	4
1 - INTRODUZIONE	5
2 - METODOLOGIA DI LAVORO	6
3 - CARATTERIZZAZIONE DEL GIACIMENTO DI SAN POTITO.....	7
4 - ATTIVITÀ DI STOCCAGGIO E MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI DEL SUOLO SUL CLUSTER-A.....	13
5 - CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA.....	18
6 - MODELLAZIONE NUMERICA.....	22
7 - CONCLUSIONI.....	31
BIBLIOGRAFIA.....	33



Executive Summary

In questo lavoro è stato studiato il comportamento geomeccanico del giacimento BB1 di San (cluster A) e della sua copertura nel caso di superamento del 20% delle pressioni originaria ($P_{max}=1.2P_i$).

Sono stati analizzati 2 scenari :

- iniezione da 180 a 240 bar
- erogazione da 240 a 145.5 bar.

I risultati dei modelli forniscono stime di massimi di uplift/subsidenza al suolo (+ 7 mm in iniezione fino a $P_{max} = 1.2P_i$, -12 mm in erogazione da $P_{max} = 1.2P_i$ fino a 145.5 bar) in linea con quelli finora osservati sul Cluster-C Cotignola, dove è già stata raggiunta la P_{max} .

Le deformazioni del suolo, misurate ad oggi tramite InSAR, sono correlate ad attività antropiche differenti dallo stoccaggio a San Potito.

Per la sperimentazione di esercizio a stoccaggio con $P_{max}=1.2P_i$, i massimi valori di ΔCFF nel giacimento sono pari a 0.13 MPa in prossimità dei pozzi iniettori; comunque è da sottolineare come i ΔCFF decadono in breve spazio (400 m) al di sotto di 0.1 MPa, che sarebbe ritenuto un valore sicuro in termini di induzione di sismicità dalla comunità scientifica.

Per la roccia incassante, i massimi valori attesi di ΔCFF risultano ≈ 0.0045 MPa per la fase di erogazione ipotizzata con un drop di pressione $\Delta P = 94.5$ bar a partire da $P_{max} = 240$ bar ($1.2P_i$): questi valori di ΔCFF sono molto lontani dai valori dimostrati in letteratura capaci di indurre sismicità (0.1 MPa, Mulargia e Bizzarri, 2014).

Alla luce delle migliori conoscenze in ambito tecnico-scientifico e dei dati a disposizione, si esclude che l'esercizio dello stoccaggio a pressioni di fondo pari al 120% della originaria pressione statica del giacimento BB1 di San Potito possa portare a condizioni critiche le rocce incassanti.



1 - Introduzione

In questo studio viene applicata una metodologia di analisi geologica e geomeccanica per valutare gli sforzi e le deformazioni indotte nel giacimento di San Potito (Cluster-A) e nella roccia di copertura, a seguito delle attività di stoccaggio di gas naturale con superamento del 20% delle pressioni statiche originarie ($P_{max}=1.2P_i$).

Le variazioni di pressione e *stress* nel giacimento, la sua geometria, il contrasto con le rocce che lo circondano, le caratteristiche geologiche della formazione e le sue proprietà geomeccaniche sono tutti fattori che da un lato influenzano le prestazioni di stoccaggio e dall'altro inducono (1) variazioni di *stress* nel giacimento e nella copertura, (2) possibili subsidenze in superficie e (3) eventuale microsimicITÀ.

Lo scopo di questo studio è (1) di determinare le dilatazioni e le compattazioni del giacimento e (2) di quantificare le variazioni di stato tensionale e deformativo nel giacimento e nella roccia incassante, nell'ipotesi in cui il giacimento BB1 di San Potito venga esercito a $P_{max}=1.2P_i$.



2 - Metodologia di Lavoro

Questo studio si sviluppa secondo le seguenti fasi concettuali ed analitiche:

- caratterizzazione geologico-strutturale del giacimento e della roccia incassante (litologia, caratteristiche petrofisiche e geometrie);
- analisi del comportamento dinamico del giacimento durante la produzione primaria (variazione temporale della pressione idrostatica di strato in funzione della produzione di gas nel tempo);
- analisi delle deformazioni del suolo registrate dall'avvio delle attività di stoccaggio (giugno 2013) mediante dispositivi prescritti dal MATTM nel decreto di compatibilità ambientale n. 773 del 8 Ottobre 2007;
- revisione delle caratteristiche geomeccaniche del volume roccioso (giacimento e roccia incassante) utilizzando :
 - (1) dati di laboratorio ricavati da prove geomeccaniche su campioni di roccia prelevati nei giacimenti e nelle rocce di copertura dei campi di San Potito e Cotignola
 - (2) dati e relazioni presenti in letteratura scientifica riguardo la compressibilità delle rocce del bacino padano e
 - (3) dati di deformazione della superficie topografica rilevati da interferometria satellitare;
- costruzione del grid agli Elementi Finiti di una sezione verticale che attraversa longitudinalmente il giacimento oggetto di studio, riprodotto con la stessa geometria dei relativi modelli geologici;
- analisi dei risultati del modello di giacimento (Eclipse) relativi al ciclo in cui si raggiunge la $P_{max}=1.2P_i$ ed assegnazione dei valori di D_p generati dall'iniezione e dalla successiva erogazione, nei nodi del grid agli Elementi Finiti;
- simulazione mediante modello geomeccanico dello scenario di stoccaggio con $P_{max}=240$ bar ($P_{max}=1.2P_i$) per valutare (1) le deformazioni massime indotte al suolo e (2) l'insorgere di eventuali instabilità indotte nel giacimento e nella roccia incassante.



3 - Caratterizzazione del giacimento di San Potito

3.1 - Caratterizzazione geologica

A livello regionale, la geologia dei campi di San Potito e Cotignola può essere descritta come una tipica evoluzione di un alto strutturale all'interno del bacino di avampaese Adriatico-Padano. Quest'ultimo si è sviluppato al fronte della catena Appenninica a partire dal Messiniano (circa 6 Ma), quando un nuovo settore dell'avampaese Adriatico venne incorporato nella flessurazione verso sud-sudovest dovuta alla curvatura della placca Adriatica in subduzione.

All'interno di questo bacino subsidente si depositarono ingenti successioni sedimentarie, costituite da peliti e sabbie trasportate in fondo al bacino marino da flussi gravitativi alimentati dai fiumi alpini e, in minor misura, appenninici (in aumento dai 3 Ma circa). Localmente, l'erosione dagli alti strutturali forniva sedimenti che caratterizzano i pendii e le piattaforme sviluppatesi in corrispondenza degli alti strutturali.

In questo contesto fortemente subsidente si sviluppano sovrascorrimenti e pieghe ad essi associate, come espressione delle condizioni di raccorciamento dovute alla subduzione. La struttura tettonica dei campi di Cotignola e San Potito è costituita da un'anticlinale di rampa e dai suoi margini. Essa è localizzata nella pianura prossimale al margine appenninico romagnolo, ha una forma allungata nel senso nordovest - sudest e si correla alla serie di strutture che verso sudest affiorano nell'alto di Cesena.

La deformazione dell'anticlinale è progredita insieme alla subsidenza e alla sedimentazione, con interruzioni documentate da alcune superfici di inconformità probabilmente legate ai principali abbassamenti del livello del mare. La stratigrafia del settore è divisibile in:

- una successione Miocenica pre-deformazione, data dai primi depositi di bacino di avampaese, corrispondente in affioramento con la Formazione Marnoso-arenacea. Essa è caratterizzata sismicamente da continuità e parallelismo dei riflettori;
- una successione sintettonica Miocenica superiore (Messiniano), Pliocenica e Pleistocenica inferiore. All'interno di questa successione sono presenti i corpi clastici grossolani che definiscono il giacimento di Cotignola e San Potito. In sismica si tratta di riflettori divergenti e discontinui, con alcune superfici di inconformità che tagliano verso il basso in modo significativo. I nomi formazionali di queste unità sono differenti da quelli usati nelle analoghe successioni in affioramento;
- una successione post-crescita della struttura di età Pleistocenica medio - superiore (circa ultimo Milione di anni), ove i riflettori sono sempre meno interessati da divergenza e tendono al parallelismo verso l'alto.

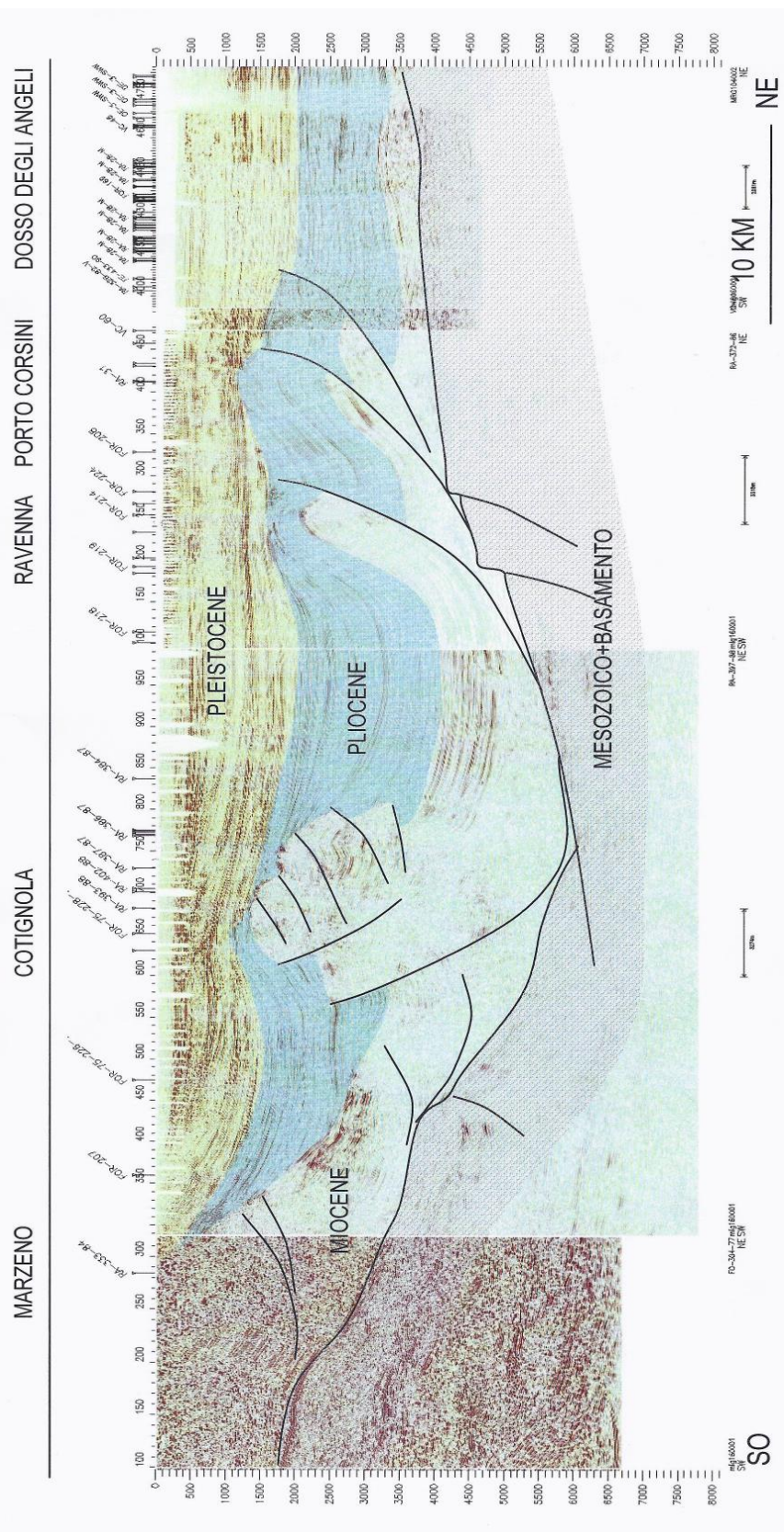


Figura 3.1 - Sezione sismica composta regionale con interpretazione, tratta da Eni - Edison, Campi di San Potito e Cotignola. Interpretazione congiunta geologico - geofisica, 2007.



In particolare, l'alto strutturale di Cotignola (Fig. 3.1) nasce come un'anticlinale di rampa legata ad un sovrascorrimento a vergenza prograda (verso nordest), che viene tagliato da un retroscorrimento tardivo (Pliocenico), forse radicato su un livello di scollamento più profondo (Fig. 3.1). Il culmine della struttura Messiniana viene progressivamente inclinato verso nordest, man mano che agisce il retroscorrimento Pliocenico, con il risultato di portare al culmine della struttura anticlinale le successioni grossolane depostesi sul fianco meridionale durante il Messiniano superiore e Pliocene inferiore. Questo cambiamento di geometrie è responsabile della genesi della trappola di Cotignola.

Quadro stratigrafico generale

Come mostrato in figura 3.2, l'unità zangleana delle arenarie di Bertinoro si è deposta a sud del culmine dell'anticlinale in erosione, che riforniva di sedimento il pendio circostante. Ulteriore riprova di questo processo è data dall'abbondante rimaneggiamento proveniente dal Miocene superiore nelle peliti delle unità MPL3, in particolare nannoplancton, ma anche diatomee e frammenti di pirite (Negri et al., Report Geophi 2014, Biostratigrafia integrata dei pozzi San Potito e Cotignola Cluster A, B e C. Implicazioni geologiche). Il grande cambiamento strutturale avviene a partire dalla MPL4a, anche se questo periodo è caratterizzato da periodi di non deposizione ed erosione localizzata, a causa dello stazionamento basso che caratterizza buona parte del suo sviluppo. Da notare che l'ampiezza di questa oscillazione è stata stimata in circa 70 m da Capozzi e Picotti (2003): poiché le lacune sono legate al regime di correnti sull'alto, è presumibile che la batimetria minima dell'alto di Cotignola in questo periodo fosse nell'ordine del centinaio di metri.

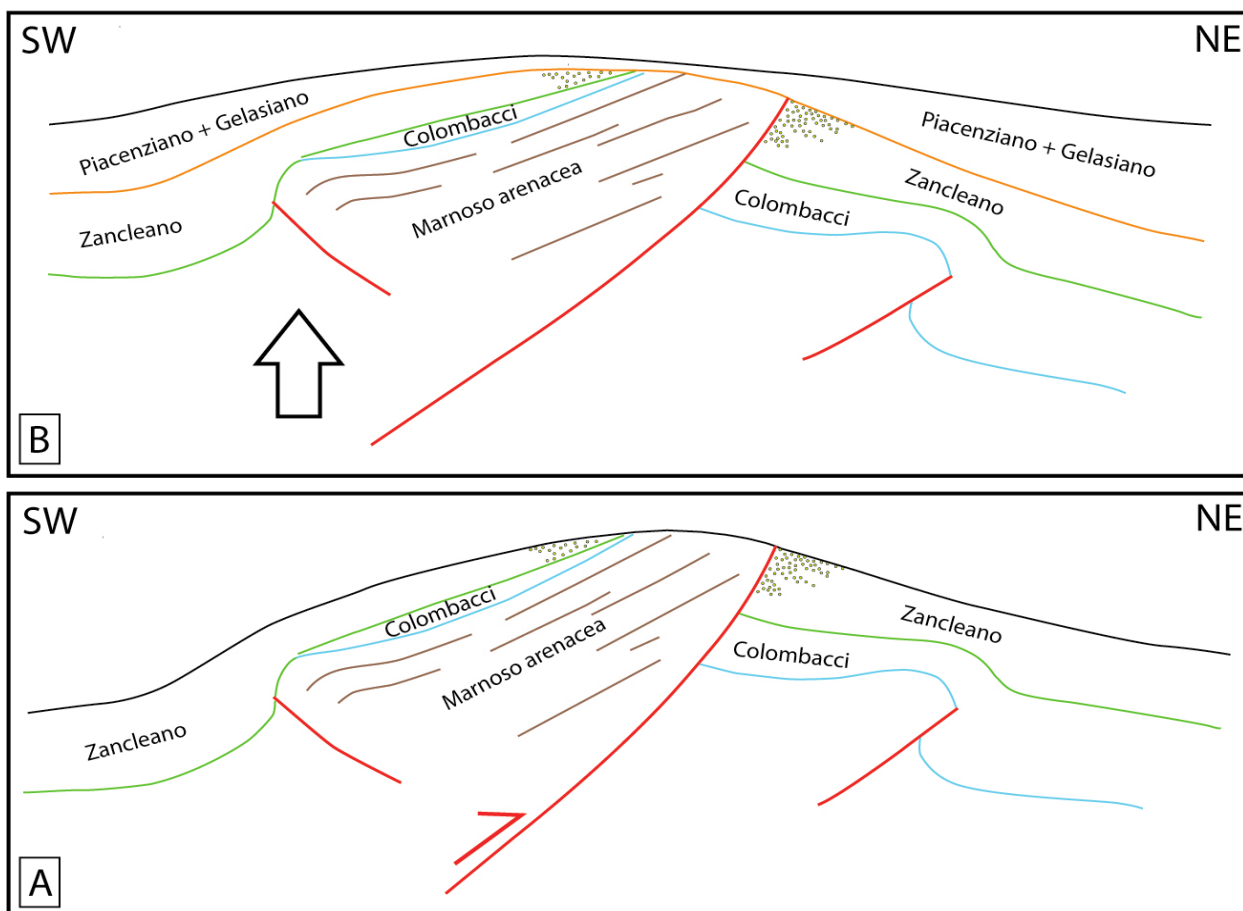


Figura 3.2 - Schema geologico interpretativo della struttura di Cotignola. A: Pliocene inferiore; B: Pliocene Medio - Superiore.

Il cambio di geometrie strutturali avvenuto al passaggio Zancleano - Piacentiano è associato ad un spostamento verso sud dell'asse dell'anticlinale, probabilmente dovuto al prevalere di un retroscorrimento che ha disattivato il thrust a vergenza nord-est. L'effetto sedimentario è ben riconoscibile nella disattivazione degli apporti sabbiosi sul lato meridionale della struttura, rispecchiato dal diminuito tasso di rimaneggiamento delle nannoflore degli intervalli pelitici e nel cambiamento di geometria, con condensazioni e lacune del Piacentiano (massime ad es. in C2 dir) sovrapposti a successioni ben sviluppate del Messiniano superiore - Zancleano. L'evento delle Arenarie di Lardiano dimostra che la tettonica attiva ha fornito altra sabbia e soprattutto ha reso possibile lo sviluppo di piccoli bacini.

3.2 - Storia produttiva del giacimento di San Potito

Lo sfruttamento del campo San Potito da parte dell'attuale Eni ha avuto inizio nel 1988. A partire da quella data, per circa 5 anni sono stati estratti consistenti quantitativi di gas (Tabella 3.1). Nel 1995 la produzione è calata, fino ad esaurimento nel 2000.

DATA	CUM CAMPO (MSm ³)	CUM Livello BB1 (MSm ³)	Gw CUM (KSm ³)	Pressione Statica Media (kg/cm ²) @ 1780.5 mslm
dic-88	0.00	0.00	0	202
apr-89	101.18	96.56	0.05	195
feb-90	352.74	323.04	1.14	178
ott-90	535.33	484.42	3.89	167
ott-91	753.76	672.94	6.77	157
ago-92	878.58	774.23	9.11	156
set-93	1010.79	874.75	10.02	151
01/12/02	1287.71	1030.75	37.12	195
01/05/10	1287.71	1030.75	37.12	196
18/06/11	1287.71	1030.75	37.12	196
29/07/13	1287.71	1030.75	37.12	197
29/10/13	1287.71	1030.75	37.12	195
05/12/13	1287.71	1030.75	37.12	192
14/01/14	1287.71	1030.75	37.12	194

Tabella 3.1 - Storico della produzione di gas nel giacimento di San Potito.



L'andamento produttivo nel giacimento di San Potito presenta nei primi anni di produzione un trend ben delineato e descritto da una produzione di circa 12 MSmc per avere un calo di pressione statica di 1 bar (fino al 1990). In una fase successiva, si risente maggiormente dell'apporto dell'acquifero (tra ottobre 1991 ed agosto 1992, con un calo di pressione di 1.5 bar vengono prodotti quasi 100 MSmc: nei grafici degli andamenti temporali di pressione e volumi prodotti nel giacimento, questo comportamento è caratterizzato da punti di flesso delle curve, laddove gli andamenti subiscono delle nette deviazioni. Dopo questo periodo il trend di produzione diminuisce sensibilmente a partire dal 1995 fino al termine della produzione (anno 2000).



4 - Attività di stoccaggio e monitoraggio delle deformazioni del suolo sul Cluster-A

La società Edison Stoccaggio S.p.A., ha realizzato un sistema di monitoraggio delle deformazioni superficiali in ottemperanza alla prescrizione n.8 del decreto VIA n. 773 del 8 ottobre 2007 di seguito riportata:

“Prima dell’inizio dello stoccaggio, la Società proponente dovrà concordare con la Regione Emilia Romagna ed ARPA Ingegneria Ambientale il progetto di un sistema di monitoraggio della subsidenza costituito dall’integrazione di più tecniche:

- una stazione GPS permanente;
- una rete di livellazione - da misurarsi secondo le specifiche dell’alta precisione - che si configuri come rete di raffittimento rispetto alla Rete Regionale di Controllo della Subsidenza;
- monitoraggio satellitare tramite tecnica PSInSAR;
- realizzazione di due stazioni assestometriche a media profondità;
- monitoraggio dei livelli piezometrici tramite una rete di raffittimento della Rete Regionale di Controllo della Piezometria;

i risultati del monitoraggio dovranno essere forniti, con modalità da concordarsi, alle Amministrazioni locali interessate”.

Pertanto, nel mese di giugno 2013 la società Edison Stoccaggio ha reso operativa presso l’impianto di stoccaggio di Cotignola una rete di monitoraggio atta a misurare le deformazioni superficiali del terreno tramite diversi strumenti, quali assestimetri, piezometri, stazione GPS e rete di livellazione geometrica di precisione, da utilizzare di concerto con dati di interferometria radar satellitare relativi all’area di interesse.

La società Edison Stoccaggio fornisce un relazione tecnica relativa all’analisi, all’interpretazione e all’integrazione tra le differenti tipologie di dati monitorati con cadenza semestrale.

Ai fini dell’analisi prevista in questo studio siamo interessati alla verifica delle deformazioni superficiali indotte dall’attività di stoccaggio finora svolta sul Cluster-A.

Di seguito vengono descritti i dati satellitari di interferometria a partire da giugno 2013 fino ad ottobre 2016, ed i dati di pressione di giacimento e volumi movimentati a partire dal giugno 2013.

4.1 - Andamento volumi e pressioni nel giacimento BB1 di San Potito

Dopo l'estrazione di 6.4 MSmc realizzata nel corso delle prove del 2013, l'ulteriore estrazione di 1.8 MSm dopo il workover del novembre 2015 e l'iniezione di 6.2 MSmc, tra il 18 novembre ed il 13 dicembre 2015, nel periodo 18 dicembre 2015 - 19 marzo 2016 sono stati erogati 26.3 MSmc.

Nel successivo periodo di iniezione, tra il 1 maggio ed il 30 settembre 2016, sono stati complessivamente iniettati circa 33 MSmc di gas (Fig. 4.1).

L'andamento delle pressioni di poro misurate dal pozzo SP-A1dir evidenzia un calo di pressione di circa 53 bar a fronte dell'erogazione di 26.3 MSmc, con una successiva risalita delle pressioni di 34.5 bar nel periodo di chiusura del pozzo (marzo - maggio '16), ed un'ulteriore aumento delle pressioni (circa 38 bar) in seguito alle fasi di iniezione estiva fino al 30 settembre 2016 (Fig. 4.2.)

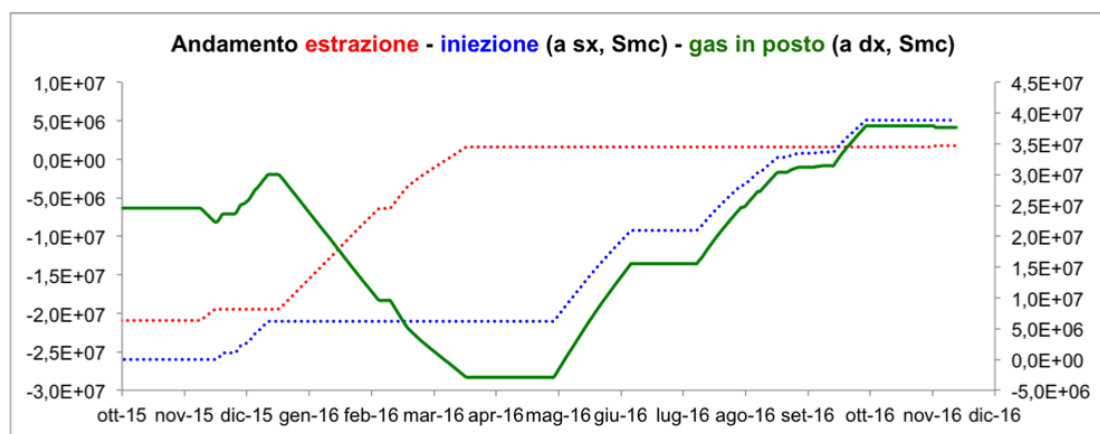


Figura 4.1 Volumi cumulate erogati ed iniettati (ordinata sx) e volumi di gas nel giacimento ordinata dx).

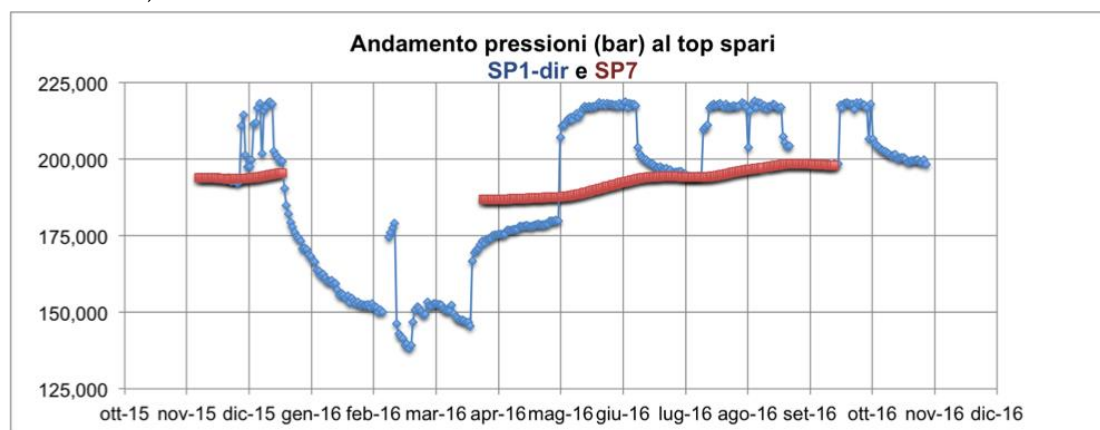


Figura 4.2 Andamento delle pressioni di poro ai pozzi SP1-dir e SP7.

4.2 - Analisi dei dati InSAR su San Potito, Cluster-A

Per l'analisi InSAR su San Potito sono stati utilizzati due dataset di immagini acquisite dal satellite TerraSAR-X in geometria ascendente e discendente tra la fine del 2013 e ottobre 2016. L'analisi è stata condotta in continuità con il monitoraggio interferometrico già attivo sui Cluster C e B di Cotignola: pertanto anche i risultati vengono mostrati in continuità con l'elaborazione degli stessi dataset effettuata sul quel sito. In Tabella 4.1 sono riportati il numero complessivo di immagini elaborate ed i rispettivi intervalli temporali coperti, che coincidono con quelli di Cotignola: ne differiscono solo per numero e densità di punti individuati, essendo l'area investigata su San Potito più ristretta rispetto a quella di Cotignola.

	Geometria	Numero immagini	Periodo monitorato	Punti di misura individuati
TSX	ascendente	89	13/12/2013 - 12/10/2016	≈ 196.000
TSX	discendente	55	24/01/2014 - 10/10/2016	≈ 123000

Tabella 4.1 - Database delle immagini satellitari utilizzate per l'analisi InSAR fino ad ottobre 2016 su San Potito e numero di bersagli radar individuati.

La densità media dei bersagli radar è rispettivamente di circa 3800 MP/km² per la geometria ascendente e di circa 2400 MP/km² per quella discendente. La densità massima è stata ottenuta sulle aree urbanizzate, mentre è minore nelle zone vegetate e coltivate. Il numero e la distribuzione dei punti di misura nell'area di studio sono comunque tali da poterne descrivere la dinamica in modo esaustivo.

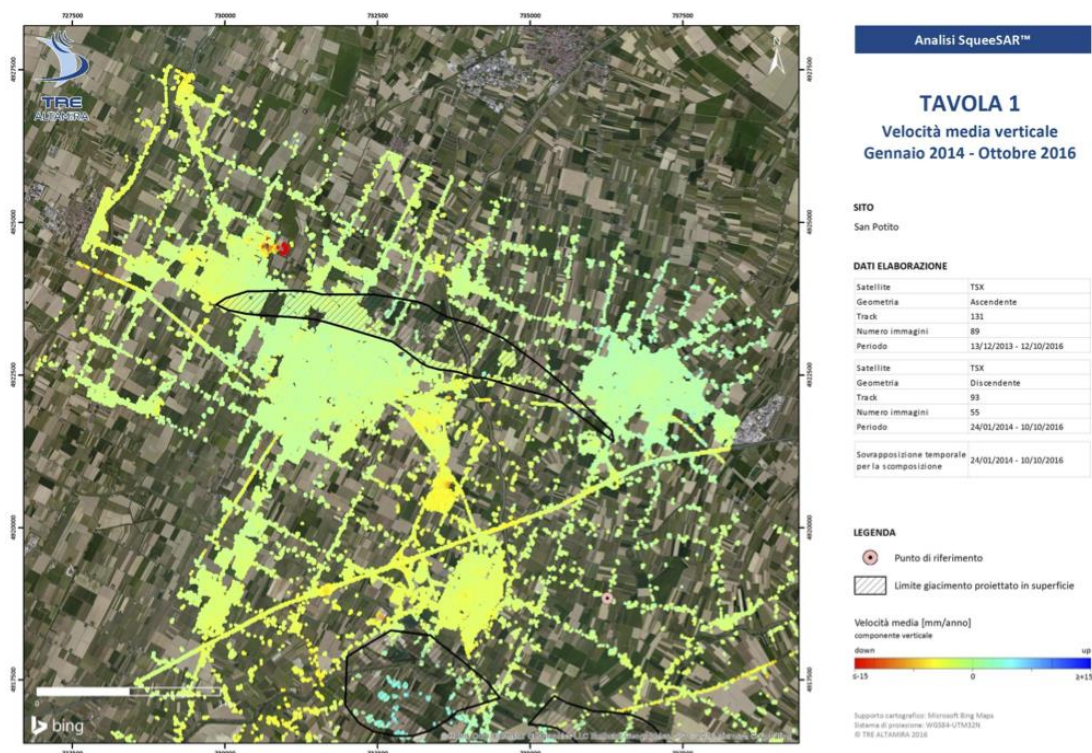


Figura 4.3 - Distribuzione dei valori di velocità media annua di spostamento verticale per i punti di misura individuati tramite scene satellitari TerraSAR-X nello studio TRE ALTAMIRA su San Potito, aggiornato ad ottobre 2016 (da Relazione tecnica, TRE ALTAMIRA, JO160133, Analisi SqueeSAR su San Potito - Aggiornamento ad Ottobre 2016, 2016).

4.3 - Analisi InSAR in relazione alla movimentazione di gas sul giacimento di San Potito

I risultati delle elaborazioni interferometriche contenuti nella relazione tecnica di TRE ALTAMIRA JO160133, Analisi SqueeSAR su San Potito - Aggiornamento ad Ottobre 2016 vengono di seguito citati:

“ I risultati, calibrati sulla stazione GNSS attiva su Cotignola, hanno evidenziato sopra il giacimento di San Potito la presenza di movimenti differenziali di entità molto limitata, con velocità di spostamento contenute entro pochi mm/anno. I dati del presente aggiornamento confermano la presenza di movimenti superficiali differenziali nell’area del giacimento di San Potito (Fig. 4.3), seppure con tassi di spostamento contenuti entro pochi mm/anno. Tali movimenti differenziali potrebbero essere correlati ai noti fenomeni di subsidenza naturale e/o indotta dallo sfruttamento delle falde acquifere che interessano quest’area della Pianura Padana.

Nella specifica area pozzo di San Potito (adiacente alla Centrale di Trattamento e Stocaggio, sita in via Chiusa 56 - RA), i dati non hanno evidenziato variazioni significative del trend deformativo. L'assenza di movimenti superficiali correlabili alle attività di stoccaggio sembra essere in linea anche con i volumi di gas movimentati fino ad oggi, che risultano essere piuttosto contenuti rispetto anche alla adiacente concessione di Cotignola.”

Infatti in figura 4.4 si può osservare come la serie temporale media dei bersagli radar individuati attorno al pozzo San Potito 1 DIR (cerchio giallo in figura 4.4), abbia un trend essenzialmente lineare, tendente ad una minima subsidenza; l'entità degli spostamenti oscilla principalmente attorno ai ± 2 mm, con massimi fino a ± 3 mm. Si può appunto notare come non risulti esservi alcuna chiara correlazione tra gli spostamenti dei point scatterer e la movimentazione di gas nel giacimento.

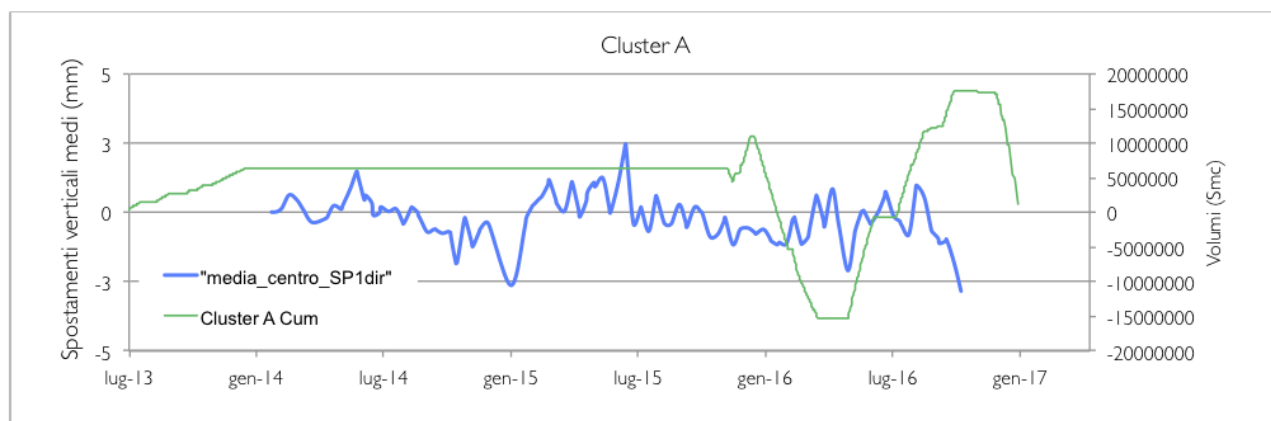


Figura 4.4 Serie temporale media di spostamento del gruppo di bersagli radar individuati attorno al pozzo San Potito 1dir (cerchio giallo in figura 4.4) al di sopra della culminazione strutturale del giacimento.

5 - Caratterizzazione geomeccanica

Nelle passate modellazioni (storia produttiva e stoccaggio secondo le Pi, stoccaggio con superamento delle Pi (Geophi, 2017)) abbiamo utilizzato valori di compressibilità verticale uniaassiale $c_M \approx 1 \times 10^{-4} \text{ bar}^{-1}$.

Tuttavia tale valore é risultato poco attendibile nella stima delle deformazioni indotte al suolo, con particolare riferimento alla modellazione del deformazioni indotte in fase di stoccaggio 110% Pi. I valori di subsidenza o uplift, derivati dal modello con l'utilizzo di tale coefficiente di compressibilità, sono risultati infatti maggiori di circa un ordine di grandezza rispetto a quelli misurati durante la fase di sperimentazione (Geophi, 2017).

Se da un lato tale condizione di modellazione è cautelativa (abbiamo in passato modellato sforzi e deformazioni maggiori di quelli realmente sviluppati dall'attività di stoccaggio) dall'altro occorre una revisione di tale valore per approssimare al meglio le reali variazioni di sforzo e le deformazioni indotte.

Le relazioni forniteci sulle caratteristiche geomeccaniche delle rocce che costituiscono il campo di San Potito suggeriscono che le rocce di giacimento sono assimilabili a rocce poco consolidate con rapporti di Poisson molto prossimi a 0.5 (valore limite nel definire il comportamento meccanico della roccia plastica).

Di seguito viene riportata una tabella riassuntiva dei parametri derivati dai differenti set di test geomeccanici e petrofisici effettuati sui campioni di carota prelevati dal pozzo SPA1.

		Compact marl	Soft marl
characterization test	density (kg/m3)	2241	2191
	sound velocity (m/s)	1507	1034
Brazilian tests	tensile strenght	0,13	0,07
Uniaxial Compressive tests	Uniaxial Compressive strenght (MPa)	3,28	0,8
	Young modulus (MPa)	397	224
	Poisson's ratio	0,37	0,43
Triaxial Compressive tests	Young modulus (MPa)	515	269
	Poisson's ratio	0,48	0,48
	Cohesion (MPa) -peak	1,74	0,47
	Friction angle - peak	1	1
	Cohesion (MPa) - residual	0,54	0,22
	Friction angle - residual	3	3
Shear tests	Cohesion (MPa)	0	
	Friction	37	

Tabella 5.1 - Risultati dei test geomeccanici sulla roccia di copertura del giacimento di San Potito.

I dati si riferiscono principalmente alla roccia di copertura, che per caratteristiche è stata studiata separatamente: una componente più compatta (*compact marl*) ed una più soffice (*soft marl*).

Come evidenziato anche in tabella 5.1, i valori di modulo di Young calcolati tramite i test compressivi differiscono in maniera sostanziale secondo la tipologia di test (uniassiale o triassiale), in particolare per quanto riguarda i campioni più consolidati (*compact marl*); lo stesso si verifica per i rapporti di Poisson.

In generale i valori di modulo di Young derivati sono molto bassi se confrontati con quelli tipici di rocce ben consolidate, e l'insieme dei risultati dei test tende a caratterizzare anche le rocce di copertura più come terreni consolidati che come rocce compatte.

Utilizzando i valori di modulo di Young e rapporto di Poisson possiamo calcolare dei coefficienti di compattazione (i.e. coefficiente di compressibilità verticale uniassiale) che ci consentano di determinare la compattazione e la dilatazione del giacimento, in funzione delle variazioni di pressione al suo interno.

Le stime di coefficienti di compressibilità verticale uniassiale, possono essere determinate tramite delle note relazioni tra parametri geomeccanici:

$$c_M = \frac{(1 - 2\nu)}{2\mu(1 - \nu)},$$

dove ν è il rapporto di Poisson e μ è il modulo di resistenza al taglio (*shear ratio*).

Calcolando in funzione dei parametri presenti in tabella 5.1, e differenziandoli sulla base dei differenti tipi di test, possiamo derivare due coefficienti di compattazione:

dai dati derivanti da test uniassiali $c_M \approx 1,5 \times 10^{-4} \text{ bar}^{-1}$;

dai dati derivanti da test triassiali $c_M \approx 3 \times 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$.

Le significative differenze tra i due valori risentono fortemente dei valori di modulo di Young. Bisogna inoltre tenere in considerazione che stiamo definendo dei coefficienti di compressibilità per la roccia di copertura. In realtà, i valori per il giacimento potrebbero risultare non troppo differenti da quelli finora determinati, date le caratteristiche meccaniche (elevato rapporto di Poisson, molto simile a quello definito tramite i test triassiali per la roccia di copertura).

Per orientarsi nella scelta di un coefficiente di compressibilità per le rocce di giacimento, utilizziamo alcune relazioni presenti in letteratura scientifica che correlano lo stato di sforzo efficace con la profondità e con stime di compressibilità verticale uniassiale, determinate

tramite misure di *radiomarkers*; la nostra attenzione è rivolta a tali stime nel contesto del bacino Padano - Adriatico.

Sulla base delle correlazioni evidenziate in letteratura, per il bacino padano e per quello Adriatico settentrionale è stato possibile derivare una relazione che fornisce la compressibilità verticale uniassiale come funzione esponenziale dello sforzo verticale efficace [Baù et al., 2002]:

$$c_M = 1.3696 \times 10^{-2} \sigma_z^{-1.1347} \text{ con } c_M \text{ e } \sigma_z \text{ espressi in } \text{bar}^{-1} \text{ e bar rispettivamente.}$$

Questa relazione è valida in condizioni di carico vergine (I ciclo di carico), mentre l'espansione della roccia è governata da una c_M di scarico/ricarico. Sempre in base a misurazioni di marker radioattivi e a test edometrici, Baù et al. [2002] and Ferronato et al. [2003b] hanno stimato un valore medio del rapporto s tra compressibilità di carico e scarico/ricarico che varia tra 1.8 e 3.5 per $100 \leq \sigma_z \leq 600$ bar (quindi per profondità tra ≈ 1000 e ≈ 6000 metri), con s che diminuisce all'aumentare di σ_z . Questo parametro risulta fondamentale nel caratterizzare il comportamento geomeccanico del giacimento durante le operazioni di stoccaggio, in quanto le fluttuazioni stagionali nel σ_z dovute all'estrazione/iniezione di gas nel giacimento avvengono a valori di sforzo minori rispetto agli sforzi di preconsolidazione e quindi nel II ciclo di carico.

I valori di compressibilità corrispondenti alle profondità (e quindi agli sforzi efficaci) del giacimento di San Potito si attestano intorno a $c_M = 3.15 \times 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$

Questo valore, derivato da letteratura, non differisce in maniera sostanziale dai risultati dei test triassiali condotti sulla componente più soffice dei campioni di carota descritti in precedenza.

Sempre secondo relazioni di letteratura, dallo stesso gruppo di autori, possiamo definire un coefficiente di compressibilità verticale uniassiale di secondo ciclo

$$c_M^{unload} = 2.9087 \times 10^{-4} \sigma_z^{-0.4135} \text{ (Ferronato et alii, 2003)}$$

I valori di compressibilità di ricarica/scarico corrispondenti alle profondità (e quindi agli sforzi efficaci) del giacimento di San Potito risultano

$$c_M^{unload} = 8.6 \times 10^{-6} \text{ bar}^{-1}$$

In questa configurazione $s = 3.5$ e c_M^{unload} rappresenta il coefficiente di compattazione verticale uniaassiale in fase di scarico/ricarico (in fase di stoccaggio).

Un altro fattore fondamentale per definire il comportamento del giacimento in funzione delle variazioni di pressione al suo interno consiste nel determinarne o definirne il comportamento poroelastico, che descrive l'interazione tra materiale granulare ed il fluido che ne satura i pori, sulla base del principio di Terzaghi delle tensioni efficaci (Biot 1941):

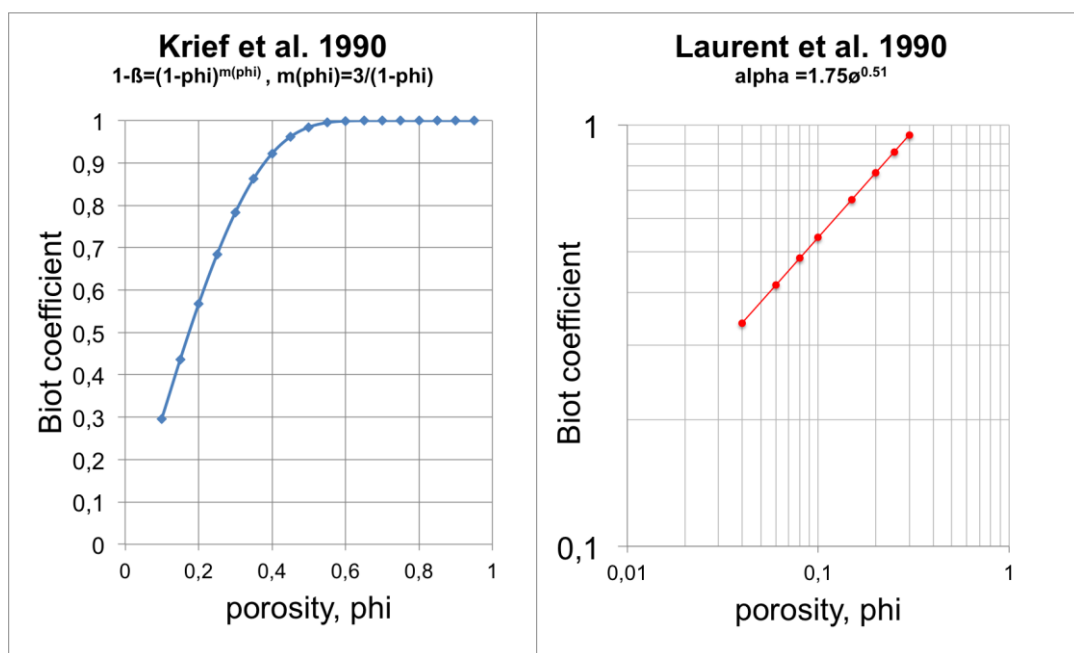


Figura 5.2 - Correlazioni tra porosità e coefficiente poroelastico (da Krief et al., 1990 e Laurent et al., 1990).

L'analisi delle due differenti equazioni che correlano porosità e coefficienti poroelastici suggerisce dei valori di coefficiente di Biot tra 0.55 (Krief et al. 1990) e 0.75 (Laurent et al. 1990) per porosità del 20%, misurate nel giacimento di San Potito. Le principali differenze tra i due metodi, risiedono nelle diverse tipologie di roccia analizzate nei due lavori: in particolare Laurent et al. (1990) hanno concentrato la loro analisi su campioni di roccia carbonatica fratturata, e gli stessi suggeriscono che a parità di porosità, i valori di coefficiente di Biot risultino generalmente maggiori in rocce carbonatiche rispetto a rocce non carbonatiche (silicoclastiche). Per tale ragione, nelle modellazioni effettuate si è tenuto conto di un coefficiente di Biot di 0.6.

6 - Modellazione numerica

La modellazione delle deformazioni e degli sforzi indotti può essere schematizzata secondo i seguenti step procedurali:

- definizione delle sezioni bidimensionali (dominio di calcolo);
- controllo delle pressioni di poro ai pozzi derivati da modello di giacimento;
- derivazione dei gradienti di pressione di poro nel campo;
- stima delle deformazioni indotte in fase di erogazione (dicembre '15 - marzo '16) ed iniezione (maggio-ottobre '16);
- stima dei campi di sforzo indotti dai differenti scenari analizzati.

6.1 Struttura del modello agli elementi finiti (FEM)

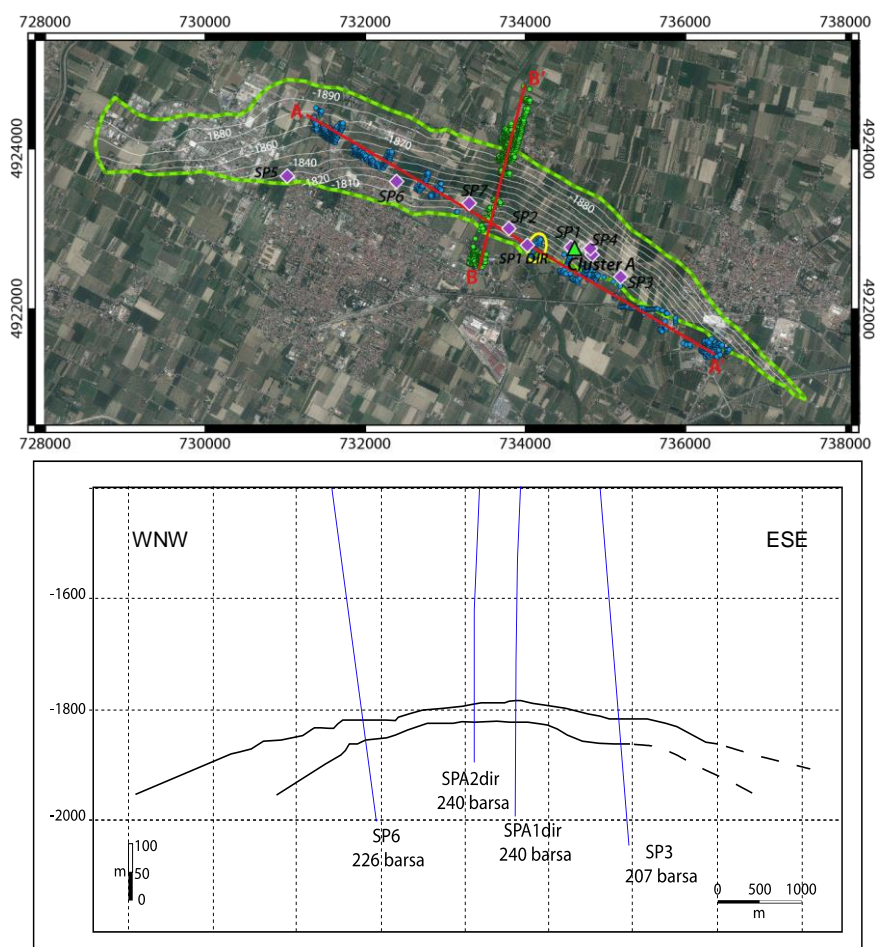


Figura 6.1 - Mappa del profilo AA' (longitudinale) e sezione con ubicazione pozzi e relative pressioni, utilizzati come base per determinare le sezioni di modellazione numerica.

Gli step di modellazione sono condotti su una sezione a scala reale del giacimento. La sezione è parallela all'asse maggiore del campo (figura 6.1 e 6.2).

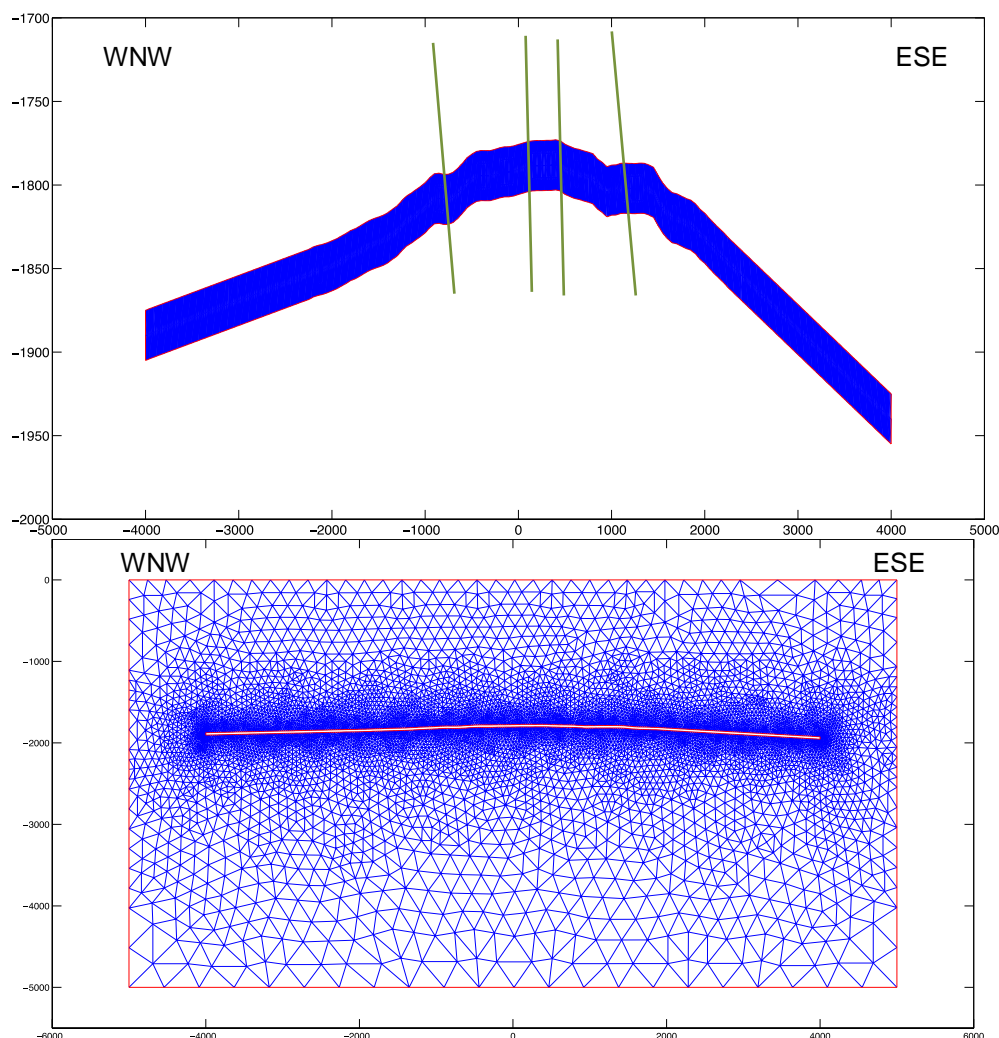


Figura 6.2 - Geometria e Mesh di Calcolo del profilo longitudinale; in alto giacimento, in basso incassante.

6.3 Scenari modellati e condizioni al contorno

In questo studio è considerato uno scenario di stoccaggio con $P_{max} = 1.2P_i = 240$ bar ai pozzi SP1dir ed SP2dir. Le modellazioni sulle deformazioni e sugli sforzi indotti sono effettuate considerando una fase di iniezione ed una successiva fase di erogazione.

Sono stati modellati 2 scenari derivati dal modello di giacimento (tabella 6.1):

una fase di iniezione partendo da 180 bar sino a 240 bar ed una fase di erogazione da 240 al

valore minimo 145.5

Intervallo	Attività	P _{init}	P _{fin}	ΔPmax
T1	iniezione	180	240	60
T2	erogazione	240	145.5	-94.5

Tabella 6.1. - Variazioni massime di pressione di poro nel giacimento secondo gli scenario Pmax= 1.2 Pi .

Gli intervalli T_i, determinati precedentemente, forniscono la base della modellazioni successive, volte a quantificare le deformazioni nel giacimento e la loro influenza sulla roccia incassante, in funzione dei ΔP calcolati.

Sulla base delle differenti distribuzioni di ΔP otteniamo i valori delle deformazioni verticali:

$$\epsilon_{zz} = c_M \alpha \Delta P, \text{ posti } c_M = 8.6 \times 10^{-6} \text{ bar}^{-1} \text{ e } \alpha = 0.6$$

I valori di deformazione imposti sono riassunti nella tabella 6.2

In particolare, il problema è posto con condizioni al contorno di spostamento (figure 6.3) : ai contorni del dominio (costituito dal volume roccioso) vengono applicati degli spostamenti ($\Delta H = \epsilon_{zz} \cdot H$) i cui valori sono determinati dalle deformazioni (tabella 6.2).

Scenario	Attività	C _M ^{unload}	ε _{zz}	Max deformazioni
<i>Pmax=1.2Pi</i>				
T1	iniezione	8.6x10 ⁻⁶	3x10 ⁻⁴	9.2 mm
T2	erogazione	8.6x10 ⁻⁶	-5,2*10 ⁻⁴	- 15,9 mm

Tabella 6.2- Scenari analizzati nelle modellazioni numeriche per le relative fasi di iniezione ed erogazione con giacimento a compressibilità c_M^{II}. Deformazione e_{zz} applicata al giacimento e relative massime compattazioni/dilatazioni indotte al giacimento (compattazioni = valori negativi).

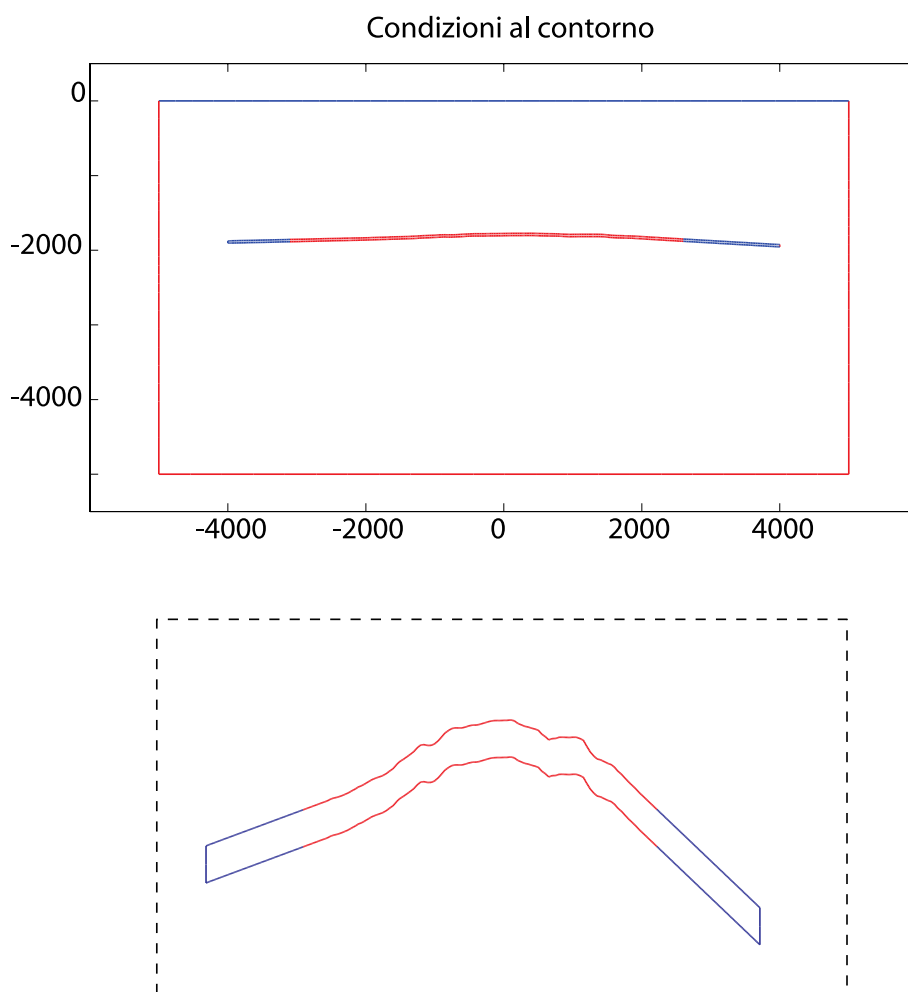


Figura 6.3 condizioni al contorno imposte (con zoom sul giacimento).

Le condizioni al contorno sono presentate nella figure 6.3 possono essere così descritte:

- le linee rosse (che racchiudono il giacimento) rappresentano elementi con condizioni di spostamento al contorno imposte sulla base dei differenti scenari:
 - le linee rosse che delimitano il “box” delle sezioni rappresentano limiti con condizioni di spostamento orizzontale e verticale nulle;
 - le linee blu rappresentano elementi liberi di muoversi in risposta agli input e rappresentano superfici a trazione nulla.

I valori negativi di deformazione, presenti nelle ultime due colonne in tabella 6.2, rappresentano compattazione del giacimento; quelli positivi indicano dilatazione (e quindi subsidenza ed uplift al suolo, rispettivamente); questi rappresentano le condizioni al contorno applicate ai modelli.

6.4 Mappatura del criterio di Coulomb da FEM

I modelli presentati in questo lavoro sono una semplificazione della reale situazione geologica/geomeccanica: le rocce che circondano il giacimento sono considerate isotrope ed aventi tutte le stesse caratteristiche (assimilabili alle rocce di copertura); questo difatti esclude che più in profondità le condizioni meccaniche varino, anche sensibilmente, qualora ad esempio fossero presenti rocce più rigide, o rocce con acquiferi importanti e/o con gradi di fratturazione più o meno elevati.

Riteniamo quindi opportuno esprimere ΔCFF , ovvero la variazione indotta dello sforzo di Coulomb:

$$\Delta\tau = \mu \Delta\sigma_n$$

che lega la variazione di sforzo tangenziale alla variazione di sforzo normale, risolto in dipendenza dalle inclinazioni di possibili piani di faglia.

Mappando ΔCFF , siamo in grado di quantificare le variazioni di una eventuale condizione critica in un punto nello spazio, in funzione delle variazioni di σ quanto questo valore si sposti lungo l'asse degli sforzi tangenziali (o di taglio) τ , in base alle differenze tra stress principali ($\sigma_1 - \sigma_3$).

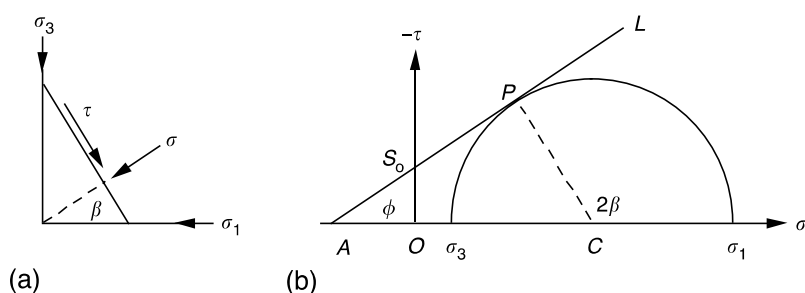


Figura 6.4 - a) sforzi normali e tangenziali risolti su un piano inclinato con angolazione β , in termini di stress principali; b) relativo diagramma di Mohr con il criterio di Coulomb rappresentato dalla retta AL.

Il modello (tramite il software Matlab™ PDE Toolbox) determina i valori di stress nelle direzioni x e y, lo stress di taglio e i due stress principali derivanti dalla risoluzione del problema elastico dato dalle condizioni al contorno, determinando i campi elastici indotti. Una successiva fase di manipolazione dei risultati mappa lo sforzo di Coulomb (ΔCFF , Coulomb failure function): l'informazione ottenuta è indicativa delle zone in cui risulta più probabile che vengano superate

le condizioni elastiche (rotture, deformazioni plastiche); lo scopo di questa modellazione non risiede nella comprensione di quale meccanismo di deformazione si sviluppi, né tantomeno di definire come avvenga la deformazione: in maniera più semplice ed immediata, gli output definiscono le zone che potrebbero superare il limite elastico.

I modelli numerici sviluppati hanno lo scopo di mappare la variazione di sforzo statico di Coulomb (ΔCFF , Coulomb Failure Function) indotta dalla deformazione del giacimento, in risposta alla movimentazione di fluidi al suo interno. In altre parole, è possibile, tramite questa mappatura, valutare l'influenza dell'attività del giacimento sugli ammassi rocciosi nel suo intorno, in termini di variazione della condizione di stabilità, secondo il criterio di rottura di Mohr -Coulomb.

Di seguito, le immagini relative al calcolo della variazione di sforzo di Coulomb, relativo alle configurazioni "peggiori" in termini di μ e inclinazione di ipotetici piani di faglia, definite secondo gli scenari proposti: per ogni scenario (T1,T2) analizzato nel giacimento e nella roccia incassante, lungo il profilo longitudinale del giacimento (Figure 6.5 e 6.6)

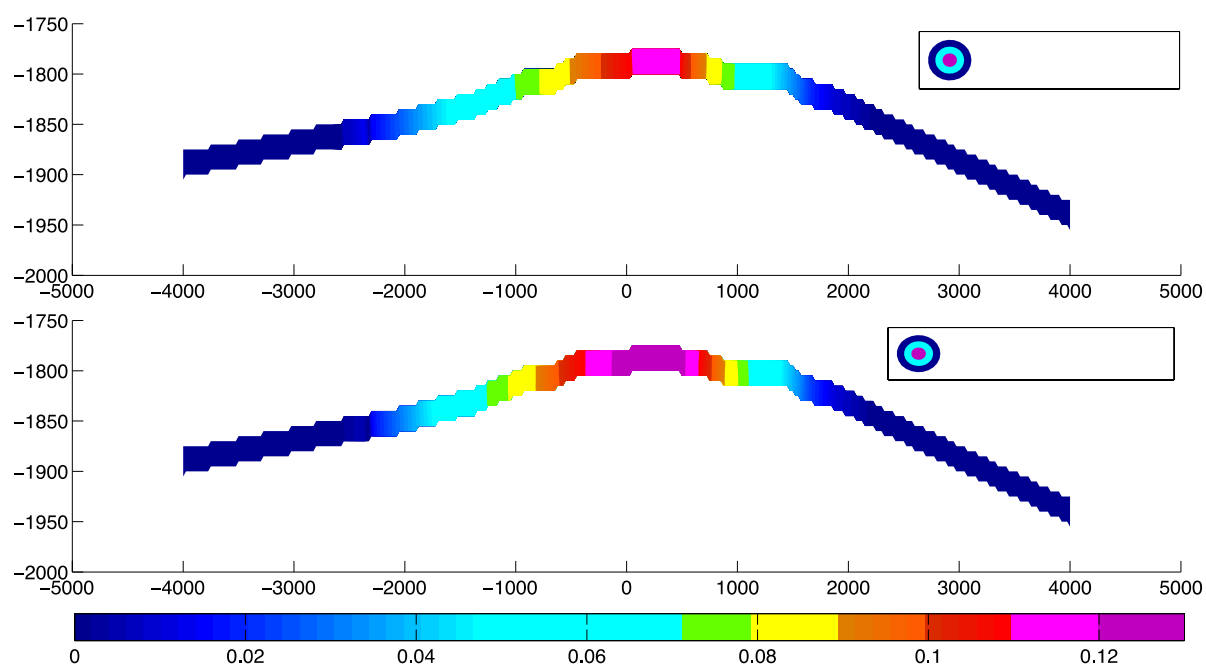


Figura 6.5 ΔCFF (in MPa) nel giacimento. Sono riportate le peggiori configurazioni per ogni scenario analizzato (in alto scenario T1 di iniezione, in basso scenario T2 estrazione) con $P_{max}=1.2P_i$.

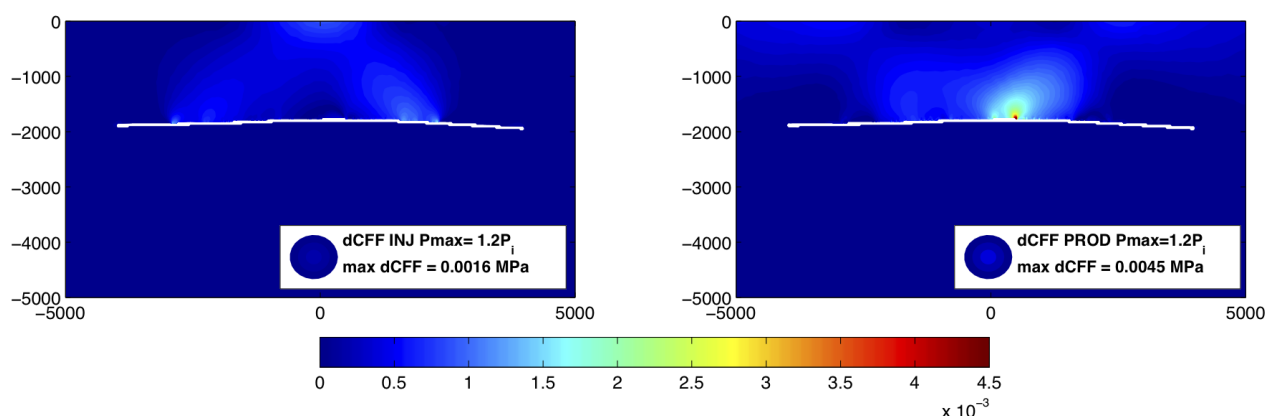


Figura 6.6 ΔCFF (in MPa) nel caprock. Sono riportate le peggiori configurazioni per ogni scenario analizzato (a sinistra scenario T1 di Iniezione, a destra scenario T2 estrazione) con $P_{max}=1.2P_i$.

I massimi valori di ΔCFF registrati nel giacimento (Figura 6.5) per i modelli con $P_{max} = 240$ bar e con $c_M^H = 8.6 \times 10^{-6} \text{ bar}^{-1}$ si attestano intorno ai 0.13 MPa, nella fase di erogazione T2. Come si può notare in figura 6.5, questi valori decadono al di sotto di 0.1 MPa nell'arco di circa 400 metri dai pozzi iniettori.

Per la roccia incassante i massimi valori calcolati si riscontrano per la fase di erogazione T2 con valori pari ≈ 0.0045 MPa a seguito di un drop di Pressione $\Delta P \approx 94.5$ bar a partire da $P_{max} = 240$ bar.

I valori determinati suggeriscono pertanto una scarsa influenza dell'attività di sperimentazione, in particolare sulla roccia incassante; valori di $\Delta CFF \geq 0.1$ MPa, valore ritenuto in letteratura capace di indurre sismicità (Mulargia e Bizzarri, 2014), si riscontrano solo in prossimità dei pozzi iniettori all'interno del giacimento; è inoltre da considerare che nelle modellazioni qui effettuate la deformazione è applicata e calcolata "istantaneamente": vengono pertanto tralasciati effetti transienti e dissipativi che determinano, nella realtà, valori minori di ΔCFF rispetto a quelli qui illustrati e derivati.

6.5 Deformazioni indotte

Sulla base delle deformazioni imposte ai limiti del giacimento (valori riportati nell'ultima colonna in tabella 6.2) ed in base alle distribuzioni delle pressioni nel giacimento (come da modello dinamico) possiamo notare come i massimi valori di spostamento verticale si riscontrano in prossimità del "centro" del giacimento.

I valori di spostamento verticale indotto (Figura 6.7) al tetto del giacimento variano da un massimo di 9.2 mm per la fase di iniezione T1 ad un minimo di -15.9 mm per la fase di erogazione T2. In generale si osserva un leggera asimmetria nella distribuzione degli spostamenti lungo il giacimento dovuto alla differente distribuzione dei ΔP al suo interno, con spostamenti relativamente maggiori (e/o minori in fase T2) verso la porzione più a ovest del giacimento (verso sinistra in figura 6.7).

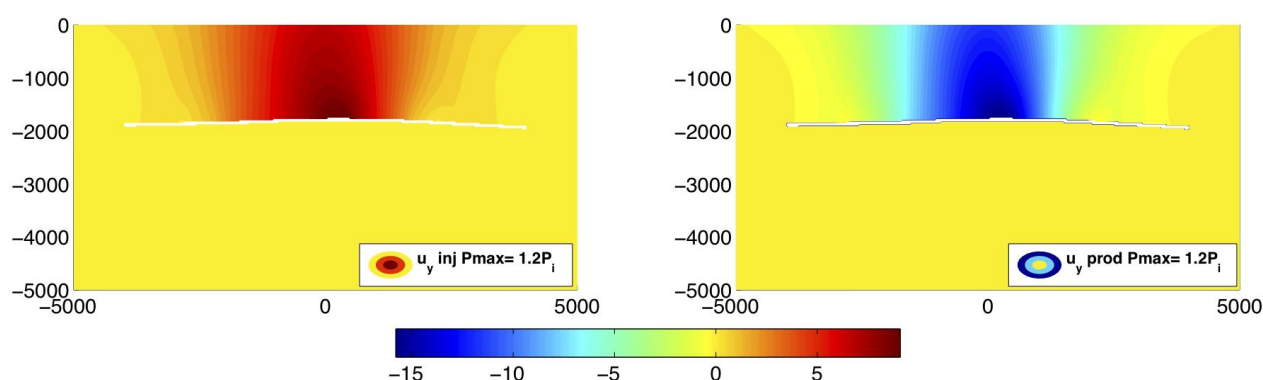


Figura 6.7 Distribuzione degli spostamenti verticali indotti dagli scenari T1 (a sinistra) e T2 (a destra) con $P_{max}=1.2P_i$. Scala cromatica in mm. I valori negativi rappresentano spostamenti verso il basso (e subsidenza alla superficie topografica); al contrario, valori positivi rappresentano spostamenti verso l'alto (e sollevamento alla superficie topografica).

Relativamente alle deformazioni indotte al suolo (Figura 6.8) si rileva che l' uplift/subsidenza dovuti all'attività di giacimento secondo gli scenari T1 e T2 sono nell'ordine di +7/-12 mm (T1 e T2 rispettivamente).

In figura 6.8 sono riportati i profili di deformazione derivati dalle differenti modellazioni considerate in questo studio ($P_{max}=1.2P_i=240$ bar, $c_M^H=8.6 \times 10^{-6} \text{ bar}^{-1}$).

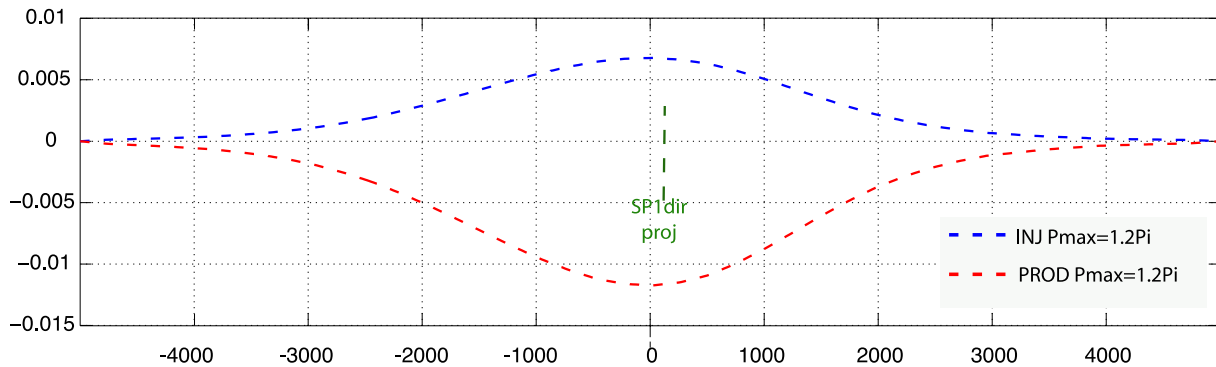


Figura 6.8 Spostamenti al suolo derivanti da modello lungo il profilo longitudinale per i differenti scenari analizzati.

Pertanto, sulla base dei risultati qui ottenuti, al meglio delle conoscenze sul giacimento e sulla roccia di copertura, nonché delle conoscenze teoriche e dei dati in possesso, la modellazione suggerisce che anche un eventuale stoccaggio in condizioni di superamento delle condizioni di pressione originaria (+20% P_{orig}), non indurrebbe modifiche sostanziali e significative nello stato degli sforzi e nelle risultanti deformazioni indotte.

7 - Conclusioni

In questo lavoro è stato caratterizzato geomeccanicamente il giacimento A del campo di stoccaggio di San Potito - Cotignola per la sperimentazione di stoccaggio con superamento del 20% delle pressioni originaria ($P_{max}=1.2P_i$).

La serie temporale media dei bersagli radar individuati attorno al pozzo San Potito 1 DIR mostra un trend essenzialmente lineare, tendente ad una minima subsidenza; l'entità degli spostamenti oscilla principalmente attorno ai ± 2 mm, con massimi fino a ± 3 mm. Non risulta esservi alcuna chiara correlazione tra gli spostamenti dei PS e la movimentazione di gas nel giacimento.

Tramite il confronto tra dati di letteratura e dati di laboratorio è stato determinato un coefficiente di compattazione verticale uniassiale di

$$c_M'' = 8.6 \times 10^{-5} \text{ bar}^{-1} .$$

Questo valore risulta minore di circa un ordine di grandezza rispetto ai coefficienti utilizzati in passato per le modellazioni geomeccaniche del campo.

Sono stati analizzati 2 scenari proposti di erogazione ed iniezione con $P_{max}= 1.2P_i$:

T1 - iniezione a partire da $P=180$ bar fino a $P_{max} =240$ bar

T2 - erogazione a partire da $P_{max}= 240$ bar fino a $P=145.5$ bar.

I risultati dei modelli hanno fornito stime di massimi uplift/subsidenza al suolo di + 7 mm in iniezione T1 e -12 mm in erogazione, in corrispondenza dei pozzi di stoccaggio nella parte centrale del campo.

Per la sperimentazione di esercizio a stoccaggio con $P_{max}=1.2P_i$, i massimi valori di ΔCFF nel giacimento sono pari a 0.13 MPa in prossimità dei pozzi iniettori; comunque è da sottolineare come i ΔCFF decadono in breve spazio (400 m) al di sotto di 0.1 MPa, che sarebbe ritenuto un valore sicuro in termini di induzione di sismicità dalla comunità scientifica.

Per la roccia incassante, i massimi valori attesi di ΔCFF risultano ≈ 0.0065 MPa per la fase di erogazione ipotizzata con un drop di pressione $\Delta P = 94.5$ bar a partire da $P_{max} = 240$ bar ($1.2P_i$): questi valori di ΔCFF sono molto lontani dai valori dimostrati in letteratura capaci di indurre sismicità (0.1 MPa, Mulargia e Bizzarri, 2014). Va sottolineato che nelle modellazioni qui



effettuate la deformazione è applicata e risolta “istantaneamente”: vengono pertanto tralasciati effetti transienti e dissipativi che determinano, nella realtà, valori minori di ΔCFF rispetto a quelli qui illustrati e derivati.

Alla luce delle migliori conoscenze in ambito tecnico-scientifico e dei dati a disposizione, si esclude, entro i limiti di pressione dettati dalle **nuove** pressioni massime di esercizio ($P_{max}=1.2P_i$) ed utilizzati in questo studio, che le attività finora previste per il giacimento di San Potito possano portare a condizioni critiche le rocce incassanti.

Bibliografia

Dream Srl per Edison stoccaggio- luglio 2012 - Campo di Cotignola Concessione di stoccaggio San Potito e Cotignola: esecuzione e interpretazione di prove di laboratorio per la caratterizzazione geomeccanica e verifica della tenuta idraulica della roccia di copertura.

Dream Srl per Edison stoccaggio- aprile 2013 - Caratterizzazione geomeccanica della roccia serbatoio e della roccia di copertura: verifica della tenuta idraulica della roccia di copertura.

Geophi 2017 per Edison stoccaggio - febbraio 2017 - Modellazione geomeccanica della fase di sperimentazione di stoccaggio in sovrappressione San Potito-Cotignola - Cluster-A .

Baù, D., Gambolati, G. and Teatini, P., 1999. Residual land subsidence over depleted gas field in the northern Adriatic basin, *Environ Eng. Geosci.*, 5(4), 389-405.

Biot, M.A., 1941. General theory of three dimensional consolidation. *J. of Appl. Physics*, 12, 155-164.

Capozzi, R. and Picotti, V., 2003. Pliocene sequence stratigraphy, climatic trends and sapropel formation in the Northern Apennines (Italy). *Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol.*, 190, 349- 371.

Ferronato, M., G. Gambolati, P. Teatini, and D. Baù (2003), Unloading - reloading uniaxial compressibility of deep giacimentos by marker measure- ments, in *Proceedings of the 11th International FIG Symposium on Deformation Measurements*, edited by S. C. Stiros and S. Pytharouli, pp. 341-346, *Geod. and Geod. Appl. Lab., Dep. of Civ. Eng., Univ. of Patras, Patras, Greece*.

Jager, J. C., Cook, N.G.V. and Zimmerman, R. W., 2007. *Fundamentals of Rock Mechanics*, 4th ed., Blackwell Publishing Ltd

Krief, M., Garta, J., Stellingwerff, J., and Ventre, J., 1990. A petrophysical interpretation using the velocities of P and S waves (full-waveform sonic): *The Log Analyst*, v. 31, p. 355-369.

Laurent, J., Bouteica, M.J., Sarda, J.P. and Bary, D., 1993. Pore-pressure influence in the poroelastic behaviour of rocks : Experimental Studies and Results. In *EUROPEC90:Increasing the margin; European Petroleum Conference*, pp. 385-392 . SPE.

Mulargia, F. and Bizzarri, A., 2014. Anthropogenic Triggering of LargeEarthquakes. *Sci. Rep.* 4, 6100; DOI:10.1038/srep06100.

Negri, A., Sabbatini, A., Picotti, V., Ponza, A., D'Oriano, F., 2014. Biostratigrafia integrata dei pozzi San Potito e Cotignola Cluster A, B e C: Implicazioni geologiche, Geophi Srl, COT1/0414106.

Ponza, A. e Guido, F. L., 2014. Analisi integrata delle misure di deformazione superficiale allo scopo di analizzare i fenomeni di subsidenza dell'area di San Potito - Cotignola.

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 giacimentos: A case study in the Po River basin, Italy. *Journal of Geophysical Res.*, 116, F02002, doi:10.1029/2010JF001793.

TRE ALTAMIRA 2016. JO160133, Analisi SqueeSAR su San Potito - Aggiornamento ad Ottobre 2016

