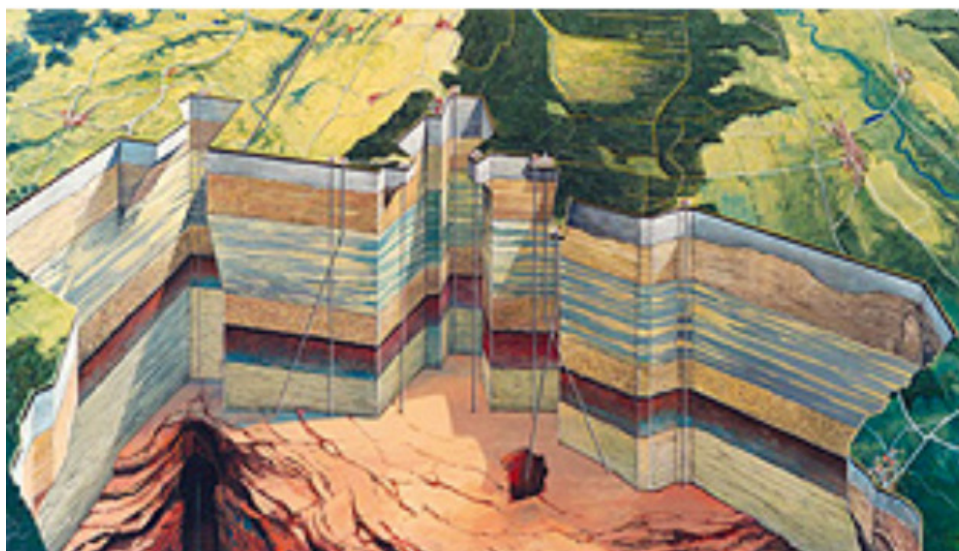


SICUREZZA GEOLOGICA DEL SERBATOIO PROFONDO “PALAZZO MORONI”



RELAZIONE A CURA DI:

PROF. VINCENZO PICOTTI



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SICUREZZA GEOLOGICA DEL SERBATOIO PROFONDO “PALAZZO MORONI”

INQUADRAMENTO GEOGRAFICO.....	4
EXECUTIVE SUMMARY	5
LA NORMATIVA VIGENTE (CENNI).....	5
DESCRIZIONE GENERALE DEGLI STOCCAGGI IN GIACIMENTI ESAURITI.....	6
GEOLOGIA DEL GIACIMENTO	8
IL SERBATOIO GEOLOGICO PROFONDO DI PALAZZO MORONI: CARATTERISTICHE DEL GIACIMENTO.....	10
STRATIGRAFIA.....	10
ASSETTO STRUTTURALE	12
PARAMETRI INIZIALI DI GIACIMENTO, CARATTERIZZAZIONE DEI FLUIDI E DELLA ROCCIA.....	14
DATI E STORIA DELLA PRODUZIONE PRIMARIA.....	15
POTENZIALI FATTORI DI RISCHIO GEOLOGICO	16
RISCHIO DI ROTTURA DEL SERBATOIO E/O DELLA ROCCIA DI COPERTURA (SISMICITÀ INDOTTA E/O ATTIVATA) E CONSEQUENTI FUGHE DI GAS VERSO LA SUPERFICIE	17
SISMICITÀ NATURALE	18
PREMESSA SULLA NORMATIVA SISMICA	18
POSSIBILITÀ DI ROTTURA DEL SERBATOIO IN SEGUITO A SOLLECITAZIONE SISMICA NATURALE	20
RISCHIO DI INCENDIO ED ESPLOSIONE.....	20
BIBLIOGRAFIA.....	21

Premessa

La Commissione europea, nel corso della XX riunione del *“Committee of Competent Authorities – CCA”*, svoltasi a Bordeaux (Francia) il 9 ottobre 2008, ha chiarito che tutti gli stoccaggi di sostanze pericolose, incluso il gas naturale, compresi quelli in miniere (*salt cavern*) e giacimenti esauriti, sono soggetti agli obblighi derivanti dal D. Lgs. n°334/99 e succ. mod.

Tale indicazione è stata recepita il 21/10/2009 con Circolare Interministeriale MSE-MATTM-MI *“Seveso-ter per stoccaggi”* (*“Indirizzi per l’applicazione del decreto legislativo 17 agosto 1999, n.334, in materia di controllo dei pericoli di incidenti rilevanti, agli stoccaggi sotterranei di gas naturale in giacimenti o unità geologiche profonde”*). Questa circolare prevede la stesura di un Rapporto di Sicurezza dedicato in particolare alla definizione dei pericoli legati alle operazioni di stoccaggio in serbatoi profondi.

I giacimenti esauriti sono parti di impianti industriali che non possono essere trattati alla stessa stregua dei manufatti per quanto riguarda la valutazione dei rischi. I processi geologici che concorrono alla formazione del giacimento, ed interagiscono con le operazioni di stoccaggio, sono dotati di una variabilità naturale che necessita di un approccio di analisi complesso e spesso basato su estrapolazioni, valutazioni probabilistiche e modelli le cui condizioni al contorno a volte sono dati da assunzioni semplicistiche. Nonostante le differenze di analisi, si ritiene di poter soddisfare le richieste di un Rapporto di Sicurezza nella certezza che è la presenza stessa di un giacimento da tempi di oltre un milione di anni a garantire le buone caratteristiche geologiche del sito prescelto per lo stoccaggio. Integrati in questi intervalli di tempo, i processi geologici possono considerarsi costantemente attivi e la risposta positiva del giacimento a grandi eventi che possono verificarsi con periodi molto lunghi (per es. forti terremoti) può considerarsi la migliore verifica alle limitate considerazioni che possiamo fare.

La presente relazione intende ottemperare alle indicazioni di questa circolare per quanto attiene agli aspetti geologici: in particolare, dopo una disamina del quadro di riferimento normativo, essa affronterà le principali caratteristiche geologiche degli stoccaggi in giacimenti esauriti, per poi giungere alla descrizione della geologia del sito *“Palazzo Moroni”*. L’ultima parte di questa nota sarà dedicata alla definizione dei potenziali fattori di rischio (fughe di gas verso la superficie, sismicità naturale) ed alle eventuali attività di controllo e prevenzione degli incidenti.

Inquadramento geografico

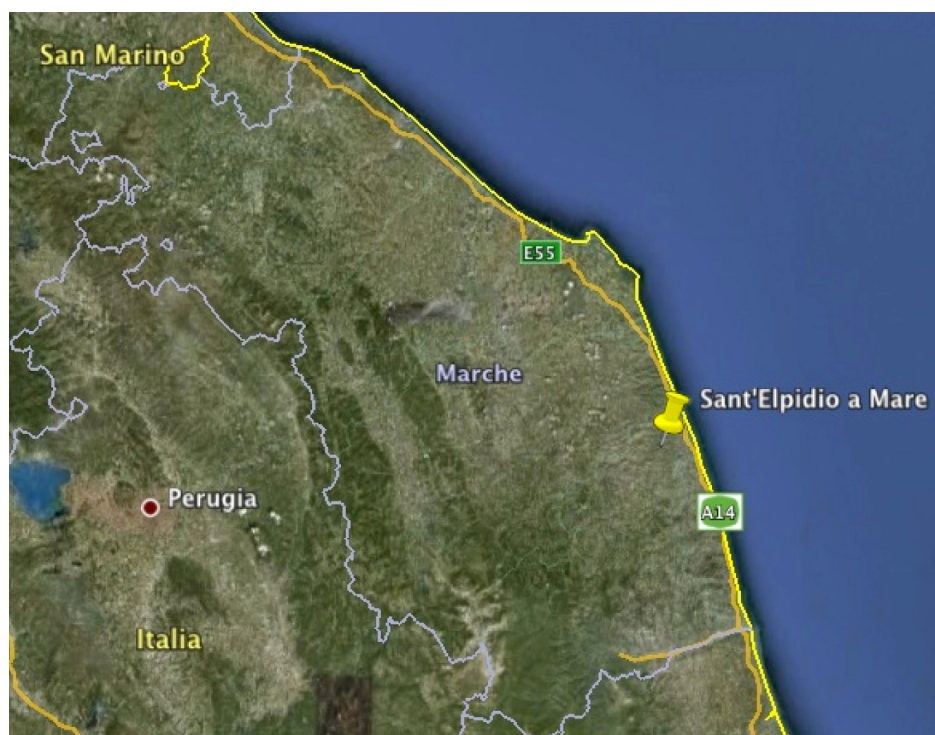


Figura 1 - La posizione del comune di Sant'Elpidio a Mare (FM) rispetto alla Regione Marche

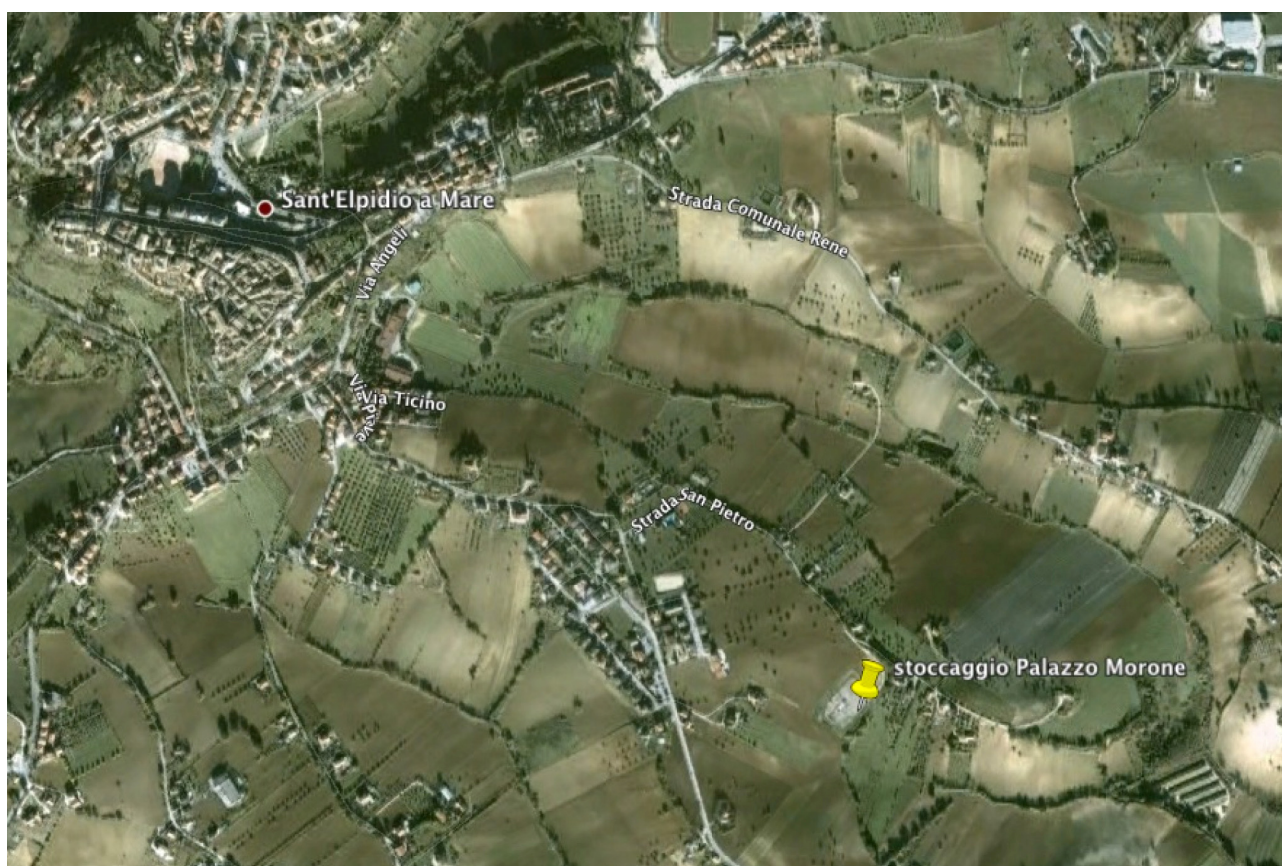


Figura 2 – Il Comune di Sant'Elpidio Mare (FM) ed il sito di stoccaggio

Il Comune di Sant’Elpidio Mare (FM), in provincia di Fermo, è un comune di circa 50 kmq situato sulle colline prospicienti la costa adriatica, allo spartiacque tra il fiume Tenna e l’Ete Morto, ha circa 17.000 abitanti.

Executive Summary

La roccia di copertura del serbatoio di Palazzo Moroni è sicura rispetto alle operazioni di stoccaggio, per le quali è previsto un controllo continuo, mediante i pozzi di monitoraggio, della dissipazione delle pressioni a fine delle operazioni di pompaggio ed erogazione, che, unitamente al mantenimento delle pressioni originarie, permetterà di evitare cedimenti della copertura della roccia serbatoio.

L’assetto geologico – strutturale del serbatoio Palazzo Moroni può essere letto come un esperimento naturale ove il giacimento, con le pressioni originarie allineate al gradiente idrostatico, è stato sottoposto a tutti i possibili sismi con tempo di ritorno di migliaia o decine di migliaia di anni, integrati nei 3 Milioni di anni di storia del sito. Con questa chiave di lettura diventa possibile affermare la sostanziale assenza di possibilità di rottura del serbatoio in seguito a sismi naturali.

Il gas presente nel giacimento si trova inoltre in pressione ed in un ambiente anaerobico e quindi non è a contatto né con il comburente né con possibili inneschi. Per quanto sopra si può escludere ogni possibile rischio di incendio ed esplosione all’interno della roccia serbatoio.

La normativa vigente (cenni)

Circolare ministeriale 21-10-2009

“Indirizzi per l’applicazione del decreto legislativo 17 agosto 1999, n.334, in materia di controllo dei pericoli di incidenti rilevanti, agli stoccaggi sotterranei di gas naturale in giacimenti o unità geologiche profonde.”

La Commissione europea, nel corso della XX riunione del “Committee of Competent Authorities – CCA”, svoltasi a Bordeaux (Francia) il 9 ottobre 2008, ha chiarito che tutti gli stoccaggi di sostanze pericolose, e quindi ANCHE **gas naturale**, ivi compresi quelli in miniere e pozzi esausti, sono soggetti agli obblighi derivanti dal D.Lgs. n°334/99 e succ. mod.

In particolare, la cosiddetta “Seveso bis” prevede l’adempimento di un Rapporto di sicurezza (art.8, D.Lgs. 334/99) contenente tutto ciò che concerne l’adozione del Sistema di Gestione della Sicurezza, i pericoli di incidente rilevante, le misure necessarie a prevenirli e a limitarne le conseguenze per l’uomo e per l’ambiente, nonché la progettazione, la costruzione, l’esercizio e la manutenzione di qualsiasi impianto, i piani di emergenza interni e gli elementi necessari per l’elaborazione del piano di emergenza esterno.

Descrizione generale degli stoccaggi in giacimenti esauriti

Gli stoccaggi in giacimenti di metano esauriti sono strutture geologiche naturali situate nel sottosuolo a profondità variabili e comprese tra i 600 ed i 1500 m sotto il livello del mare. Nella pratica nazionale, vengono scelti come siti di stoccaggio per lo più i giacimenti di metano esauriti perché offrono solide garanzie e vantaggi operativi. Infatti, la presenza di fluidi nel sottosuolo è dovuta alla concausa di:

- 1) una **roccia serbatoio**, costituita da un intervallo più o meno potente di rocce porose e dotate di caratteristiche petrofisiche adatte allo stoccaggio (permeabilità, trasmissività);
- 2) una situazione di **trappola** che ha favorito l’accumulo di fluidi (gas metano e acque salate) ed impedito la loro migrazione altrove. Questa trappola è di norma costituita da pieghe anticlinali (trappole strutturali) oppure da chiusure degli intervalli che costituiscono le rocce serbatoio (trappole stratigrafiche o trappole per faglia);
- 3) una **copertura** di rocce impermeabili, in questo caso data da potenti intervalli a granulometria fine (ricchi di argilla), che garantisce la tenuta idraulica del giacimento.

La migrazione dei fluidi è avvenuta durante le fasi di strutturazione geologica, nel nostro caso avvenuta tra 3 e 2 Milioni di anni fa. Questo fatto garantisce la stabilità nel tempo di questi giacimenti in termini di tenuta idraulica dei fluidi.

In termini operativi il vantaggio degli stoccaggi in giacimenti esauriti deriva dalla conoscenza delle principali caratteristiche petrofisiche e geomeccaniche del giacimento, ottenute durante la fase di esplorazione e produzione, avvenute nella seconda metà del secolo scorso. Queste conoscenze sono di grande utilità nella gestione di esercizio dello stoccaggio, come vedremo in seguito.

Nella pratica dello stoccaggio di idrocarburi nei paesi industrializzati sono state scelte opzioni diverse come lo stoccaggio all’interno di caverne nel salgemma (spesso usate negli Stati Uniti) o lo stoccaggio in acquiferi profondi. Gli elementi geologici che costituiscono questi stoccaggi sono

differenti da quelli in giacimenti esauriti. Nel tenere conto delle condizioni di sicurezza di questi ultimi, si dovrà puntualizzare quegli elementi che li caratterizzano e che verranno sintetizzati di seguito:

- ***petrofisica del serbatoio***: la porosità delle rocce serbatoio nei casi in esame è primaria, cioè legata alla presenza di pori tra un granulo e l'altro delle arenarie che compongono i serbatoi dei siti di stoccaggio. La dimensione di questi pori è sufficiente a garantire il flusso dei fluidi attraverso la roccia fino ad ottenere la completa saturazione e la loro eventuale stratificazione nel giacimento, con gli idrocarburi ad occupare il settore più elevato sopra la tavola d'acqua, secondo la loro densità. E' bene ricordare che il serbatoio è una roccia in cui l'impalcatura dei granuli in termini di costipazione e cementazione è sufficientemente resistente da sostenere significative oscillazioni della pressione dei fluidi nei pori. La perturbazione poroelastica creata dalle operazioni di pompaggio tende a dissiparsi in funzione della trasmissività del serbatoio con una tempistica che viene tenuta sotto controllo dall'analisi delle pressioni statiche a testa e fondo nei pozzi di monitoraggio, eseguite di norma ogni 6 mesi.
- ***regime di pressione originario e di esercizio***: in casi di giacimenti di fluidi in profondità, la pressione originaria, rilevata al momento dell'inizio dello sfruttamento del giacimento, si situa di norma all'interno di due valori limite determinati dall'andamento del gradiente idrostatico e di quello geostatico. Per questi ultimi, si tratta del valore di pressione di una colonna d'acqua di spessore uguale alla profondità del giacimento (gradiente idrostatico) e di quello di una colonna di sedimenti (gradiente geostatico, calcolato di norma su valori di densità medi di 2,3 gr/cm³). Semplificando, si può immaginare che tanto più il valore di pressione originaria dei fluidi nel giacimento si avvicina al gradiente geostatico, tanto più scarsa è la resistenza offerta dall'impalcatura dei granuli della roccia serbatoio, di modo che il carico litostatico viene trasmesso dai granuli al fluido nei pori. Questa però è solo una delle possibili componenti della pressione dei fluidi nel giacimento; un'altra ha a che fare con la possibilità che il fluido sia in connessione idraulica con settori più depressi, per es. in presenza di strutture anticlinali, e si trovi quindi in condizioni di pressioni maggiori. Vale la pena ricordare che nel caso in esame, i valori di pressione originari sono molto più prossimi al gradiente idrostatico, a dimostrazione delle buone caratteristiche geotecniche della roccia serbatoio. Poiché di norma vengono selezionati per lo stoccaggio i giacimenti migliori da questo punto di vista, è pratica comune in molti paesi occidentali (e dal gennaio

2011, con il nuovo disciplinare sugli stoccaggi, anche in Italia) di aumentare i valori di pressione di stoccaggio rispetto a quelli originari con un ΔP significativo, (10 – 20%, le norme europee indicano il massimo intorno al 40%) allo scopo di incrementare i volumi di working gas (si vedano ad esempio le procedure dell’American Gas Association e le norme UNI-EN 1918). Questo a dimostrazione che la pressione sostenibile dai serbatoi può, nella maggior parte dei casi, avvicinarsi al gradiente geostatico più di quanto fosse all’origine, senza detrimento per la roccia serbatoio.

- **tenuta idraulica rocce di copertura:** la tenuta delle rocce di copertura è garantita dalla storia del giacimento, che non sarebbe potuto esistere in assenza di efficace blocco idraulico da parte degli intervalli che sormontano la roccia serbatoio. La discussione sulla sicurezza della tenuta della copertura deve quindi affrontare la possibile rottura delle rocce di copertura indotta dalle operazioni di stoccaggio. Il raggiungimento del punto di rottura può avvenire a seguito di una efficace perturbazione del campo degli sforzi, a sua volta originata da uno squilibrio poroelastico nella roccia serbatoio. Per raggiungere queste condizioni dovremmo prima avvicinarci al gradiente di pressione geostatico nel serbatoio, nel quale dovrebbero essere impartiti gradienti di pressione che non possano essere dissipati per limiti petrofisici della roccia serbatoio, creando quindi sovrappressioni nei pori che possano localmente permettere il superamento del punto di rottura della roccia. Nella realtà, le buone caratteristiche petrofisiche della roccia serbatoio e la pratica di esercizio dello stoccaggio con pressioni statiche ampiamente al di sotto del gradiente geostatico, e mai al di sopra della pressione originaria, unita al monitoraggio indiretto della perturbazione poroelastica attraverso i rilievi di pressione statica di fondo pozzo effettuati a cadenza semestrale, garantiscono l’assenza di squilibri di pressione che possano portare a rotture così importanti da trasmettere la perturbazione anche alla roccia di copertura e provocarne il cedimento.

Geologia del giacimento

Il serbatoio profondo “Palazzo Moroni” si situa presso il giacimento esplorato dal pozzo “Verdicchio 1” nella concessione “Fiume Tenna”.

Si tratta di una successione di mare profondo depostasi nel Pliocene all’interno del bacino di avampaese centro-Adriatico, creatosi per la flessurazione della placca Adriatica che subduce verso ovest a creare la catena Appenninica. Il bacino di mare profondo era alimentato assialmente da

sistemi fluviali che portavano il detrito, per la maggior parte di origine alpina, verso le zone depocentrali.

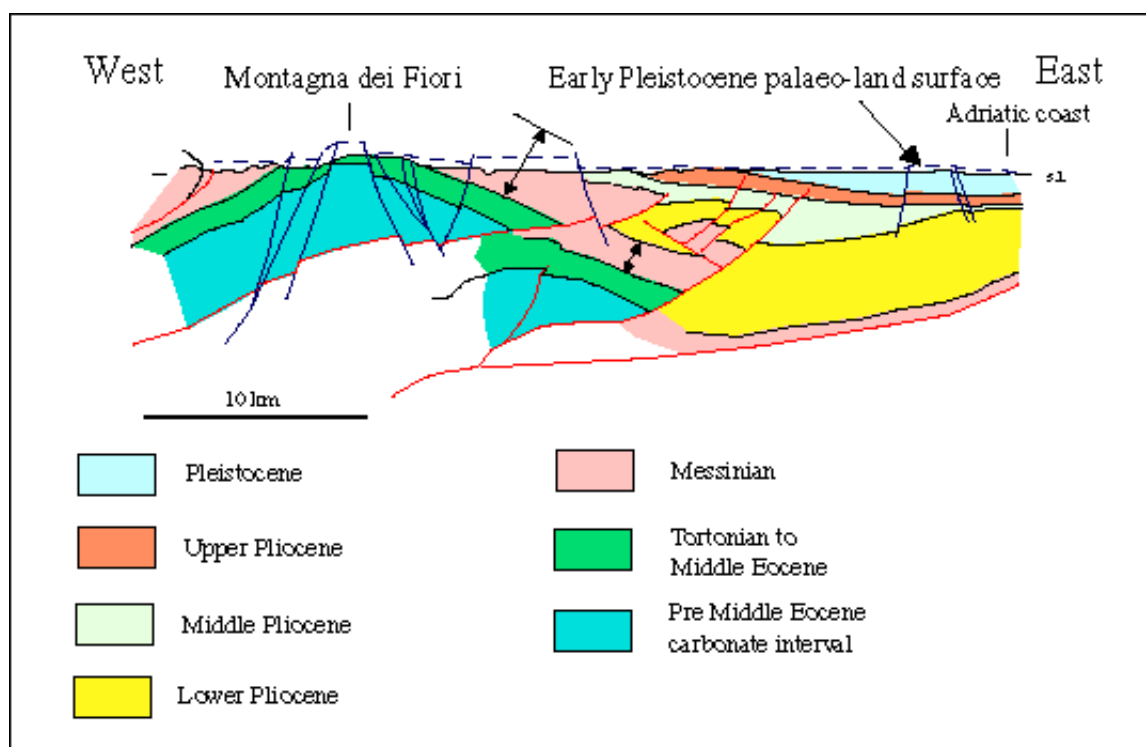


Figura 3 – Sezione geologica all'altezza del F. Tronto. Si noti il grande spessore del Pliocene Inferiore (Fm del Cellino) nel sottosuolo, mentre in superficie è coperto dal sovrascorrimento della Montagna dei Fiori e dall'arretramento del depocentro nel Pliocene Medio

Durante la deposizione avveniva anche la deformazione, con l'innalzamento del grande sovrascorrimento noto come "struttura costiera". I depositi sabbioso-pelitici torbiditici del Pliocene inferiore, noti con il nome di Formazione del Cellino tendono ad avere una geometria di crescita, con numerose discordanze progressive o abrupte, ed in generale una diminuzione delle sabbie verso gli . In figura 3 si nota il grande spessore dei depositi pliocenici inferiori, e la loro deformazione ad opera dell'importante struttura della Montagna dei Fiori. Un'aumento locale della subsidenza nel settore avvenne con il Pliocene Medio, con il risultato di ottenere l'appoggio in trasgressione di sabbie e ghiaie di mare basso al di sopra dei depositi Messiniani del lembo frontale dell'anticlinale della Montagna dei Fiori, ma anche di accumulare una notevole quantità di depositi di mare profondo nel bacino antistante (Fig. 3). A scala più ampia, di catena, la sezione di Fig. 4 permette di apprezzare la prominente struttura costiera, che tende ad assorbire la gran parte della deformazione compressiva pliocenica. Il serbatoio profondo "Palazzo Moroni" è situato

sul lembo occidentale della struttura costiera, caratterizzato dalle strutture in crescita visibili in Fig. 4.

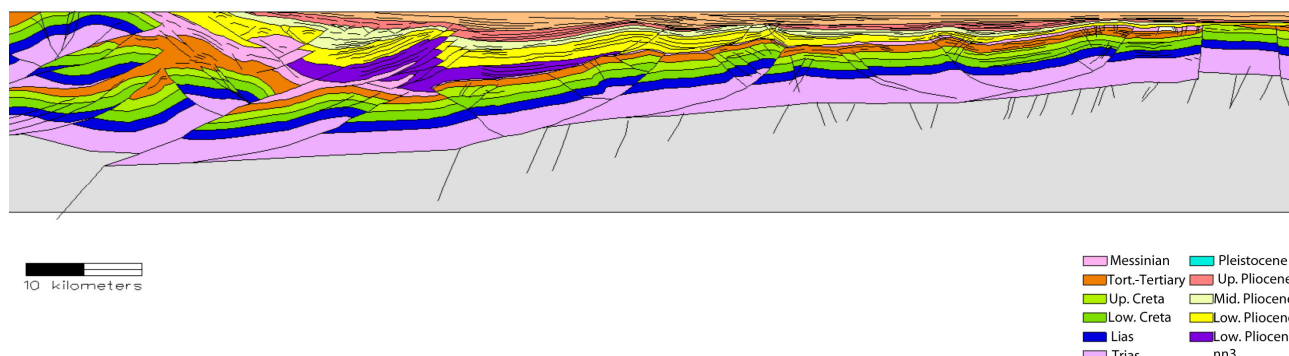


Figura 4 – Sezione geologica basata su linee sismiche all'altezza della Valle del Tronto. Si noti la struttura costiera, con il suo grande spessore di Pliocene Inferiore, viola (biozone nn1 – nn3) e giallo (nn3 – nn5)

L'attività di questa grande struttura si è protratta tra il Pliocene inferiore ed il Pliocene superiore (tra circa 5 e 2 Milioni di anni fa), come dimostra la presenza al di sopra di essa di depositi Pleistocenici poco o nulla deformati da questa piega.

Il serbatoio geologico profondo di Palazzo Moroni: caratteristiche del giacimento

Stratigrafia

La successione litostratigrafica dall'alto verso il basso è costituita dai seguenti intervalli:

- **Quaternario e Pliocene superiore** (0 --- 575 m): successione argillosa, localmente siltoso-sabbiosa di sedimenti marini, con tendenza *shallowing up*.

- **Pliocene medio** (575----1070 m): Argille siltose con intercalazioni, nella parte basale, di sabbie argillose.

- **Pliocene inferiore** (1070----1374 TD m):

Intervallo 1070----1257,5 m: Argilla marnosa con intercalazioni siltose.

Intervallo 1257,5----1349 m: Sottili alternanze di argille siltose, di silt e di sabbie argillose, passanti ad arenarie poco consolidate da molto fini a fini.

Intervallo 1349----1374 m: Argilla marnosa.

La roccia di copertura è molto potente da 1257,5 (top reservoir) a 1070 m (oltre 180 m) ed è

costituita da argilla marnosa con passaggi siltosi.

Il top del *reservoir* è stato rinvenuto alla profondità di 1257,5 m RT (1107 mssl) mentre il bottom è stato posizionato a 1349 mRT (1198,5 mssl).

Lo spessore totale di 91,5 m è compreso fra 2 formazioni argillose, la mineralizzazione riguarda uno spessore di 80 m (*gross pay*) avendo individuato la presenza della tavola d'acqua GWC a 1337,5 m RT (1187 mssl).

In generale, la litologia del serbatoio profondo può essere descritta come un'alternanza molto fitta di strati sottili di sabbia o arenaria poco consolidata con intercalazioni di argille siltosa e siltiti.

I livelli sabbiosi hanno spessori variabili da qualche centimetro a qualche decimetro, così come le intercalazioni argillose che tuttavia mostrano una componente detritica non trascurabile.

Queste indicazioni, accompagnate dalle informazioni derivanti dal comportamento produttivo, consentono di affermare che questo sistema geologico complesso è dinamicamente un unico serbatoio eterogeneo dal punto di vista petrofisico (Figura 5 e Tabella 1).

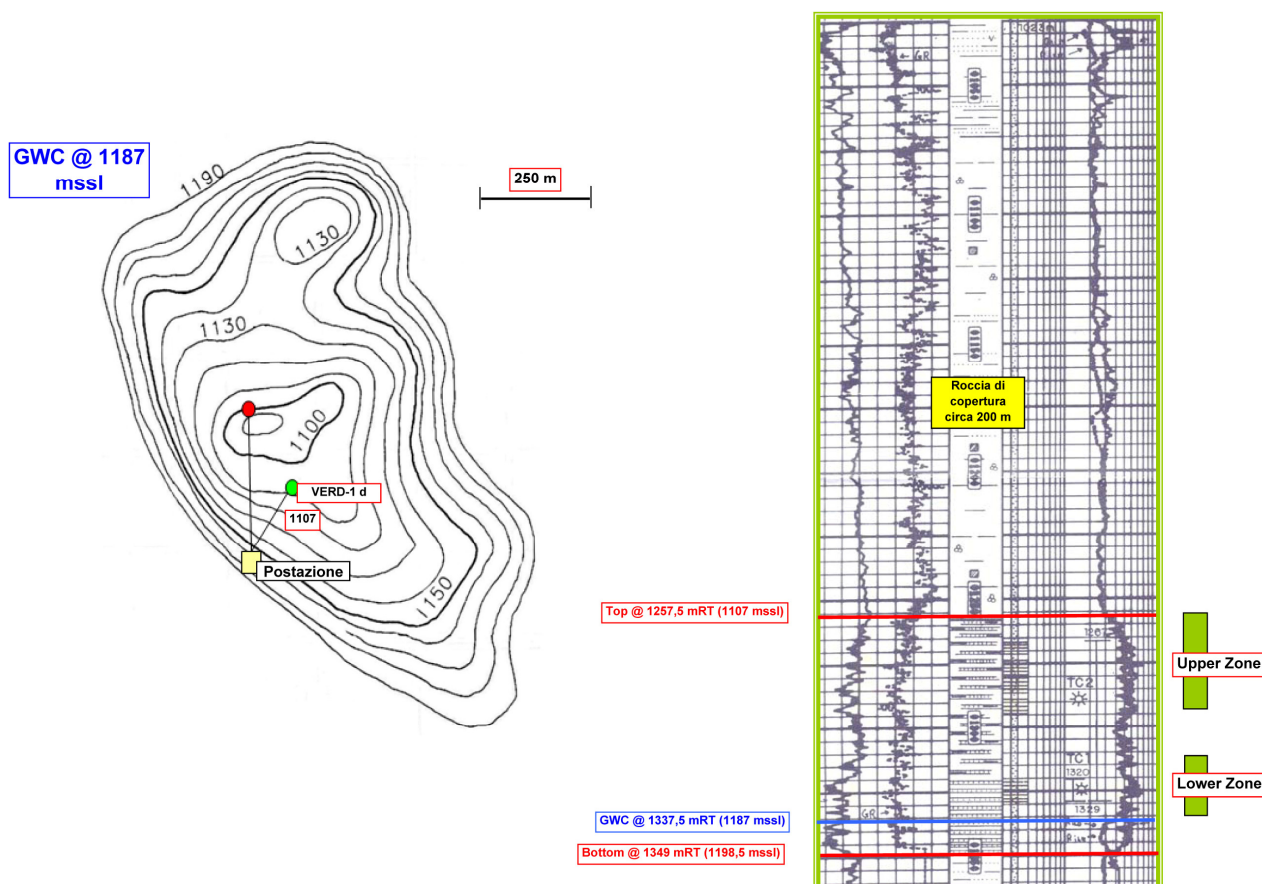


Figura 5 – Stralcio di log del pozzo Verdicchio 1 –d e sua posizione sulla culminazione dell'anticlinale, segnata dai contour di linee. Sono indicate le caratteristiche di tetto e letto dell'intervallo serbatoio e la posizione originale del contatto Gas – Acqua (GWC).

Assetto strutturale

La struttura del serbatoio Palazzo Moroni è una brachianticlinale con asse allungato in direzione NNW-ESE e forte immersione assiale in entrambe le direzioni, a disegnare una struttura domiforme. In sezione (Fig. 6) si vede come questa struttura appartenga al grande lembo occidentale della struttura costiera, come dimostrano i riflettori immergenti ad ovest, che si trovano immediatamente sopra la discordanza posta intorno ai 900 msec (unc. in Fig. 6). Questa discordanza separa due domini di giaciture. L'analisi delle pendenze di strato rilevate in pozzo ha fornito i seguenti risultati:

- da 230 m (inizio registrazione) a 575 m: strati suborizzontali
- da 575 a 1195 m: aumento progressivo delle pendenze da 2-4° a 20-22° con immersione SW
- da 1195 a 1255 m: pendenze di 10-12° con immersione SW
- da 1255 a 1360 m: Rottura di continuità corrispondente ad una discordanza angolare verso 1255 m, da qui in poi gli strati immergono verso NE (inversione di azimuth) con pendenze di 18-24°.

La struttura anticlinalica del serbatoio è dovuta ad uno scollamento più superficiale rispetto a quello responsabile della struttura costiera, interpretato alla base dei depositi terrigeni (Messiniano, Fig. 4). Anche se queste strutture non sono chiaramente visibili in Fig. 6, si ipotizza che lo scollamento principale possa essere all'interno della successione del Pliocene, poche centinaia di metri al di sotto del culmine. La discordanza di cui sopra è quindi da imputare alla disattivazione di questo scollamento superficiale ed all'approfondimento del livello di scollamento.

In Fig. 7 si presenta una interpretazione aggiornata della culminazione del campo, in cui sono visibili alcune piccole faglie ad alto angolo, individuabili anche sulla linea sismica di Fig. 6. La presenza di faglie normali, abbastanza comuni presso la culminazione delle anticlinali della struttura costiera e altrove, in questo caso non è in grado di compartimentare il serbatoio, che si comporta come un unicum da un punto di vista idraulico.

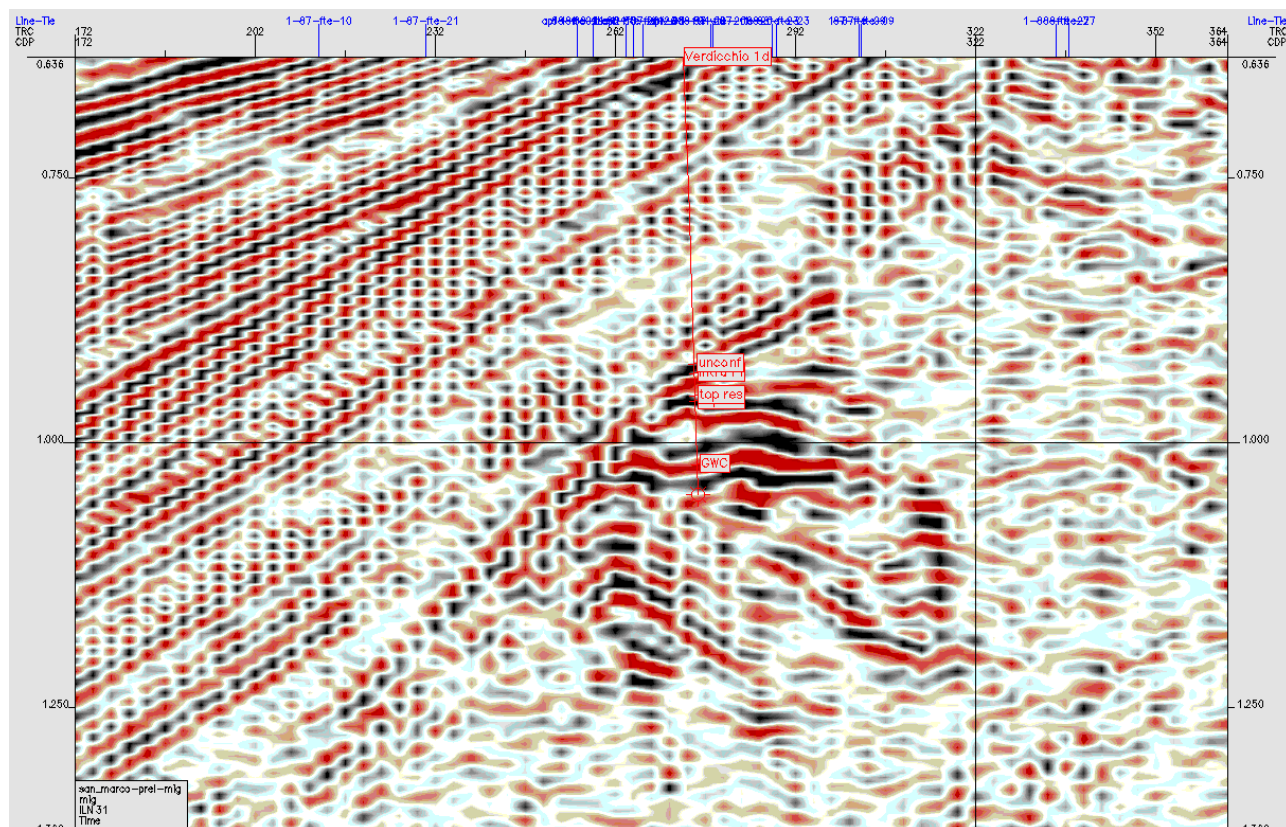


Figura 6 – Stralcio di linea sismica Ovest – Est che attraversa il serbatoio profondo dello stoccaggio “Palazzo Moroni”.

Si noti la stretta anticlinale e l’omogenea immersione verso ovest dei riflettori della successione di copertura.

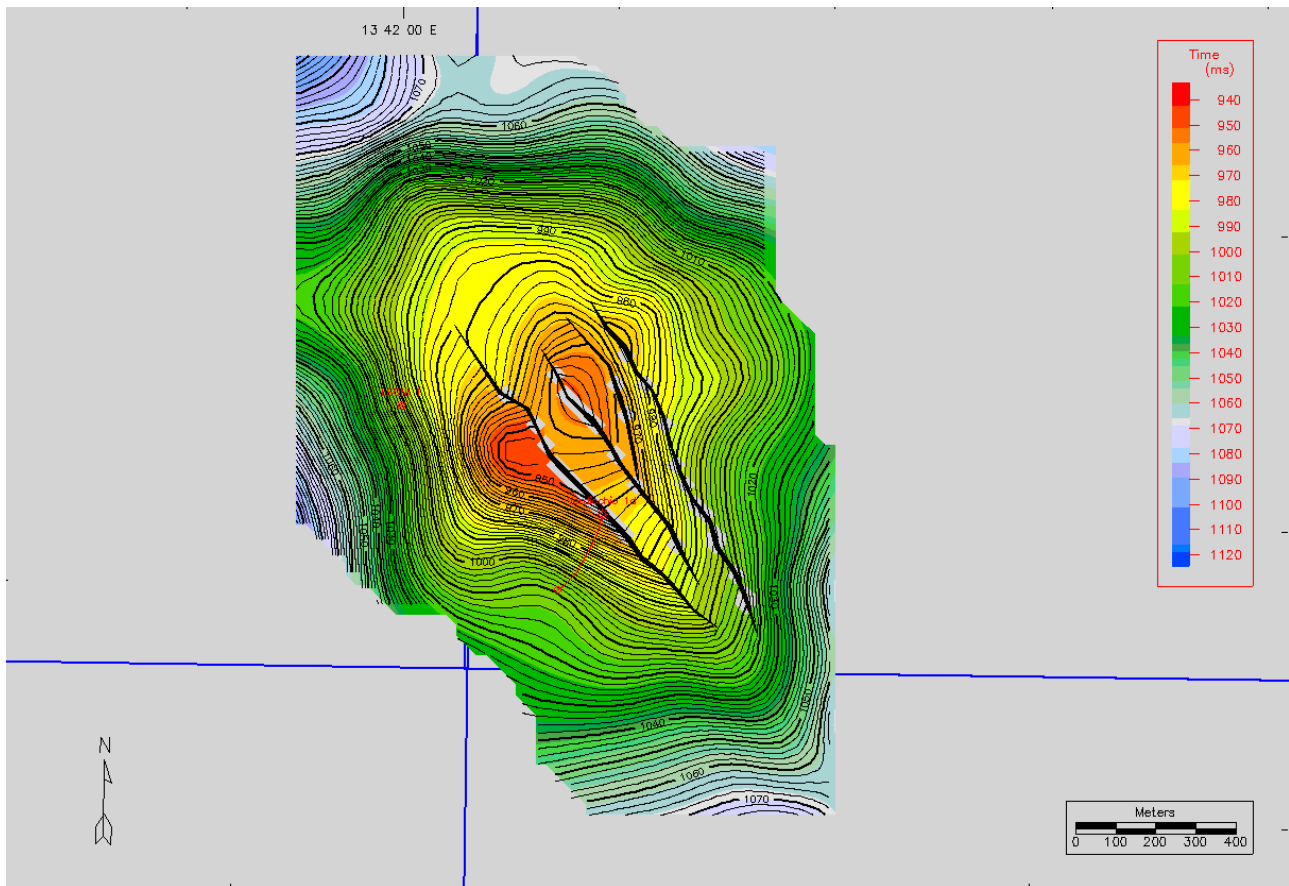


Figura 7 – Mappa delle isocrone del tetto del serbatoio nel campo Palazzo Moroni. Si notino le faglie normali allungate lungo il piano assiale dell’anticlinale.

Parametri iniziali di giacimento, caratterizzazione dei fluidi e della roccia

Parametri iniziali di giacimento

Le condizioni statiche di riferimento sono rappresentate dalla pressione e dalla temperatura con riferimento al datum del giacimento, dal gradiente idraulico dei pori e dal gradiente termico presentati qui di seguito :

- Datum del giacimento 1150 mssl (1300,5 mRT)
- Pressione iniziale di giacimento $P_i = 129,2 \text{ Kg/cm}^2\text{a}$ al datum
- Temperatura di giacimento $T = 38 \text{ }^\circ\text{C}$ al datum
- Gradiente idraulico dei pori $\gamma_i = 0,1128 \text{ kg/cm}^2\text{/m}$
- Gradiente termico $\gamma_T = 0,033 \text{ }^\circ\text{C/m}$

Caratterizzazione dei fluidi e della roccia

Utilizzando le correlazioni statistiche correnti in letteratura sono stati ricostruiti i parametri PVT del gas, le caratteristiche dell’acqua e della roccia.

La composizione molare media del gas prodotto è presentata nella tabella seguente:

Composizione molare	
Comp.	%
C1	99,9
C2	0,05
C3	0,02
N2	0,03
Totale	100,00

I parametri PVT del gas alle condizioni iniziali di pressione e temperatura sono riportati nella tabella seguente:

Pi (Kg/cm ^{2a})	Ts (°C)	μgi (cp)	Zi (ad)	Bgi (mc/Smc)
129,2	38	0,015	0,8464	0,00725

Le caratteristiche dell'acqua di strato sono presentate nella tabella seguente:

Salinità acqua di strato NaCl = 25 g/l Pressione di strato Pi = 129,2 Kg/cm ^{2a} Temperatura di strato Ts = 38 °C
Fattore di volume dell'acqua Bw = 1,001 mc/mc Viscosità acqua di strato (Pi,Ts) μw = 0,707 cp Compressibilità acqua di strato (Pi,Ts) Cw = 4,046 10⁻⁵ 1/Kg/cm²

Le caratteristiche petrofisiche della roccia di giacimento sono presentate nella tabella seguente:

Pressione di strato Pi = 129,2 Kg/cm ^{2a} Porosità φ = 20,4% Profondità media da PC = 1230 m
Compressibilità della roccia (Pi,Ts) Cf = 4,55 10⁻⁵ 1/Kg/cm²

Dati e storia della produzione primaria

La produzione è iniziata nel dicembre 1989 attraverso il pozzo VERD-1d. La produzione si è mantenuta costante per circa 2 anni (1992) con un elevato ritmo (circa 100.000 Smc/g) per poi declinare (ottobre 2002 si registra una portata di acqua di 1354 l/g) fin sotto 10.000 Smc/g alla fine del 1995 e attestarsi infine ad una portata di circa 4.000 Smc/g per 12 anni e tuttora in produzione. Non viene registrata produzione d'acqua. La produzione cumulativa di gas al 28-02-2011 è di circa **199.74 MSmc**. I parametri erogativi attuali del pozzo VERD-1d sono i seguenti:

- q gas = 2.800 Smc/g
- FTHP = 18 Kg/cm²

Non si rileva produzione d'acqua perché con Tbg 3 ½" la portata di esercizio attuale (2800 Smc/g)

non consente il trascinamento dei liquidi a giorno ($Q_{\text{gas min}}$ di trascinamento liquidi deve essere $>$ di 40.000 Smc/g).

Nel dicembre 2003 è stato realizzato un'ampliamento spari (1304-1307, 1312-1316 mRT) senza rilevare benefici nel senso che le zone aperte si sono rivelate depletate come il resto degli intervalli precedentemente aperti a dimostrare che esiste comunicazione idraulica all'interno del *reservoir* anche se non direttamente aperto.

L'andamento della produzione storica al 28-02-2011 viene proposto nella figura 8:

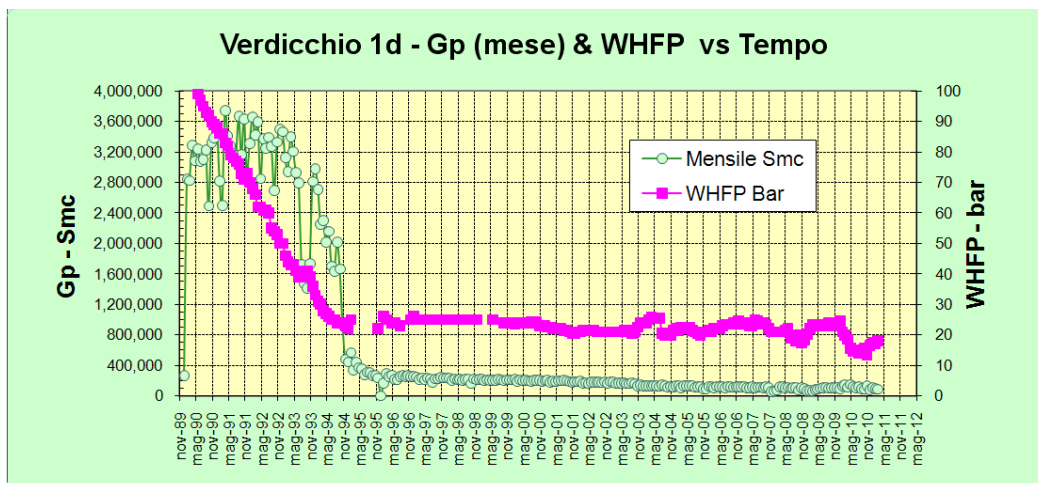


Figura 8 – Storia della produzione ed andamento delle pressioni statiche.

Le pressioni originarie del gas sono prossime al gradiente idrostatico, ad indicare una scarsa spinta dall'acquifero, che interviene a mantenere una debole pressurizzazione solo in fase di depletamento (Fig. 8) ed una sostanziale portanza dell'impalcatura granulare della roccia.

Potenziali fattori di rischio geologico

Come richiesto dalla legge, il Rapporto di Sicurezza deve individuare i pericoli di incidente rilevante, in questo caso legati a possibilità di fuga di gas dal serbatoio per rottura delle rocce di copertura in conseguenza di operazioni di stoccaggio o per sismicità naturale, oppure per scarsa tenuta idraulica dei pozzi utilizzati. Di seguito verranno presi in considerazione separatamente i diversi fattori di rischio, tenendo conto delle caratteristiche del serbatoio descritte nei capitoli precedenti.

Rischio di rottura del serbatoio e/o della roccia di copertura (sismicità indotta e/o attivata) e conseguenti fughe di gas verso la superficie

Come già descritto in precedenza, la possibilità di rottura (fratturazione e/o fagliazione) del serbatoio e della roccia di copertura e conseguente fuga di gas verso la superficie è funzione della intensità di perturbazione poroelastica nel serbatoio, e delle caratteristiche di resistenza al taglio delle rocce di copertura. La perturbazione poroelastica dipende dalle caratteristiche petrofisiche del serbatoio e dalle pressioni di esercizio. La roccia di copertura, in questo caso, è costituita da una potente serie argilloso marnosa (circa 180 m) in condizioni di pressione di confinamento data dal carico litostatico di oltre 1000 m di roccia.

Si ricorda che le norme europee, recepite a livello nazionale (UNI-EN 1918) e basate sull'esperienza internazionale di oltre 80 anni di gestione di stoccaggi in unità geologiche profonde, definiscono la soglia di pressione limite per mantenere condizioni di sicurezza al 40% oltre il gradiente idrostatico. A questo valore massimo potrebbero attenersi anche gli stoccaggi che desiderano aumentare la pressione rispetto a quella originale. Nel caso di Palazzo Moroni, la massima pressione statica di esercizio non supererà quella originale, che è prossima al gradiente idrostatico. A questo minimo gradiente di pressione, le caratteristiche petrofisiche della roccia serbatoio, soprattutto porosità e diffusività idraulica, sono sufficienti per evitare lo sviluppo di perturbazioni poroelastiche tali da imporre sforzi sulla roccia che possano avvicinarsi al suo punto di rottura. Dunque, nonostante la presenza di perturbazioni e quindi di tensioni, con conseguente possibile microsismicità, come vedremo in seguito, si esclude che nel caso in esame si possano accumulare tensioni tali da raggiungere la rottura della roccia di copertura.

Un lavoro di Van Eck et al., (2006) discute in modo statistico la microsismicità dovuta allo sfruttamento di alcune decine di giacimenti di gas olandesi (con $M \leq 3.5$). Si tratta di una situazione abbastanza simile a Palazzo Moroni, ove i microsismi sono associati all'attività di estrazione in rocce serbatoio a porosità primaria e poco cementate, situate a profondità di norma < 2 km. Gli autori valutano che questa microsismicità non influenzi la tenuta delle rocce di copertura, e costruiscono un modello che determina lo scuotimento in superficie in termini di PGA (Peak Ground Acceleration), arrivando a delineare un quadro sismico in cui la sorgente sismica fornisce localmente un aumento percentualmente rilevante del PGA (compreso tra 0,2 e 0,3 g). Pur non essendo nota la microsismicità per Palazzo Moroni, si ricorda che in questo settore non sono rilevati sismi dalla rete nazionale INGV, in grado di registrare a partire da $M 2,5 - 3$, dunque la microsismicità, se pur presente, non può superare questi valori. Pertanto anche il PGA associato

alla microsismicità, nel caso in esame è minore, e comunque più basso di quello dovuto alla sismicità naturale, previsto dalla normativa vigente per la zona di Sant'Elpidio a Mare (vedi capitolo successivo).

In ogni caso, la maggioranza dei casi di microsismicità noti in letteratura documentano che un'attenta conduzione delle operazioni di pompaggio e la verifica periodica delle pressioni statiche, unite alle conoscenze del giacimento provenienti dalla fase di sfruttamento primario, sono in grado di fornire indicazioni operative circa il comportamento geomeccanico della roccia serbatoio e di copertura.

In un recente lavoro, Evans (2009) ha preso in esame tutti gli incidenti noti nei paesi ove si sono sviluppati gli stoccaggi in corpi geologici profondi (UGS). In nessun caso si sono avuti cedimenti della roccia di copertura, e gli unici casi di fughe verso la superficie sono avvenuti a causa della connessione alla superficie dovuta a pozzi non cementati di cui non era nota l'ubicazione. Questo è potuto succedere in stati (California) ove l'esplorazione selvaggia degli anni 20 e '30 del secolo scorso aveva prodotto una simile situazione. Nulla di ciò potrebbe succedere in Europa ed in Italia, ove tutti i pozzi sono censiti e chiusi minerariamente in modo controllato.

Si ritiene quindi che la roccia di copertura del serbatoio di Palazzo Moroni sia sicura rispetto alle operazioni di stoccaggio, per le quali è previsto un controllo continuo, mediante i pozzi di monitoraggio, della dissipazione delle pressioni a fine delle operazioni di pompaggio ed erogazione, che, unitamente al mantenimento delle pressioni originarie, permetterà evitare cedimenti della copertura della roccia serbatoio.

Sismicità naturale

Premessa sulla normativa sismica

La normativa regionale è data dalla "Deliberazione della G.R. n. 1046 PR/CMF del 29/07/2003. Indirizzi generali per la prima applicazione dell'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274/2003 - individuazione e formazione dell'elenco delle zone sismiche nella Regione Marche", aggiornata dalla D.G.R. n. 136 del 17 febbraio 2004.

L'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n°3274 del 20 marzo 2003 definisce i "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica".

Il comune di Sant’Elpidio a Mare rientra nella Zona Sismica 2: l’ordinanza n°3274/2003 ha aggiornato la classificazione prevista dal D.M. 14 maggio 1982. La Zona 2 è definita come zona a **sismicità media**, dove gli eventi sismici possono creare gravissimi danni, anche se non di tipo catastrofico. Ogni zona è individuata mediante valori di accelerazione massima del suolo a_g con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, riferiti a suoli rigidi caratterizzati da $V_s > 800$ m/s. Per il Comune di Sant’Elpidio a Mare (Fig. 9):

zona 2	accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni [a_g]	accelerazione orizzontale massima convenzionale di ancoraggio dello spettro di risposta elastico [a_g]
	$0,15 < a_g \leq 0,25$	0,25 g

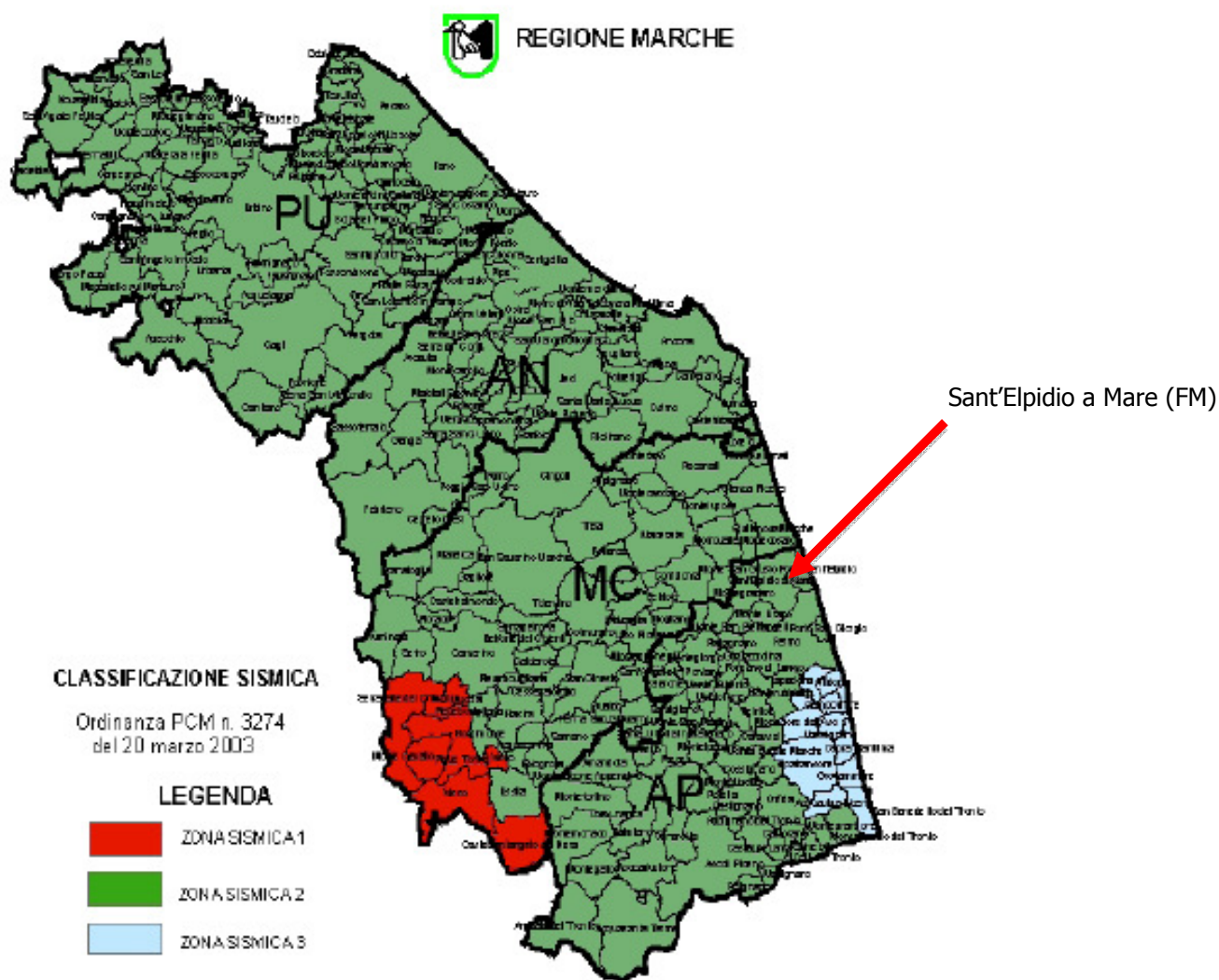


Figura 9 - Classificazione sismica delle Marche (D.P.C.M. 3274/2003)

Possibilità di rottura del serbatoio in seguito a sollecitazione sismica naturale

La pratica di produzione e stoccaggio idrocarburi ha prodotto una notevole serie di dati da cui si evince che la presenza di sismi in prossimità del giacimento o dello stoccaggio non ha particolari effetti sulla rottura delle rocce serbatoio. Questo fatto, testato anche per sismi di $M > 7$ (per es. nel settore nordoccidentale di Taiwan, terremoto del Chi Chi, 1999) implica che l'ovvia perturbazione poroelastica associata al passaggio delle onde sismiche viene dissipata agevolmente dalle rocce porose, perlomeno nell'ambito delle profondità dei giacimenti. Più in profondità, nei dintorni dello strato sismogenetico (nel caso di Palazzo Moroni è dubitativamente posto tra gli 8 ed i 15 km di profondità) si ipotizza che la perturbazione poroelastica, di intensità maggiore a causa delle maggiori tensioni, produca una caduta del livello delle tensioni efficaci tale da permettere il corteggio di sismi che costituiscono il cosiddetto sciame di *aftershock*.

Nel caso di Palazzo Moroni, l'intensità massima prevista, anche se il tempo di ritorno non è chiaramente determinato, è circa di $M > 5,5$. Bisogna tenere presente che i valori di accelerazione massima previsti dalla normativa sismica si riferiscono alla superficie, mentre nel caso del sottosuolo, le pressioni di confinamento e l'assenza di onde superficiali tendono a diminuire i valori di scuotimento previsti. Tuttavia, essendo impossibile determinare per via sperimentale la resistenza della roccia serbatoio alla rottura in seguito a terremoti di questa intensità, si potrebbe cercare di costruire modelli fisici, basati perlopiù su dati indiretti e assunzioni. In alternativa, ed in modo più pratico, è possibile leggere l'assetto geologico – strutturale del serbatoio Palazzo Moroni come un esperimento naturale ove il giacimento, con le pressioni originarie allineate al gradiente idrostatico, è stato sottoposto a tutti i possibili sismi con tempo di ritorno di migliaia o decine di migliaia di anni, integrati nei 3 Milioni di anni di storia del sito. Con questa chiave di lettura diventa possibile affermare la sostanziale assenza di possibilità di rottura del serbatoio in seguito a sismi naturali.

Rischio di incendio ed esplosione

L'incendio è una combustione che si sviluppa in modo incontrollato nel tempo e nello spazio. La combustione è una reazione chimica tra un corpo combustibile e un corpo comburente. In genere i combustibili sono numerosi: legno, carbone, carta, petrolio, gas combustibile, ecc. Il comburente che interviene in un incendio è l'aria o, più precisamente, l'ossigeno presente nell'aria.

L'esplosione è una combustione a propagazione molto rapida con violenta liberazione di energia. Può avvenire solo in presenza della cosiddetta «atmosfera esplosiva» (miscela con l'aria di sostanze infiammabili allo stato di gas, vapori, nebbie o polveri). L'esplosione avviene solo nel caso in cui la concentrazione in volume della miscela sia all'interno del campo d'esplosività inteso come l'intervallo tra il limite inferiore d'esplosività (bassa concentrazione di gas con l'ossigeno al di sotto della quale non si ha innesco) ed il limite superiore d'esplosività (alta concentrazione di gas al di sopra della quale non si ha innesco). Per il metano il campo di esplosività è compreso tra il 5% ed il 15% (percentuale in volume)

Nel nostro caso il gas presente nel giacimento si trova in pressione ed in un ambiente anaerobico e quindi non è a contatto né con il comburente né con possibili inneschi.

Per quanto sopra si può escludere ogni possibile rischio di incendio ed esplosione all'interno della roccia serbatoio.

Bibliografia

Evans D.J., 2009, A review of underground fuel storage events and putting risk into perspective with other areas of the energy supply chain. In: Evans D.J. and Chadwick R.A. (eds) Underground gas storage: Worldwide experiences and future developments in UK and Europe. *The Geological Society of London Special Publications*, 313, 173-216.

Van Eck T., Goutbeek F., Haak H. and Dost B., 2006, Seismic hazard due to small-magnitude, shallow-source, induced earthquakes in The Netherlands. *Engineering Geology*, 87, 105-121.