



Ricerca di Sistema elettrico

Raccolta delle informazioni, ricostruzione critica delle attività pregresse e rilievo geostrutturale

A. Plaisant, D. Multineddu, R. Cara

RACCOLTA DELLE INFORMAZIONI, RICOSTRUZIONE CRITICA DELLE ATTIVITÀ PREGRESSE E RILIEVO GEOSTRUTTURALE

A. Plaisant, D. Multineddu, R. Cara (SOTACARBO)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto B.2: Cattura e sequestro della CO₂ prodotta dall'utilizzo dei combustibili fossili

Obiettivo: Parte B1 - c - Monitoraggio e storage della CO₂

Task: c.1- Raccolta delle informazioni, ricostruzione critica delle attività pregresse e rilievo geostrutturale

Responsabile del Progetto: ing. Stefano Giammartini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *“Studi sull'utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO₂”*

Responsabile scientifico ENEA: ing. Paolo Deiana

Responsabile scientifico SOTACARBO: ing. Enrico Maggio

Indice

SOMMARIO.....	4
ALLEGATO A.....	5
ALLEGATO B.....	63
ALLEGATO C.....	100

Sommario

Il presente lavoro si inserisce nell'ambito dell'Accordo di Programma MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico, Piano Annuale di Realizzazione 2013, relativamente al tema di ricerca B.2 "Cattura e sequestro della CO₂ prodotta dall'utilizzo di combustibili fossili" e riguarda le attività c.1 "Raccolta delle informazioni, ricostruzione critica delle attività pregresse e rilievo geostrutturale".

Il documento descrive le attività riguardanti la raccolta delle informazioni attualmente disponibili sull'assetto geologico dell'area, l'elaborazione del rilievo geologico-strutturale e la ricostruzione critica delle attività pregresse già realizzate nell'area di studio.

Il documento comprende due allegati A e B. Il primo è costituito dalla mappatura delle faglie e dal rilevamento strutturale che ha previsto una revisione dei dati esistenti, basata sulle carte geologiche pubblicate e su una rivisitazione in campagna dei dati regionali. E' stata inoltre svolta l'analisi della deformazione fragile e sono stati raccolti dati sulla fratturazione e fagliazione sulle rocce di copertura e del potenziale reservoir.

L'allegato B comprende la valutazione delle informazioni e dei dati disponibili sul giacimento, frutto di attività di prospezione mineraria pluridecennale sul carbone, inoltre vengono descritte le attività di caratterizzazione del reservoir avvenute in passato nell'area di studio attraverso una campagna di sismica di superficie a riflessione e una campagna di sondaggi profondi e successive analisi in laboratorio, correlate con modellazioni numeriche per la stima delle potenzialità del sistema di confinamento.

Allegato A



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Raccolta delle informazioni, ricostruzione critica delle
attività pregresse.

Rilievo geostrutturale

S. Bigi
C. Tartarello
L. Ruggiero
D. De Angelis
P. Sacco
S. Lombardi

1. Introduzione

La presente relazione descrive gli studi realizzati nel primo anno delle attività di ricerca finalizzate alla caratterizzazione geologica, geofisica e geochemica del bacino carbonifero eocenico del Sulcis. Tali attività costituiscono la base per la realizzazione di un sito idoneo allo stoccaggio geologico della CO₂ prodotta dall'uomo (*Carbon Geological Sequestration – CGS*) nella suddetta area. I primi studi effettuati negli anni precedenti da diversi Enti di ricerca hanno, infatti, messo in luce le potenzialità del sito ai fini dello stoccaggio (**CGS**): esistenza di acquiferi profondi (potenziali serbatoi per lo stoccaggio) sormontati da una coltre terrigena di copertura impermeabile con spessori superiori ai 400-500 m. All'interno della coltre di copertura si trovano, inoltre, letti di carbone che possono costituire una trappola secondaria per l'anidride carbonica in caso di una eventuale migrazione della CO₂ immagazzinata verso la superficie. Tali caratteristiche renderebbero il sito non solo idoneo ma anche unico al mondo.

Il bacino carbonifero del Sulcis si trova nella parte sud-occidentale della Sardegna (Italia), ed è caratterizzato da estesi depositi sub-bituminosi che coprono una superficie di circa 800 km² le cui riserve sono state stimate in circa 1,2 miliardi di tonnellate. L'unità produttiva in affioramento vicino alle città di Gonnessa e Bacu Abis immerge di circa 10° verso S-SW, raggiungendo profondità superiori agli 800-1000 m vicino alla costa e oltre 1500 metri in mare aperto. Questi depositi sono attualmente sfruttati a una profondità di circa 400 m utilizzando le tecniche di estrazione tradizionali nella parte settentrionale del bacino, ma la profondità e lo spessore delle unità verso sud rendono più difficile l'accesso rendendoli non sfruttabili economicamente.

Il progetto prevede diverse attività di indagine, che sono finalizzate alla caratterizzazione geologico-strutturale del giacimento, alla caratterizzazione geochemica e allo studio di fattibilità. Gli studi qui presentati riguardano la raccolta delle informazioni attualmente disponibili sull'assetto geologico dell'area, una ricostruzione critica delle attività pregresse, i dati ed i risultati del rilievo geologico-strutturale effettuato durante questo anno. Tali dati sono stati raccolti e sintetizzati in un ambiente 3D mediante il software Move della Midland Valley.

2. Attività svolta

La mappatura delle faglie e il rilevamento strutturale ha previsto una revisione dei dati esistenti, basato sulle carte geologiche pubblicate e su una revisione in campagna dei dati regionali. Una sintesi di questo lavoro è riportata nel capitolo 3 di questo report. Gran parte del lavoro di revisione è stato alla base della costruzione del modello 3D descritto nel capitolo 6 di questo report e disponibile nel formato .mve (Move 2014, Midland Valley).

E' stata svolta l'analisi della deformazione fragile e sono stati raccolti dati sulla fratturazione e fagliazione sulle rocce di copertura e del potenziale reservoir.

Per le faglie affioranti, dove possibile sono stati misurati gli elementi della zona di faglia al fine di una classificazione qualitativa della distribuzione della permeabilità (densità di fratturazione vicino al piano di

faglia, tipo di fratture, eventuali evidenze di circolazione di fluidi associati alla deformazione). Questi elementi sono stati inoltre messi in relazione con le emissioni di gas misurati attraverso due delle strutture considerate più significative. I risultati di questa attività sono riportati nel capitolo 4.

Per la fratturazione che interessa le rocce della copertura e del potenziale reservoir, sono stati eseguiti scan area e scan lines per un totale di circa 500 fratture (con relativi valori di spaziatura, lunghezza, apertura, etc.). Questa operazione è stata eseguita per le diverse litologie affioranti, e in particolare:

- Produttivo;
- F.ne Cixerri
- Rioliti
- Paleozoico_Calcari laminati.

Si prevede di completare questo tipo di analisi coprendo tutte le litologie affioranti, compresa la sequenza meso-cenozoica affiorante soltanto nella zona dell'Isola di Sant'Antioco. I risultati sono riportati nel capitolo 5 del presente report.

3. Sintesi delle conoscenze geologiche nella zona del Sulcis

La zona in esame è stata ampiamente studiata nel passato per la presenza dei giacimenti di carbone contenuti all'interno dei depositi eocenici paleogenici.

In generale, nella zona affiorano rocce che coprono un intervallo geologico piuttosto ampio, e che forniscono testimonianze di diverse fasi deformative, alcune delle quali ancora oggetto di diverse interpretazioni (CIT).

Sulla base di dati recentemente pubblicati nel Foglio n.564 Carbonia, scala 1:50.000, che costituiscono un'ottima sintesi della geologia dell'area, è possibile suddividere la successione sedimentaria presente nell'area in cinque gruppi principali, che dal più antico al più recente sono:

- Gruppo metamorfico ercinico
- Ciclo sedimentario mesozoico
- Ciclo sedimentario cenozoico
- Vulcaniti mioceniche
- Ciclo sedimentario pliocenico-quadernario.

Questa suddivisione è vantaggiosa anche ai fini della distinzione tra potenziale reservoir e seal. L'ipotesi di lavoro è infatti che il reservoir potenziale per lo stoccaggio sia costituito dalla successione carbonatica del ciclo meso-cenozoico e dal sottostante gruppo metamorfico ercinico, mentre il ciclo cenozoico e le vulcaniti possano costituire il seal. Questo lavoro è infatti dedicato alla valutazione del potenziale volumetrico dell'uno e della tenuta dell'altro.

Il ciclo metamorfico ercinico affiora immediatamente ad est della zona in esame, e ha una assetto strutturale tuttora dibattuto. Questa è il risultato quattro fasi deformative, una caledoniana e tre appartenenti all'orogenesi ercinica, che coinvolgono una successione terrigena e carbonatica di età compresa tra il Cambriano e l'Ordoviciano superiore. Ai fini di questo studio, tuttavia, la deformazione duttile associata alla

storia paleozoica di queste rocce è importante poiché definisce il fabric della roccia. La struttura interna di queste rocce, costituita dalla foliazione metamorfica, è marcatamente anisotropa, e può controllare anche la geometria delle strutture generate dalle successive fasi di deformazione. Questo vale soprattutto per faglie e fratture, a cui è legata la permeabilità secondaria di queste rocce.

Si distinguono diversi litotipi, sostanzialmente composti da alternanze tra carbonati e depositi terrigeni (metapeliti e metarenarie), di basso grado metamorfico (Franceschelli et al., 1992).

Il ciclo sedimentario mesozoico affiora solo nella parte meridionale della zona esaminata e può essere considerato uno dei punti di incertezza nella ricostruzione del modello geologico. Si tratta di una successione lacunosa composta da depositi carbonatici di mare poco profondo, in parte o completamente dolomitizzati, che coprono un intervallo temporale che va dal Trias medio al Cretacico inferiore. Come sarà illustrato nel capitolo del modello geologico, non avendo dati di pozzo completi per l'area in esame, utilizzando l'assetto in affioramento nella zona settentrionale dove non affiorano, nel sottosuolo si dovrebbe assistere ad un loro progressivo assottigliamento verso nord e verso est. In alternativa la loro mancanza al di sotto della zona costiera fino a S. Giovanni Suergiu, potrebbe essere dovuta alla presenza di faglie.

Il ciclo sedimentario cenozoico consiste in un ciclo sedimentario transgressivo-regressivo, composto da termini carbonatici (Calcarei a Formaniferi e F.ne del Miolitico) che passano verso l'alto a depositi marini e continentali (Lignitifero Auct.) passanti verso l'alto a depositi terrigeni (F.ne Cixerri). Questo ciclo sedimentario che ha una notevole importanza economica per questa regione, presenta variazione di spessore laterali ed ha la base tempo trasgressiva sui depositi sottostanti. In questo modo il basamento paleozoico è progressivamente ricoperto da depositi più giovani da W verso E. Questo ricopre importanza nella interpretazione dell'assetto geologico dell'area.

Il gruppo delle vulcaniti mioceniche è piuttosto complesso e comprende una notevole quantità di litotipi. Per una suddivisione speditiva si possono però distinguere due grandi gruppi, uno più basico, corrispondente alle andesiti, che costituiscono la base e uno successivo più acido, gruppo delle rioliti. Le ulteriori suddivisioni, proposte in base alla età e alle diverse composizioni mineralogiche possono essere rappresentate dallo schema di fig. 1 come proposte nel foglio Carbonia.

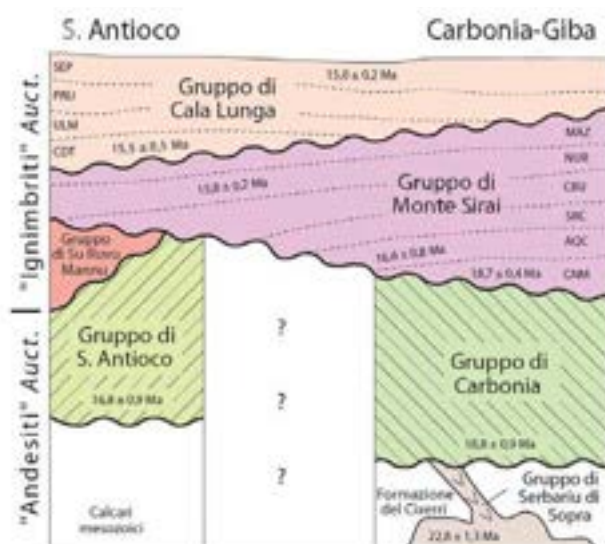


Figura 1 – Schema dei rapporti stratigrafici tra i vari gruppi del complesso vulcanico miocenico dell'area (da Note del Foglio 564 Carbonia)

Anche nel caso delle successioni vulcaniche si riscontrano le stesse incertezze di valutazione incontrate in precedenza che riguardano la continuità laterale (accentuata, in questo caso dalla natura dei depositi) e la variazioni di spessore. Come vedremo nella parte di caratterizzazione delle fratture, queste litologie presentano notevoli variazioni anche nello stato di fratturazione e quindi presentano una notevole varietà di valori di permeabilità secondaria.

Nelle sezioni geologiche e nelle ricostruzioni 3D si è mantenuta la suddivisione in due gruppi, che, se non supportata da dati di pozzo e geofisici, non potrà essere migliorata.

Il ciclo sedimentario pliocenico-quadernario copre in discordanza tutti i depositi descritti finora. Sono distinguibili tre principali unità deposizionali separate da superfici di erosione corrispondenti a fasi di incisione e terrazzamento e di età comprese tra il Pleistocene medio e l'Olocene.

Per quanto riguarda l'evoluzione strutturale, i suddetti cicli sedimentari scandiscono le principali fasi deformative, che possono essere riassunte come segue:

- Fase deformative paleozoiche che determinano gran parte della deformazione duttile per metamorfismo del basamento
- Fase oligo-miocenica che è responsabile dello sviluppo del bacino di Carbonia
- Fase distensiva associata al vulcanismo miocenico.

Le fasi deformative paleozoiche sono piuttosto complesse e l'analisi dettagliata delle deformazioni ad esse associate esula dagli obiettivi di questo lavoro. Sicuramente tuttavia esse hanno importanza in quanto il metamorfismo determina una progressiva riduzione della porosità primaria, e impone una notevole anisotropia nelle rocce. Le successioni interessate dal metamorfismo ercinico affiorano nel settore orientale della zona in esame e presumibilmente sono presenti in profondità al di sotto delle coltri meso-cenozoiche e mioceniche. Le principali direzioni deformative sono NW-SE e N-S, direzioni che caratterizzano anche le deformazioni più recenti, mentre le strutture più diffuse sono le pieghe alla meso- e alla macro-scala. I piani di sovrascorrimento hanno fasce deformative molto ampie, completamente silicizzate e sede di mineralizzazioni. Le deformazioni tardive associate sempre all'orogenesi ercinica sono costituite da faglie a direzione N-S, con cinematica normale o trascorrente. Anche queste strutture hanno zone di faglia con mineralizzazioni, che quindi mostrano un comportamento idraulico di tipo barriera. Inoltre queste strutture sono di età paleozoica e quindi coperte in discordanza dei depositi dei cicli sedimentari successivi. Tuttavia esse rappresentano delle discontinuità nel basamento che potrebbero essere state riattivate dalle fasi tettoniche successive. In parte riattivati sono i filoni magmatici associati a queste fasi.

La fase tettonica oligo-miocenica ha controllato la deposizione del ciclo sedimentario cenozoico. Si tratta di strutture compressive (pieghe e faglie inverse) con due principali direzioni: N-S le più antiche, che coinvolgono la successione meso-cenozoica e E-W le più recenti. Queste ultime, grandi pieghe regionali ad assi E-W avrebbero controllato lo sviluppo del bacino che ospita la F.ne di Cixerri, senza interessare però le successive coltri vulcaniche burdigaliane.

La fase distensiva miocenica interessa i termini delle vulcaniti che sono dislocati da faglie normali di importanza regionale e con rigetti intorno ai 100 m. Gran parte della fratturazione rintacciabile nei depositi vulcanici è da associare alla attività di queste strutture. Si distinguono diversi sistemi:

- 1) Sistema NE- SW e N-S, che affiora principalmente nella zona ad est di Caronia, interessa le vulcaniti andesitiche ed è associato alla messa in posto delle strutture filoniane. Dove è stato possibile presenta cinematiche normali e trascorrenti sinistre.
- 2) Sistema NW-SE, più recente del precedente, interessa gli stessi terreni.
- 3) Sistema NW-SE e NNE-SSW associato alla messa in posto del più recente vulcanismo acido riolitico-dacitico. Affiorano principalmente nella zona ad ovest di Carbonia e nell'Isola di S. Antioco. Hanno rigetti massimi di 50 m.

Queste faglie risultano di solito sigillate dei depositi vulcanici miocenici più recenti. Sono tuttavia segnalate altre faglie che hanno attività successiva, a principale direzione N-S. Tra queste la struttura principale prende il nome di Faglia di Maladroxia, e passa immediatamente ad est dell'isola di S. Antioco. A questa sono associati inspessimenti della successione quaternaria di circa 240 m (Carrozzo et al., 1991; Cristini et al., 1982; Bertorino et al., 1981).

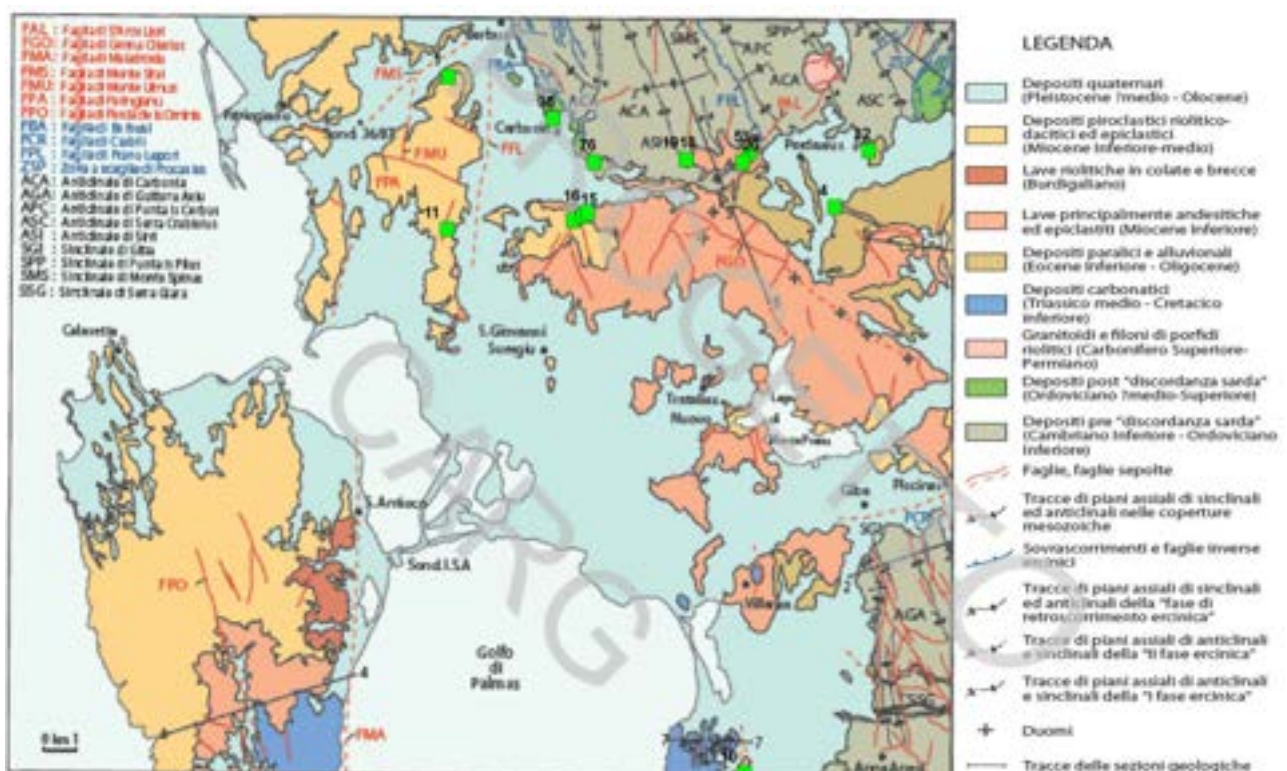


Figura 2- Schema strutturale dell'area e delle zone limitrofe, tutte comprese nel F. Carbonia. sono indicate le principali faglie presenti nell'area e le stazioni di misura eseguite in questo studio.

4. Mappatura delle faglie e rilevamento strutturale

4.1 Descrizione dell'assetto strutturale attuale

Il bacino del Sulcis occupa il settore sudorientale della Sardegna. La zona pianeggiante è circondata da rilievi, dove affiorano formazioni diverse a testimonianza di una complessa evoluzione geologico-strutturale. Ad est della città di Carbonia sono presenti i rilievi dove affiorano le sequenze paleozoiche, metamorfosate dall'orogenesi ercinica. A sud di queste affiora il ciclo delle andesiti, che devono la loro messa in posto alla tettonica distensiva miocenica. A nord e nella parte centrale si rinvencono invece i cicli più recenti delle rioliti e daciti, mentre ad ovest e a sud fino all'Isola di S. Antioco sono presenti i depositi del ciclo mesozoico.

Ad ovest di Carbonia si distinguono due depressioni vallive, orientate circa N-S, entrambe controllate da faglie non affioranti, che ribassano i terreni più recenti affioranti nell'area (cicli vulcanici dacitici e riolitici). La dorsale di M. Ulmus, tra le due valli costituisce anche una soglia tra il bacino settentrionale, dove sono attualmente situate le miniere di carbone, e quello meridionale, oggetto di questo studio.

La valle più ad ovest si estende a Nord di S. Antioco e, come descritto nel precedente paragrafo presenta attività pliocenico-quadernarie, dovute alla faglia di Maladroxia. La valle più a est, che si estende tra Carbonia e S. Giovanni Suergiu risulta anche essa piuttosto recente, tenendo conto che strutture minori, a direzione N-S sono rintracciabili nella valle e tagliano le vulcaniti mioceniche.

Tutte queste strutture dislocano in profondità un basamento carbonatico metamorfico ricoperto dai diversi cicli sedimentari.

L'assetto descritto è fortemente complicato dalle notevoli variazioni di spessore dei suddetti cicli sedimentari, che non hanno grande continuità laterale o a causa della loro natura (ad esempio i depositi vulcanici) o a causa delle fasi tettoniche che ne hanno controllato la deposizione.

Gran parte delle litologie interessanti per lo scopo di questo lavoro non affiorano nella zona considerata, ma nelle zone limitrofe. L'analisi della deformazione si è quindi distribuita nei rilievi circostanti, dove le litologie sepolte nel bacino affiorano e dove è stato quindi possibile osservare direttamente faglie e fratture alla scala dell'affioramento. I siti di misura sono rappresentati in figura 2.

4.2 Rilevamento strutturale e caratteristiche delle zone di faglia

Nella zona in esame sono state effettuate 15 stazioni strutturali che hanno permesso di riconoscere le principali direzioni di fratturazione e fagliazione presenti nell'area. Le misure raccolte sono elencate nell'allegato 1 della presente relazione, dove sono state annotate le osservazioni svolte in campagna e le posizioni delle scanline e scanarea.

Come direzioni principali, queste seguono la distribuzione delle faglie regionali. Come si può vedere dall'allegato 2 dove sono presentate le proiezioni dei dati sul reticolo di Schmidt, gran parte delle fratture

estensionali e di taglio hanno direzione N-S ed E-W, ma sono presenti, anche se non in tutti gli affioramenti considerati, anche direzioni NW-SE e NE-SW (vedi plot nell'allegato). Queste direzioni sono anche quelle che si ripetono nei diversi set di fratture selezionati dal software per la costruzione del DFN.

Poiché questo studio è finalizzato alla valutazione delle caratteristiche idrauliche delle faglie, l'analisi di queste ultime si è basata sulla misura degli spessori della zona di faglia, dai quali è stato possibile ricavare l'indice F, un parametro che illustra qualitativamente la distribuzione delle permeabilità delle faglie.

La zona di faglia infatti costituisce una struttura di fondamentale importanza per valutare il comportamento delle faglie, a sua volta fondamentale nella costruzione di un modello geologico statico e dinamico. Le faglie raramente sono costituite da una superficie semplice e da uno spessore costante. Hanno invece strutture complesse funzione di diversi fattori, tra i quali la litologia, e la loro storia deformativa, comprese le condizioni di pressione e temperatura alle quali questa avviene. A partire dagli anni '90 lo studio delle faglie si è concentrato sul riconoscimento di diverse "zone" che hanno diverso significato. In generale esse sono tre: la zona più interna, detta "core" o superficie di scorrimento, la zona di fratturazione o "damage zone" e la roccia incassante indeformata (figura 3)

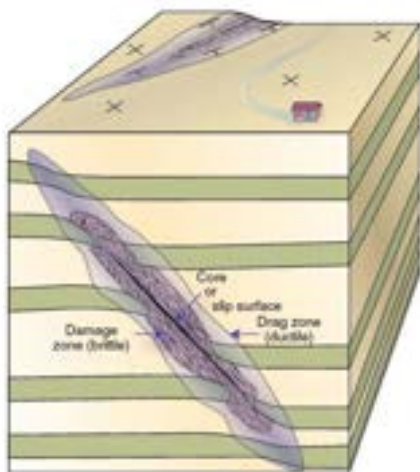


Figura 3 - Schema di una zona di faglia in tre dimensioni (da Fossen, 2009).

Il core della faglia è di solito composto da una sola superficie, oppure da più superfici vicine, oppure da una zona in cui il materiale è il risultato dell'azione meccanica dovuta allo scorrimento. In generale tende ad essere più spessa con il proseguire della deformazione, e ha spessori variabili da pochi mm a qualche metro. Poiché il materiale che ospita è il risultato di processi di abrasione e di compattazione ripetuti nel tempo, la sua porosità è funzione dell'attività della faglia e la permeabilità è funzione della granulometria. I materiali di queste zone hanno granulometrie dei limi e delle argille, che rendono questa zona la parte impermeabile della faglia. Questa zona è discontinua lungo il piano di faglia che non è sempre attivata allo stesso modo. La zona di fratturazione intorno al core è costituita da una zona altamente fratturata in cui la fratturazione tende a diminuire progressivamente allontanandosi dal core. La fratturazione è associata al movimento e determina un'alta permeabilità secondaria della zona di faglia. Le fratture funzionano da condotti che permettono la circolazione dei fluidi e da zone di ammortamento dello stress sprigionato dalla faglia stessa durante il movimento. La damage zone, che ha la porosità primaria della roccia incassante e quella secondaria dovuta

alla fratturazione, ha una permeabilità variabile in funzione della evoluzione della faglia stessa. Infatti, le strutture attive tendono a mantenere aperte le fratture in questa zona e di conseguenza alta la permeabilità, mentre le faglia più evolute, che subiscono processi di deposizione e di mineralizzazione tendono progressivamente a ridurla. Al fine di definire dei parametri che rappresentino il comportamento delle faglie in un modello geologico, è utile definire il parametro F che rappresenta il rapporto tra lo spessore totale della faglia e lo spessore del core della stessa faglia. Questo parametro, il cui valore è compreso tra 0 e 1, permette una stima del comportamento idraulico delle strutture. Nel caso di valori vicini ad 1 infatti, lo spessore totale della faglia corrisponde quasi totalmente al core della stessa. In questo caso la struttura ha un comportamento di tipo barriera, cioè impermeabile ai fluidi (acqua o gas); per queste strutture è importante definire quindi le caratteristiche della damage zone, che potrebbe essere mineralizzata (in questo caso la faglia è completamente impermeabile) o meno. In quest'ultimo caso la permeabilità avrà una forte anisotropia, essendo massima parallelamente al piano della faglia e nulla nella direzione perpendicolare. Bisogna inoltre tenere presente che sia gli spessori della damage zone che del core variano lungo la direzione della faglia, soprattutto in strutture immature. Nella zona in esame trattandosi per gran parte dei casi di strutture antiche, gli spessori medi tendono ad essere più rappresentativi, escludendo le evidenze di riattivazione successiva. In questo lavoro questo parametro è stato misurato per circa 20 faglie in diverse litologie, appartenenti al seal e al potenziale reservoir. I valori di F calcolati per ciascuna faglia sono riportati nel grafico di fig. 4, mentre i valori misurati sono riportati nella tabella dell'allegato 3.

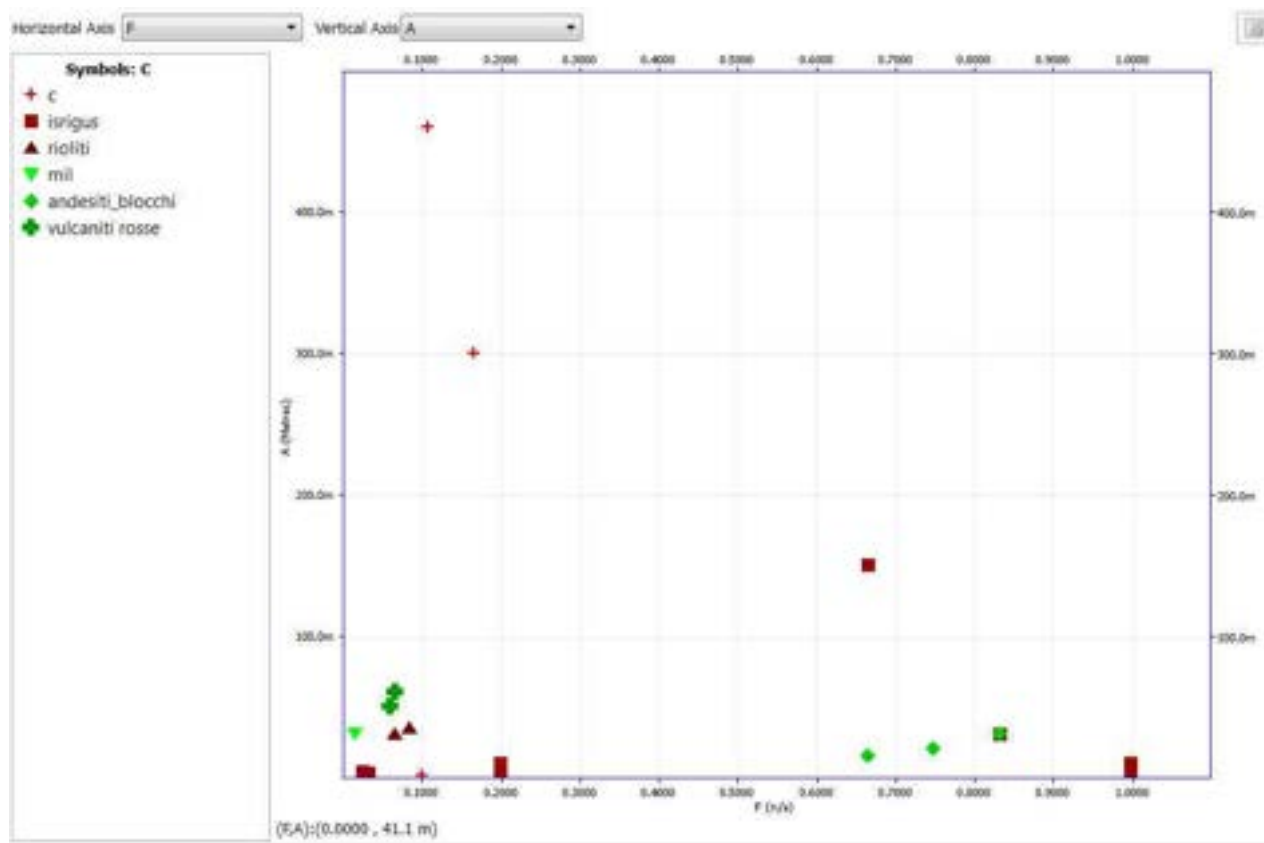


Figura 4 - diagramma della distribuzione del valore di F , il rapporto tra lo spessore totale della zona di faglia e lo spessore del core (da Caine et al., 1996)

Le faglie della figura 4 sono state misurate nelle formazioni sedimentarie del Cixerri (c) e del Miliolitico (mil), e nelle formazioni vulcaniche delle lave riolitiche (riolitidi monte Crobu), delle ignimbriti riolitiche grigie (Isrigus), delle andesiti (andesiti a blocchi) e delle rioliti rosse.

Nella F.ne del Cixerri le faglie presentano una zona di faglia piuttosto ampia, di qualche metro (figura 5). La zona di fratturazione si presenta sempre alterata, anche in funzione della variabilità dei litotipi, ma in generale essa costituisce gran parte della zona di faglia. Non sono state osservate mineralizzazioni diffuse e le fratture aperte e connesse tra loro (vedi anche scanline relativa). Il core invece, pur avendo spessori apprezzabili, ha dimensioni ridotte rispetto al resto della zona deformata. Il core è costituito in generale da materiale a granulometria ridotta, compattato e alcune volte in rilievo erosivo. I valori di F ricavati sono bassi, ad indicare una permeabilità alta parallelamente al piano di faglia.



Figura 5 - faglia nella formazione di Cixerri. Notare l'ampiezza della zona fratturata rispetto alla zona di core evidenziata nella figura.

Analoghe considerazioni si possono fare per la F.ne del Miliolitico, che presenta una ampia zona fratturata, mentre il core ha dimensioni molto ridotte. Questo dato però, relativo ad una sola faglia, osservata nella zona meridionale richiederebbe ulteriori approfondimenti. Altro discorso va invece fatto per la F.ne del Lignitifero. Negli affioramenti di questa formazione la fratturazione alla meso-scala è completamente mineralizzata, riducendo la permeabilità dei livelli calcarenitici intercalati alla lignite (vedi paragrafo delle scan area). Questa mineralizzazione inoltre interessa tutte le famiglie di fratture osservate, mentre le uniche strutture beanti sono orientate E-W.

Per quanto riguarda invece le formazioni vulcaniche, queste possono essere distinte in base alla mineralogia, ma anche della litologia. Come già detto si dividono in due grandi gruppi, andesiti e rioliti, ma all'interno di ciascuno sono presenti litotipi molto differenti, essenzialmente distinguibili in lave e depositi piroclastici.

Per quanto riguarda le andesiti, quelle filoniane sono state osservate nella zona di Predaxius, dove i contatti per intrusione con le rocce paleozoiche sono riattivati e presentano indicatori cinematici (figura 6); inoltre i filoni presentano direzioni N-S, NW-SE e E-W.



Figura 6 - Contatto tra le andesiti a destra e i calcari paleozoici a sinistra. Filone di quasi 5 metri di spessore a direzione NW-SE. Il contatto è alterato e presenta indicatori cinematici.

Le andesiti si distinguono in lave e breccie clastiche e autoclastiche. Queste ultime sviluppano piani di faglia con una deformazione molto localizzata, per cui la zona di faglia è quasi completamente costituita dal core. Il risultato sono valori del parametro F piuttosto alti, che indicano un comportamento idraulico di tipo barriera (figura 4).

Lo stesso vale per le rioliti, che in alcuni affioramenti sono lave in altre piroclastiti. Come si vede nel plot di figura 4, le rioliti dette di Is Irigus comprendono entrambe i gruppi, uno con valori vicini ad 1, corrispondente alle piroclastiti; l'altro gruppo corrisponde alle lave, con valori bassi, in cui si trovano anche tutte le altre lave considerate (sia riolitiche che andesitiche).

Le faglie nelle piroclastiti si presentano come piani di taglio, con una spaziatura di qualche metro alla mesoscala, con una deformazione concentrata sul piano di faglia e una zona rimaneggiata molto sottile rispetto alla zona di faglia. Queste strutture si comportano da barriere, anche se, data la litologia, la permeabilità è da considerarsi molto bassa in tutto il corpo roccioso (figura 7)



Figura 7 - Faglia nelle rioliti laviche e nelle rioliti piroclastiche.

In generale le faglie che presentano maggiore permeabilità sono quelle sviluppate nelle lave (sia riolitiche che andesitiche), poiché queste litologie sono molto competenti, e caratterizzate da una forte localizzazione della deformazione.

Le faglie osservate hanno attività documentata nel Miocene (in base a rapporti di separazione stratigrafica), e solo in alcuni casi sono presenti evidenze di riattivazione successiva, con più indicatori cinematici sullo stesso piano e con piani di taglio che ne tagliano altri.

Nello schema considerato non sono presenti queste evidenze, che però assumono una certa importanza nella valutazione delle faglie come vie di migrazione, in quanto le strutture attive o più recenti mostrano una zona di fratturazione più sviluppata e non mineralizzata.

5 .Rilevamento delle emissioni gassose in transetti attraverso le principali faglie

Al fine di costruire un modello di migrazione di fluidi attraverso le faglie, nella zona sono state scelte le tracce di due faglie principali, considerate anche le più recenti, e attraverso queste strutture sono stati misurate le emissioni gassose e le concentrazioni di gas nel suolo.

Queste misure, oltre a permettere valutazioni sul tipo dei gas emessi, la provenienza e la composizione, permettono di valutare il potenziale di leakage della struttura stessa.

Queste due faglie sono state scelte per diverse ragioni. Prima di tutto per la loro sospetta giovane attività. Questo permetterebbe di classificarle come “gas bearing fault” (cit), cioè strutture che, avendo una attività recente, mantengono attiva la zona di fratturazione associata e la propria permeabilità parallela al piano di faglia. Poi perché tali strutture sono “sepolte”, quindi tagliano tutta la successione sedimentaria e vulcanica, escludendo solo le coperture. Infine perché entrambe potrebbero costituire i confini dell’eventuale reservoir. Tali faglie (che prendono i nomi di faglia di Matzaccara e faglia di Is Irigus (vedi figura 2)

Sono stati misurati due tipi di dati: 1) la concentrazione dei gas nel suolo e il valore del flusso di specifici gas dal suolo. Nel primo caso gli eventuali valori anomali indicano un processo di accumulo dei gas nel suolo, alimentato da zone profonde e trasportato in superficie, corretto degli apporti dei gas prodotti dai suoli stessi. Nel secondo caso si misura il flusso a terra. Questo valore è sensibile alla tipo di suolo presente che potrebbe ostacolare il flusso in superficie.

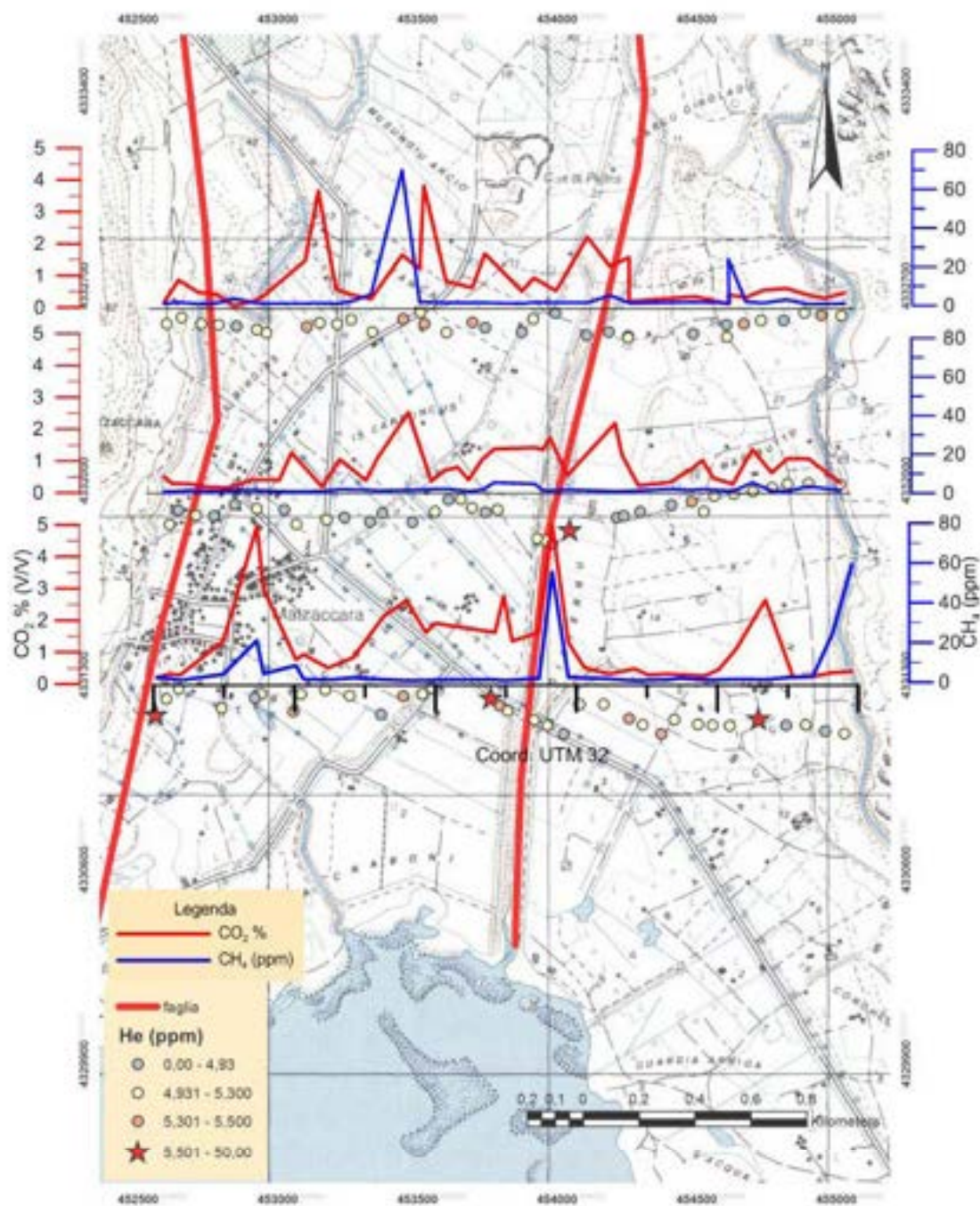


Figura 8 –risultati del rilevamento in campagna dei dati di concentrazione di CO₂ e metano attraverso le due strutture considerate.

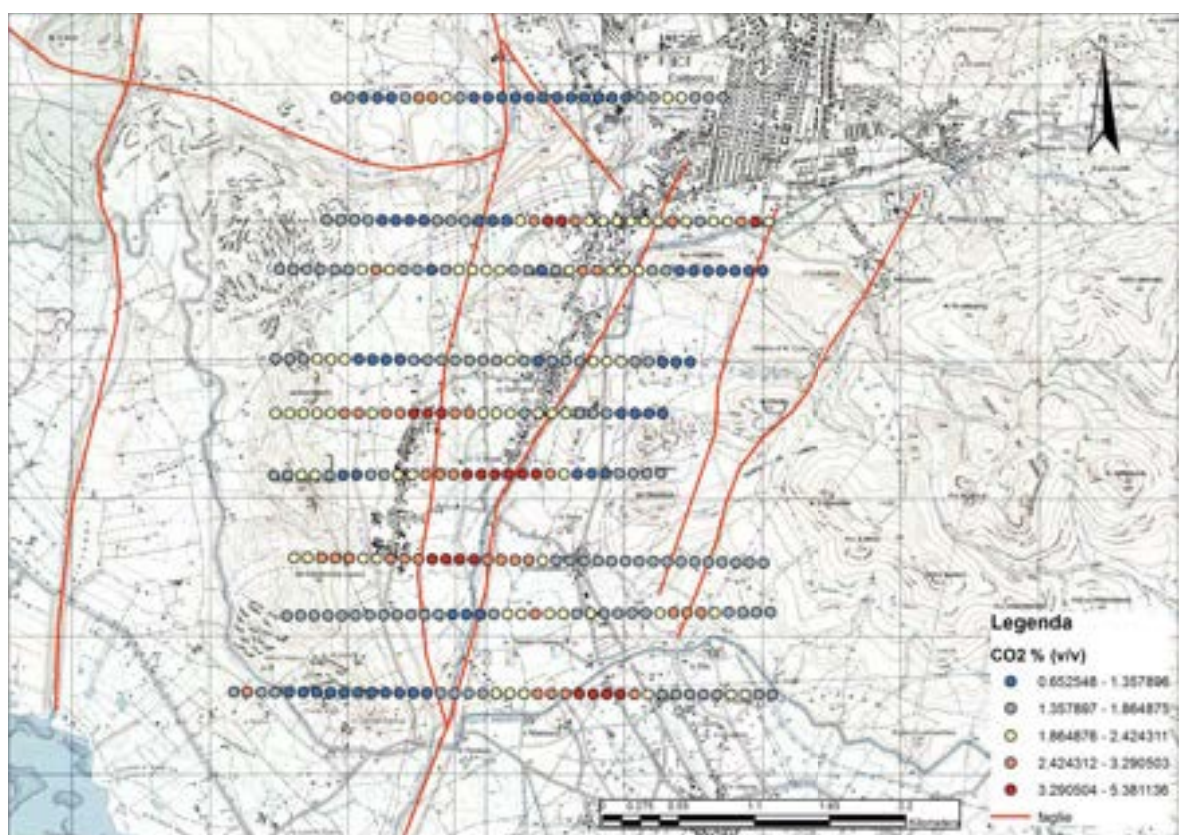


Figura 9 - risultati dei valori di concentrazione della CO₂ nel suolo mediante misura di campioni in laboratorio.

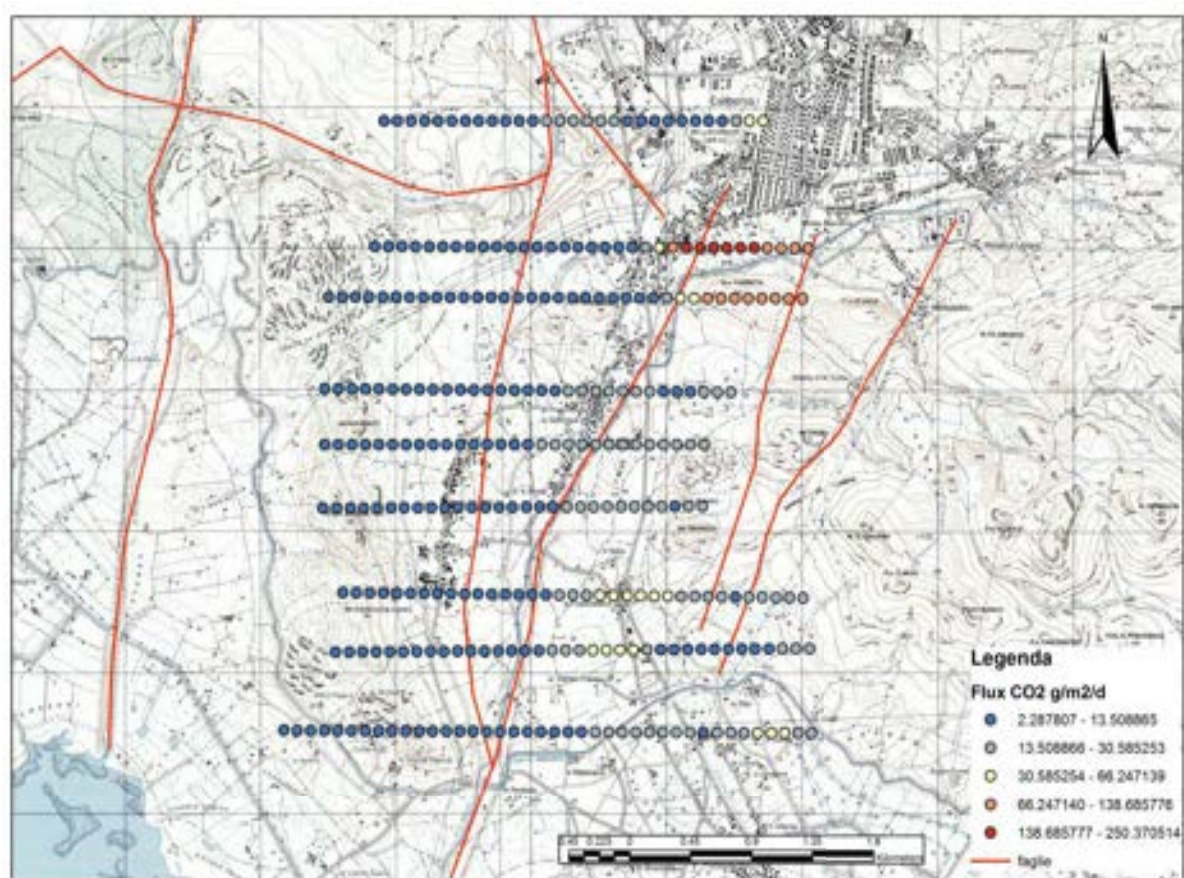


Figura 10 - valori di flusso della CO₂ misurati attraverso le faglie considerate.

6. Analisi della fratturazione e modellazione

L'analisi della fratturazione si propone di fornire una serie di parametri numerici statistici in grado di descrivere il pattern della fratturazione di un dato volume roccioso. Il lavoro che riguarda l'analisi della fratturazione è consistito in due parti: un rilievo in campagna e una fase di elaborazione dei dati. La fase di lavoro sul terreno comprende due tipi di procedure per la raccolta dei dati: la realizzazione di scan area e di scan lines. Una volta eseguito questo lavoro sul terreno, i dati raccolti vengono quindi rielaborati per ottenere dei parametri statistici rappresentativi del sistema di fratture analizzato, e che saranno utilizzati per generare il *Discrete fracture network* (DFN) all'interno del volume di roccia considerato. La rielaborazione e quindi la generazione del DFN è stata eseguita mediante l'utilizzo di software dedicati, con licenze accademiche. Nel caso in esame è stato utilizzato il software Move, Midland Valley, che permette di elaborare i dati di fratturazione e poi di ricavare i suddetti parametri.

Tali operazioni si sviluppano in un apposito modulo del programma, chiamato Fracture Modelling, che contiene un workflow di modellazione automatizzato e consente la caratterizzazione della rete di fratture. Esso prepara inoltre in uscita dei file utilizzabili direttamente per la simulazione di giacimento. Mediante l'integrazione completa con l'analisi strutturale e la modellazione questo workflow fornisce la capacità necessaria per costruire e testare sistemi di fratture geologicamente validi, utilizzando un approccio statistico avanzato.

In questa fase del lavoro saranno presentati i dati raccolti e le rielaborazioni effettuate.

6.1 Scanline

La prima fase, realizzata per tutte le scan-line eseguite in campagna riferite alle diverse litologie, consiste nella proiezione dei dati su uno stereo plot. In base alla distribuzione relativa dei dati, il programma permette di definire diversi cluster in base all'orientazione delle fratture stesse.

Per ogni set sarà applicata la correzione di Terzaghi, per ottenere una riduzione dell'errore, dovuta alla differente orientazione delle fratture rispetto a quella della scanline. Infatti, se da una parte diverse orientazioni indicano una popolazione di misure rappresentativa delle differenti orientazioni presenti nella zona, il rilievo in una sola direzione potrebbe non rappresentare la densità di fratturazione corretta per ogni set di fratture riconosciuto. Il rapporto tra questi due parametri, la spaziatura reale e il numero di fratture misurate per ogni set, è funzione dell'angolo di intersezione tra la direzione della scanline e la direzione del set di fratture in esame (R. D. Terzaghi, 1965). Più è piccolo questo angolo, più la spaziatura misurata si avvicina al valore reale. Per ottenere questa correzione, il programma Move attribuisce un "peso" ad ogni frattura misurata rispetto alla direzione della scanline. Questa operazione è rappresentata di seguito per tutti i set di fratture definiti. Questi nuovi valori sono quindi utilizzati per ricalcolare il Mean Resultant Orientation (Spherical Mean) e il valore di k (distribuzione di Fisher) parametri che saranno utilizzati per la costruzione del DFN.

I risultati ottenuti sono riassunti nelle pagine seguenti, e saranno riassunti in tabelle alla fine del capitolo.

6.2 - Descrizione delle scanline

Scanline 1, suddivisione in 4 set

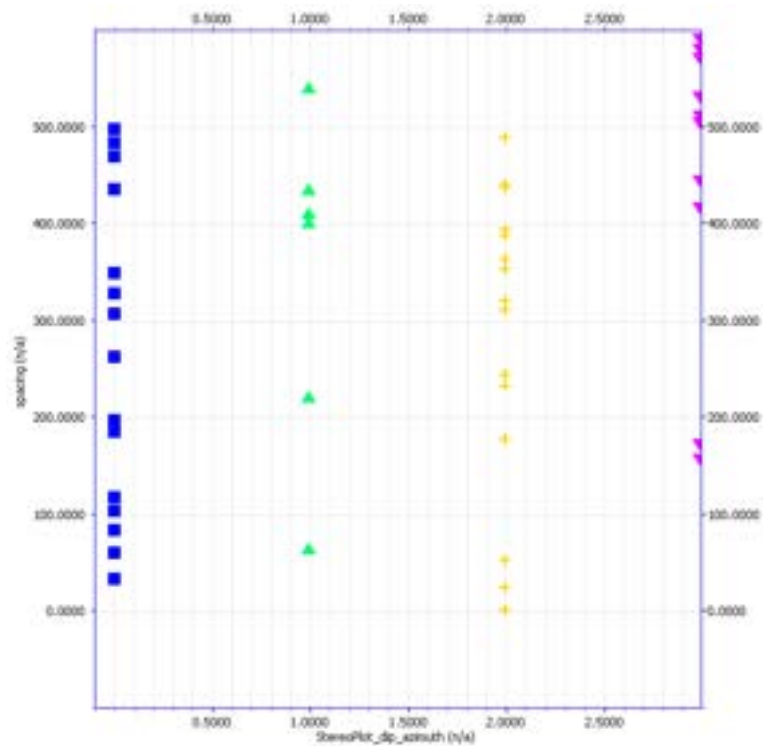
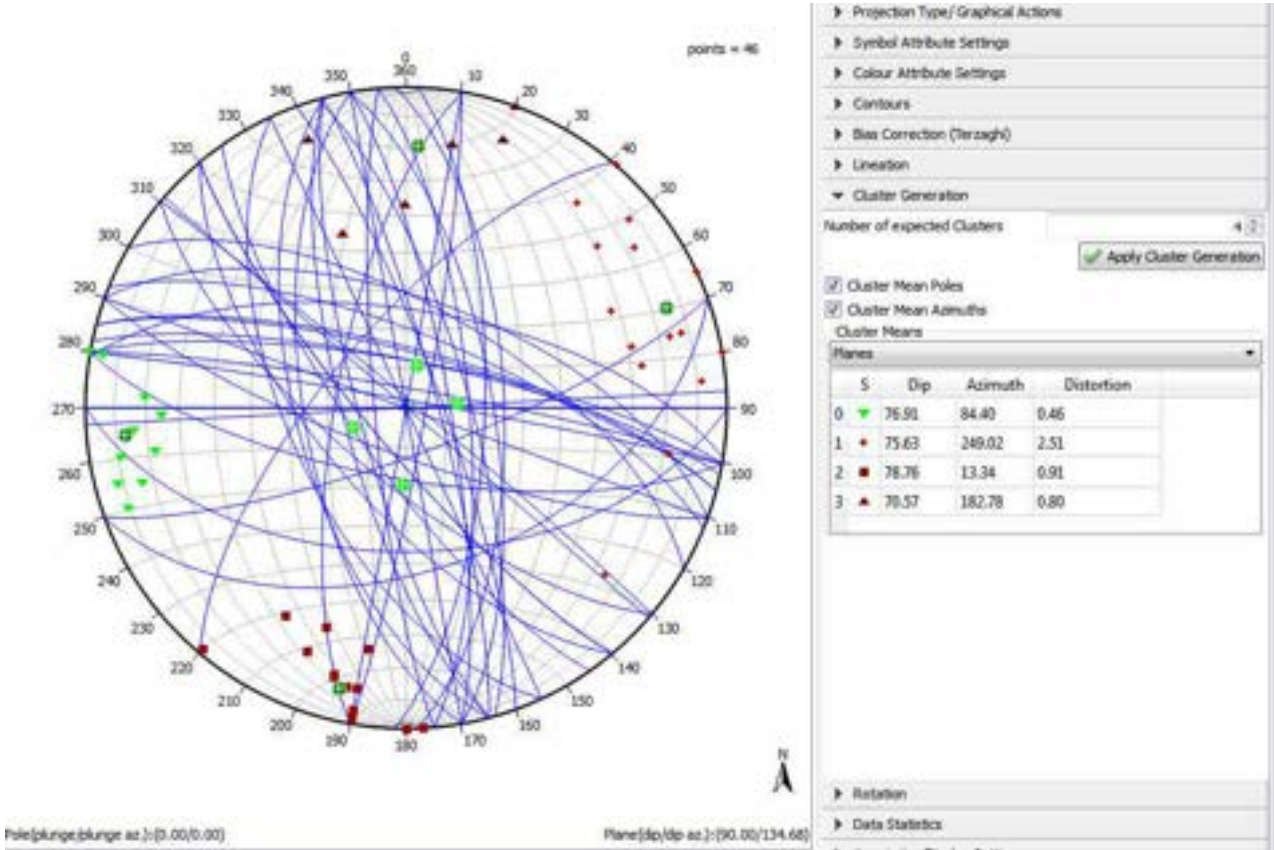


Figura 10

Scanline 2 – Cixerri

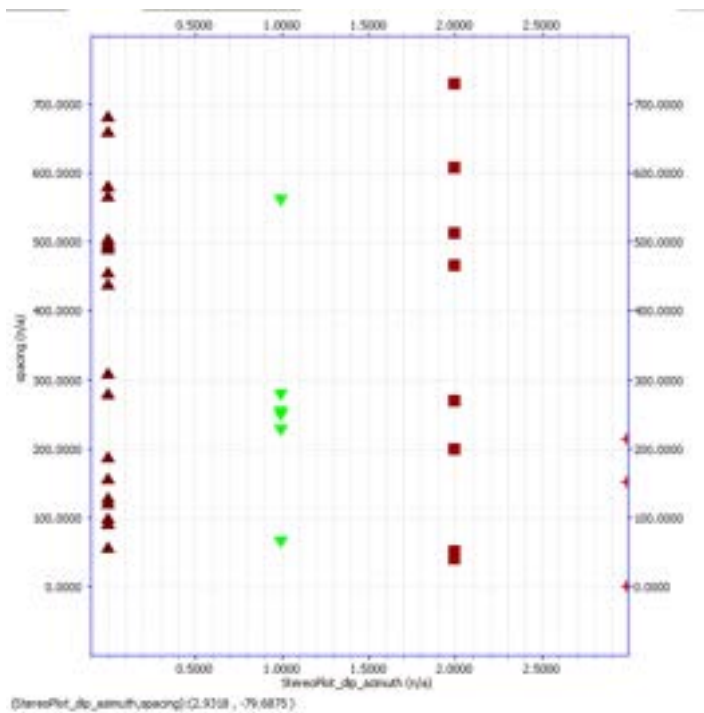
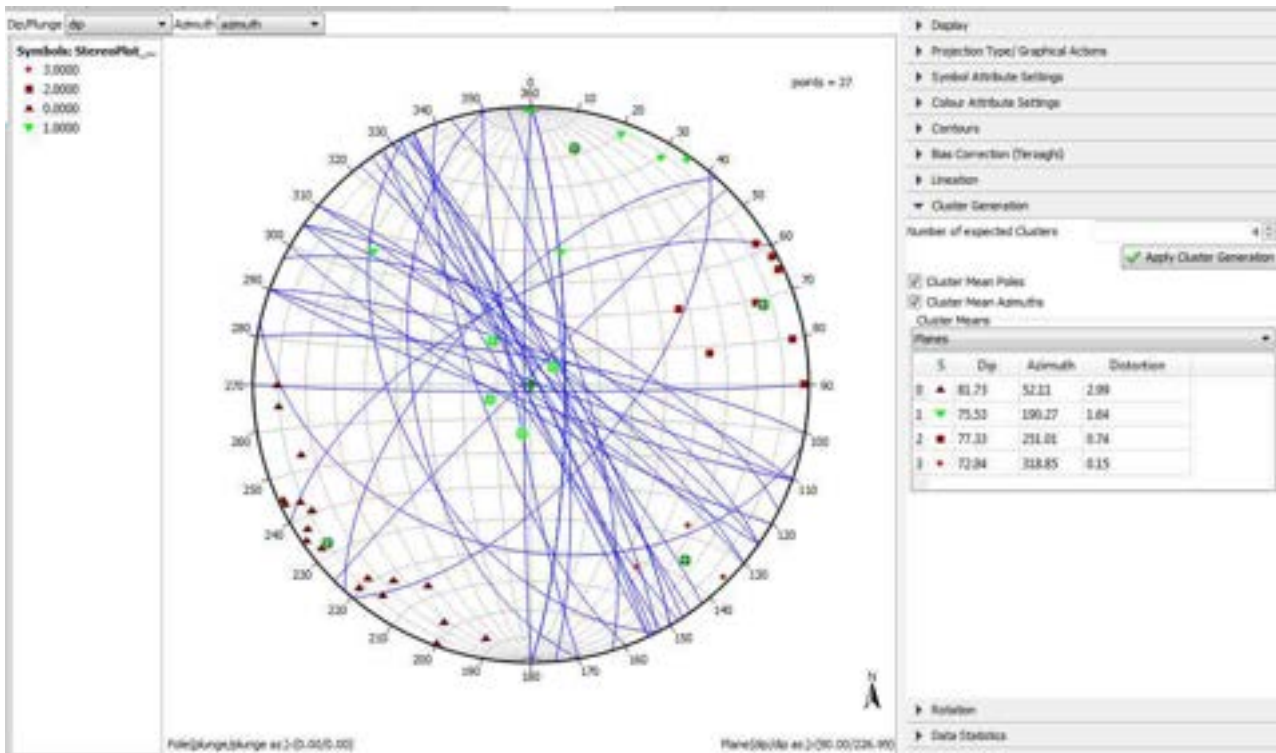


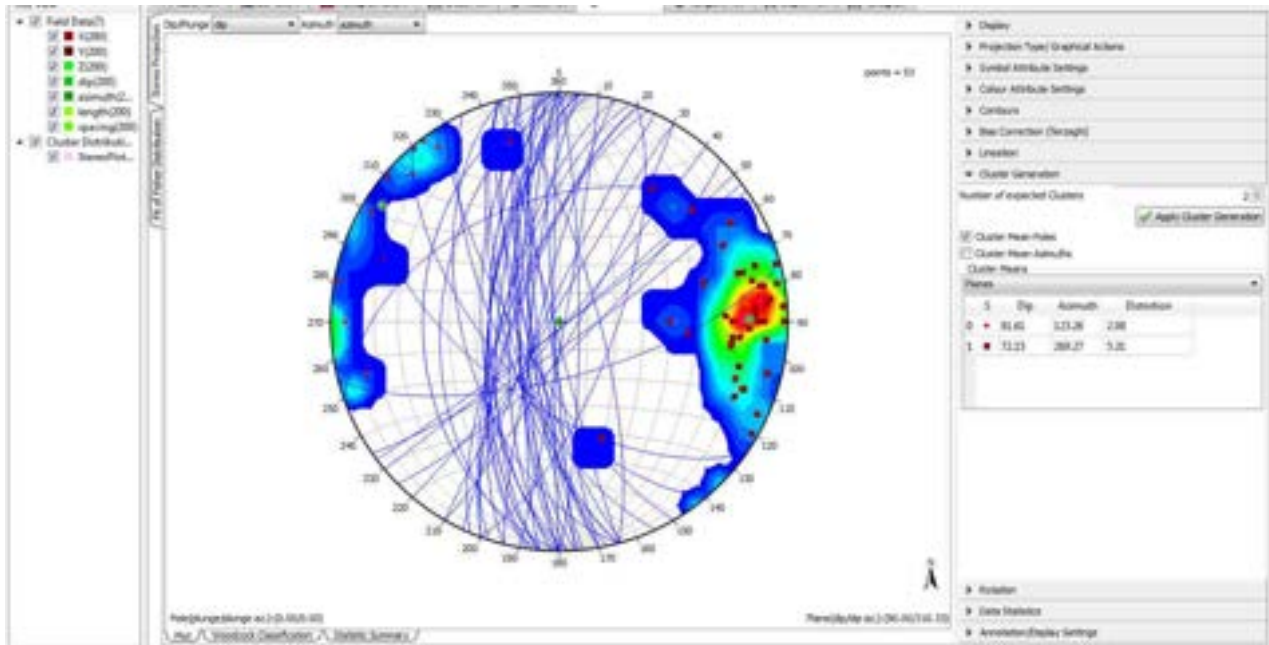
Figura 11

Sono stati definiti 4 set, ma saranno elaborati solo 3 perché uno è composto solo da tre fratture.

Scanline 3 –

11 apr 2014 SCAN LINE N°3 coord. UTM 32 WGS84 X 455759 Y 4332972 NUR piroclastiti riolitiche saldate grigio-rossastre, porfiriche N80°W

Suddivisione in cluster



Spaziatura per cluster

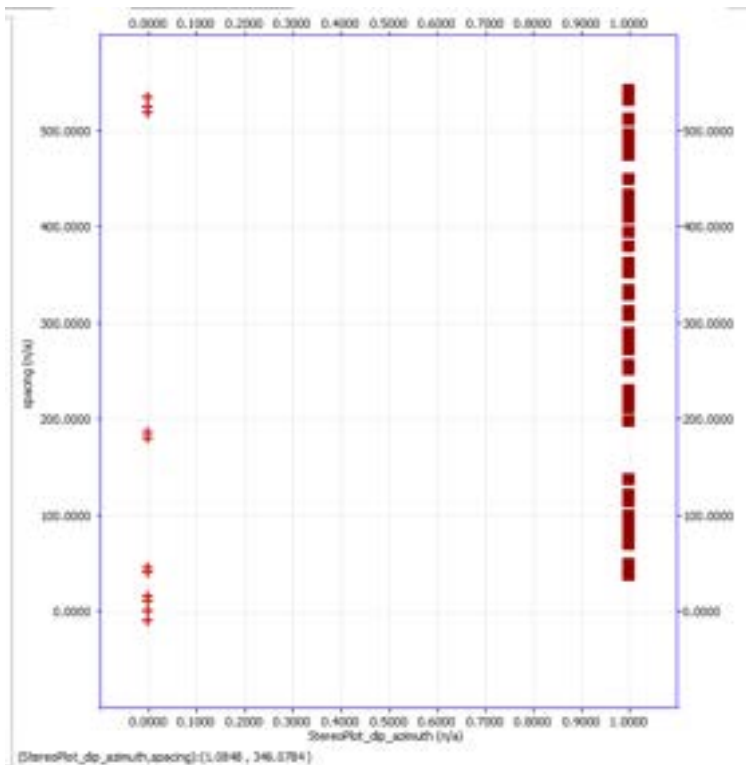
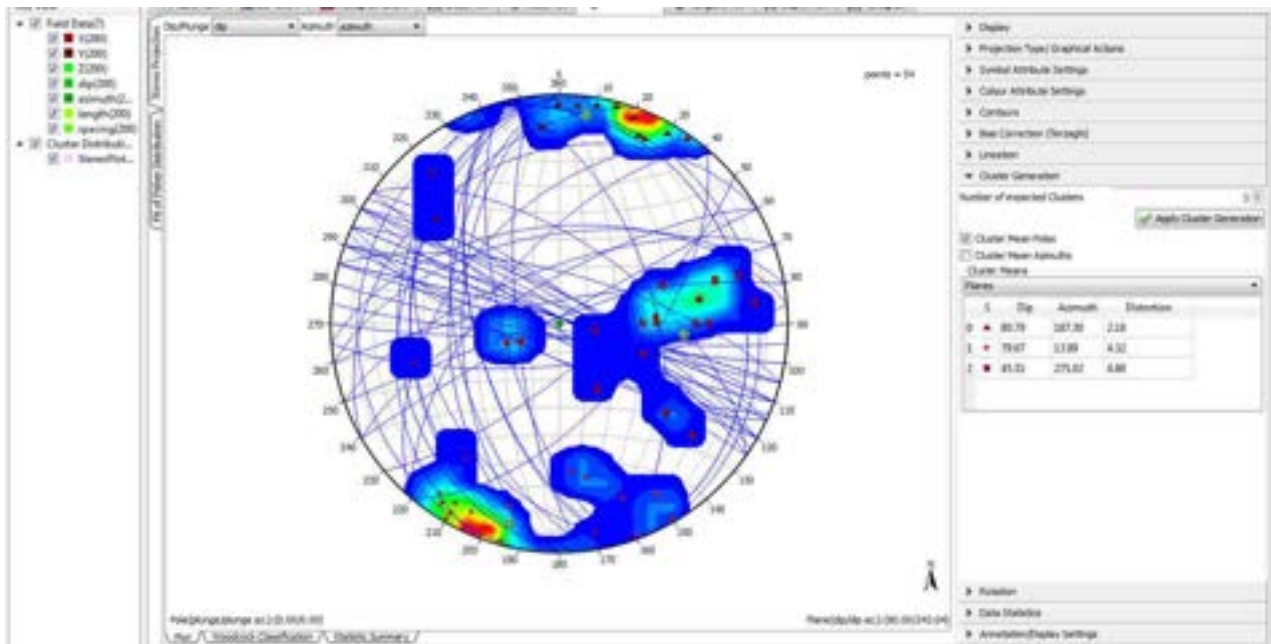


Figura 12

Scanline 4

12 apr 2014 SCAN LINE N°4 coord. UTM 32 WGS84 X 464771 Y 4334877 paleozoico calcari laminati (dolomie) metamorfosati N20°E



Spaziatura per set

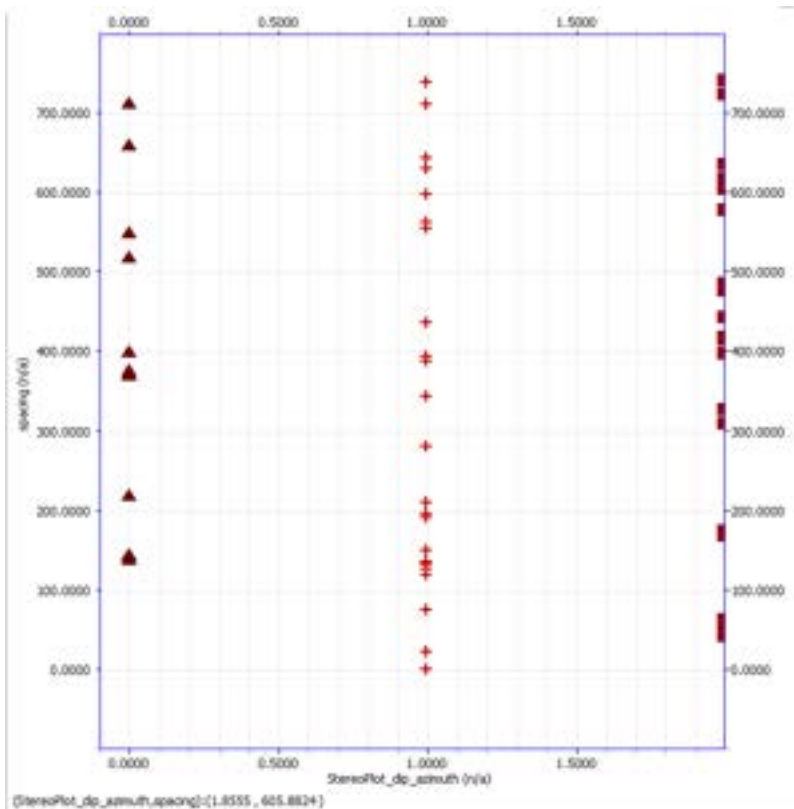


Figura 13

La correzione di Terzaghi applicata ai diversi set di ogni scanline ha permesso di ricavare i valori della direzione media e il parametro K della distribuzione di Fisher che sono due dei parametri richiesti dal software per la costruzione del discrete fracture network.

Nella tabella seguente sono riassunti i valori presentati nell'allegato 5.

	Set	K	MRO
Scan line 1	0	22,33	12,55/101,66
	1	11,83	65,47/177,77
	2	16,17	74,42/249,65
	3	35,71	77,14/86,78
Scan line 2	0	11,09	80,79/50,36
	1	11,15	70,93/195,58
	2	17,27	75,25/251,46
Scan line 3	0	8,27	79,78/125,84
	1	16,48	69,68/264,23
Scan line 4	0	25,79	80,98/193,00
	1	16,93	78,19/14,77
	2	6,22	25,75/279,54

5. 3 Analisi della connettività dovuta alla fratturazione

Per ogni scanline sono state inoltre calcolati I valori di connettività, espresso con il rapporto tra il numero di fratture che terminano in altre fratture e il numero totale delle fratture stesse.

6.3 Scanarea

Le scan area forniscono informazioni riguardo alla densità di fratture per unità di area. Questo tipo di dato dipende fortemente dalla scala e in generale è condizionato dalla qualità dell'affioramento, perché è necessario disporre di superfici di strato ben esposte (VanDijk, 2000). Tuttavia scanarea sono utilizzate anche con orientazione verticale per l'analisi della rifrazione della fratturazione.

Le scan-line permettono la definizione della densità di fratturazione per unità di lunghezza. Questa è una procedura più indipendente dalla scala ed ha invece una limitazione nella definizione delle lunghezze delle tracce delle fratture, legata alla scala di osservazione dell'operatore.

Le scan area sono state eseguite dove l'affioramento permetteva l'osservazione delle superfici di stratificazione, o per definire variazioni dovute alla stratificazione secondo sezioni verticali. In ogni caso la giacitura della superficie è stata misurata. Le immagini delle scan area seguono una elaborazione che prevede una fase di rettificazione dell'immagine e la conta delle fratture. Questo tipo di analisi fornisce dati sulla densità areale e sulla distribuzione delle lunghezze delle fratture. Quest'ultimo parametro è richiesto nella costruzione del DFN.

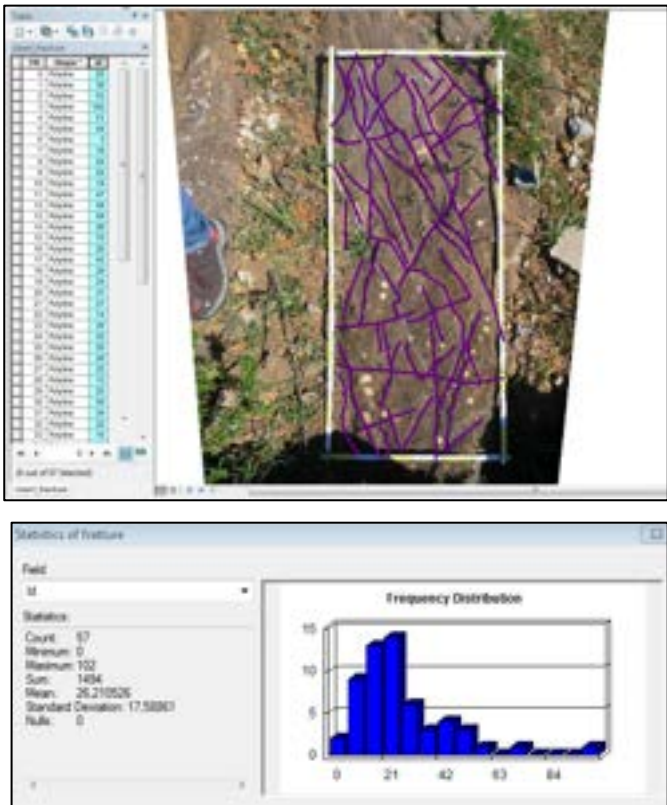
Sono state eseguite 7 scanarea, in diverse formazioni: 3 nel Produttivo, 2 negli scisti/arenarie, 2 nelle vulcaniti (rioliti rosse e grigie).

Qui di seguito sono elencati i risultati ottenuti da questa analisi, in termini di densità areale. Sono inoltre riportati i valori statistici della distribuzione delle lunghezze i cui risultati sono trattati in un paragrafo a parte.

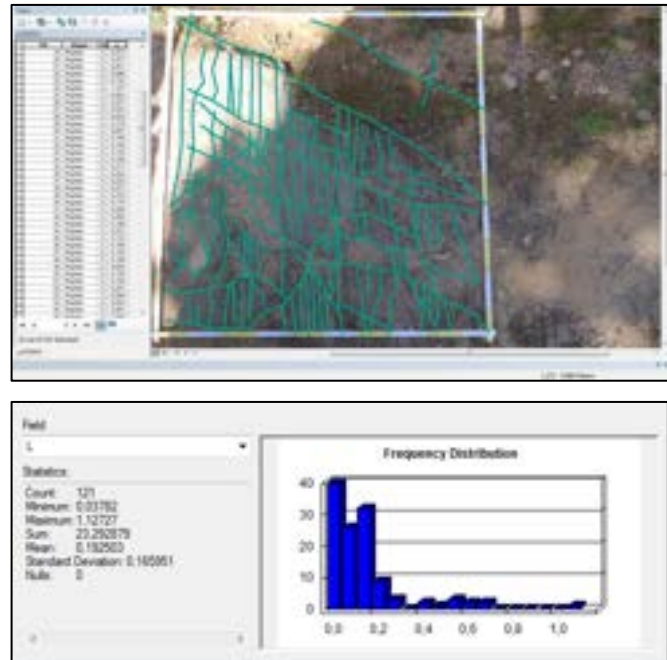
La distribuzione delle lunghezze è uno dei parametri determinanti nella costruzione del DFN ed è inoltre un parametro difficile da definire, in quanto la distribuzione statistica dei valori dovrebbe teoricamente coprire diverse scale di osservazione, dalla scala regionale a quella sub-metrica. Poiché questo è possibile solo in alcune situazioni geologiche molto favorevoli (continuità di affioramento, omogeneità delle litologie ecc.) che non è il caso dell'area esaminata, l'approccio statistico permette di ottenere ugualmente un valore attendibile di questo parametro considerando la dimensione frattale della popolazione di lunghezze disponibile. Questo valore, che definisce una distribuzione statistica detta Power law (citare), permette di riprodurre popolazioni di misure che presentano la stessa distribuzione di valori a diverse scale.

Nel paragrafo successivo sono presentati i valori di power law calcolati per ogni scanarea.

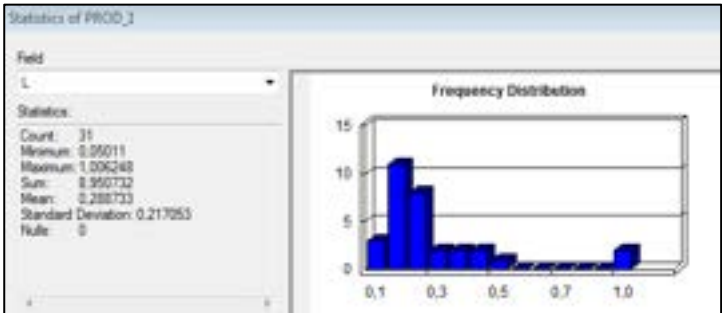
Scanarea 1 – formazione Lignitifero



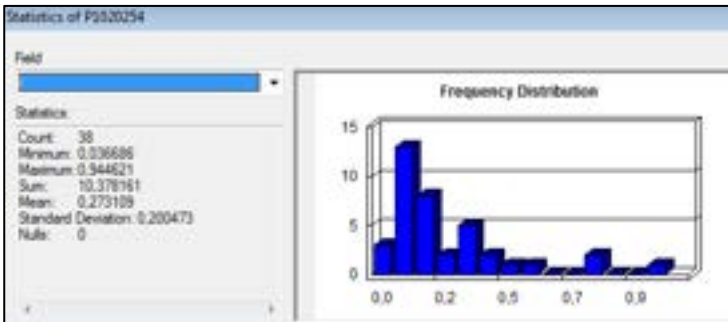
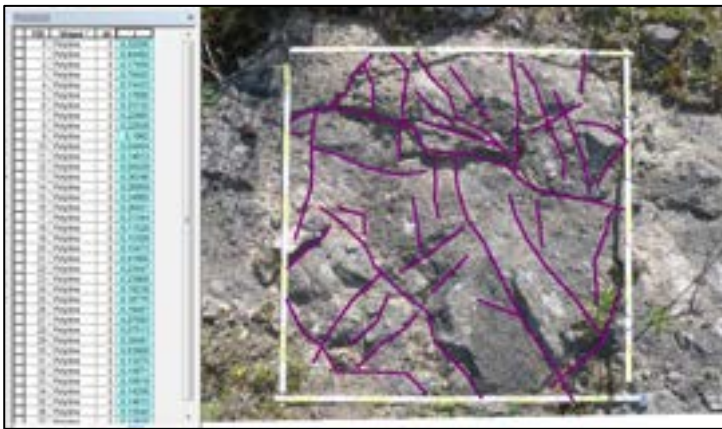
Scanarea2 - Calcarei del Lignitifero in prossimità di una piccola faglia



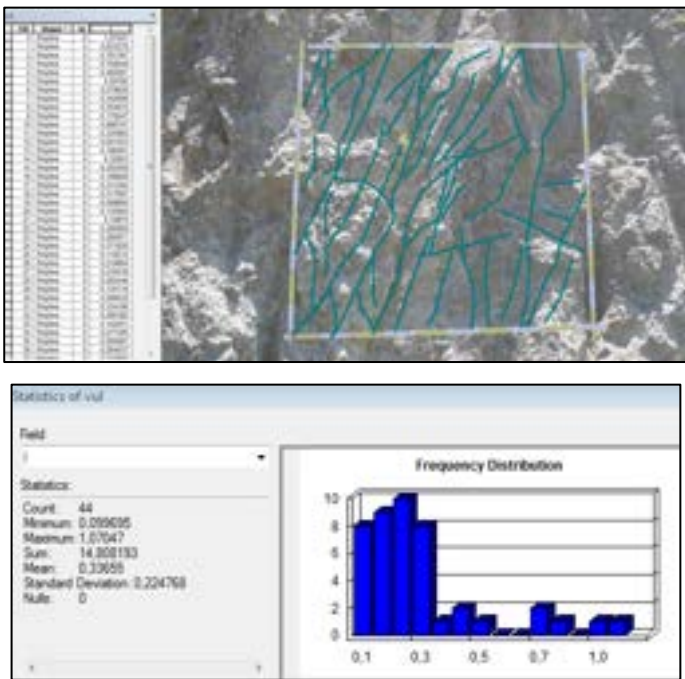
Scan area 3 – Calcari del Lignitifero



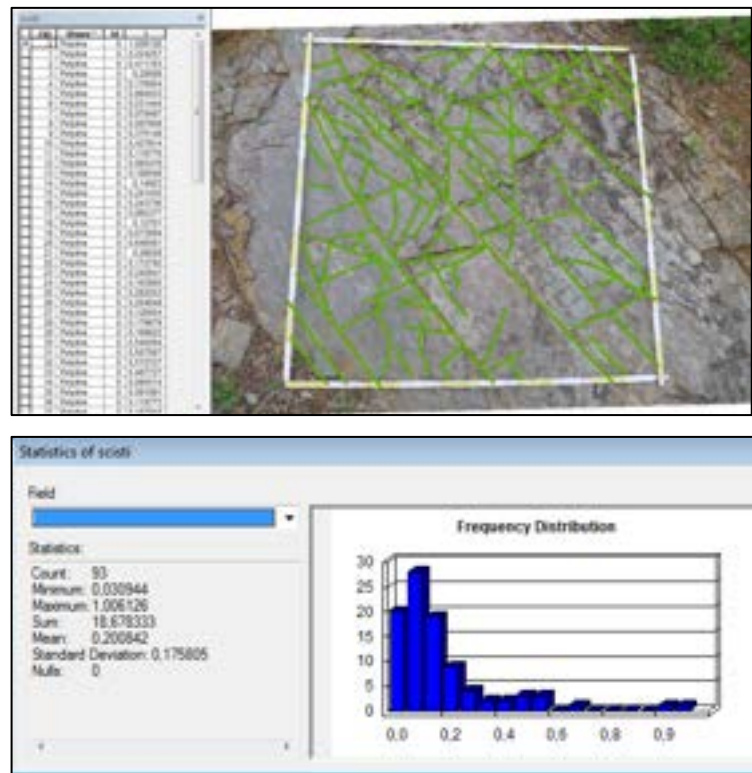
Scan 4 – Rioliti grigie



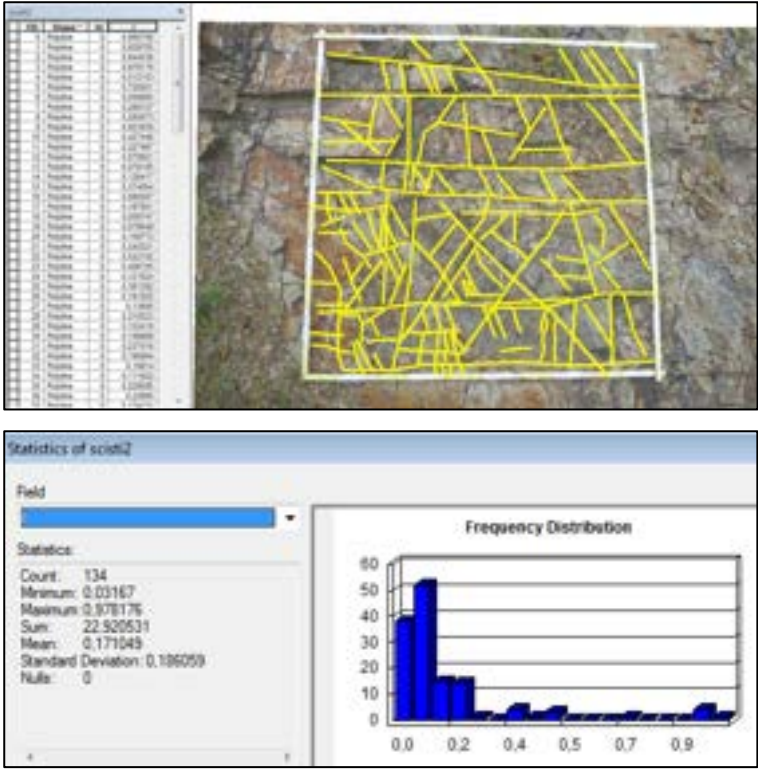
Scanarea 5 – vulcaniti



Scanarea 6 – Scisti



Scanarea 7 – arenarie e scisti



5. 5 Analisi delle lunghezze

7. Ricostruzione di un modello geologico 3D preliminare e di una valutazione di potenziale volume

Il modello geologico che viene presentato è il risultato della sintesi di tutti i dati disponibili, ed è stato realizzato utilizzando il software Move della Midland Valley, che permette la gestione nello stesso ambiente di diversi tipi di dati (geofisici, mappe geologiche, dati di perforazioni, etc.). Questo è ovviamente un modello preliminare, in cui manca la conferma da parte di dati geofisici come le linee sismiche e di sottosuolo più dettagliati. Esso costituisce comunque una valida piattaforma di lavoro, pronta per essere migliorata via via che nuove informazioni saranno usufruibili.

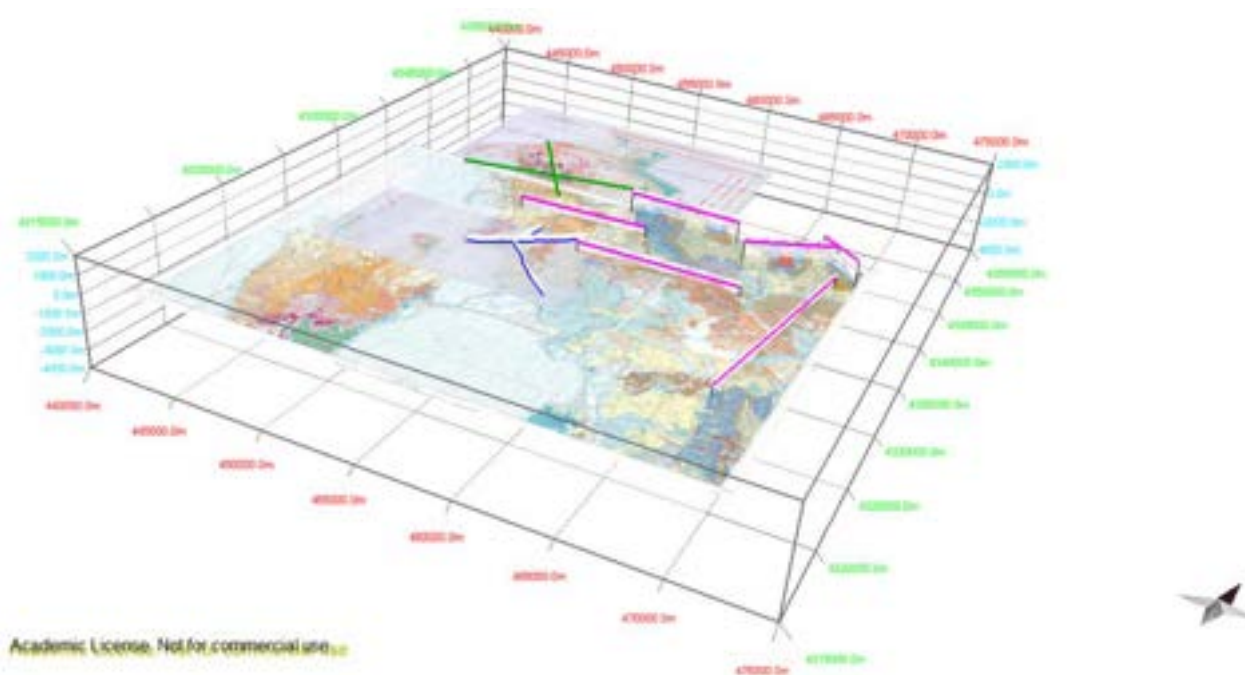
I dati utilizzati sono:

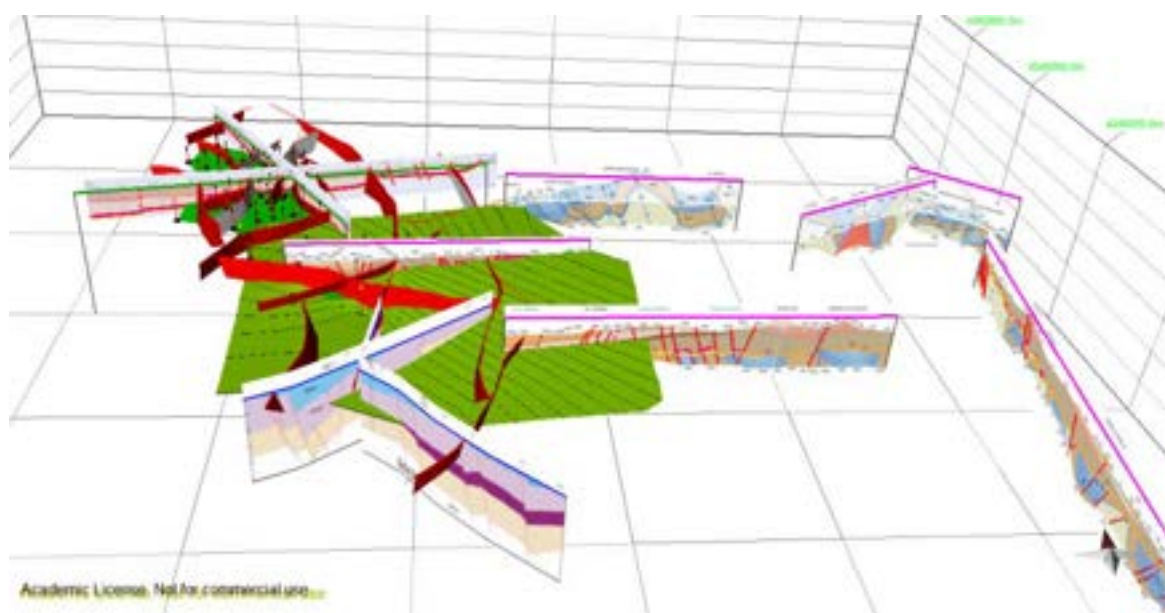
- Dati di pozzo
- Mappe geologiche
- Profili pubblicati
- Linea sismica in formato raster dal report OGS nell'ambito del progetto europeo "SiteChar",
- Mappa delle isobate del top dal "produttivo" dalla carta geologica Carbosulcis

In base ai dati presenti e delle osservazioni fatte durante le campagne di acquisizione dei dati del presente report, il piano delle principali faglie sono state ricostruite e nel modello tridimensionale tali faglie dislocano il top del produttivo, sulla base dei dati e delle interpretazioni fornite dai profili pubblicati.

Analizzando tali sono state inoltre individuate diverse discrepanze tra i diversi tipi di dati, soprattutto per quanto riguarda la definizione degli spessori delle diverse formazioni nella zona sudorientale, che è poi quella con il potenziale maggiore per lo scopo di questa ricerca.

I dati di pozzo disponibili sono pubblicati nella Carta Geologica dell'area pubblicata dalla Carbosulcis. Qui sono riportate due stratigrafie incomplete e la profondità del top del Produttivo nell'area settentrionale, in prossimità appunto delle principali miniere. Tuttavia, nella zona meridionale sono presenti almeno altri 3 pozzi profondi le cui s





Allegato 1

<i>n. station</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>tipo di indagine</i>	<i>direzione</i>	<i>località</i>	<i>litologia</i>	<i>dip</i>	<i>dip azimuth</i>	<i>tipo</i>	<i>note</i>	<i>spaziatura</i>
1	455735	4337379	scanline 1	N35E		ignimbriti					
2	455744	4333220				NUR - rioliti di Nuraxi				alternanze di depositi porfirici e più fini molto saldati presenza di faglie	
3	468879	4336015				metarenarie paleozoico				molto fogliettata	
4	468646	4335211	scanarea 1	lato parallelo (LP) alle fratture N30W; lato normale (LN) alle fratture N60E		lignitifero?	75	257	fr	calcareniti; in alcune fratture è presente un riempimento che da rilievo positivi (calcite?); sono presenti enechelon che indicano shear	
							65	250	fr		
							80	0	fr		
			scan area 2	LP 90/30; LN N10E			89	30	S	riempimento di calcite / QZ? Con cinematica sinistra che ritaglia delle vene 89/180 che hanno movimento destro	
							89	180	D		
5	467583	4333551	scanline 2	N60E		Cixerri				spessore strato	

Allegato 1

										arenaceo circa 2 metri	
6	464977	4335134				contatto MPR- Paleozoico				ampiezza zona di faglia 4,60 metri, corpi intrusi nel paleozoico e cenozoico	
7	460219	4334876	scanarea 3	45-210	Campo sportivo di Serbariu	Lignitifero, calcari e calcareniti con livelli di carbone decimetrici. Strati a bancate di 1m e piccoli strati centimetrici	88	240	strati	fratture con riempimento multiplo (calcite/qz) alcune faglie	
							78	315	fr	5mm, piani mineralizzati	
							88	345	fr	calcite	
							80	343	fr		
							60	80	fr		
							85	55	fr		
							70	45	fr		
							50	80	fr		
							45	70	fr		
			scan area 4	40/215			70	110			
							62	0			
							68	350	fratture aperte		
							35	80	mineralizzazione discontinua e multipla		
							60	110	fr		
							60	200	fr		
							65	220	fr		

Allegato 1

							20	110	sistema coniugato		
							50	75	sistema coniugato		
							25	80			
							88	300			
8	458942	4336156	scanarea 5	N30E (parallelo fratture)	colle rosmarino	puddinghe, metasiltiti e matearenarie	83	320			
							80	315			
							85	310			
			speedscanline 1		colle rosmarino (monumento)	calcari a miliolidi	85	275	frattura parallela alla SSC		2,552631579
							88	0	frattura parallela alla SSC		
							88	145	frattura obliqua alla scanline		
							74	40			
							88	90			
							65	110	dolomia ricristallizzata		spaziatura dolomie 10 cm
							60	115	dolomia ricristallizzata		
							55	120	dolomia ricristallizzata		
							60	120	dolomia ricristallizzata		
9					colle rosmarino (cima)	AGU3 - metasiltiti	70	60	foliazione matasiltiti		
							55	180	frattura		

Allegato 1

							60	173	tagliano tutto e sono beanti:spaziatura 2 m)		
							85	110	tagliano tutto e sono beanti:spaziatura 2 m)		
							85	111	tagliano tutto e sono beanti:spaziatura 2 m)		
							80	340			
							75	333			
					via crucis	metaconglomerato	88	260			
							85	250			
10	464820	4316924			monte Morgiani (cantina sociale)	sintema Portovesme su calcari a milioliti	88	300	fratture con riempimento	Cmil sono bercciati. Si vedono microfossili	
							78	165	fratture con riempimento		
							65	200	fratture con riempimento		
							85	150	fratture con riempimento		
							40	195	fratture con riempimento		
							70	275	fratture con riempimento		
							88	110	fratture con riempimento		
							88	165	fratture con riempimento		

Allegato 1

							80	110	fratture con riempimento		
							85	90	fratture con riempimento		
							75	185	fratture con riempimento		
							88	290	fratture con riempimento		
							78	183	fratture con riempimento		
							80	130	fratture con riempimento		
11	455700	4332908			cava Is Urigus	piroclastiti non organizzate, massive con qualche struttura di flusso con giacitura 23-310. inclusi litici rossi e pomici, calcare grigio, molto poroso nella cava	85	54	fratture con riempimenti e zone di taglio di circa 5 cm	grazie alla esposizione della cava le fratture presentano lunghezze nell'ordine delle decine di metri. Spaziature delle faglie di circa 6 m	
							45	270			
							68	260			
							60	290			
							75	50			
							85	240			
							87	230			
							85	248			
							65	100			
							88	270			
							88	45			

Allegato 1

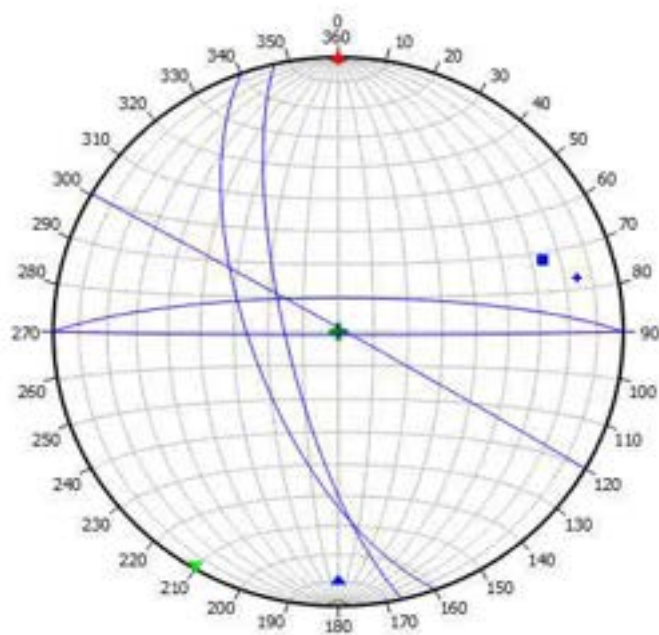
							60	120			
							70	150			
							60	300			
							70	320			
							65	260			
							60	80			
12	455759	4332972	scanline 3	N80W		NUR-piroclastiti riolitiche saldate grigiorossastre, porfiriche					
13	459567	4333156	speedscanline2		strada per madadeddu	andesiti con blocchi eterogenei	45	15			8,041666667
							60	110			
							85	280			
							80	280			
							88	280			
							80	280			
			scanarea 6	65/350							
14	459866	4333293					70	270	faglia nelle lave		
							70	350	coniugata alla precedente		
15	460006	4333396	scanarea 7	20-327		PRDa					
				fratture a destra 55-89							
					Diga		83	65			
							85	53			
							88	240			
							87	80			

Allegato 1

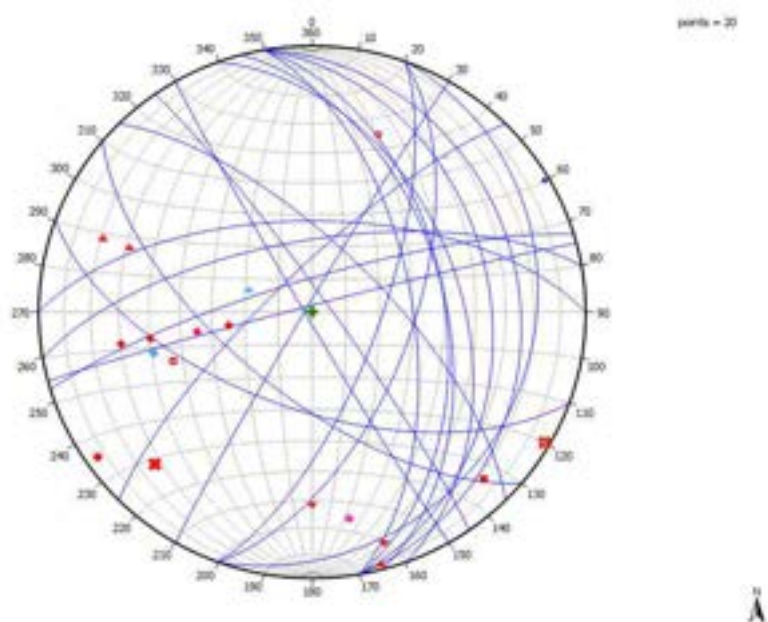
							85	140			
							80	0			
							80	320			
							87	320			
							82	30			
							10	150	laminazione		
			speedscanline 3								13,57142857
16	466557	4325243			lago					da riesaminare	
17	463028	4334954	scanarea 8	45-150	strada per Perdaxius	metapeliti e metareniti filladiche	65	30	filone magmatico		
				fratture immergenti a destra 75- 30							
			scanarea 9	strato			50	160	strati		
							50	50	fr		
							55	330	fr		
							60	64	fr	fratturazione controllata dalla litologia joint sistematici	
			scanarea 10	50-150			55	10		sistema a X	
18	464771	4334877	scanline 4	N20E		paleozoico-calcarei laminati	88	60			
							88	240		parallele al lato della scanarea	
							55	310			

Allegato 2

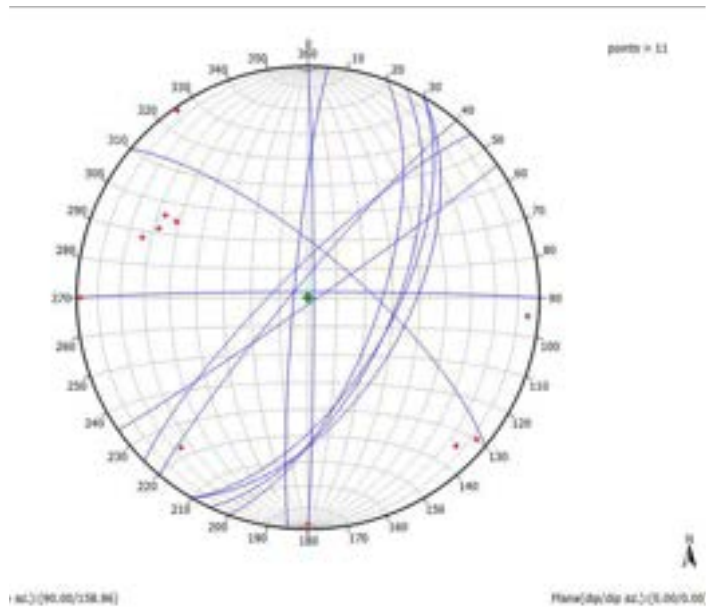
Proiezioni stereografiche di tutti i dati escluse le scan line



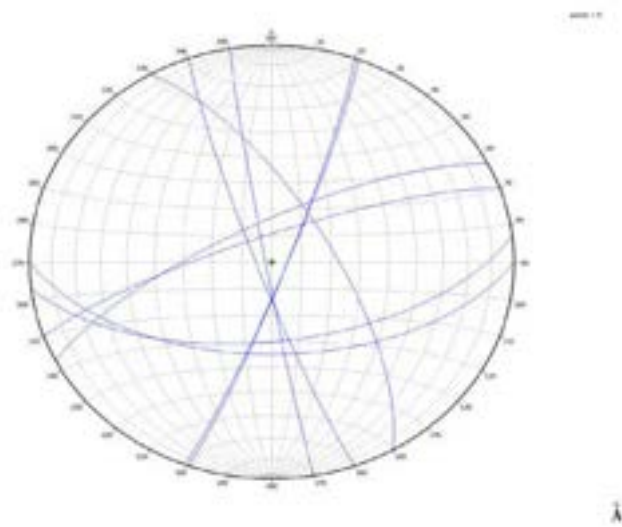
Sit 161 (vedi Fig. 2 nel testo per la localizzazione).



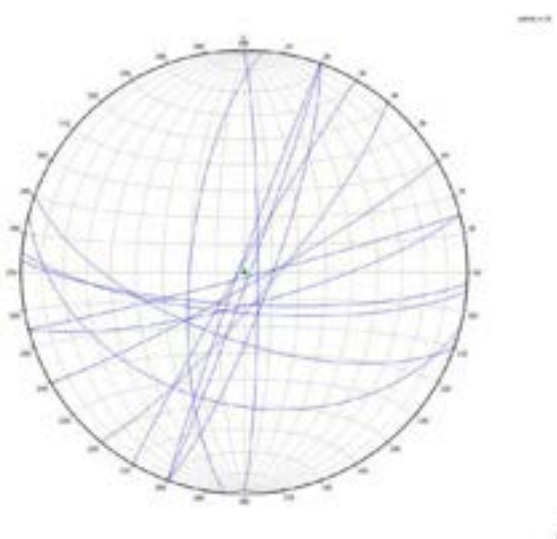
Sito 7



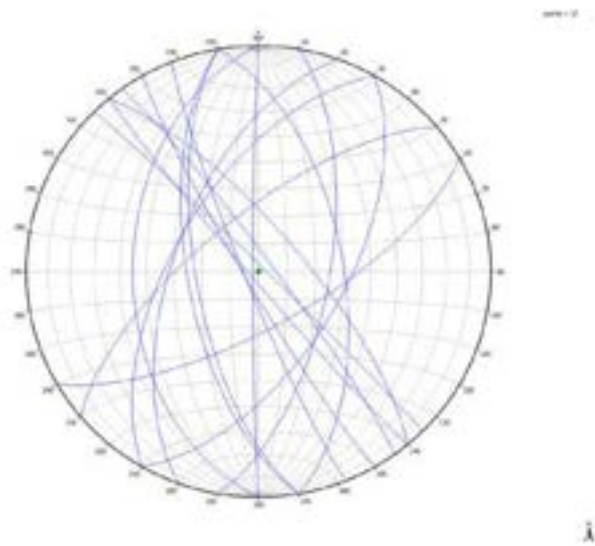
Sito 8



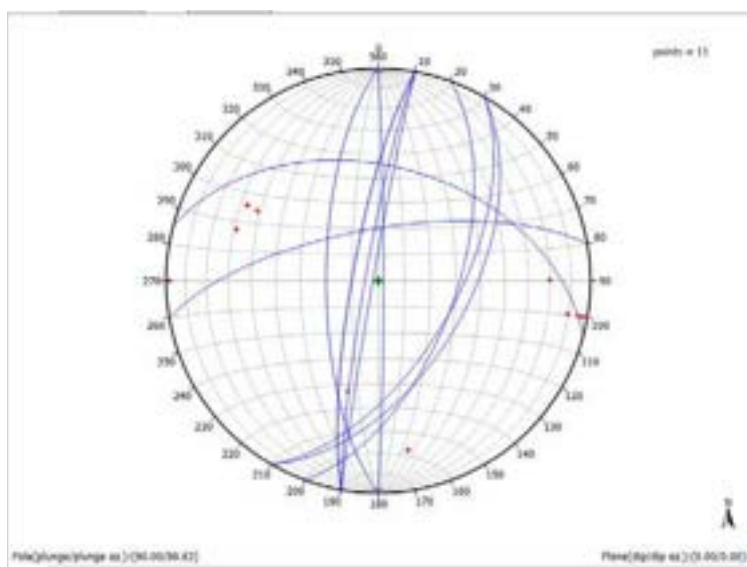
Sito 9



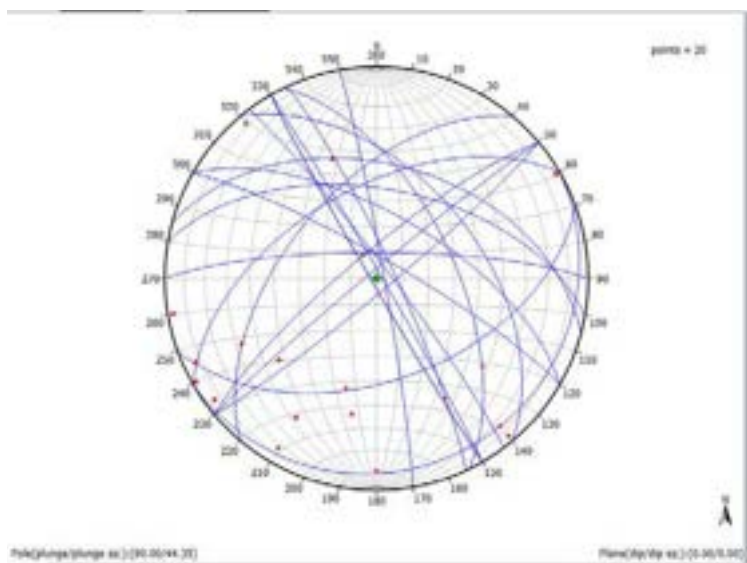
Sito 10



S i t o 1 1



S i t o -1 2



S i t o -1 3

Allegato 3

Tabella dei valori misurati attraverso le faglie. Le misure sono espresse in cm.

spessore totale	core	litologia	F
300	50	c	0,166667
460	50	c	0,108696
1	0,1	c	0,1
10	10	isrigus	1
5	5	isrigus	1
30	25	isrigus	0,833333
30	2	rioliti	0,066667
35	3	rioliti	0,085714
30	0,5	mil	0,016667
4	0,1	isrigus	0,025
10	2	isrigus	0,2
3	0,1	isrigus	0,033333
0,5	0,1	isrigus	0,2
150	100	isrigus	0,666667
20	15	andesiti_blocchi	0,75
15	10	andesiti_blocchi	0,666667
30	25	andesiti_blocchi	0,833333
50	3	vulcaniti rosse	0,06
60	4	vulcaniti rosse	0,066667

Allegato 4

8 apr 2014 SCAN LINE N°1 coord. UTM 32 WGS84 X 455735 Y 4337379 Igmibriti direzione parete N35°E							
N°	Distanza	azimuth	Inc	Up	Down	Term. UP	Term. Down
1	0	221	90	40	84	aff.	?
2	23	260	64	40	14	aff.	rocc.
3	33	0	90	26	100	frat.	?
4	52	230	67	7	34	rocc	fratt
5	60	10	85	38	8	strat	rocc.
6	63	180	53	9	6	frat.	rocc.
7	83	357	90	37	104	frat.	?
8	103	0	90	19	12	rocc	fratt
9	117	20	62	3	21	rocc	fratt
10	156	88	65	61	110	frat.	?
11	171	100	90	41	90	rocc	?
12	177	245	90	16	50	frat.	fratt
13	185	12	78	67	106	frat.	fratt
14	197	22	71	35	61	frat.	fratt
15	220	160	48	7	20	frat.	fratt
16	232	245	60	>200	130	?	?
17	244	280	72	44	15	rocc	fratt
18	262	30	64	42	50	frat.	fratt
19	307	310	70	5	62	frat.	fratt
20	310	230	80	5	23	frat.	fratt
21	320	265	82	110	135	rocc	?
22	328	15	76	39	50	frat.	fratt
23	349	15	75	12	136	frat.	?
24	353	255	78	22	25	frat.	fratt
25	363	255	74	61	65	strat	fratt
26	387	235	76	>200	140	?	?
27	393	230	80	14	10	frat.	rocc.
28	400	160	78	10	0	frat.	?
29	410	200	90	55	53	frat.	fratt
30	416	80	68	38	40	frat.	fratt
31	434	200	78	68	21	strat	fratt
32	435	40	88	68	57	strat	fratt
33	437	260	90	70	134	strat	?
34	440	220	72	8	60	frat.	rocc.
35	444	85	74	15	6	strat	fratt
36	470	10	78	114	133	rocc	?
37	484	9	65	62	8	strat	rocc.
38	488	255	62	15	6	strat	fratt
39	498	10	88	8	50	rocc	fratt
40	503	80	79	80	51	frat.	rocc.
41	510	70	81	92	138	strat	?
42	530	92	70	15	0	strat	fratt
43	540	190	72	24	24	rocc	rocc.
44	570	75	82	55	50	rocc	fratt

45	579	74	74	12	12	rocc	fratt
46	590	100	85	4	33	strat	fratt

9 apr 2014 SCAN LINE N°2 coord. UTM 32 WGS84 X 467583 Y 4333551 FORMAZIONE CIXERRI alternanza di conglomerati ed arenarie direzione parete N60°E								
N°	Distanza	azimuth	di p	Up	Down	lunghezza	Term. UP	Term. Down
1	0	330	65	5	0	5	?	?
2	40	245	88	20	11	31	rocc.	rocc.
3	51	260	55	17	2	19	frat.	rocc.
4	56	27	70	6	10	16	rocc.	rocc.
5	64	193	40	5	7	12	rocc.	rocc.
6	90	20	80	5	10	15	rocc.	rocc
7	98	20	89	11	5	16	rocc.	frat.
8	120	35	75	24	4	28	rocc.	rocc.
9	128	40	80	20	5	25	frat.	frat.
10	151	312	65	6	7	13	frat.	frat.
11	156	85	80	7	1	8	frat.	frat.
12	186	35	82	58	0	58	cambio facies(roccia)	fino conglomerato
13	199	250	75	25	30	55	frat.	cambio facies(roccia)
14	213	315	88	15	2	17	rocc.	frat.
15	226	200	85	3	9	12	frat.	frat.
16	247	210	83	8	6	14	frat.	frat.
17	252	130	63	10	3	13	rocc.	frat.
18	270	243	50	6	0	6	rocc.	
19	277	215	88	10	7	17	frat.	frat.
20	279	90	80	13	30	43	rocc.	rocc.
21	309	73	75	73	29	102	conglomerati	rocc.
22	438	90	80	26	100	126	rocc.	conglomerati
23	455	60	80	8	10	18	rocc.	frat.
24	467	270	88	6	8	14	rocc.	rocc.(passa acqua)
25	490	65	88	53	40	93	rocc.	rocc.
26	495	60	80	50	32	82	rocc.	rocc.(beante)
27	498	64	88	18	4	22	frat.	frat.
28	504	63	82	49	1	50	frat.	frat.
29	514	242	88	68	3	71	conglomerati	frat.
30	560	180	88	70	20	90	conglomerati	rocc.
31	566	10	82	67	104	171	conglomerati	conglomerati
32	580	55	88	50	20	70	conglomerati	rocc.
33	581	52	85	40	30	70	conglomerati	frat.
34	608	238	85	23	60	83	conglomerati	frat.(aperta)
35	660	40	85	80	100	180	conglomerati	conglomerati
36	682	57	85	10	2	12	conglomerati	rocc.
37	730	260	85	100	200	200	conglomerati	conglomerati

scan line 2A 2 metri strato arenaria superiore allo strato di conglomerato sovastante scan line 2								
1	33	80	72	7	9	16	rocc.	rocc.
2	41	215	62	3	3	6	rocc.	rocc.
3	45	210	75	8	22	30	rocc.	frat.
4	47	30	73	4	0	4	rocc.	
5	51	30	70	1	0	1	rocc.	
6	59	31	60	54	8	62	rocc.	rocc.
7	78	230	65	33	20	53	rocc.	rocc.
8	87	230	67	12	8	20	frat.	frat.
9	129	80	64	8	3	11	rocc.	rocc.
10	170	290	82	14	57	71	frat.	frat.
11	186	220	65	7	5	12	frat.	rocc.
12	188	20	65	4	0	4	frat.	

11 apr 2014 SCAN LINE N°3 coord. UTM 32 WGS84 X 455759 Y 4332972 NUR piroclastiti riolitiche saldate grigio-rossastre, porfiriche N80°W								
N°	Distanza	azimuth	Inc/Imm	Up	Down		Term. UP	Term. Down
1	-10	110	70	14	3	17	str.	rocc.
2	0	120	84	10	13	23	str.	str.
3	10	130	88	100	60	160	str.	str.
4	15	135	80	8	120	128	str.	?
5	38	270	88	60	5	65	frat.	frat.
6	40	140	88	20	8	28	frat.	frat.
7	45	143	88	25	38	63	frat.	frat.
8	49	260	80	20	4	24	str.	frat.
9	70	255	70	13	25	38	str.	str.
10	78	258	75	10	110	120	str.	?
11	85	254	78	6	120	126	str.	?
12	91	264	82	42	23	65	str.	str.
13	100	255	88	68	115	183	str.	?
14	115	295	85	200	130	330	?	?
15	121	284	70	36	113	149	str.	?
16	137	293	72	200	117	317	?	?
17	180	100	88	200	110	310	?	?
18	185	90	83	77	150	227	str.	?
19	198	260	86	107	150	257	str.	?
20	212	260	78	28	150	178	str.	?
21	220	268	62	52	150	202	str.	?
22	226	278	65	52	10	62	str.	frat.
23	230	265	80	54	32	86	str.	str.
24	252	266	75	87	150	237	frat.	?
25	256	288	70	58	28	86	str.	frat.
26	272	277	65	12	53	65	frat.	frat.
27	280	255	55	11	1	12	frat.	str.

28	290	245	68	11	1	12	str.	str.
29	308	266	88	17	27	44	str.	frat.
30	312	272	72	53	110	163	str.	?
31	330	270	65	18	47	65	str.	str.
32	334	290	75	20	8	28	str.	str.
33	352	268	75	23	48	71	str.	str.
34	363	284	83	20	8	28	str.	str.
35	380	215	60	12	38	50	str.	frat.
36	395	290	74	40	59	99	str.	str.
37	410	275	80	12	19	31	str.	rocc.
38	420	270	79	3	26	29	rocc.	?
39	430	275	65	9	20	29	str.	frat.
40	434	275	65	9	70	79	str.	?
41	450	340	45	10	0	10	str.	
42	475	270	65	9	29	38	str.	frat.
43	480	275	47	9	30	39	str.	?
44	490	275	68	7	5	12	rocc.	frat.
45	491	300	87	10	33	43	str.	?
46	497	270	40	4	7	11	rocc.	rocc.
47	511	230	65	7	1	8	str.	frat.
48	512	270	76	5	0	5	str.	
49	518	75	76	4	0	4	str.	
50	524	145	82	2	2	4	str.	frat.
51	532	240	75	18	40	58	str.	frat.
52	534	165	70	1	0	1	str.	
53	542	255	72	21	80	101	str.	?

12 apr 2014 SCAN LINE N°4 coord. UTM 32 WGS84 X 464771 Y 4334877 paleozoico calcari laminati (dolomie) metamorfosati N20°E								
N°	Distanza	azimuth	Inc/Imm	Up	Down		Term. UP	Term. Down
1	0	25	80	200	200	400	?	?
2	22	75	55	7	8	15	rocc.	frat.
3	42	65	15	8	1	9	frat.	non si vede
4	50	270	35	2	1	3	rocc.	rocc.
5	63	270	30	3	3	6	frat.	frat.
6	74	15	88	17	92	109	frat.	rocc.
7	118	33	83	200	140	340	?	?
8	126	15	72	12	16	28	frat.	frat.
9	132	20	88	47	140	187	frat.	!
10	135	30	85	17	110	127	frat.	frat.
11	138	215	88	11	6	17	frat.	frat.
12	142	205	78	52	4	56	rocc.	frat.
13	143	203	78	7	15	22	frat.	frat.
14	150	30	88	30	70	100	rocc.	frat.
15	168	270	55	1	35	36	rocc.	rocc.
16	175	260	52	8	20	28	frat.	rocc.

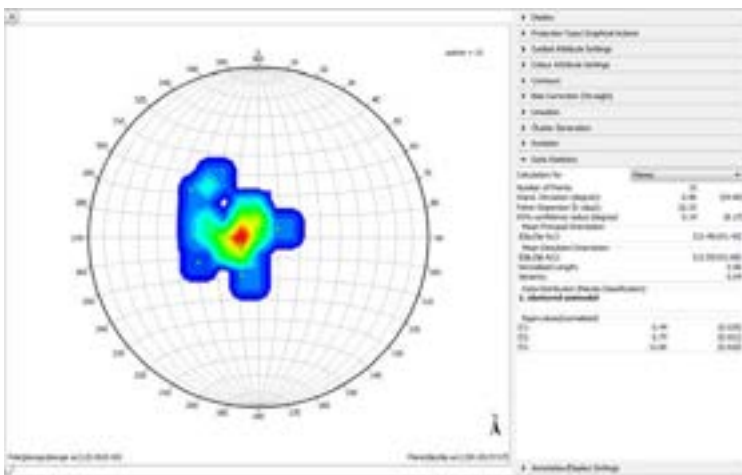
17	191	340	70	14	15	29	frat.	frat.
18	195	15	88	70	11	81	frat.	frat.
19	210	355	55	14	4	18	frat.	rocc.
20	218	195	88	54	10	64	frat.	rocc.
21	280	340	88	17	28	45	frat.	rocc.
22	310	290	32	50	23	73	rocc.	rocc.
23	327	255	60	80	25	105	frat.	frat.
24	343	30	80	80	170	250	frat.	?
25	370	130	60	140	200	340	?	?
26	371	180	85	20	2	22	rocc.	frat.
27	376	185	85	64	170	234	frat.	!
28	388	35	80	3	60	63	rocc.	frat.
29	393	25	88	37	140	177	frat.	!
30	398	250	40	65	5	70	frat.	frat.
31	400	200	85	200	140	340	!	!
32	415	255	70	25	12	37	frat.	frat.
33	419	270	50	6	12	18	frat.	frat.
34	436	20	88	200	200	400	!	!
35	443	266	35	18	20	38	frat.	frat.
36	477	264	75	11	20	31	frat.	frat.
37	486	254	60	20	27	47	frat.	frat.
38	518	140	75	58	200	258	frat.	!
39	550	175	75	86	5	91	frat.	frat.
40	555	35	61	28	71	99	frat.	frat.
41	563	20	84	92	100	192	frat.	frat.
42	578	280	13	17	7	24	frat.	frat.
43	598	25	88	36	300	336	frat.	!
44	605	310	51	0	14	14		frat.
45	618	70	20	3	3	6	rocc.	rocc.
46	630	330	75	35	38	73	frat.	frat.
47	636	70	20	7	6	13	frat.	rocc.
48	643	350	82	7	32	39	frat.	frat.
49	660	210	85	25	100	125	rocc.	frat.
50	711	330	88	57	26	83	frat.	frat.
51	713	190	86	300	300	600	!	!
52	724	330	27	14	54	68	frat.	frat.
53	739	350	58	27	30	57	frat.	frat.
54	742	310	65	18	30	48	frat.	?

Allegato 5

Scan line 1: analisi dei set

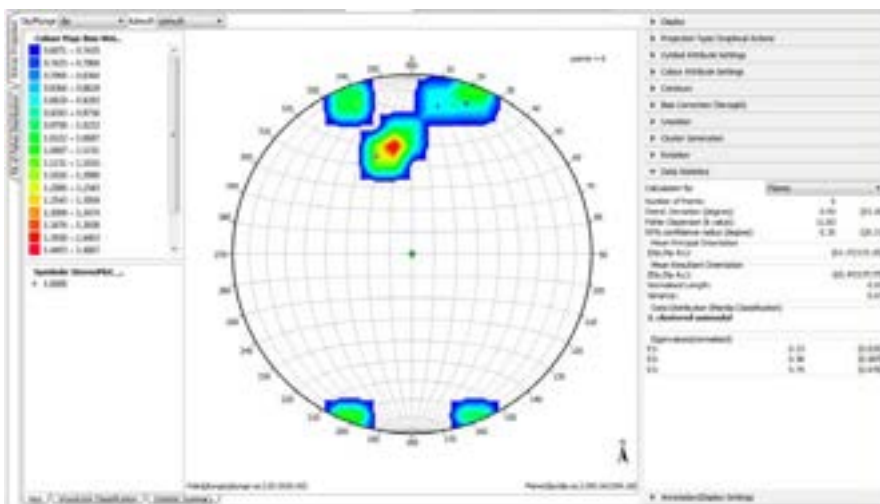
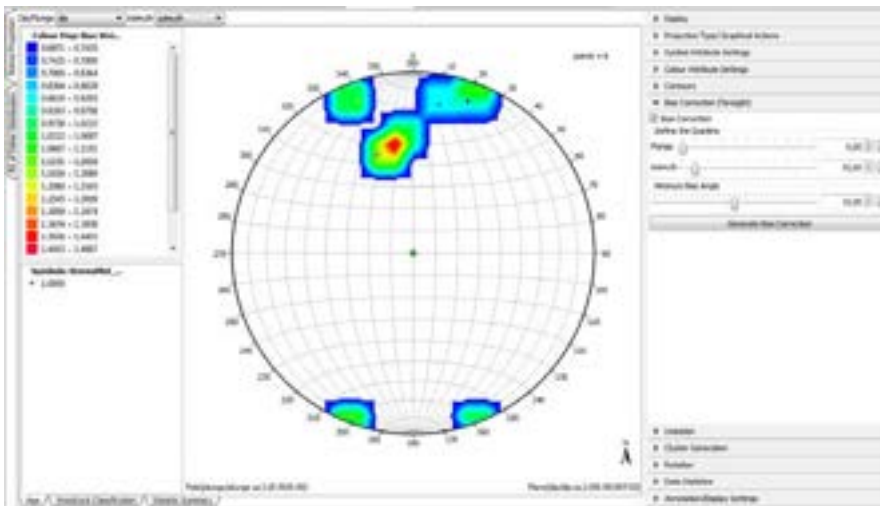
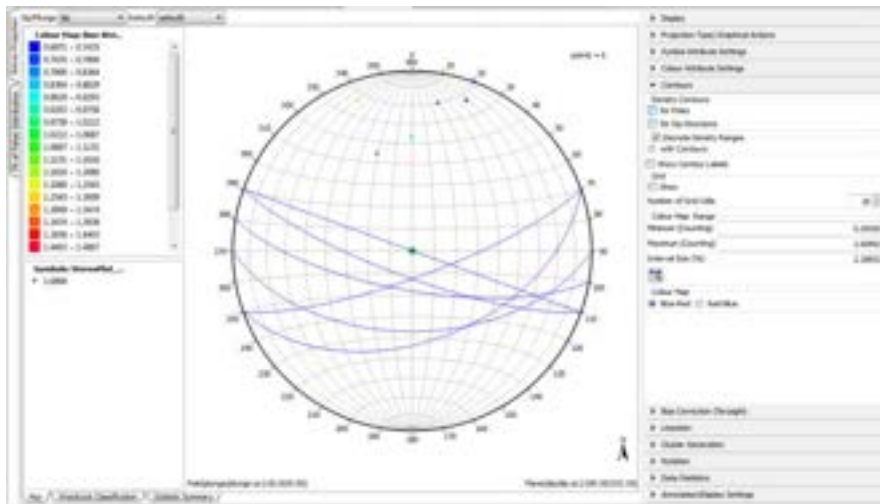
Set 0 – 79/84; 12/101 - spacing = 34, 79 cm

dip	azimuth	length	spacing	Bias Weights
set 1				
90	0	126	33	1,00
85	10	46	60	1,00
90	357	141	83	1,00
90	0	31	103	1,00
62	20	24	117	116849,00
78	12	173	185	1,00
71	22	96	197	0.752013
64	30	92	262	0.980272
70	310	67	307	172223,00
76	15	89	328	1,00
75	15	148	349	1,00
88	40	125	435	1,00
78	10	247	470	1,00
65	9	70	484	114292,00
88	10	58	498	1,00

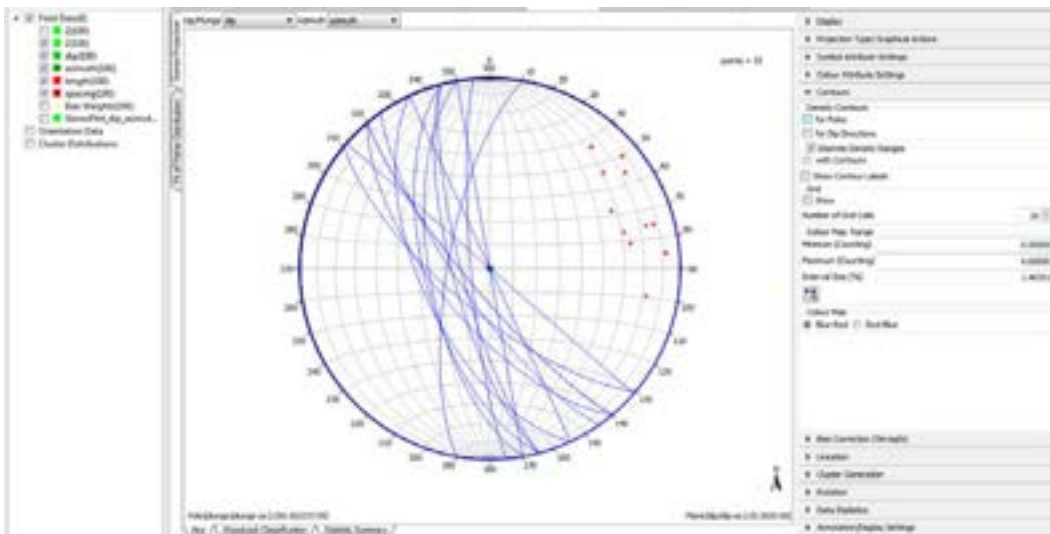


Correzione di Terzaghi per il set 0

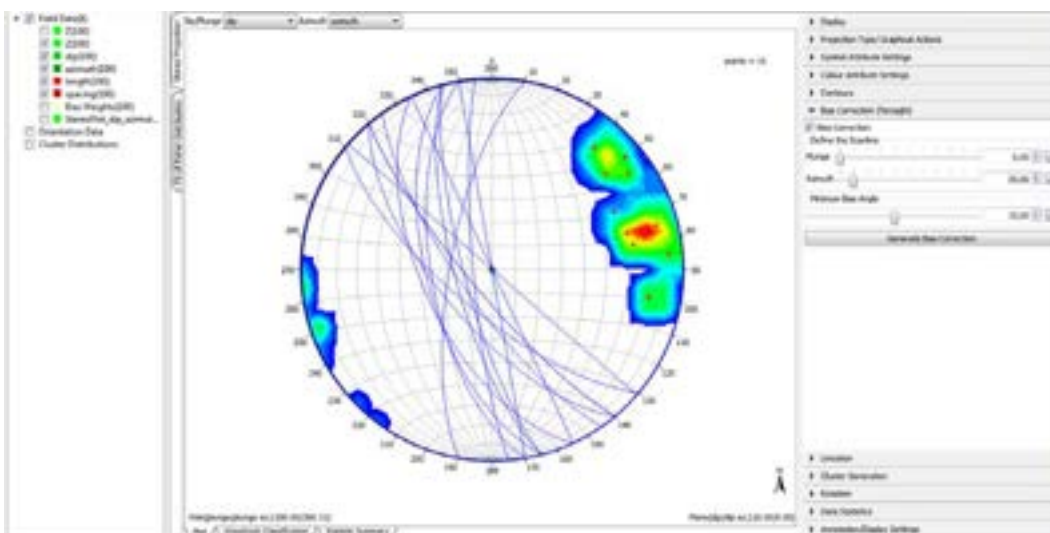
Set 1



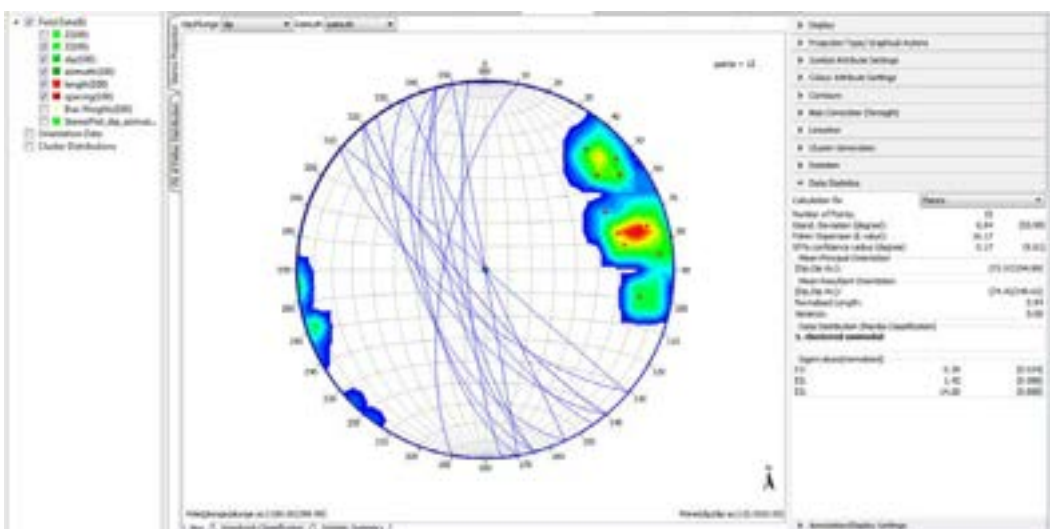
Set 2



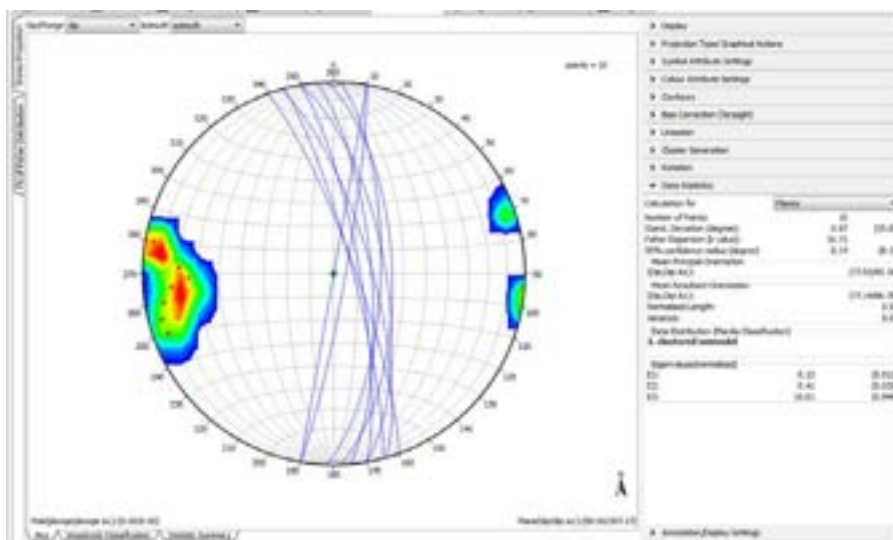
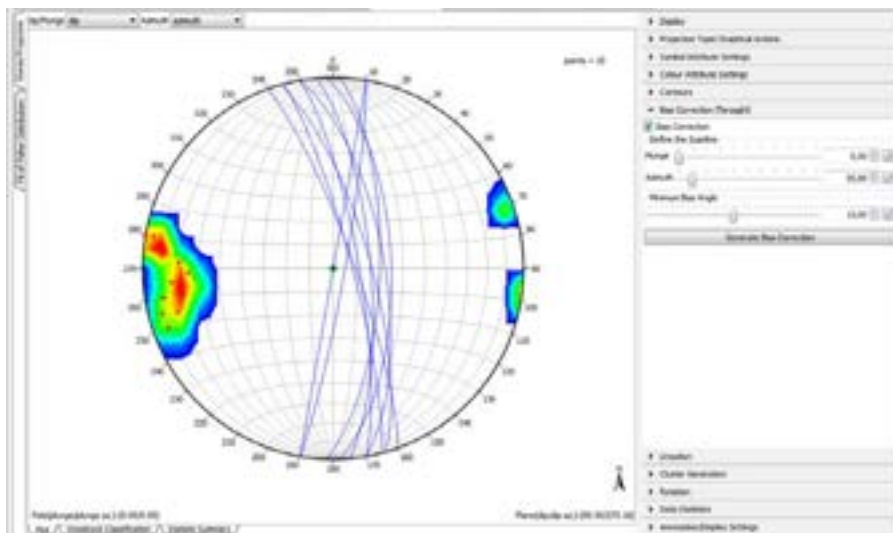
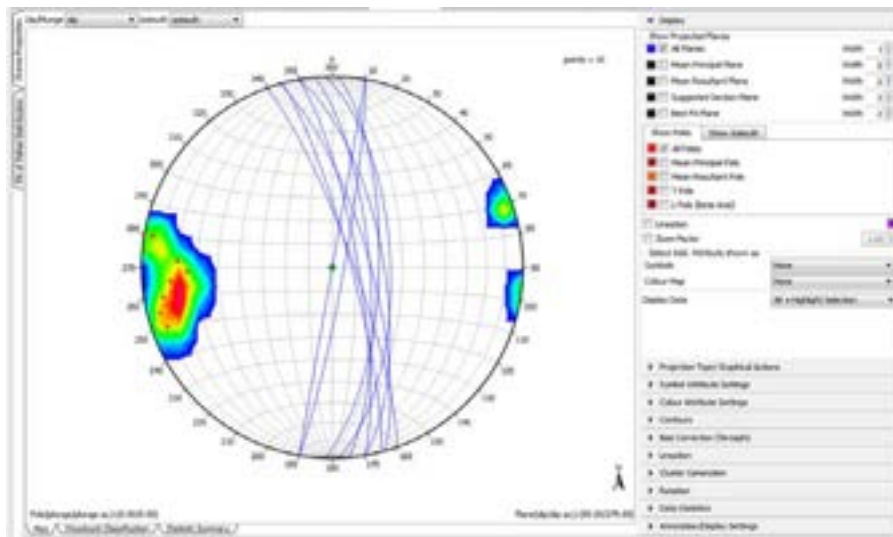
Correzione di terzagli



Dati statistici

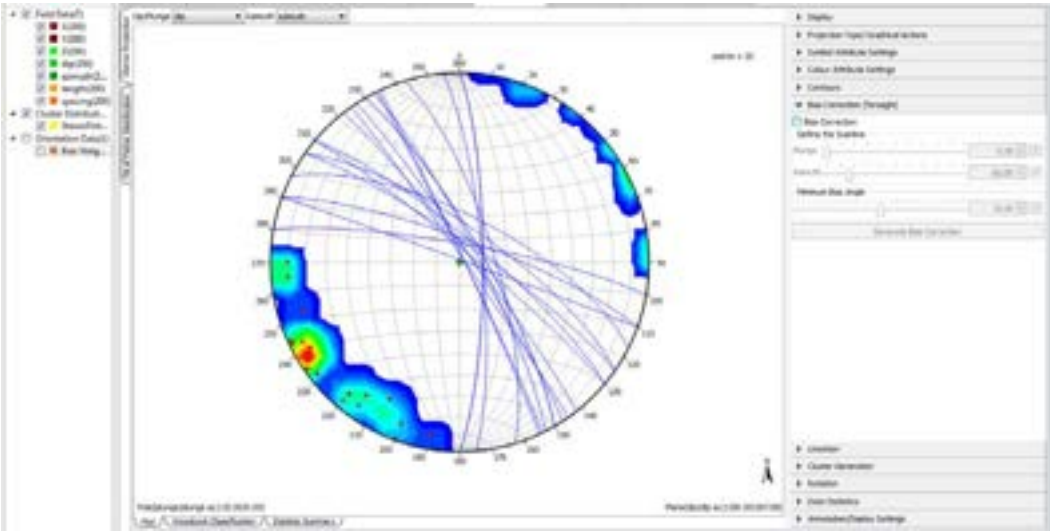


Set 3

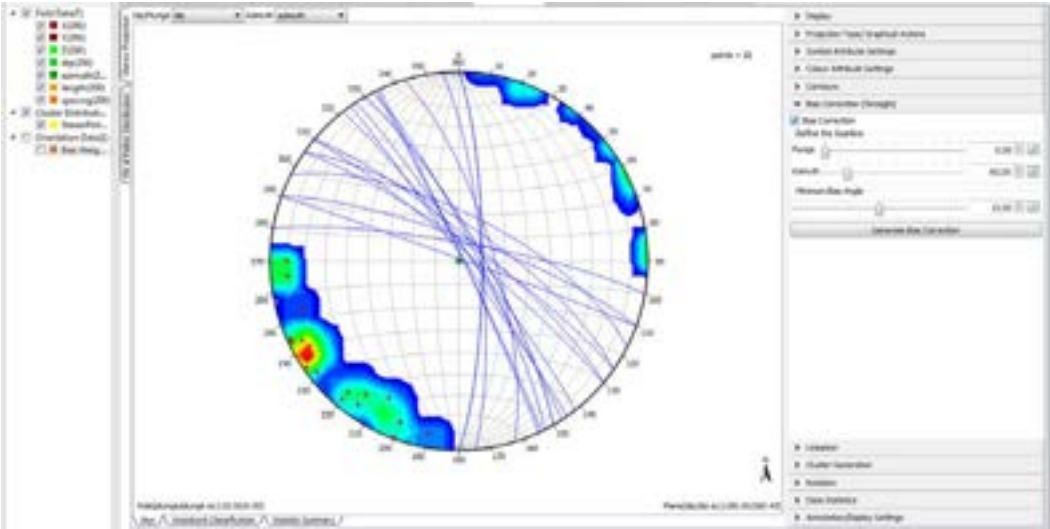


Scan line 2: analisi dei set

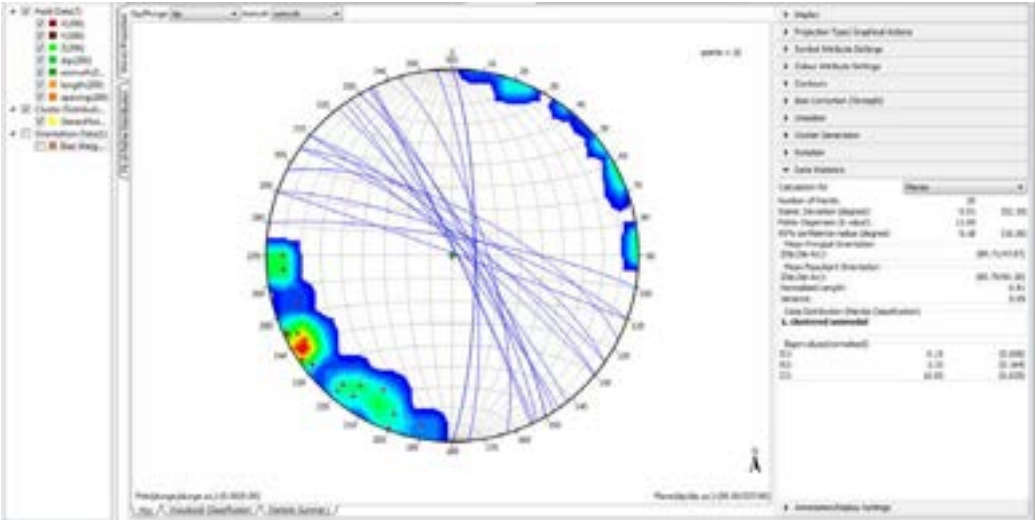
SC2 - Set 0



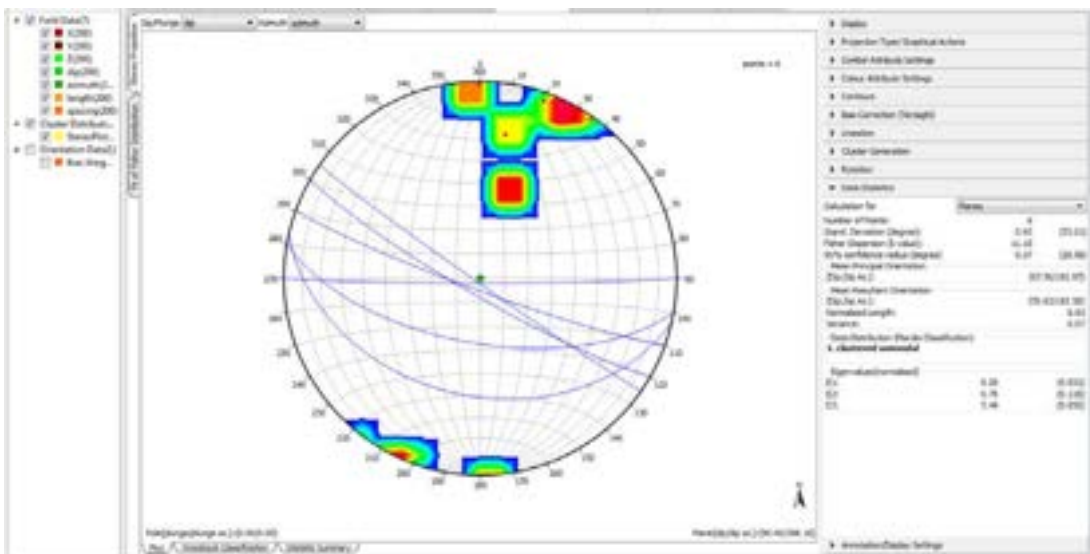
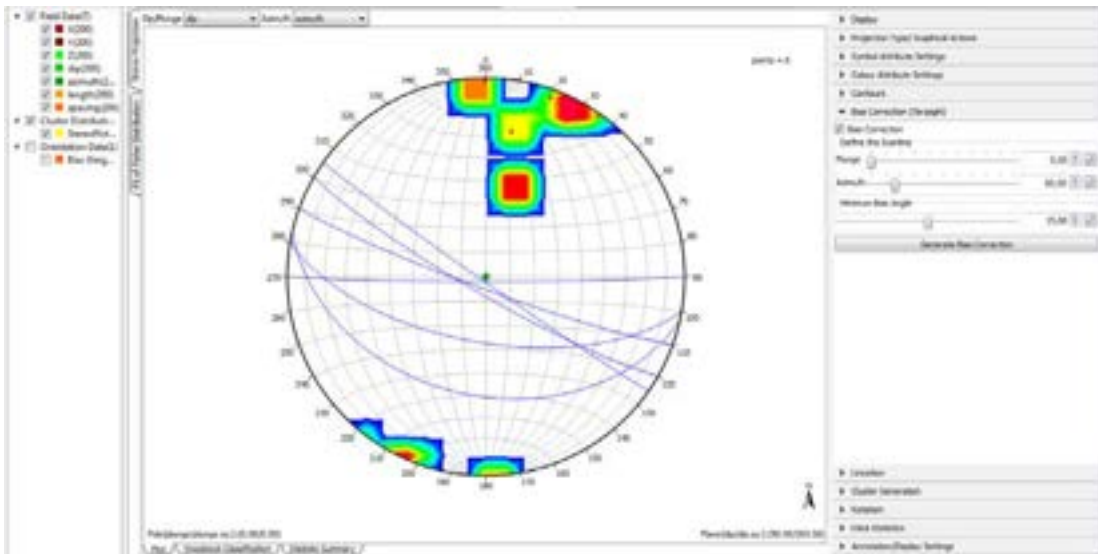
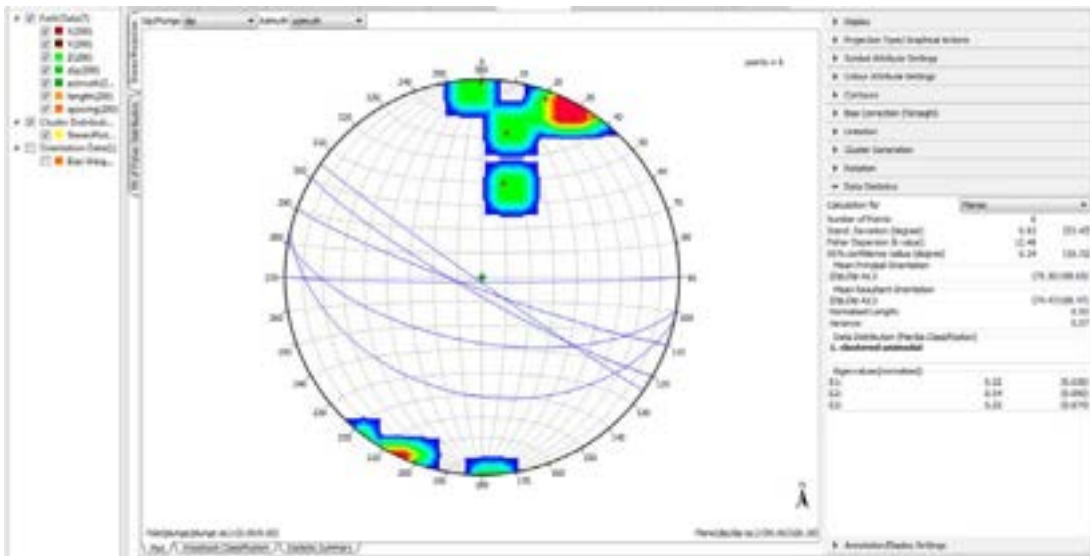
Terzaghi correction



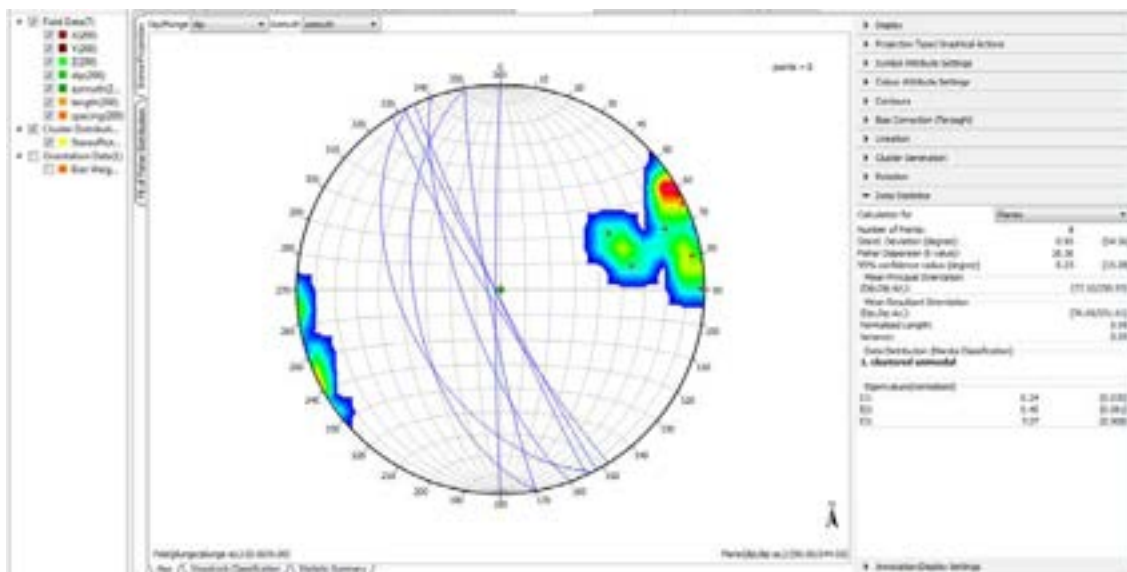
Statistica



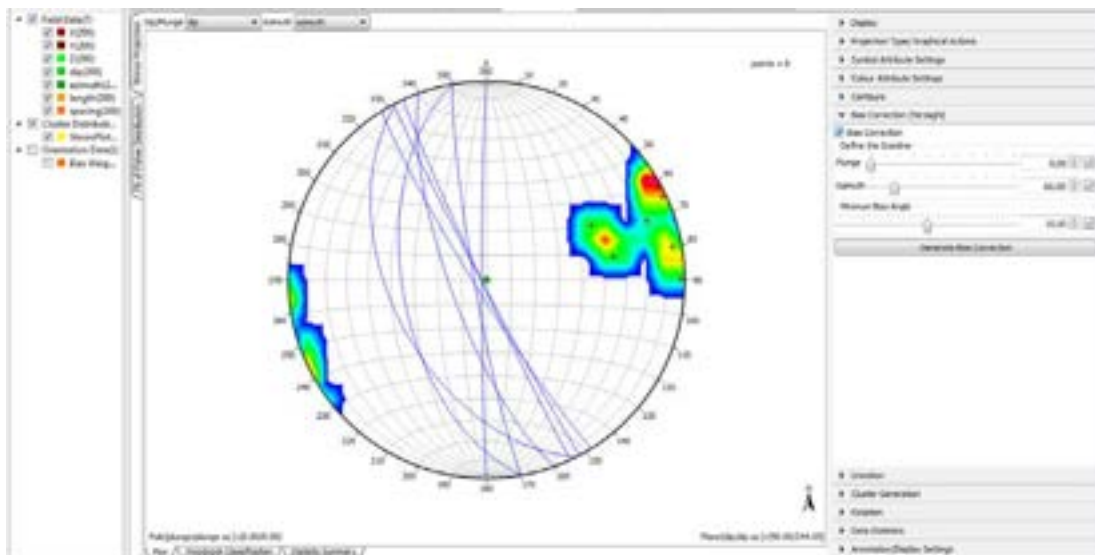
SC2_Set 1



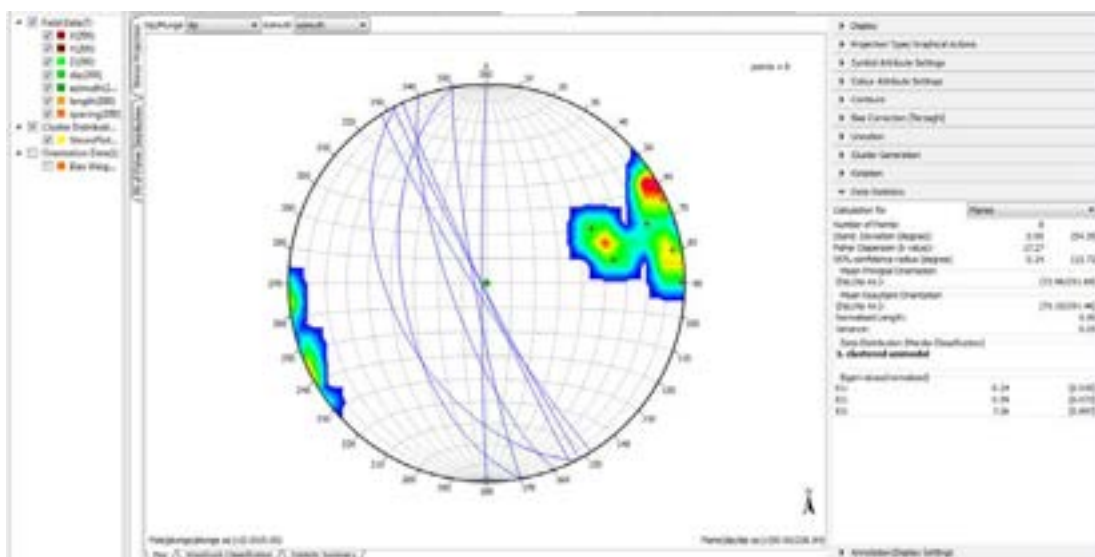
SC2 - Set 2



Terzaghi

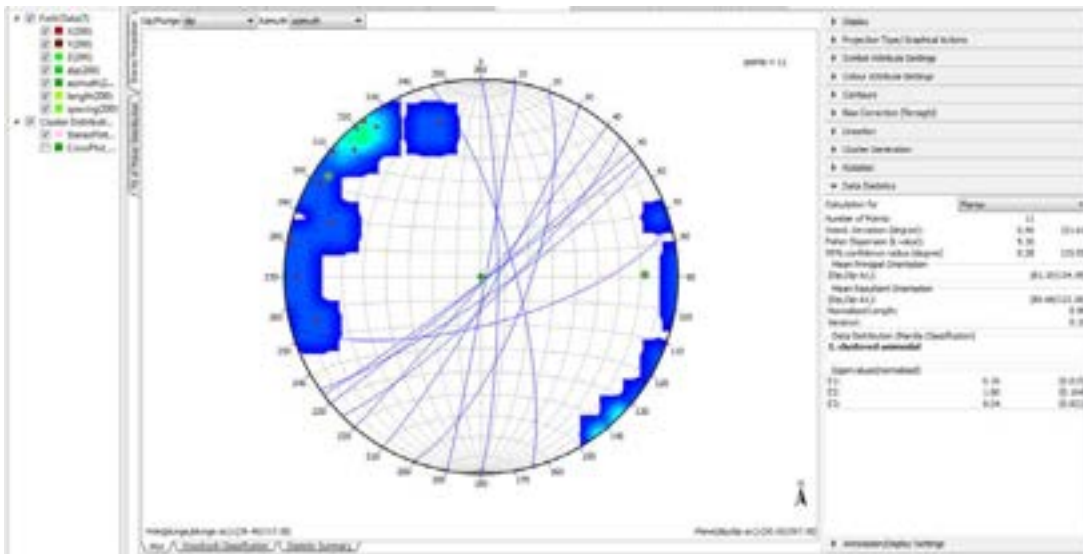


Dati finali

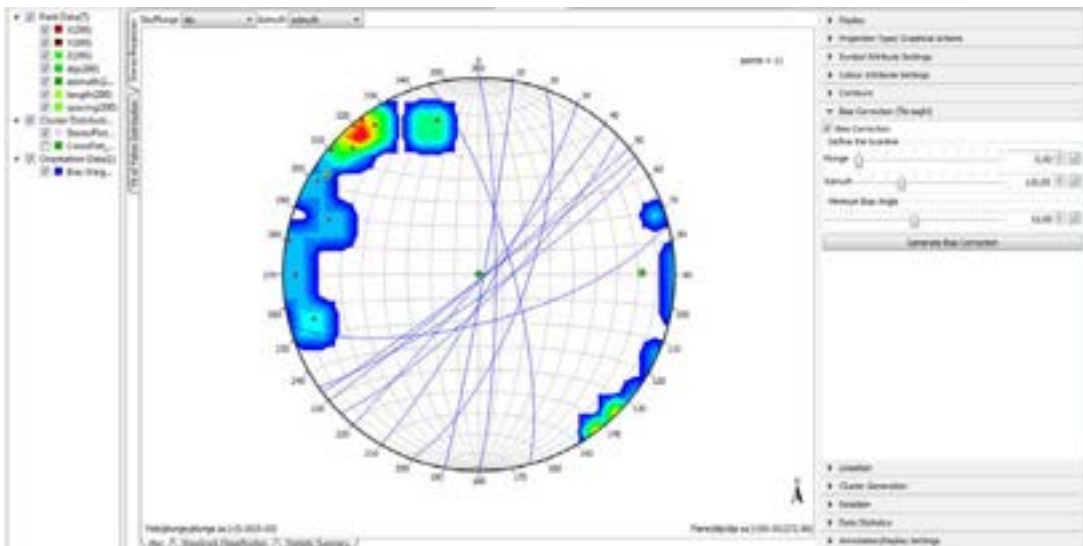


Scanlin3

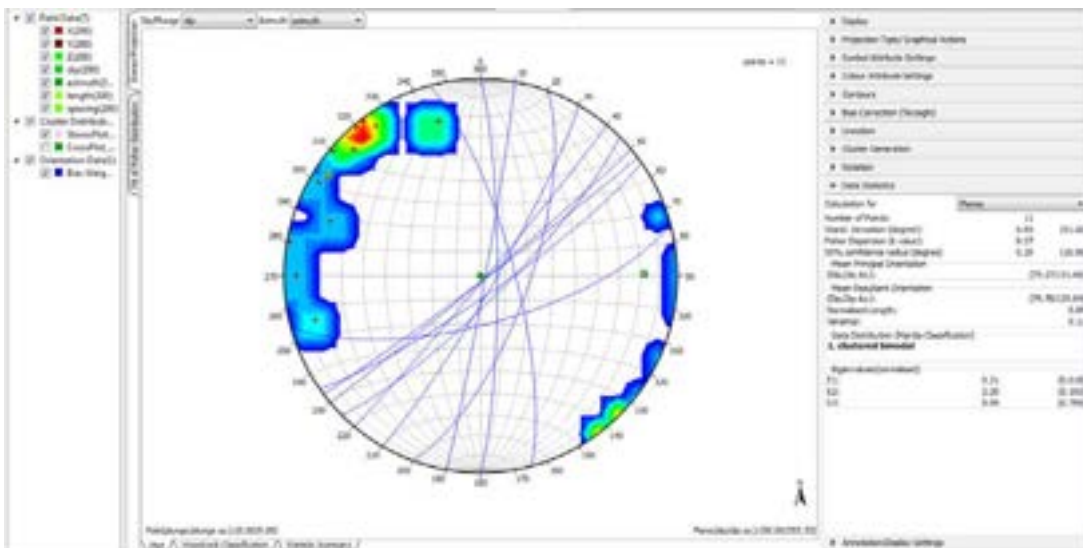
SC3 -set 0



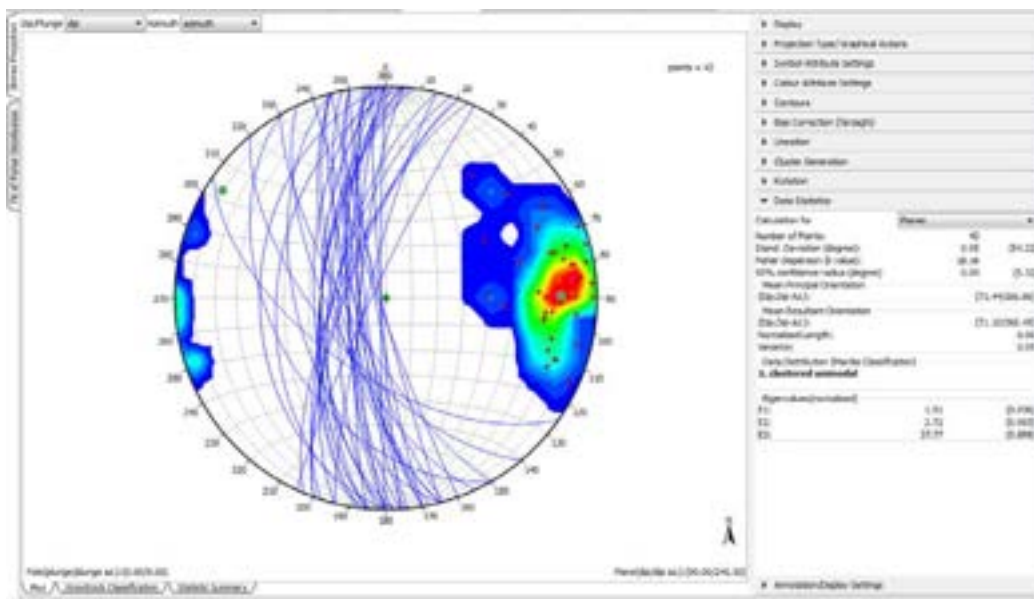
Terzaghi correction



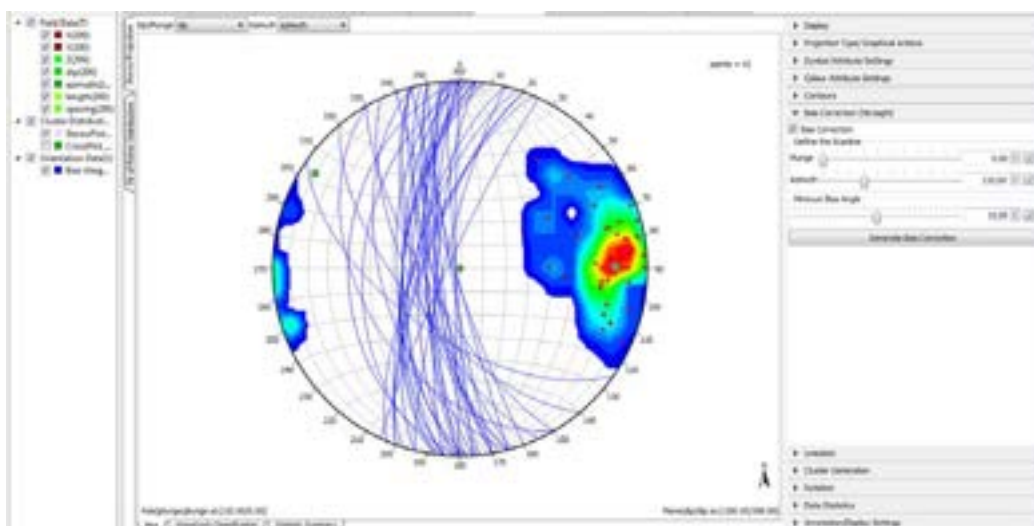
Valori corretti



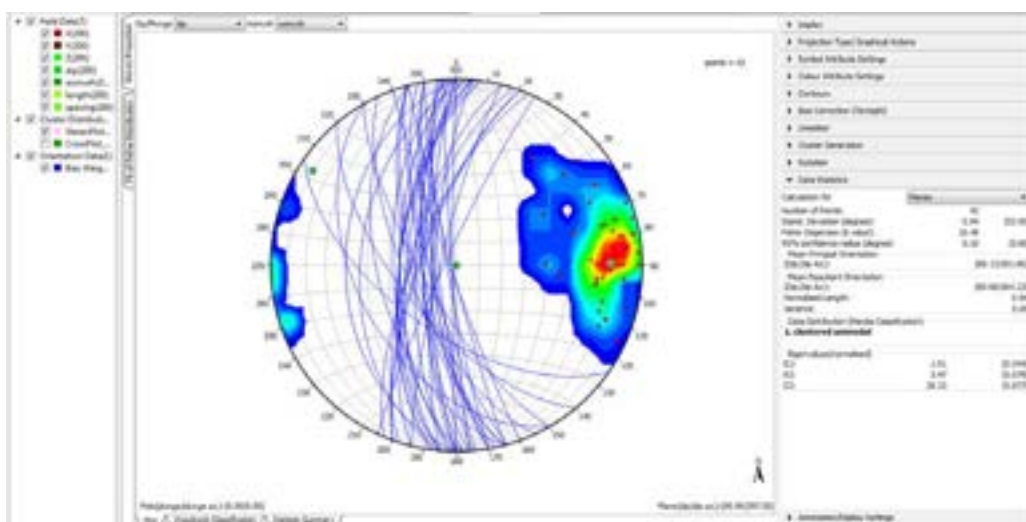
Scanline 3 – set 1

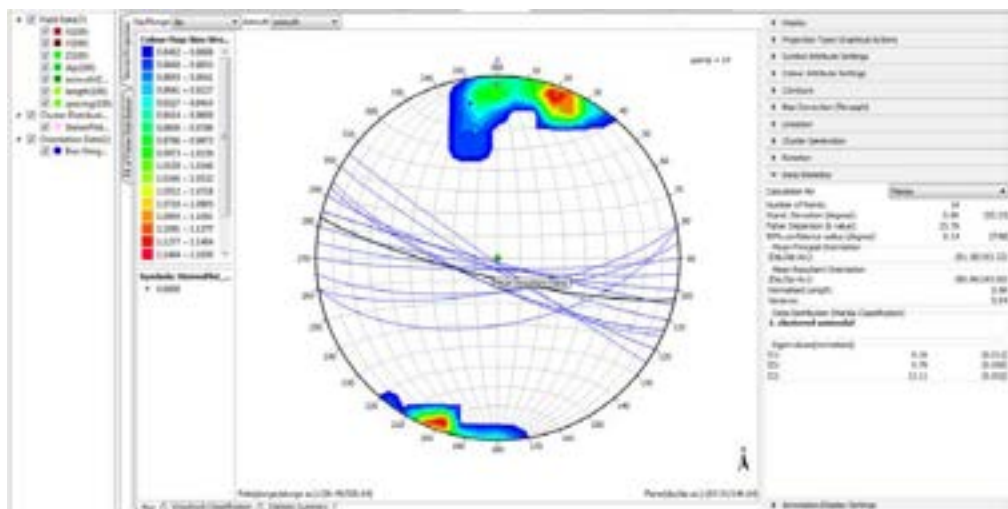


Terzaghi correction

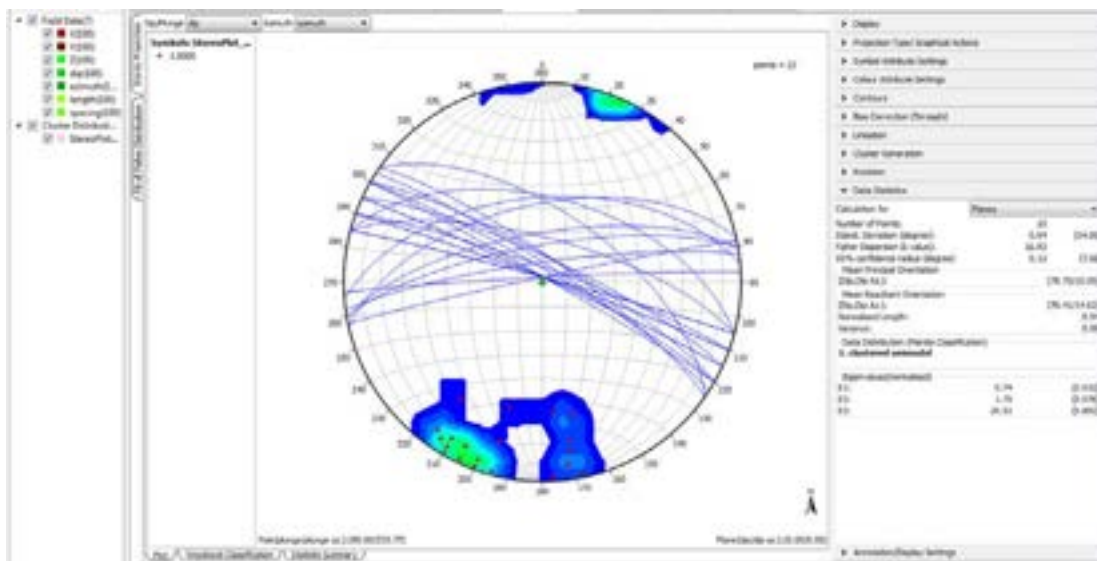


Valori finali

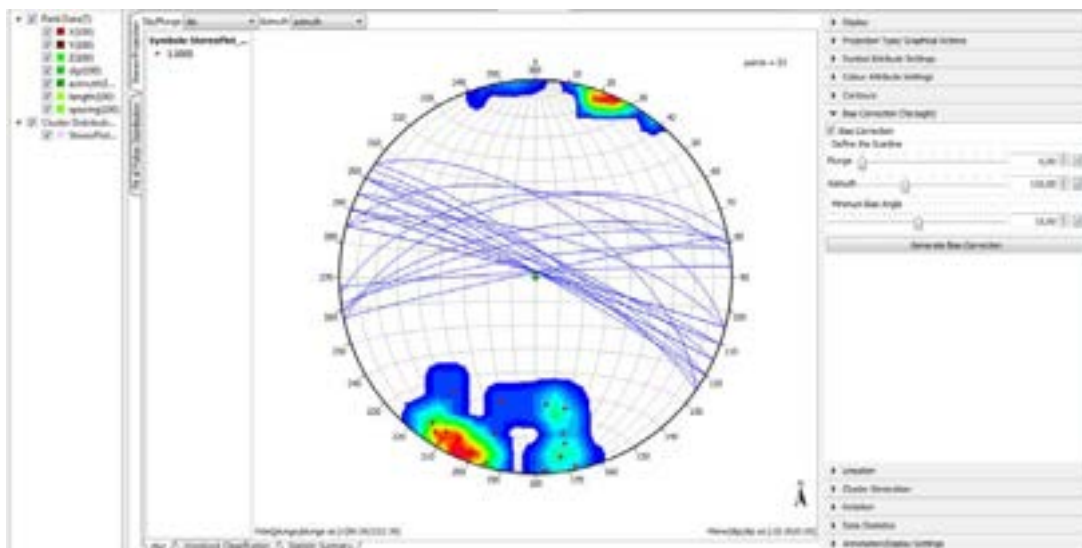




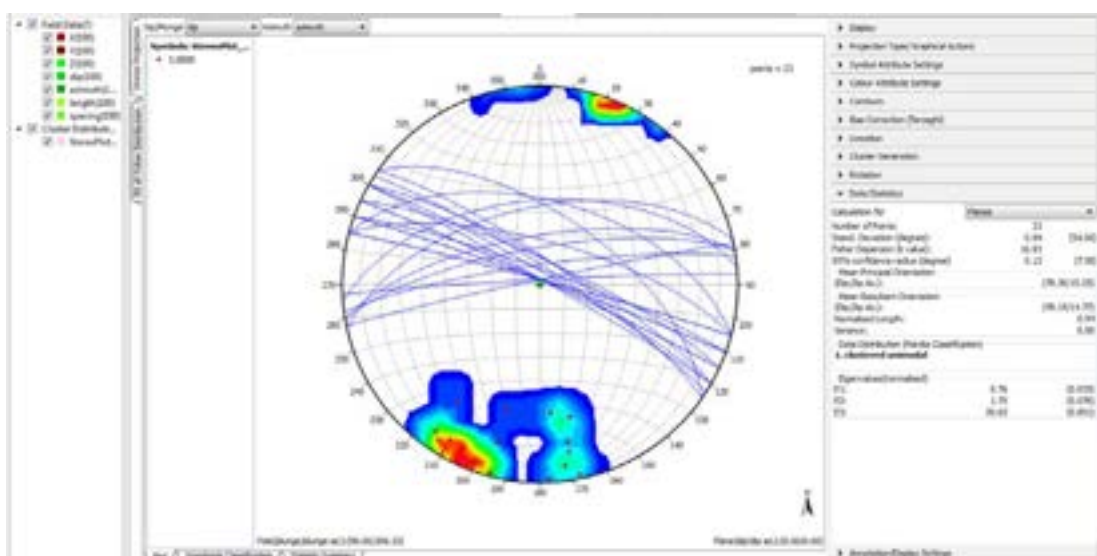
Scanline4 – set 1



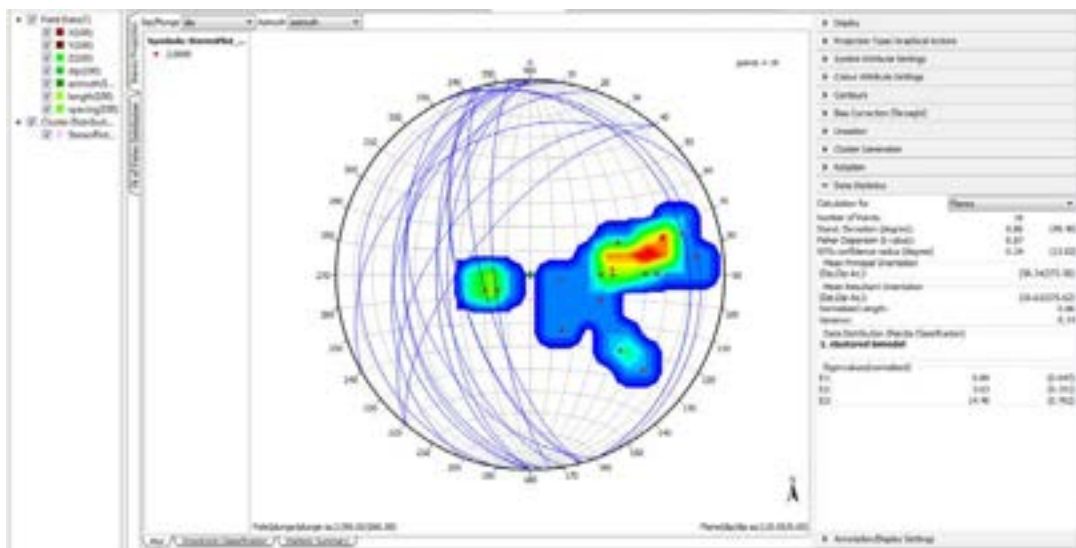
Terzaghi correction



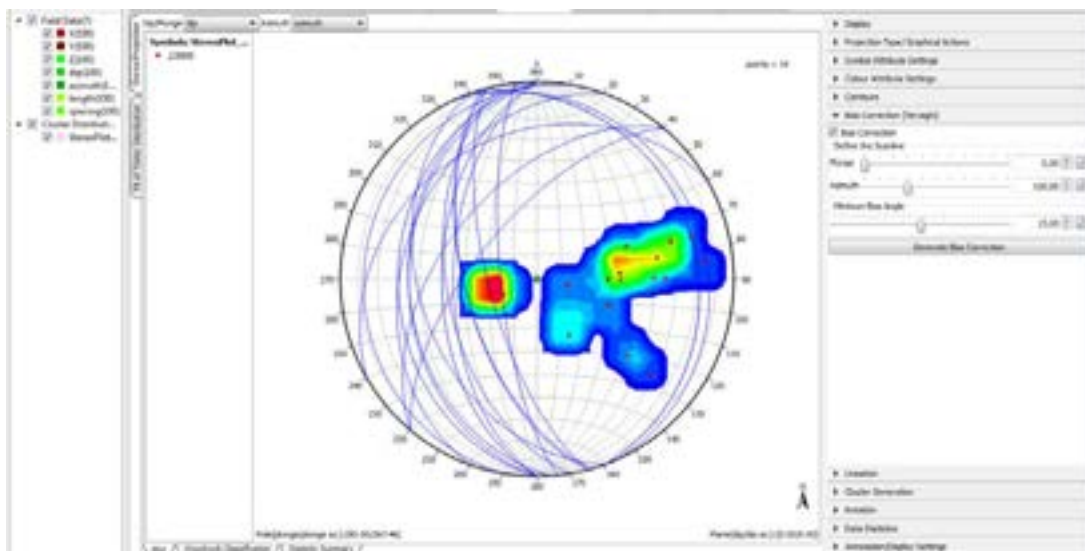
Valori finali



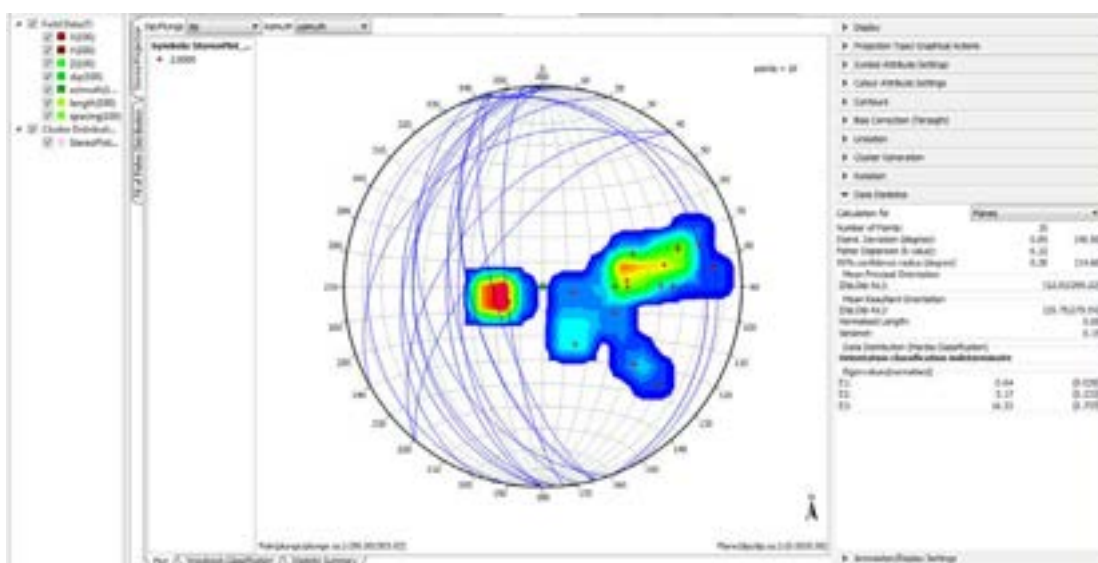
Scanline 4 – set 2



Terzaghi correction



Valori finali



Allegato B

CARBOSULCIS S.p.a.

DATA: 30 Settembre 2014

N° DOCUMENTO

CBS-RISVI 2014-09

LOCALITA'

NURAXI FIGUS – GONNESA (CA)

LAVORO

Accordo Collaborazione Carbosulcis-Sotacarbo

Rapporto Tecnico

Progetto B.2 "Cattura e sequestro della CO₂ prodotta
dall'utilizzo di combustibili fossili"

Sub-obiettivo C.1 "Raccolta delle informazioni,
ricostruzione critica delle attività pregresse e rilievo
geostrutturale"

INDICE

1. INQUADRAMENTO.....	2
2. PREMESSA	2
3. AZIENDA.....	5
4. PROGETTO	5
5. OBIETTIVI ATTESI.....	17
6. OBIETTIVI RAGGIUNTI E RISULTATI	22
7. SINTESI E CONCLUSIONI.....	33

1. INQUADRAMENTO

In questi ultimi anni, è sempre più diffuso e crescente l'impegno, da parte della comunità internazionale, per la salvaguardia del nostro ecosistema, e la comunità scientifica sempre più impegnata nella individuazione di tecnologie e sistemi realmente percorribili per la riduzione delle emissioni in atmosfera di gas ad effetto serra, che contribuiscono al surriscaldamento della Terra.

L'Italia, che si sta muovendo in questa direzione, ha avviato iniziative rivolte alla risoluzione del problema globale di riduzione delle emissioni.

Oltre agli impegni conseguenti alla sottoscrizione del Protocollo di Kyoto, agli accordi multilaterali per la riduzione delle emissioni entro il 2020, l'Italia ha avviato una serie di iniziative che mirano alla collaborazione e alla partecipazione a gruppi di lavoro internazionali, con l'obiettivo di sviluppare tecnologie avanzate per la cattura e lo smaltimento dei principali gas clima alteranti e per la diffusione commerciale delle stesse tecnologie, con particolare attenzione alle esigenze dei paesi in via di sviluppo.

2. PREMESSA

E' ormai appurato che il bacino carbonifero del Sulcis è in Italia il più interessante sito dove realizzare una tecnologia di recupero del metano dai letti di carbone, sia con sistemi convenzionali (CBM, Coal Bed Methane), che con sistemi avanzati (ECBM, Enhanced Coal Bed Methane).

La tecnologia ECBM, oltre che per lo sfruttamento del metano, occupa notevole rilevanza nell'ambito della mitigazione della CO₂ nell'atmosfera, e quindi nello sviluppo sostenibile rispetto all'ambiente.

Strategicamente il bacino del Sulcis potrebbe risultare un Polo di eccezionale importanza, tanto per il recupero di una risorsa energetica naturale qual è il metano presente nei letti di carbone profondi, quanto nella potenzialità di realizzare un confinamento geologico della CO₂.

Il carbone continua a rappresentare oggi più di prima una fonte energetica fondamentale, ancora ampiamente sfruttabile, ed economicamente vantaggiosa, che può garantire sostentamento nel transitorio necessario al consolidamento di fonti energetiche alternative.

Esso rappresenta il più lungimirante combustibile fossile nel pianeta, capace di soddisfare le esigenze energetiche planetarie per i prossimi 200 anni; la sua vantaggiosa collocazione sui mercati internazionali e il consolidamento della tecnologia tradizionale per la generazione di potenza, gli conferiscono costi di produzione dell'energia piuttosto contenuti.

Il problema nell'impiego di carbone per la generazione di potenza è dato dalla natura dei gas provenienti dalla sua combustione nelle emissioni rilasciate in atmosfera.

Da una analisi sia dei risultati delle attività di sperimentazione condotte a livello mondiale e sulla base delle caratteristiche attualmente note del bacino carbonifero Sardo, l'applicazione delle tecniche ECBM al giacimento carbonifero del Sulcis appare promettente sia in termini di condizioni che di volumi di confinamento dell'anidride carbonica.

L'effettiva potenzialità della provincia carbonifera del Sulcis sarà valutabile grazie ai risultati che verranno conseguiti dal progetto di ricerca riguardante la caratterizzazione del sito, ovvero l'oggetto della collaborazione tra Carbosulcis e Sotacarbo, e i partner che concorreranno con supporto tecnico, intellettuale e finanziario, alla sua riuscita.

Competenze geologiche, conoscenza del territorio, detenzione della concessione mineraria, disponibilità di un sito e delle relative infrastrutture, esclusività di ricerca e sfruttamento del bacino, sono condizioni necessarie ma non sufficienti a realizzare un progetto. E' stato pertanto fondamentale che la Carbosulcis abbia ricercato in Italia e all'estero partnerships capaci di fornire supporto dal punto di vista tecnologico e di know-how.

Oltre all'aspetto industriale di estremo rilievo, la concessione potrebbe infatti rappresentare un Polo scientifico di eccellenza, dove università e industria troverebbero il conforto nell'applicazione delle tecnologie sperimentali di Carbon Capture and Storage. Sarebbe quindi un'iniziativa che potrebbe fornire innumerevoli opportunità all'interno del nuovo sistema tecnico-politico-energetico, al livello nazionale ed internazionale.

I risultati attesi dalla realizzazione del progetto che prevede lo sfruttamento del bacino carbonifero del Sulcis per la messa a punto di tali tecniche, con conseguente maturazione di esperienze esportabili sul mercato internazionale, ha a premessa la condivisione delle informazioni e dei dati ottenuti dalla ricerca verso i partners nazionali che lavorano per la promozione del Sulcis come un polo di eccellenza sulle CCS, e ha pertanto le seguenti aspettative:

- l'individuazione di nuove soluzioni tecnico-impiantistiche perseguibili per incrementare l'utilizzo del carbone nel settore energetico in un sistema "zero emission", in cui le emissioni in atmosfera derivanti dalla combustione dei minerali sono pressoché nulle;
- il consolidamento delle competenze scientifiche e tecnologiche nel settore di applicazione delle tecniche CCS;
- l'impiego alternativo, e non concorrenziale al tradizionale sfruttamento del carbone Sulcis, del bacino carbonifero sardo in termini di sequestro geologico della CO₂;
- lo studio di un impianto ECBM, su scala industriale, che risponda alle esigenze di smaltimento di CO₂ delle sorgenti antropiche individuate nell'area del Sulcis e la definizione, in un sistema integrato di tipo "zero-emission";
- l'ulteriore sfruttamento dell'acquifero salino profondo per la massimizzazione degli obiettivi di stoccaggio sicuro dell'anidride carbonica;
- la convalida del definitivo confinamento della CO₂ attraverso lo studio dei comportamenti del gas nel bacino carbonifero e conseguente equiparazione delle tecnologie ECBM alle altre azioni previste dal Piano Nazionale di Riduzione delle Emissioni di CO₂ per il rispetto degli impegni internazionali assunti dall'Italia alla risoluzione del problema del surriscaldamento del pianeta;
- la riduzione dei costi di produzione per l'energia elettrica dalle centrali operanti nel Sulcis che conferiranno la CO₂ prodotta al futuro impianto industriale ECBM Sulcis grazie ai costi evitati dall'acquisto dei permessi di emissione e dai ricavi derivanti dalla vendite delle quote loro assegnate in quanto produttori di energia e non utilizzate.

3. AZIENDA

La Carbosulcis s.p.a. è titolare di una concessione mineraria “Miniera Monte Sinni” per lo sfruttamento delle risorse carbonifere e metanifere nell’area compresa tra i comuni di Carbonia, Gonnese e Portoscuso, nonché, in questi ultimi anni, titolare di un permesso di ricerca mineraria “Is Urigus”, attualmente scaduto, su carbone e metano nell’area vasta che dai comuni di Carbonia e Portoscuso si estende a Sud fino al comune di San Giovanni Suergiu .

Il permesso di ricerca ha permesso di condurre attività di sperimentazione operativa attraverso la realizzazione di una campagna di sondaggi profondi mirata alla caratterizzazione del potenziale reservoir.

4. PROGETTO

4.1. Aspetti generali

Il sito di confinamento della CO₂ è rappresentato dal bacino carbonifero del Sulcis che si estende nell’estremità Sud Ovest della Sardegna e si immerge in direzione SSW con un’inclinazione di circa 10°. La parte settentrionale del bacino è sfruttata con sistemi tradizionali di coltivazione del carbone nella concessione della miniera Monte Sinni, della Carbosulcis SpA, mentre la parte meridionale del giacimento, la cui profondità raggiunge gli 800 – 1000 m, è oggetto di ricerca per le applicazioni di stoccaggio geologico della CO₂.

Le attività di studio di Carbosulcis, attraverso campagne di sondaggi per la caratterizzazione del bacino e di sismica di superficie a riflessione, si sono sviluppate nell’area vasta che va dalla zona costiera a sud, fino all’area industriale del Sulcis, in cui è presente una centrale termoelettrica e diversi insediamenti industriali chimici e metallurgici.

Preliminari studi di caratterizzazione del carbone estratto e precedenti indagini sulla geologia del sito, hanno, come già detto, evidenziato una notevole affinità del bacino carbonifero all’applicazione delle tecnologie CCS. Infatti il bacino carbonifero del Sulcis presenta le seguenti principali caratteristiche geologiche:

- Buona Omogeneità del Reservoir che favorisce la distribuzione e l'adsorbimento della CO₂
- Carbone Sulcis Subbituminoso di medio rango con ottime capacità di adsorbimento della CO₂
- Faglie adatte al confinamento in quanto impermeabili e non eccessivamente estese
- Campo di profondità (800 – 1500m): ottimale per il confinamento CO₂
- “Caprock” costituito da una formazione arenaria argillosa, di permeabilità inferiore a 10⁻⁹ m/s, di spessore minimo di 300m, sormontato da una formazione vulcanica con potenza variabile
- Favorevole geometria e distribuzione del letto di carbone
- Presenza di una formazione acquifera sottostante allo strato profondo di carbone che aumenta sensibilmente la capacità di confinamento del sito.

Il primo studio di prefattibilità che ha evidenziato questi elementi, è stato condotto nel Novembre 2005¹ dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, su commissione della Sotacarbo, e ha espresso un parere positivo sulla presenza dei requisiti necessari ad impiegare il bacino carbonifero del Sulcis come serbatoio geologico per la CO₂.

Un successivo studio della TNO², nel 2006, pur sottolineando la necessità di approfondire le attività di studio e associare una ricerca in situ, ha confermato le positive premesse in merito alla configurazione del serbatoio geologico. La presenza di faglie rappresenta generalmente una criticità del sistema di confinamento, poiché può essere un veicolo di migrazione del gas dal sottosuolo e quindi del ritorno della CO₂ in superficie. Tuttavia se le faglie risultano impermeabili queste possono conferire un effetto migliorativo al sistema, garantendo la sigillazione e l'isolamento tra diverse aree di stoccaggio.

Inoltre, da test di laboratorio sul carbone raccolto nelle aree di coltivazione o campionato dalle carote realizzate in passato ai fini dell'esplorazione, che hanno sicuramente affinità

¹ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Studio di Fattibilità (I Studio) su possibile stoccaggio geologico di CO₂ tramite tecniche di ECBM nella Provincia Carbonifera del Sulcis – F. Quattrocchi - 2005

² TNO Istituto Nazionale di Ricerche Olandese - Servizio Geologico – Evaluation of the potential of the application of Enhanced Coal Methane production in the Sulcis basin (Sardinia) – F. Van Bergen; H. Pagner - 2006

giacimentologiche con la formazione carbonifera profonda oggetto dello studio, è stata evidenziata la sua notevole attitudine all'adsorbimento della CO₂.

Carbosulcis ha realizzato attività di ricerca finalizzate all'acquisizione di dati e conoscenze sullo stoccaggio geologico della CO₂ che si svilupperà su due macrofasi principali che vertono nella :

- caratterizzazione del carbone Sulcis e individuazione delle proprietà necessarie a valutare la sua attitudine allo stoccaggio geologico della CO₂ ed al recupero del metano al fine di individuare la metodologia e l'approccio per la qualificazione e classificazione del bacino (reservoir) che avverrà attraverso analisi di laboratorio e modellazione matematica sulla base dei dati raccolti con campagne in superficie e attraverso sondaggi profondi.
- definizione della metodologia applicativa più idonea all'attività di ricerca sullo stoccaggio geologico della CO₂, l'estrazione del metano dal sottosuolo e l'impatto ambientale delle tecnologie proposte svolta attraverso sperimentazioni su impianto pilota e l'applicazione di metodologie e tecniche di monitoraggio ambientale.

Tali attività fanno seguito ad una fase di prefattibilità, già completata e precedente al presente accordo, che si è avvalsa anche della collaborazione di Sotacarbo, e che ha consentito di effettuare le seguenti attività

- Raccolta dati
- Campionamento carbone e acque da giacimento per test di prefattibilità
- Analisi e test su acque profonde e carbone nell'area coltivata
- Elaborazione dati su potenzialità carbone
- Esecuzione test linea sismica
- Elaborazione ed interpretazione sismica
- Valutazione congiunta dei dati (go/no go)
- Impostazione della metodologia di approccio

Il completamento di questa fase ha permesso di ottenere i primi risultati operativi incoraggianti per la realizzazione del progetto.

L'approccio nell'attività di studio di prefattibilità è stato sistematico, condotto separando distintamente l'aspetto di produzione del metano da quello di stoccaggio dell'anidride carbonica, focalizzando maggiormente l'attenzione sul sistema geologico ed idrogeologico del bacino.

Lo studio è partito dalla composizione del carbone, individuandone la proporzione nelle componenti organica ed inorganica, e identificando la bontà della parte organica che è quella che agisce nella generazione del CH_4 e nel sequestro della CO_2 .

Poiché attualmente non si conosce quale sia la situazione nelle aree profonde inesplorate del bacino carbonifero in merito alle caratteristiche del carbone e del sistema geologico, le attività di ricerca previste nel progetto consentono di confermare ed estendere i risultati preliminari della fase di prefattibilità.

Sottolineato che gli studi effettuati sono stati supportati da partnership titolate, l'esito della campagna di prefattibilità del 2006, è stato che il carbone Sulcis, attraverso misurazioni e valutazioni dirette o indirette, presenta buone affinità in termini di produzione e trasporto del metano, così come di sequestrare la CO_2 .

Le attività in campo realizzate in questi ultimi anni hanno riguardato l'indagine del bacino carbonifero attraverso la realizzazione di campagne di studio in situ, ossia il sondaggio con recupero di carota ad una profondità di 1000m e la sismica di superficie a riflessione per un totale di 40 km di linee. Durante il progetto sono state effettuate n.2 (SR1 e SR2) perforazioni profonde con recupero di carota in un'area periferica del bacino carbonifero ancora inesplorato, mentre la previsione del numero di fori considerato sufficiente ad avere una conoscenza più approfondita dei fenomeni legati alla capacità di segregare geologicamente l'anidride carbonica è indicativamente di n.5. La campagna di sismica invece implementerà quella già realizzata e riguarderà la realizzazione di una rete di linee di indagine che attraverseranno i punti di ubicazione dei pozzi, e che attraverso la correlazione con i dati stratigrafici della campagna di sondaggio permetterà di estendere l'interpretazione geologica a tutto il bacino.

4.2. Inquadramento geografico

Il progetto è stato realizzato nel periodo in cui Carbosulcis è stata titolare del permesso di ricerca denominato “Is Urigus” nell’area vasta del Bacino Carbonifero del Sulcis, come indicato nella carta di seguito, nella quale è indicata l’ubicazione dei possibili siti di sondaggio:

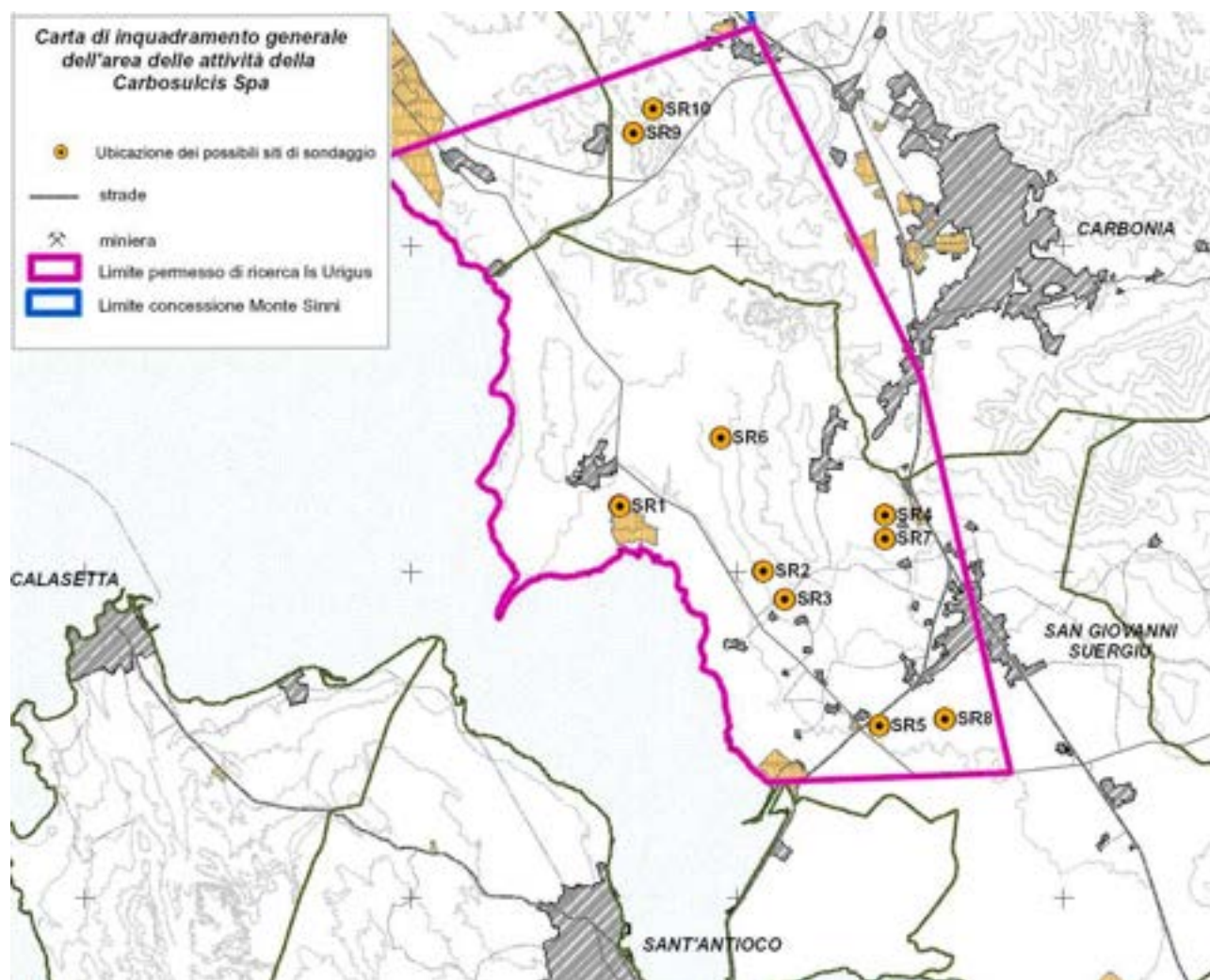


Figura 1

4.3. Inquadramento geologico, geomorfologico ed idrogeologico generale

Il Bacino Eocenico Sulcitano è noto per la presenza di un importante giacimento carbonifero, caratterizzato in affioramento da litologie riconducibili a genesi prevalentemente vulcanica e subordinatamente sedimentaria.

a. Le formazioni pre-terziarie

Il bacino eocenico sulcitano poggia prevalentemente sopra un substrato paleozoico, con evidente e marcata discordanza angolare, per lo più tramite un conglomerato di base a ciottoli notevolmente arrotondati.

Il substrato è per lo più rappresentato dalla successione ordoviciana-siluriana-devoniana, costituito dall'alto verso il basso da: filladi, filladi carboniose, quarziti (scisti a graptoliti e liditi), metacalcari (Calcari ad *Orthoceras*), metarenarie e metasiltiti con brachiopodi, ecc.; filladi; metarenarie e metaconglomerati.

Localmente le formazioni di tale successione sono spesso verticali con un accenno di vergenza verso WSW.

Le formazioni paleozoiche sono state raggiunte raramente con i fori sonda, che per lo più sono stati fermati nella parte stratigrafica della successione eocenica indicata con il termine minerario "il produttivo", dato che contiene il giacimento carbonifero.

b. Il Terziario

Nel bacino terziario si è riconosciuta una successione, potente mediamente 140 m, marina alla base e continentale nella sua parte medio - superiore, nella quale sono stati definiti il Tanetiano sup. (?), l'Ilerdiano, il Cuisiano ed il Luteziano basale.

b.1 Il Miliolitico

I primi strati marini incontrati nei pozzi, sono rappresentati da circa 30-40 m di calcari litorali ad Alveolinidae, Orbitolites, Miliolidae e alghe calcaree.

In questa successione sono state determinate ricche e significative microfaune e microflore, che hanno consentito una precisa datazione dei vari livelli.

A circa 30-40 m dalla base della trasgressione le faune si impoveriscono e le associazioni

acquistano un carattere oligotipico dominato dalla presenza pressoché esclusiva di Miliolidae ("Miliolitico" Auct.), a cui si accompagna saltuariamente qualche esemplare di Spirolina.

La diminuzione brusca dell'indice di diversità delle microfaune marca l'inizio della regressione che raggiunge l'acme nell'ambito del Cuisiano-Luteziano con la completa emersione del bacino.

b.2 Il Produttivo

Ai calcari miliolitici di ambiente litorale seguono calcari marnosi e marne lagunari a salinità progressivamente decrescente, dapprima a Ostracodi, poi a Characeae ed infine argille palustri e calcari d'acqua dolce a Gasteropodi polmonati.

L'età di questa successione, precedente ai primi livelli carboniosi, è incerta per l'assenza di marker biostratigrafici; essa può essere compresa fra l'Ilerdiano superiore e il Cuisiano.

Gli strati carboniosi si intercalano nei livelli lagunari e palustri; i resti vegetali sono stati trasportati nelle aree interne del bacino ad opera delle acque meteoriche in corrispondenza delle fasi regressive più accentuate.

Durante queste fasi il manto vegetale che rivestiva il continente ubicato a E, avanzava verso le piane sottostanti aperte a W.

Apporti fluviali siltoso-conglomeratici a clasti paleozoici (per lo più quarzosi), interrompono talora bruscamente la sedimentazione, pressoché esclusivamente carbonatico, originando vari livelli arenaceo-siltosi a cemento carbonatico o argillosi.

La regressione si attua attraverso fasi ritmiche, alternate a brevi incursioni marine, che penetrano nell'interno del bacino emerso, innestandosi e digitandosi nelle varie facies transizionali (lagunari, palustri, fluviali).

Dal punto di vista giacimentologico la mineralizzazione è rappresentata da una serie di banchi di carbone di potenza e continuità laterale variabile, e quindi di differente interesse minerario.

Essi sono raggruppabili in più fasci sovrapposti si rinvencono intercalati a livelli sedimentari sterili, di natura litologica variabile, essendo presenti tipi arenacei, siltosi, argillosi, marnosi e calcarei, per uno spessore massimo di circa 80 metri.

Gli strati ed i livelli di carbone si ritrovano generalmente associati a formare il "seam", di cui costituiscono la parte minerariamente interessante, intercalati con livelli generalmente

calcareo-marnosi.

Gli ambienti di sedimentazione dei materiali vegetali sono riferibili ad una alternanza di facies strettamente lacustri sino a lagunari e, talora, alle zone della bassa pianura di delta.

b.3 La Formazione del Cixerri (Luteziano-Oligocene)

La formazione del Cixerri è costituita da depositi continentali.

Dal punto di vista litologico essa è costituita da argille e arenarie sterili, in cui s'intercalano depositi conglomeratici in genere canalizzati.

Lo spessore è assai variabile (da qualche decina di metri a 300 m al massimo), condizionato dalla paleogeografia preesistente.

I clasti sono poligenici, eterometrici (diametro fra 2 e 30 cm, ma anche eccezionalmente di dimensioni maggiori), costituiti da calcari mesozoici (in prevalenza), scisti, gneiss, graniti.

L'età della Formazione del Cixerri è compresa fra il Luteziano e l'Oligocene.

b.4 Il Vulcanico

Lo studio geologico di dettaglio delle vulcaniti cenozoiche sulcitane integrato dall'analisi di numerosi sondaggi, distribuiti su una superficie di circa 40 Km², ha permesso la ricostruzione e suddivisione del vulcanismo terminale in 12 unità principali.

In particolare, all'interno di questa successione ignimbratica, è stata evidenziata la presenza di intercalari sedimentari e/o epiclastici e/o superfici pedogenizzate che testimoniano periodi di stasi nell'attività vulcanica intervenuti fra alcuni degli eventi eruttivi principali.

Questi si susseguono con intervalli sempre più brevi nella parte terminale della successione vulcanica in esame come attesta la diminuzione nello spessore degli intercalari vulcano-sedimentari.

La presenza di queste discontinuità, e le differenti caratteristiche petrografiche e petrochimiche presenti nei vari flussi piroclastici, hanno permesso di distinguere le varie unità eruttive che sono state assimilate ad Unità litostratigrafiche per la loro correlabilità laterale.

Le datazioni eseguite sulle vulcaniti con il metodo K/Ar (SAVELLI, 1975) hanno rilevato un'età compresa fra 29-11 m.a.. I principali prodotti di questa attività magmatica sono

rappresentati da andesiti e da ignimbriti, con prevalenti termini basaltici e subordinate daciti e rioliti. Lo spessore complessivo è di circa 1.000 m.

c. Il quaternario

Le litologie ascrivibili a questa era sono nel bacino del Sulcis piuttosto varie.

Per quanto riguarda una attendibile datazione, l'unico punto di riferimento è costituito dal "Tirreniano" che affiora sulla costa che va da "Guroneddu" sino a "Porto Paglia", nella parte Nord del bacino.

E' possibile effettuare una distinzione fra le diverse litologie riconducendole nell'ambito di tre formazioni principali:

1) Depositi alluvionali

Si osservano in modo particolare nell'area a Sud dell'abitato di Cortoghiana ("Cussorgia de is Fenus") dove si presentano di colore rosso-bruno con una componente ciottolosa i cui clasti hanno dimensioni variabili da 2 a 30 cm.

I clasti appartengono alle formazioni paleozoiche, ai conglomerati del Cixerri ed alle vulcaniti terziarie.

Le alluvioni si sono depositate sulle morfologie vulcaniche preesistenti, colmando le depressioni ed accumulandosi spesso con notevoli spessori.

2) Depositi eolici

Il complesso vulcanico è localmente sormontato da depositi sabbiosi eolici würmiani, rappresentati da arenarie quarzoso-calcaree di colore bianco giallastro a volta sciolte o stratificate e parzialmente cementate.

Nella porzione più profonda mostrano una accentuata incoerenza con graduale lieve aumento della coesione per incremento della frazione argillosa.

3) Depositi recenti fluvio-lacustri

Le alluvioni recenti, ampiamente diffuse nelle fasce costiere hanno tessitura da limo-sabbiosa a limo-argillosa.

Depositi lacustri sono stati individuati in aree ristrette, costituiti da crostoni a cemento

carbonatico con fauna a gasteropodi, probabilmente generatisi in piccoli stagni e lagune, creatisi a seguito dell'isolamento di tratti di mare causati da cordoni dunari di genesi eolica.

STAGES		FORMATIONS	MAJOR LITHOLOGIES		DEPOSITIONAL ENVIRONMENT	
CAENOZOIC	MIOCENE	Volcano-sedimentary complex		Pyroclastics rhyolitic ignimbrites andesitic basalts	Volcanics interbedded with continental terrigenous successions	Not studied
	OLIGOCENE	Cixerri Fm. Appr. 450 m		Polygenic conglomerates sandstones siltstones claystones	Alluvial fans braided plains	Alluvial fans
		Produttivo Fm. Up to 300m		Siltst. Sandst. Cgl coal freshwater limest maris claystones	Fluvial channels palustrine lacustrine paralic lagoonal	Fluvial channels supralittoral paludal- lagoonallittoral
	(Early) EOCENE	Miliolitico Limestone Fm. 30-70 m		Bio-calcareenites maris	Hypersaline & mesohaline lagoons	Sublittoral
		Basal Conglom. 30-40m		Conglomerates	Transgressive lag	
	Palaeocene	Dolomite				
Mesozoic		PERMO-TRIASSIC		Folded metasedimentary formations		Not studied
PALAEOZOIC BASAMENT						

Figura 2

d. Evoluzione tettonica dell'area

I più importanti eventi tettonici dell'area sono avvenuti durante il Terziario, periodo durante il quale l'Isola risente degli smorzati riflessi del ciclo orogenetico alpino, che hanno causato la frattura ed il dislocamento del basamento paleozoico e delle successioni sedimentarie mesozoiche, la fuoriuscita di enormi quantità di magmi alcalicalcici e lo sprofondamento delle fosse del Cixerri e del Campidano.

L'area in esame è interessata da pieghe e da diverse serie di faglie orientate prevalentemente con direzioni N-S e NNO-SSE e subordinatamente E-O.

Per effetto di queste faglie l'area risulta suddivisa in una serie di blocchi giacenti a quote diverse - talvolta basculati e con un generale approfondimento verso S-SO, che originano una morfologia generale di semigraben.

La dimensione dei singoli blocchi è estremamente variabile ed è funzione diretta della entità delle singole fratture, mentre la geometria dei blocchi resta abbastanza costante e si ripete alla differente scala dimensionale.

Lo spessore dei rigetti osservabili varia dal metro ad alcune decine di metri e lungo una stessa frattura è spesso possibile osservare una variazione del rigetto (faglia a forbice) che riduce od esalta progressivamente l'entità della dislocazione.

Le principali linee tettoniche che interessano l'area in oggetto sono quelle di *Paringianu* e di *Levante*, localizzate rispettivamente a S e a E del *Rio Acqua Ierru*. La prima faglia, con a direzione circa E-W ed immersione a N, mostra un rigetto variabile tra i 20 e i 50 m a W.

Le faglie caratterizzanti il “*Sistema di Levante*”, evidenti soprattutto a E di Nuraxi Figus, hanno direzione prevalente NNO-SSE e rigetti compresi tra 20 e 50 m. Su una di queste direttrici tettoniche scorre il *Rio Acqua Ierru*.

Un altro sistema di faglie, ma con direzione preferenziale NNO-SSE e rigetti compresi tra 60 m e 100 m, si rileva ad W della attuale miniera di Nuraxi Figus (Faglie di Sinni e di Ponente).

e. Caratteri idrografici ed idrogeologici generali

Nel territorio in esame affiorano prevalentemente litologie a *permeabilità medio-bassa*, relativamente alla presenza di rocce vulcaniche in facies lapidea, subordinatamente piroclastiti terziarie e depositi fluvio-lacustri a *permeabilità bassa* ed infine terreni detritici quaternari a *permeabilità media* per porosità interstiziale.

Per quanto concerne le vulcaniti lapidee, caratterizzate da una fratturazione primaria dovuta alle modalità di raffreddamento dei magmi, possono essere interessate da una certa circolazione idrica legata all'intensità ed all'andamento delle fratture.

Ciò consente, nelle zone maggiormente fratturate, una certa circolazione idrica, seppur nel complesso la permeabilità è comunque da ritenersi medio-bassa.

Infatti generalmente queste litologie si comportano da impermeabile relativo nei confronti delle sovrastanti sabbie eoliche e depositi alluvionali e colluviali che, invece, presentano una permeabilità media, legata sostanzialmente alla porosità singenetica.

Questi depositi possono essere sede di una modesta falda freatica alimentata direttamente dagli apporti pluviometrici diretti e dai corsi d'acqua limitrofi, come denota la scarsa presenza di pozzi superficiali nell'intorno.

Sono da ritenersi pressoché impermeabili, o dotati di bassa permeabilità, le piroclastiti ed i depositi fluvio-lacustri in relazione alla tessitura e struttura della roccia nel primo caso e ad un'alta percentuale materiali fini (limo ed argilla) nel secondo.

Questi ultimi, essendo poco drenati, danno luogo frequentemente a ristagni di acqua.

L'idrografia superficiale del territorio, di evidente impostazione tettonica, vede la presenza di brevi rii e torrenti il cui deflusso è strettamente legato al tipo ed alla intensità delle precipitazioni. Queste, a carattere stagionale, provocano nei torrenti delle piene in occasione delle prime piogge autunnali e dei massimi di portata nei mesi di febbraio-marzo.

Durante la stagione secca (maggio-settembre) i corsi d'acqua risultano in parte o del tutto privi di deflusso superficiale pur mantenendo, nei tratti a valle, un certo deflusso in sub-alveo.

I litotipi vulcanici danno origine ad un reticolo idrografico nel complesso omogeneo, caratterizzato da un andamento *dendritico* di tipo *anastomizzato* e subordinatamente *sub-parallelo*, anche se talora le principali strutture tettoniche guidano i corsi d'acqua secondo direzioni alternative *sub-angolari*.

I corsi d'acqua principali sono il *Rio Acqua Ierru*, il *Rio Anguiddas*, il *Rio Acqua Sa Canna* che afferiscono nel collettore principale costituito dal *Canale di Paringianu*, canalizzato nella parte terminale e deviato dal suo percorso originario per defluire più a S in loc. *is Benazzeddus*.

Il *Rio Acqua Ierru* è attualmente sbarrato da una diga drenante, costruita dalla CARBOSULCIS per il contenimento dei fini derivanti dall'impianto di trattamento.

5. OBIETTIVI ATTESI

Il progetto ha avuto come obiettivo previsto la valutazione, attraverso ricerca in campo, in laboratorio e attraverso simulazioni numeriche, del potenziale che presenta il bacino carbonifero del Sulcis in termini di produzione di metano da giacimento profondo di carbone (CBM e ECBM) e di stoccaggio geologico della CO₂ sia nello stesso giacimento che nella formazione carsica, il “Miliolitico”, che contiene l’acquifero salino profondo che si trova sotto il “Produttivo”. La coesistenza di due tipologie di serbatoi geologici distinte disposti in serie, rappresenta una singolarità importante e un’unicità del reservoir.

E’ da sottolineare che il progetto di ricerca è stato realizzato sulla base di un programma lavori che riguardava una serie di attività di indagine sia teorica che operativa. Per questioni di tempo e disponibilità di risorse non tutte le attività attese sono state compiute, pertanto verrà reso il risultato della campagna di indagine svolta, e suggerita una linea programmatica da seguire per l’ottenimento di tutti i risultati attesi.

A questo proposito Carbosulcis si è avvalsa una partnership di istituti titolati per raggiungere gli obiettivi del presente progetto.

Istituti	Area di Ricerca
Bureau de Recherches Geologiques et Minières (BRGM)	Geologia del giacimento, idrologia, caratterizzazione degli strati di carbone e del gas.
Institut Français du Pétrole (IFP)	Geologia del giacimento, interpretazione della geofisica in foro (well test and log), caratterizzazione del carbone e dei fluidi, up-scaling.
Imperial Consultants (IMPERIAL)	Caratterizzazione del giacimento, Reservoir characterisation, interpretazione della geofisica in foro (well test and log), caratterizzazione del carbone e dei fluidi, valutazione del potenziale e previsione delle performance del bacino carbonifero.
Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS)	Acquisizione ed interpretazione dei dati sismici, e geologia del giacimento.
Netherlands Institute of Applied Scientific Research (TNO)	Interpretazione dei dati sismici, geologia del giacimento, caratterizzazione del carbone, modellazione matematica del bacino e stima delle capacità di stoccaggio della CO ₂ .
CE.RI. – Centro di Ricerca « Previsione, Prevenzione e Controllo	Analisi del suolo e monitoraggio ambientale

dei Rischi Geologici, dell' Università di Roma "La Sapienza" (URS)	per la definizione delle criticità geologiche.
Geotec S.p.A (GEOTEC)	Acquisizione dei dati sismici.
RSE – Ente di Ricerca del Sistema Energetico appartenente al GSE nazionale.	Modellazione previsionale dell'iniezione della CO2 nella formazione carbonifera e nell'acquifero profondo.
CINIGEO – Consorzio Interuniversitario Nazionale per l'Ingegneria delle Georisorse	Elaborazione delle linee sismiche e studio delle proprietà litologiche della formazione dell'acquifero salino.

Il progetto si è sviluppato organizzato in due parti: Una di raccolta dei dati, ossia campagna sondaggi, sismica, geofisica in foro, e l'altra di attività di laboratorio.

La prima fase, a parte la sismica che rientrava all'interno delle attività del progetto e che è stata realizzata a cura dei partners, era a carico di Carbosulcis.

I **Working Packages (WP)** rappresentano le attività principali del progetto e nella fase **A** sono attribuiti ai partners:

WP1A – Raccolta e valutazione dei dati esistenti

L'obiettivo realizzativo è stato la raccolta dei dati disponibili di Carbosulcis relative alle precedenti attività di studio di tipo geologico, idrogeologico, geochemico, geostrutturale, ecc..., relativi al bacino carbonifero. Il risultato di questa attività è

- Definire la posizione delle linee sismiche in numero e lunghezza;
- Individuare le aree in cui realizzare i sondaggi a carottaggio;
- Discutere e realizzare il programma per la geofisica in foro (logging & well testing);
- Presentare e discutere il programma completo di ricerca.

Una volta avviata la perforazione e il campionamento delle carote si sono individuati gli stadi entro cui avviare la campagna di geofisica in foro (logging, well-testing).

WP2A – Acquisizione ed interpretazione dei dati sismici

Il principale obiettivo dell'acquisizione attraverso la sismica a riflessione dalla superficie è l'identificazione e la determinazione geometrica del "Produttivo" e del "Miliolitico" come delle formazioni sovrastanti e sottostanti relative all'area del bacino carbonifero.

- Acquisizione dei dati sismici
- Elaborazione dei dati sismici
- Analisi tomografica e meccanismi di migrazione
- Interpretazione dei dati sismici
- Profili sismici verticali

WP3A – Geologia del bacino come serbatoio e sviluppo del modello geologico

Il principale obiettivo del modello geologico è conoscere la distribuzione verticale e laterale del carbone in cui la CO₂ può essere iniettata. Inoltre la valutazione della sequenza carboniosa al di sotto e al di sopra della formazione del “Produttivo” e del “Miliolitico” rappresentano obiettivi primari per conoscere la capacità di contenimento del sistema geologico.

Attività dell’obiettivo è analizzare ed integrare i vecchi log, la stratigrafia e la descrizione geologica dei campioni di carota.

- Integrazione dei dati geologici esistenti
- Integrazione dei dati sismici, dei loggs e dei risultati degli studi in superficie
- Sistema idrologico del bacino
- Sviluppo di un modello con il codice Petrel

WP4A – Caratterizzazione del bacino

Questo WP include sia la caratterizzazione in campo che in laboratorio del serbatoio nonché delle proprietà petrofisiche del bacino del Sulcis. Assieme al modello geologico questi dati sono essenziali allo sviluppo del modello di serbatoio e alla simulazione.

La geofisica in foro, sotto la forma del well logging, permette la definizione di informazioni quali:

- litologia
- porosità
- saturazione

- permeabilità

Di questi quattro test, i più precisi (e perciò considerati standard) sono la descrizione litologica, la determinazione della porosità e della saturazione. È raccomandata l'acquisizione dei logs di permeabilità e la loro interpretazione, poiché le permeabilità misurate sui campioni e i dati di well-testing sono acquisiti nello stesso foro.

- Raccolta carote
- Interpretazione della geofisica in foro well logging
- Misure dei contenuti di gas negli strati di carbone
- Interpretazione della geofisica in foro well testing
- Monitoraggio ambientale del suolo e identificazione delle faglie
- Composizione dei gas e misura degli isotopi
- Misure di permeabilità con impiego di permea metro in miniera
- Caratterizzazione del carbone
- Isoterme di sorbi mentodel carbone
- Caratterizzazione delle proprietà petrofisiche, meccaniche, elastiche
- Esperimenti di trasporto di flusso
- Esperimenti di diffusione
- Analisi dell'immagine per l'identificazione e la distribuzione dei cleats

WP5A – Previsione di capacità del serbatoio

Attraverso quest'attività s'intende estendere i risultati ottenuti dai campioni in laboratorio verso tutto il bacino carbonifero in maniera tale da poter determinare le caratteristiche prestazionali o performance del serbatoio geologico. L'approccio prevede la generalizzazione dei risultati su tutta l'area d'interesse e valutazioni sulla di trasmigrazione dei gas nel bacino carbonifero attraverso simulazione di iniezione della CO₂.

- Up Scaling, ossia estensione dei risultati su larga scala
- Simulazione della distribuzione della CO₂ nel letto di carbone e successivamente nell'acquifero salino sottostante.

- Simulazione numerica a seguito di scenari possibili di iniezione nel territorio

WP6A – Sitnesi e impostazione attività successive

I **Working Packages** rappresentati nella fase **B** erano attribuiti a Carbosulcis:

WP1B – Raccolta e valutazione dei dati esistenti

WP2B – Perforazione e carotaggio

WP3B – Geofisica in foro - Well Logging

WP4B – Geofisica in foro - Well Testing

WP5B – Test in campo di iniezione CO₂ (Qualora possibile)

6. OBIETTIVI RAGGIUNTI E RISULTATI

Le attività nel progetto erano state organizzate in modo da permettere sostanzialmente la raccolta dei dati e la conseguente analisi.

Il metodo conoscitivo più corretto per l'esplorazione profonda dell'area è la sismica a riflessione, e pertanto una delle prime attività è stata proprio quella di realizzare la campagna. Contemporaneamente sono stati eseguiti due fori profondi con recupero di carota, per sondare le aree periferiche del bacino carbonifero ancora sconosciute.

I risultati ottenuti dalle perforazioni non hanno soddisfatto le attese dal momento che in entrambi i casi non si è raggiunta la formazione del Produttivo. In entrambi i casi la sismica ha dimostrato che ci si trovava all'interno di un'area di anomalia geologica dove la formazione alluvionale di superficie ha una potenza di circa 200 m, e ciò ha spostato tutti i riferimenti stratigrafici in profondità. L'attesa di trovare la formazione di carbone ad una profondità compresa tra 700 e 900 m di profondità è stata vanificata dal sondaggio che ha raggiunto in entrambi i casi quasi 1000 m. I dati ricavati rappresentano comunque patrimonio di informazioni del sito e forniscono le informazioni per la modellazione geologica dell'area.

Tra le opzioni per il completamento delle attività di progetto, ci sarebbe di sicuro quella di riprendere i due fori SR1 e SR2 e continuare il carotaggio oltre i 1000 m, fino all'attesa individuazione della formazione del Produttivo a 1200 m di profondità.

Al fine di compiere tutta quella serie di attività di laboratorio direttamente sui campioni, la necessità di individuare la formazione di carbone e la successiva formazione calcarea carsica che contiene l'acquifero, suggerisce di individuare più a nord, dove il produttivo non è ancora tanto profondo e dove fori eseguiti in passato per la prospezione mineraria hanno dato riscontro, i fori di nuova realizzazione (SR6, SR9 e SR10).

La correlazione dei dati sismici, sia a riflessione che in foro (VSP), con quelli forniti dallo studio dei campioni, avrebbe permesso la realizzazione di modelli matematici capaci di effettuare previsioni nella distribuzione della CO₂ iniettata lungo il serbatoio, e determinare gli eventuali punti di iniezione.

Tutto questo non è stato propriamente compiuto poiché le attività di laboratorio relative alle analisi dei campioni di carbone profondo non ci sono state, dal momento che i campioni di

carbone profondo non sono stati raccolti.

Tuttavia una modellazione è stata compiuta sulla base di informazioni indirette riguardanti le proprietà del carbone profondo non raccolto delle perforazioni eseguite nella specifica campagna, ma dai sondaggi compiuti in passato. Pur non potendo fornire lo stesso tipo di informazioni, trattandosi di campioni datati trent'anni, lo studio condotto da RSE e dal Cinigeo ha generato un modello numerico elaborato attraverso un codice di calcolo proprio, assolutamente interessante, il quale può essere implementato, modificato e riproposto in funzione delle nuove eventuali informazioni recuperabili dalle future campagne di esplorazione.

Tutta la parte relativa alla geofisica in foro non è stata compiuta poiché sarebbe dovuta essere funzionale alla determinazione delle caratteristiche del carbone in loco, così come la conseguente caratterizzazione definitiva del bacino, che prevedeva test ed analisi direttamente sui campioni di carbone, per l'individuazione delle principali proprietà

- litologia
- porosità
- saturazione
- permeabilità

Le attività previsionali sulle capacità del serbatoio sono state invece, come già accennato, realizzate impiegando dati ed informazioni provenienti dalla ricerca recente Carbosulcis, ma anche dagli archivi della miniera (sondaggi, sismica, studi giacimento logici, ecc...), in attesa di essere implementati ed integrati dai dati delle carote di carbone profondo, auspicabilmente in una prossima campagna di sondaggi.

Le attività di valutazione della capacità del bacino, col supporto e con la collaborazione di Carbosulcis, sono state realizzate da OGS e dal gruppo RSE-Cinigeo, sulla base di modelli e letteratura tecnica universalmente riconosciuti.

Per quanto riguarda il monitoraggio ambientale invece si sottolinea la campagna realizzata dai tecnici dell'Università di Roma "La Sapienza", i quali hanno eseguito campionamenti della superficie del suolo nelle aree precedentemente individuate come critiche dal punto di vista geologico, poiché potenziale veicolo di migrazione di gas dal sottosuolo alla superficie.

6.1. Raccolta e valutazione dei dati esistenti³

La struttura geologica del Bacino Carbonifero presenta una specificità unica dovuta alla sequenza e alle caratteristiche delle specie litologiche, che permetterebbero uno sfruttamento ottimale della potenzialità del bacino.

Indagini legate alla pianificazione della coltivazione del carbone realizzate in 30 anni, indicano infatti un comportamento, pressoché costante nell'area vasta, che prevede la successione, dalla superficie alla profondità, di formazioni con ottima capacità isolante (arenarie e argilliti a permeabilità bassissima) che ricoprono le formazioni che accolgono i reservoir.

A partire dalla struttura più profonda, si individua la formazione di tipo calcareo del Miliolitico, che giace sopra il basamento Paleozoico. Il Miliolitico ospita una falda acquifera fossile geologicamente isolata, che quindi non ha contatti verso la superficie o altre strutture geologiche superiori. Sopra l'acquifero poggia la formazione del Produttivo che contiene il carbone distribuito su diversi strati o seam, entro una potenza di circa 60m-80m. Una barriera geologica naturale riscontrabile tra Produttivo e Miliolitico, isola le due formazioni, ma se anche così non fosse il Produttivo rappresenta il secondo sistema di conferimento della CO₂ disposto in serie, che naturalmente amplifica le potenzialità globale sia in termini di contenimento in profondità della CO₂, che in termini di quantità di CO₂ stoccata. La formazione del Produttivo è oggetto dell'applicazione della tecnologia ECBM, in cui si avrà il doppio vantaggio di segregare CO₂ e consentire la eventuale produzione di gas naturale. La produzione di metano da giacimenti carboniferi può essere quindi determinata dall'immissione forzata di anidride carbonica, il cui adsorbimento nella matrice del carbone, comporta il rilascio di metano. Il ciò avviene attraverso campagne di perforazione di fori di iniezione e di produzione.

La formazione subito successiva è quella del Cixerri, che ha una potenza di almeno 300m di arenarie e argilliti con elevata capacità isolante, che può essere definito il principale "caprock". Successivamente la struttura prevede le rocce vulcaniche, fino alla superficie, su una formazione di potenza variabile notevolmente fratturata. La capacità isolante della formazione del Cixerri è visibile anche dal fatto che le falde acquifere superficiali si generano

³ WP1A: Data Room Evaluation

nell'interfaccia tra questa e la formazione vulcanica, a dimostrazione che essa rappresenta uno strato isolante tra la superficie e le formazioni profonde.

6.2.Acquisizione ed interpretazione dei dati sismici

Le attività di acquisizione⁴ e processing⁵ della sismica sono state realizzate attraverso l'impiego di mezzi mobili *vibrosizer* lungo una rete costituita da circa 40 km di linee, che ricopre alcuni punti dove è prevista la realizzazione dei fori di sondaggio.

La campagna di sismica di superficie a riflessione è avvenuta descrivendo una maglia costituita essenzialmente da n.7 linee, oltre ad una prima, che era stata precedentemente realizzata attraverso metodo di indagine differente, ossia attraverso non una sorgente vibrante di propagazione dell'onda, ma attraverso degli scoppi generati con esplosivo.

Il principale obiettivo di quest'attività era fornire un modello di velocità nella direzione verticale verso la profondità del bacino, al fine di correlare i log e le informazioni geologiche ai dati sismici per ottenere delle sezioni sismiche verticali.

Lo studio ha mostrato e identificato attraverso il processing e l'interpretazione dei sismogrammi, un chiaro modello di distribuzione delle velocità nell'area di indagine, dove sono distinguibili quattro diversi layer di velocità:

In superficie il layer con una velocità di propagazione d'onda molto bassa (310-930 m/s); sub giacente un layer di velocità intermedia caratterizzato da una parte superiore asciutta (830-1400 ms/) e una satura d'acqua (1690-2020 m/s); dopodiché è ben distinto un layer di velocità elevata (2500-3360 m/s).

Le diverse velocità di propagazione individuate, correlate agli altri dati disponibili, hanno permesso di individuare delle sequenze con caratteristiche omogenee ma non necessariamente coincidenti alle formazioni litologiche conosciute, ovvero non è stato possibile individuare la separazione tra il cap-rock, la formazione alluvionale del Cixerri, e il Produttivo, separazione che invece è evidente, e riscontrata dall'esperienza, durante la

⁴ WP2A1 Seismic data acquisition - Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS) – Geotec – Netherlands Institute of Applied Scientific Research (TNO)

⁵ WP2A2 Seismic data processing – Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS) – Netherlands Institute of Applied Scientific Research (TNO)

prospezione mineraria o nella realizzate le gallerie nella miniera di carbone.

La soluzione di impiegare dei *vibrosizer*, più veloce ed immediata, avrebbe potuto o potrà essere implementata con la ribattuta di alcuni punti o la realizzazione di nuove linee sismiche attraverso ‘scoppi’ con dinamite, che fornisce segnali più chiari e profondi.

L’interpretazione della sismica di superficie è comunque imprescindibile e principale elemento di correlazione con i dati che verranno restituiti dai Vertical Seismic Profiles, ossia la sismica in foro direttamente sui pozzi. Una successiva campagna di sismica sarà auspicabile per aumentare la definizione delle velocità e quindi l’identificazione delle formazioni profonde, e individuarne le estensioni geografiche.

I risultati ottenuti attraverso la sismica sostengono comunque le convinzioni già assunte che la struttura geologica descritta nel par. 4.3 sia effettivamente caratterizzante tutta l’area del permesso di ricerca, ovvero la parte sottoposta ad esplorazione. Più precisamente le formazioni che hanno maggiore rilievo dal punto di vista dello stoccaggio di anidride carbonica attraverso iniezione, ossia il Produttivo e il Miliolitico, hanno una disposizione in direzione NE-SW, con affioramento in superficie del Produttivo nella zona di Carbonia e affondo di tutto il blocco stratigrafico verso la costa.

Lo studio condotto oltre al processing si è concluso con l’analisi tomografica tridimensionale⁶ e l’interpretazione⁷ e dei dati sismici, che ha confermato la geologia delle sequenze sismiche individuate, quali

- Depositi alluvionali Quaternari
- Complesso Vulcano-sedimentario
- Cixerri+Produttivo+Miliolitic
- Sedimenti Permo-Trias

In allegato vengono riportati stralci riassuntivi dei rapporti finali relativi alle attività caratterizzanti e ai risultati ottenuti.

⁶ WP2A3 Tomographic analysis and depth migration – Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS) – Netherlands Institute of Applied Scientific Research (TNO)

⁷ WP2A4 Seismic data interpretation – Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS) – Netherlands Institute of Applied Scientific Research (TNO)

Allegati

Allegato 02 - WP2A1 Seismic data acquisition – Pagg. 12-20 ; 85;

Allegato 03 - WP2A2 Seismic data processing – Pagg. 40-68;

Allegato 04 - WP2A3 Tomographic analysis and depth migration – Pagg. 5-9 ; 52;

Allegato 05 - WP2A4 Seismic data interpretation – Pagg. 9-13 ; 39-40;

6.3.Monitoraggio ambientale

Nell'ambito della realizzazione del progetto oggetto del presente accordo, è stata già compiuta, dall'Università di Roma Sapienza⁸, l'attività di monitoraggio dell'area del bacino carbonifero, che ha definito lo "zero ambientale". Lungo le singolarità e le strutture geologiche critiche di connessione tra il sottosuolo e la superficie, quali faglie, pieghe, fori preesistenti, ecc...in maniera sia concentrata che distribuita su un'area di circa 20 km², sono stati effettuati più di 300 campionamenti di gas e di suolo. Questa campagna è stata compiuta al fine di monitorare il flusso e la migrazione di gas profondi, su tutti radon, elio, thoron, che derivano dal decadimento di metalli, come l'uranio, che si trovano in concentrazioni elevate nel basamento della crosta terrestre, e che svelano la potenziale comunicazione tra la formazione profonda deputata ad accogliere il serbatoio, e la superficie, ma soprattutto rivelano lo stato del veicolo di trasporto, ovvero l'attività della faglia. Le conclusioni del lavoro realizzato dall'Università di Roma Sapienza, hanno evidenziato che sebbene presenti, le faglie risultano, allo stato attuale, inattive o impermeabili, poiché non sono state riscontrate concentrazioni significative dei gas traccianti, né di CH₄ o CO₂ provenienti dal sottosuolo. Ciò può ragionevolmente significare che il sistema di faglie genera effettivamente delle aree compartimentate stagne entro le quali sia possibile conferire la CO₂. Sarà opera dell'attività di studio verificare e studiare i limiti di resistenza del sistema di sigillazione al momento dell'iniezione della CO₂, tuttavia le premesse sono estremamente positive.

In allegato vengono riportati stralci riassuntivi dei rapporti finali relativi alle attività caratterizzanti e ai risultati ottenuti.

⁸ WP4A5 Near Surface Gas Geochemistry Study – Università Roma Sapienza Centro di Ricerca CERI, Laboratorio di Chimica dei Fluidi

Allegati

Allegato 06 – WP4A5 Near Surface Gas Geochemistry Study – Pagg. 9-13 ; 39-40;

6.4.Sondaggi Profondi

Dall'osservazione della carta geologica del bacino carbonifero del Sulcis, si può evincere che questo non presenta un'omogeneità geologica laterale, ma può essere suddiviso in settori, ad ognuno dei quali può essere associata una *stratigrafia tipo*.

La stratigrafia tipo dell'area di Nuraxi Figus è ben nota, essendo stata indagata e descritta attraverso numerosi sondaggi esterni, che hanno attraversato e carotato in modo continuo i diversi litotipi, dalle ignimbriti al basamento paleozoico.

Tale sequenza stratigrafica venne considerata come “tipica” anche nelle previsioni dei nuovi sondaggi del permesso di ricerca “Is Urigus”, non essendo possibile conoscere in sottosuolo il passaggio fra il Settore di Seruci-Paringianu e quelli limitrofi.

La perforazione del sondaggio SR2 ha raggiunto la quota di ~ -874,00 m. dal p.c.

La descrizione delle carote nella parte finale del foro indica la presenza andesiti e di piroclastiti, all'interno delle quali è riconoscibile una dimensione granulometrica da sabbia grossolana, con abbondante pirite diffusa e piccoli noduli silicei.

I granuli, ad una prima osservazione macroscopica, appaiono essenzialmente silicei, così come pure la pasta di fondo. Solo localmente sono presenti microfratture contenenti calcite.

La litologia piroclastica appare in modo evidente soggetta ad un metamorfismo da contatto, dovuto alla presenza delle andesiti. Tale metamorfismo è associato ad una circolazione idrotermale, avvenuta presumibilmente in una roccia in origine ad elevata permeabilità primaria.

La sequenza stratigrafica rispecchia nella sua successione lo schema stratigrafico tipico del settore di Carbonia. Tale stratigrafia, seppure nota in superficie, non è mai stata attraversata in passato da un sondaggio a carotaggio e può presentare spessori differenti in aree limitrofe, dovuti prevalentemente alla paleo-morfologia dell'ambiente di deposizione.

Gli schemi stratigrafici conosciuti mostrano come quadro generale una corrispondenza di spessori abbastanza buona fra il complesso delle vulcaniti del settore di Nuraxi Figus, sommato alla “Formazione del Cixerri”, ed il complesso delle vulcaniti del settore di

Carbonia (comprese le Andesiti), sempre sommato alla “Formazione del Cixerri”. Tuttavia la potenza delle vulcaniti incontrata nel sondaggio SR2 appare anomala e superiore alle previsioni.

Lo spessore della “Formazione del Cixerri” al di sotto delle andesiti non è mai stato indagato e non si esclude la possibilità che possa essere ridotto rispetto agli spessori noti nel settore di Nuraxi Figus. Inoltre l’insieme del fenomeno metamorfico e di quello idrotermale, potrebbe alterare completamente le strutture sedimentarie, e portare ad un “mascheramento” della “Formazione del Cixerri”.

Non essendoci alcuna conferma né smentita da parte delle linee sismiche, si ritiene che la perforazione nelle aree interessate dal permesso di ricerca dovrebbe proseguire fino all’ottenimento di informazioni utili, sicuramente oltre la quota di -1000 m dal p.c.

Il sondaggio SR1 raggiunto la quota di ~ -886,00 m. dal p.c. ed è stato eseguito in un’area nella quale sono rilevabili in affioramento, non lontano dalla postazione del sondaggio SR1, le unità ignimbritiche di “Paringianu” e di “Monte Ulmus”, tipiche della zona di Seruci-Paringianu, che hanno fatto presupporre la presenza in sottosuolo delle unità sottostanti sino all’unità alla base delle ignimbriti, denominata unità di “Corona Maria”.

La perforazione ha confermato l’ipotesi, l’unità di base è stata intercettata dal sondaggio e la sequenza ignimbritica è stata descritta con continuità.

È stata tuttavia rilevata un’anomalia.

La sequenza ignimbritica si trova al di sotto di una copertura alluvionale-sedimentaria che presenta una potenza di circa 200 m, a causa di un disturbo tettonico che ribassa l’intero settore nel quale si trova il sondaggio SR1, con uno stile a semi-graben basculato verso sud.

Per tale motivo si ritenne, già nelle prime fasi di perforazione, che tutta la sequenza stratigrafica, compreso il Produttivo, sarebbe risultato più profondo di almeno 200 m rispetto alle quote ipotizzate.

Superata la sequenza ignimbritica, il sondaggio avrebbe dovuto incontrare la “Formazione del Cixerri” ma, dopo diverse decine di metri di litologie detritiche, che potevano essere attribuite appunto alla formazione detritica del Cixerri, è iniziata una sequenza di lave andesitiche, con intercalati livelli di brecce e livelli piroclastici, tipiche del “Settore di Carbonia-S.Giovanni Suergiu”

Appare evidente a questo punto che l'area interessata dal sondaggio SR1, si presenta come un'area di transizione, nella quale si sovrappongono e si intersecano le unità e le formazioni appartenenti ai due settori adiacenti: "Serbariu-Paringianu" e "Carbonia-S.Giovanni Suergiu". La sequenza di lave andesitiche, se pur nota in superficie, non è mai stata attraversata da sondaggi e pertanto non è noto il suo spessore reale.

E' noto che l'ipotesi iniziale, che prevedeva la presenza del Produttivo fra gli 800 m ed i 1000 m dal piano campagna, era stata fatta in assenza totale di informazioni, prima ancora che venisse eseguita la campagna di indagini geofisiche, ed era pertanto passibile di variazioni interpretative in fase di realizzazione del foro.

La profondità di 1000 m dal p.c., richiesta per l'esecuzione dei sondaggi di ricerca, deriva da una prima valutazione, compatibile con l'inclinazione del piano su cui "affonda" la formazione del Produttivo, da NE a S-SW. La conoscenza al tempo del sistema geologico (faglie, rigetti, ecc.) in assenza di dati sismici, non aveva generato dubbi sulla possibilità che la campagna di sondaggi non potesse raggiungere la formazione del carbone. Sebbene 1000 m di profondità, che era anche il limite imposto dal permesso di ricerca, non siano stati sufficienti, i fori di sondaggio hanno avuto importanza rilevante e hanno restituito importanti informazioni relative alla geologia di una zona periferica del bacino ancora inesplorata.

Una corretta programmazione nell'ubicazione dei sondaggi, avrebbe richiesto comunque tempi molto più lunghi ed una ricerca geofisica preliminare.

6.5.Sito di confinamento CO₂ e potenzialità di stoccaggio

In merito alla capacità di conferimento della CO₂ nel sistema costituito dai due serbatoi, si riportano le conclusioni che sono state effettuate in occasione delle attività di studio preliminare e che hanno espresso un'elevata potenzialità di stoccaggio sia nella formazione di carbone profondo, che nella formazione acquifera sottostante.

Il gruppo di lavoro Cinigeo⁹ (Unioversità di Cagliari) e RSE¹⁰ hanno collaborato per la realizzazione di un modello numerico previsionale applicato al caso del bacino del Sulcis.

L'attività rappresenta un lavoro di sviluppo e messa a punto del Sistema Integrato di Analisi Modellistica (SIAM) in grado di supportare tutte le fasi per l'analisi e la caratterizzazione di un sito per lo stoccaggio geologico di CO₂ mediante la modellazione numerica avanzata.

Tale sistema fornisce infatti gli strumenti software sia per accedere ai database necessari per la definizione delle caratteristiche geologiche dei potenziali siti sia i moduli per la realizzazione e l'utilizzo di modelli numerici di analisi pienamente tridimensionali, completando la disponibilità funzionale con appositi moduli di visualizzazione grafica.

Per realizzare con attendibilità il modello è stato necessario avere la disponibilità di sufficienti informazioni di carattere geologico, delle caratteristiche dei potenziali serbatoi e la necessità di verificare l'idoneità degli strumenti di modellazione in presenza di strutture morfologiche complesse, quali ad esempio quelle dovute alla presenza di faglie e di anticlinali; l'analisi dei risultati, quindi, ha riguardato sia l'aspetto della pura

efficienza modellistica che quello della valutazione della idoneità di ciascun sito allo stoccaggio geologico della CO₂ e della relativa capacità.

L'aspetto più difficoltoso è stato pertanto fornire le informazioni necessarie ad una modellazione quanto più particolareggiata e dettagliata possibile, che però necessariamente ha richiesto l'intensa collaborazione di Carbosulcis come depositaria delle informazioni e conoscenze, e dell'Università di Cagliari, come interprete dei dati nel formato e nelle modalità necessarie al modello.

⁹ Consorzio Interuniversitario Nazionale per l'Ingegneria delle Georisorse - CINIGEO; Università di Cagliari - Caratterizzazione di dettaglio del suolo nell'area sud-occidentale del bacino carbonifero del Sulcis con attenzione alla formazione del Miliolitico e dell'acquifero che questa ospita – S. Fais - 2010

¹⁰ Ricerche di Sistema Elettrico (RSE ex Cesi Riceerche) – Studio di modellazione dell'acquifero presente nella formazione del Miliolitico come struttura geologica di confinamento della CO₂, all'interno del bacino carbonifero del Sulcis – F. Moia; S. Guandalini; A. Negri - 2010

La realizzazione del modello numerico in grado di soddisfare le esigenze dello studio si è sostanzialmente sviluppata attraverso quattro fasi successive e precisamente:

1. realizzazione del modello geologico del sito.
2. realizzazione di un modello semplificato per analisi di sensitività.
3. realizzazione del modello numerico per la simulazione fluidodinamica
4. definizione degli scenari di iniezione e simulazione del transitorio di iniezione.

A tal proposito la semplificazione della stratigrafia, la considerazione di una iniezione al centro di simmetria del dominio e la possibilità di isolare le singole strutture di faglia hanno consentito, variando le condizioni di iniezione e la posizione del pozzo e della eventuale faglia, di evidenziare il comportamento della CO₂ nel serbatoio e di comprendere meglio gli effetti della compartimentazione introdotta dalla presenza di faglie impermeabili.

Sono stati confrontati gli effetti di una iniezione di CO₂ con portata di riferimento di 0.2 Mton/anno e della durata di 30 anni, effettuata mediante un pozzo verticale e un pozzo orizzontale.

Sono quindi state effettuate simulazioni parametriche in presenza o meno di una faglia impermeabile, e si è simulato l'effetto del tempo in cui la CO₂ in risalita arrivi ad una quota tale per cui le condizioni di supercriticità vengono meno, con conseguente passaggio alla fase gassosa e quindi con un aumento di volume e perdita delle condizioni di supercriticità.

I test hanno evidenziato come un'iniezione orizzontale sia più indicata agli scopi e come sia preferibile eseguirla in una posizione relativamente profonda e quindi posta verso la parte sud del dominio per garantire un migliore sfruttamento dei volumi disponibili.

Il primo test numerico è stato eseguito considerando quindi un'iniezione orizzontale di 0.2 MTonn/anno di CO₂ alla profondità di 1850 metri con durata di 30 anni e periodo di simulazione esteso fino a 100 anni.

I risultati hanno evidenziato come la CO₂ migra verso l'alto interessando sia il Miliolitico che il Produttivo ma attestandosi al tetto della formazione che incontra la formazione del Cixerri che svolge il ruolo di caprock.

La massima sovra-pressione a seguito del processo di stoccaggio viene raggiunta dopo 3 anni e resta abbondantemente sotto il 10% della pressione iniziale a garanzia dell'integrità del serbatoio.

E' stato preparato anche un case test con iniezione di CO₂ multi pozzo per verificare le capacità di stoccaggio con volumetrie più elevate e la mutua influenza delle bolle di CO₂ in espansione.

Allegati

Allegato 07 – OGS_Stima Capacità Stoccaggio CO2 Bacino Sulcis;

Allegato 08 – RSE-CINIGEO_ Studio Modellazione Bacino Sulcis; Pagg. 6-13 ; 85;

7. SINTESI E CONCLUSIONI

Diversamente dal processo di cattura, che è legato esclusivamente dalla tecnologia industriale e dal suo sviluppo, lo stoccaggio della CO₂ richiede oltre alla tecnologia, la disponibilità di un serbatoio geologico.

Il bacino carbonifero del Sulcis rappresenta un potenziale *reservoir* per la sua specificità geologica, a cui si aggiunge la stabilità geologica-sismica di cui gode la Sardegna, che preverrebbe i rischi di cedimento di un potenziale serbatoio geologico.

La consapevolezza della valenza strategica della ricerca e della favorevole geologia del territorio ha spinto i principali attori dell'industria mineraria e della ricerca del Sulcis ad avvalersi di professionalità non solo interne ma anche internazionali, autorevoli e titolate, per verificare il potenziale del proprio giacimento carbonifero, che raccoglie in se due dei principali sistemi di conferimento geologico della CO₂, ovvero i letti profondi di carbone non coltivabili, e gli acquiferi salini profondi, i quali costituiscono appunto il reservoir.

Il bacino carbonifero del Sulcis ha una riserva di carbone attualmente sfruttata, nelle attività di coltivazione, per circa 1/10 della sua potenzialità stimata. Un giacimento tanto vasto (la riserva stimata di carbone è intorno al miliardo di tonnellate) ed esteso (circa 400 km²) che potrà rappresentare un interessantissimo sito di sviluppo di tecnologie pulite sul carbone.

I risultati incoraggianti dello studio preliminare hanno spinto nel 2008 a richiedere ed ottenere un Permesso di Ricerca dalla Regione Autonoma della Sardegna, attualmente scaduto, per avviare l'esplorazione e realizzare una valutazione di dettaglio sulla fattibilità di impiegare il bacino carbonifero come serbatoio geologico di biossido di carbonio, dettata da

uno specifico progetto avviato da Carbosulcis, che si avvale di diversi partners internazionali appartenenti al network d'eccellenza CO₂ GeoNet.

Il progetto, non concluso, ha comportato un'attività di esplorazione degli strati profondi fino a 1000 m sotto il piano di campagna, nei letti di carbone che si trovano al di sotto del caprock, ovvero degli strati di copertura che tengono isolato il serbatoio (formazioni alluvionali, vulcaniche e arenario-argillose, costantemente superiori a 600 m di potenza nelle aree di interesse), per raccogliere e analizzare le caratteristiche dei campioni di carbone e valutarne la sua attitudine a catturare le molecole di CO₂ liberando metano, prodotto naturalmente, che potrebbe essere raccolto e reimpiegato.

I principali aspetti del progetto di ricerca hanno previsto:

- la valutazione delle informazioni e dei dati disponibili sul giacimento, frutto di attività di prospezione mineraria pluridecennale sul carbone, che tuttavia dev'essere sviluppata e approfondita poiché nata con diverse finalità;
- una campagna di sismica di superficie a riflessione entro l'area inesplorata del permesso di ricerca mineraria per individuare la stratigrafia profonda del giacimento;
- la caratterizzazione del reservoir attraverso lo studio delle principali formazioni geologiche, del sistema di faglie e del relativo monitoraggio ambientale, attraverso la raccolta dei campioni per mezzo di una campagna di sondaggi profondi e delle successive analisi in laboratorio, da correlare con modellazioni numeriche ai dati sismici;
- la previsione e la predizione delle potenzialità del sistema di confinamento e sviluppo di progetti per lo sfruttamento in scala superiore.

I dati finora raccolti sono stati tra loro correlati e configurano uno scenario assolutamente interessante e promettente, che al momento non presenta evidenti elementi di criticità, e che sia qualitativamente che quantitativamente, nei circa 200 km² del territorio del Sulcis che presenta condizioni idonee, consentirebbe, tra formazione di carbone e formazione dell'acquifero salino, lo stoccaggio di oltre 30 milioni di tonnellate di CO₂, che

diventerebbero oltre 50 milioni se si considerasse la parte del bacino carbonifero che si estende off-shore oltre le coste¹¹.

Lo studio dovrà tuttavia essere avvallato da ulteriori approfondimenti e soprattutto dalle prossime campagne di iniezione, le quali dovranno confermare le positive conclusioni a cui è giunto lo studio sulla modellazione e sulla capacità del serbatoio geologico, nato dalla collaborazione di Carbosulcis con CINIGEO, rappresentato nella fattispecie dall'Università di Cagliari, e RSE.

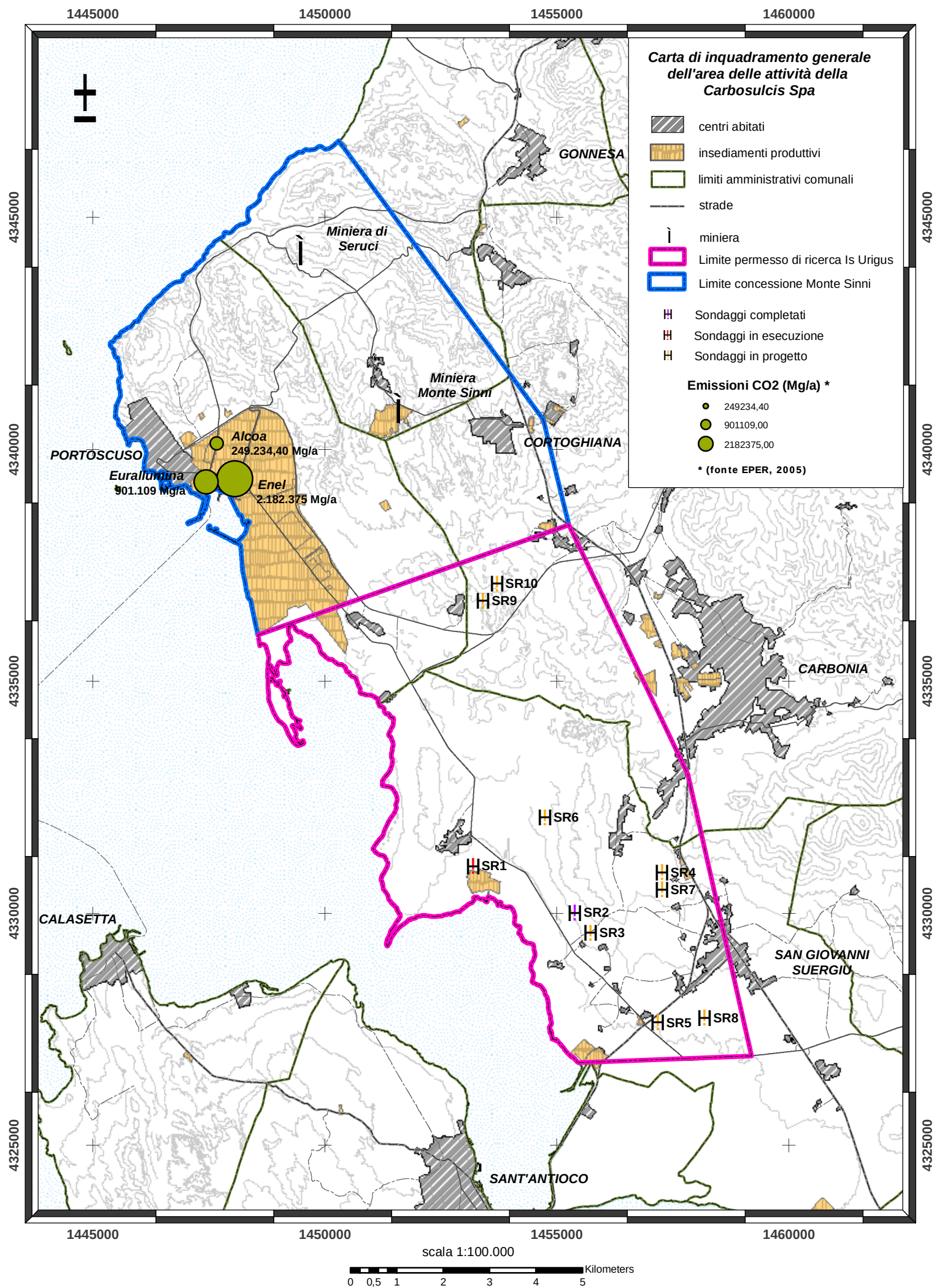
Lo studio non ha soltanto confermato gli aspetti qualitativi del reservoir, ma attraverso simulazioni dinamiche di iniezione della CO₂ ha fornito ulteriori elementi di natura quantitativa, considerati in linea con gli obiettivi di stoccaggio dell'anidride carbonica che si è posto il progetto integrato con la centrale a carbone da 450 MW, e che in una vita utile di 20 anni dovrebbe produrre oltre 25 milioni di tonnellate di gas serra da confinare in sottosuolo. Cautelativamente lo studio ha valutato la capacità del reservoir di accogliere la CO₂ durante la vita utile della nuova centrale operando un'analisi di sensitività sulle portate e sui tempi di iniezione, e verificando ricorsivamente l'interazione dinamica del sistema geologico col gas, proiettando gli scenari fino ai 100 anni successivi all'avvio della fase di iniezione, con ottimi risultati.

A conclusione del presente documento è opportuno sottolineare quanto sia importante il corredo di informazioni in possesso, sia quelle antecedenti alle attività recenti di ricerca, che quelle proprie dell'ultimo quinquennio. Il modo migliore per capitalizzare questi investimenti sarebbe concludere le attività di caratterizzazione e effettuare le prove di iniezione. Le linee guida sono state segnate e di sicuro la collaborazione accademica, scientifica e tecnologica per valorizzare la potenzialità del sito, sarebbe ben auspicabile e accetta.

¹¹ Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale (OGS) – Stima delle capacità di stoccaggio della CO₂ nella formazione del Miliolitico contenente l'acquifero salino, estesa al bacino carbonifero del Sulcis – G. Brancolini

Allegato C

1. Inquadramento generale
2. Report WP2a1
3. Report WP2a2
4. Report WP2A3
5. Report WP2A4
6. Report WP2A5
7. OGS_Stima Capacita Stoccaggio CO₂ Bacino Sulcis.
8. RSE-CINIGEO_Studio Modellazione Bacino Sulcis.



4.3. Acquisition parameters

The acquisition parameters, such as active channels and maximum offset, have been chosen considering that the target of the survey is at about 800m depth and on the basis of the field tests, described in detail in the next section. The results obtained from a previous acquisition performed by OGS in July 2007 (Line 101) have also been precious for defining methods and techniques of this new survey. In Table 4.1, the main acquisition parameters are summarized.

No. active channels	121
Station Interval	20 m
Spread Definition	split asymmetric
Geophone Array	Array of 12 geophones (10 Hz)
Source Offset	40 m
Source Type	Vibroseis
Source Interval	40 m
Recorder	SERCEL 408-XL
Record Length	3 sec
Minimum Offset	10 m
Maximum Offset	2390

Table 4.1: Main acquisition parameters.

The acquisition has been performed by using geophones with natural frequency of 10 Hz and each trace was composed of an array of 12 geophones distributed on a length of 10 meters. The nominal coverage was equal to 30. The chosen pattern configuration was asymmetrical (10 m – 2390 m). At the end of each line, the pattern configuration changed from asymmetrical to symmetrical in order to preserve the coverage.

In Table 4.2 the shot parameters of each line, chosen on the basis of the field tests, are reported.

Line	Frequency range (Hz)	Sweep length (s)	N° Vibrators	N° Sweeps
102	12 -72	12	1	2
103	12 -72	16	2	4
104	12 -72	16	3	4
105	12 -72	16	3	2
106	12 -72	16	2	2
107	12 -72	12	1	2
108	12 -72	12	1	2

Table 4.2: Energisation characteristics along the seismic profiles.

Table 4.3 summarizes, for each seismic profile: 1) start acquisition date, b) end acquisition date, 3) first vibration point, 4) last vibration point, 5) first active station, 6) last active station and 7) line length.

.Line name	Start acquisition	End acquisition	First VP	Last VP	First Station	Last Station	Line Length (m)
102	14/05/2008	15/05/2008	101	465	101	466	7.300
103	17/05/2008	19/05/2008	102	277	102	280	3.560
104	23/05/2008	24/05/2008	114	460	114	462	6.960
105	21/05/2008	22/05/2008	101	423	101	424	6.460
106	20/05/2008	20/05/2008	117	268	117	286	3.380
107	13/05/2008	14/05/2008	97	289	97	296	3.980
108	16/05/2008	17/05/2008	101	415	101	417	6.320
TOTAL							37.960

Table 4.3: Acquisition Parameters (VP = Vibration Point).

During the acquisition phase, all seismic data were stacked by using a preliminary processing sequence in order to verify the data quality. The map of the survey is shown in Figure 4.1. In yellow, the line recorded by OGS in 2006 using the dynamite source (Line 101) and in red the new lines recorded by Geotec in the frame of the Carbosulcis project.

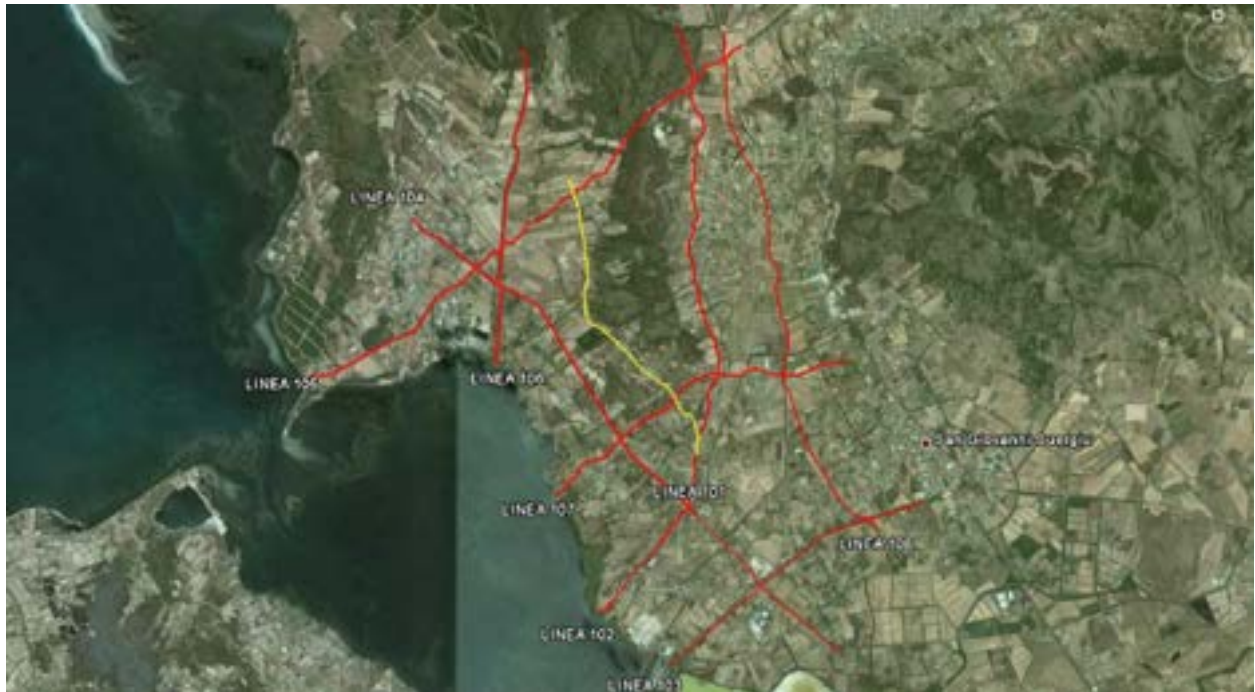


Figure 4.1: Location map of the mcs seismic lines in the Sulcis area. In yellow the line recorded by OGS in 2007, in red the line recorded by Geotec in 2008

4.4. Field tests and recording parameters

The seismic acquisition was performed by using a SERCEL 408-XL acquisition system, with 121 active channels. The Vibroseis was adopted as a seismic source. Field tests have been performed in order to evaluate the following Vibroseis parameters:

- frequency range;
- sweep length;
- number of sweeps.

Considering the target depth and the results obtained from the previous seismic survey mentioned above, the following sweep lengths were tested: 8 s, 12 s and 16 s. For each sweep length value, the following frequency ranges were tested:

6Hz-130Hz,
6Hz-72Hz,
12Hz-72Hz,
12Hz-130Hz,
18Hz-130Hz.

After choosing frequency range and sweep length, the field tests were focused on the definition of the best number of vibrators and the number of the sweeps per each shot. This was done for every line, since the geological and environmental conditions demonstrated to be highly variable. In fact, lines 107, 106, 102 and 108 are located in areas characterized by a low environmental noise, whereas lines 104, 105 and 103 are near roads and villages, and therefore strongly affected by anthropic noise. A high number of tests was performed on line 107, even if the noise level was acceptable, being the first line in the program. The parameters used for each line are summarized in Table 4.2. In the following sections, the shot parameters chosen for each line are briefly commented.

Line 107

After several tests, the acquisition of the line 107 was performed by using the following parameters:

- 1) sweep length: 12 s,
- 2) frequency range: 12-72 Hz,
- 3) N° Vibrators: 1,
- 4) N° sweeps: 2.

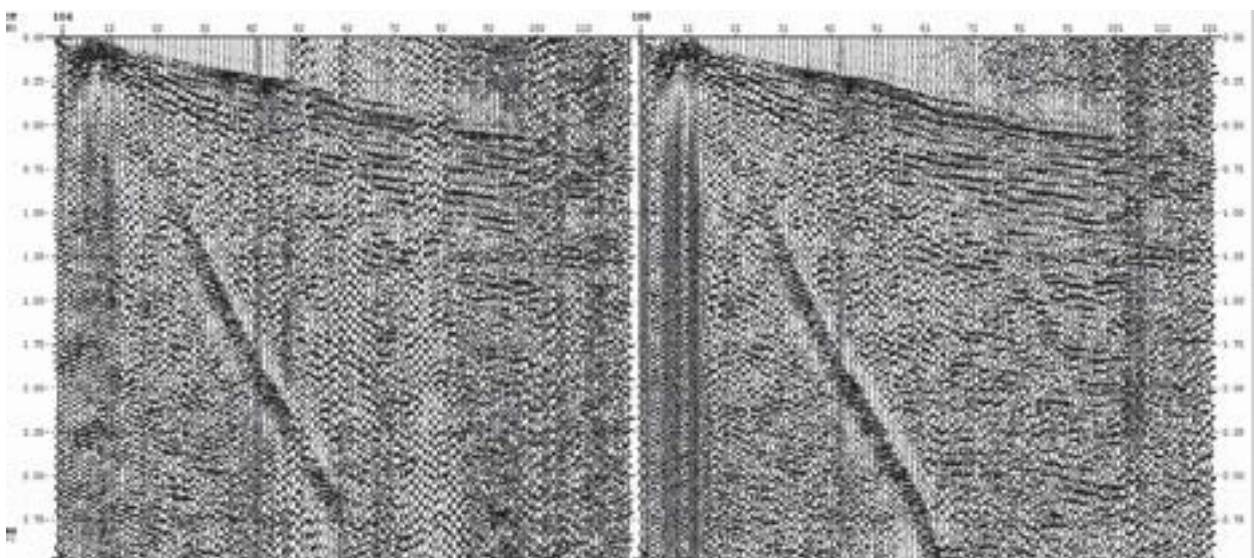


Figure 4.2: Comparison of seismic data using 8s (left panel) and 12 s (right panel) sweep length.

In Figure 4.2 the seismic data acquired by using 8 s (left panel) and 12 s (right panel) sweep length are compared; AGC equal to 500 ms was applied on both records.

Neglecting the area affected by environment noise on the left, the 12s sweep record contains stronger and deeper reflections than that acquired with 8s sweep.

Lines 108 and 102

According to the initial tests, lines 108 and 102 were acquired with the same parameters of the line 107. In Figure 4.3 and 4.4, some reflections, pointed by red arrows, are evident from about 200 ms up to 1 s. Coherent noise (pointed by blue arrows) and environmental noise (pointed by orange arrows) are evident from about 200 ms.

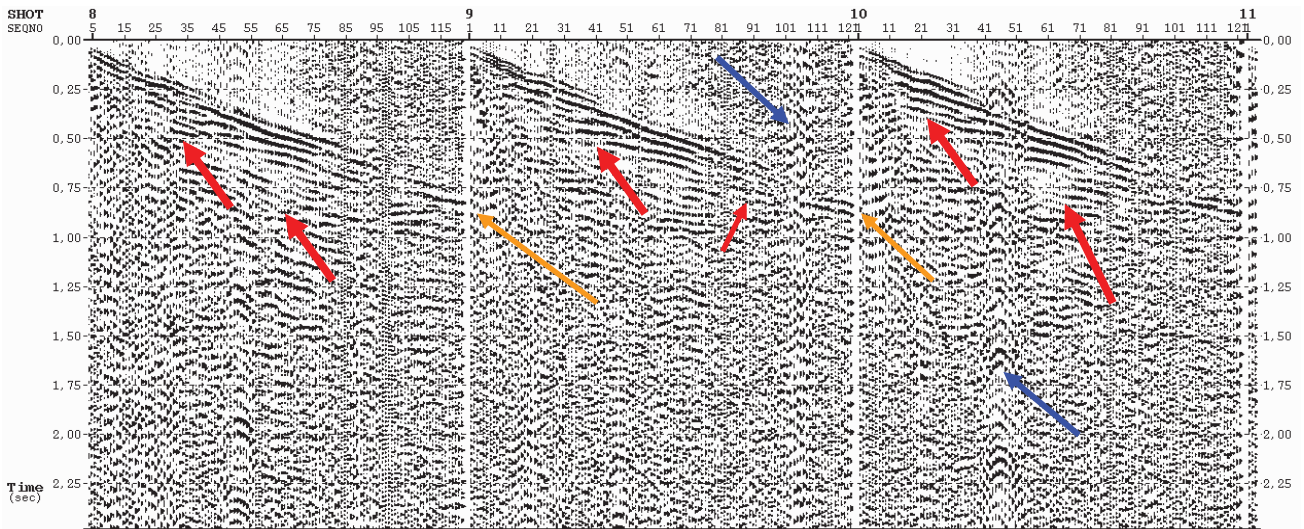


Figure 4.3: Example of raw data of the line 108. The arrows point at: 1) reflections (red arrows), 2) coherent noise (orange arrows) and 3) environmental noise (blue arrows).

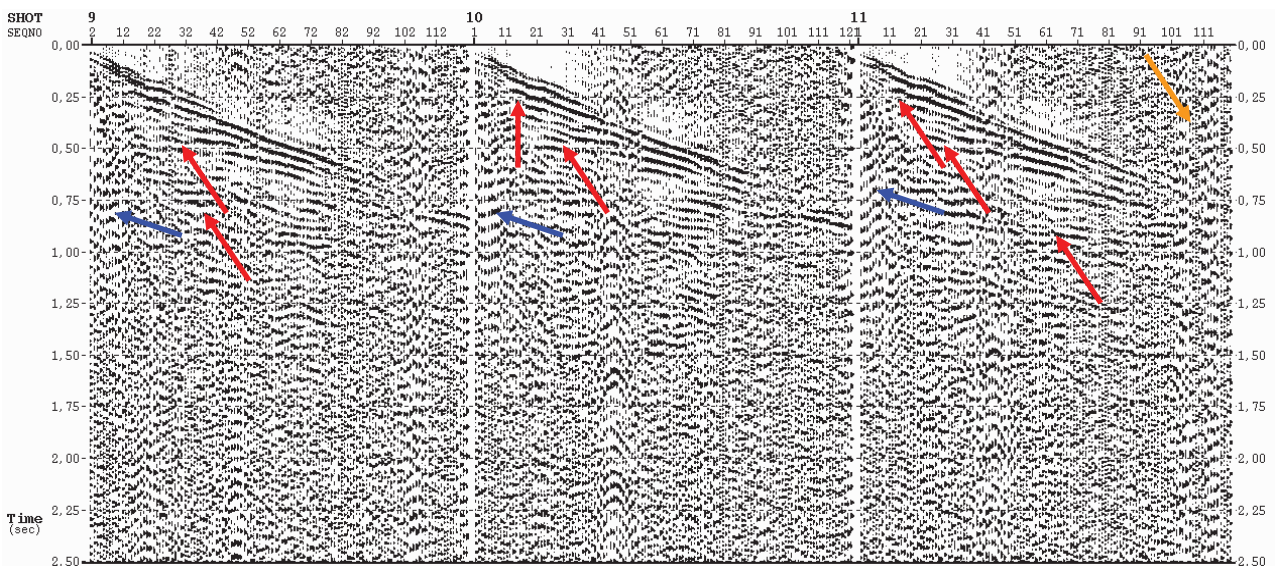


Figure 4.4: Example of raw data of the Line 102. The arrows point at: 1) reflections (red arrows), 2) coherence noise (blue arrows) and 3) environmental noise (orange arrows).

Line 103

The line 103 runs parallel to the state highway 126, characterized by strong traffic that influence the quality of the seismic data. The first shots of line 103 were acquired by using just one Vibroseis and increasing the number of the sweeps. The very poor results, see Figure 4.5, suggested the necessity to change the acquisition parameters. Particularly evident from Figure 4.5 is the absence of any useful signal at large offsets.

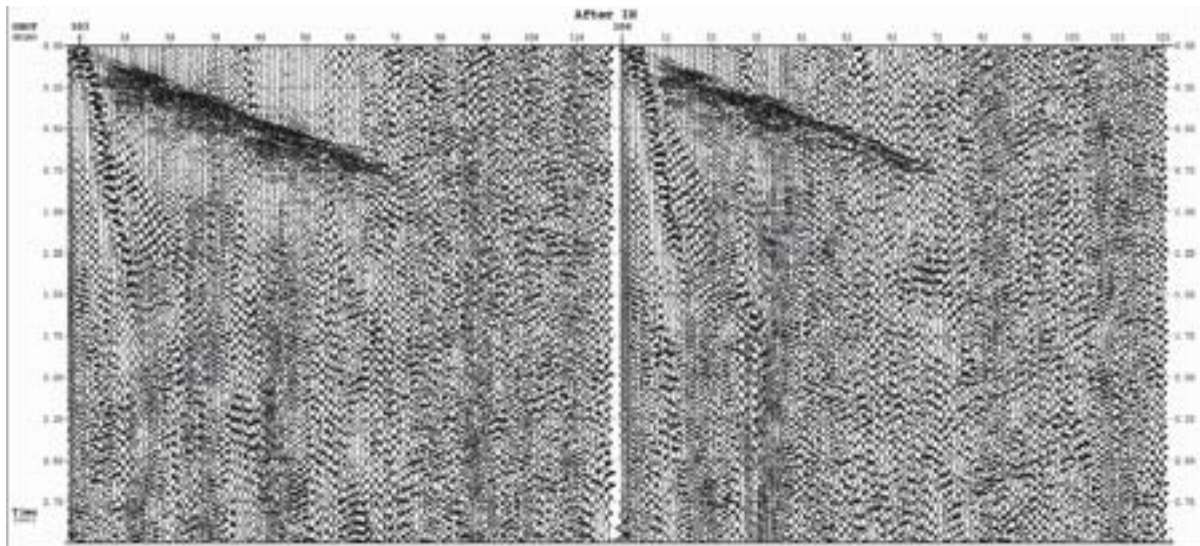


Figure 4.5: Example of records from Line 103. AGC equal to 1000 ms was applied on both records. Note the very poor quality of the seismic response, particularly at large offsets.

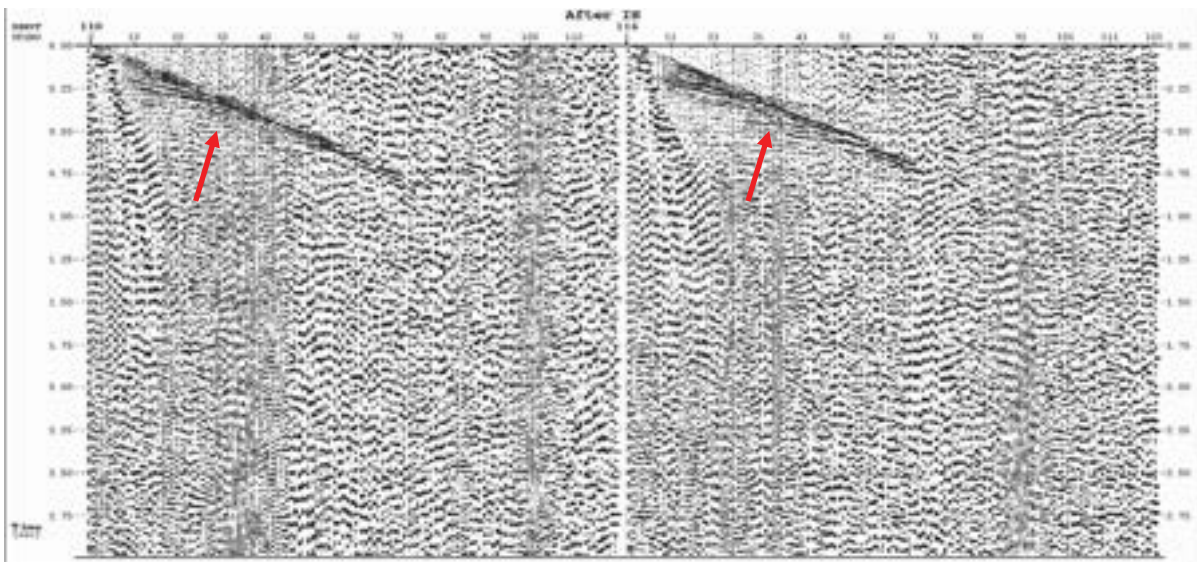


Figure 4.6: The left panel shows the shot acquired by using a sweep length of 12 s, while the right one was acquired by using a sweep length of 16 s. Note the improvement of the signal to noise ratio in the part indicated by the red arrows.

In order to improve the signal/noise ratio, two Vibrators were used and sweep lengths of 12s and 16s were tested on the same shooting point (number 103). In the shot acquired by using 16s sweep length (Figure 4.6, right panel), the reflections pointed by red arrows are more evident. So after the field tests, the following parameters, were used to acquire line 103:

- 1) sweep length: 16s,
- 2) frequency range: 12-72 Hz,
- 3) N° Vibrators: 2,
- 4) N° sweeps: 4.

An example of two records acquired along this line is shown in Figure 4.7. Some reflections that could be enhanced during the processing phase, are indicated by the red arrows.

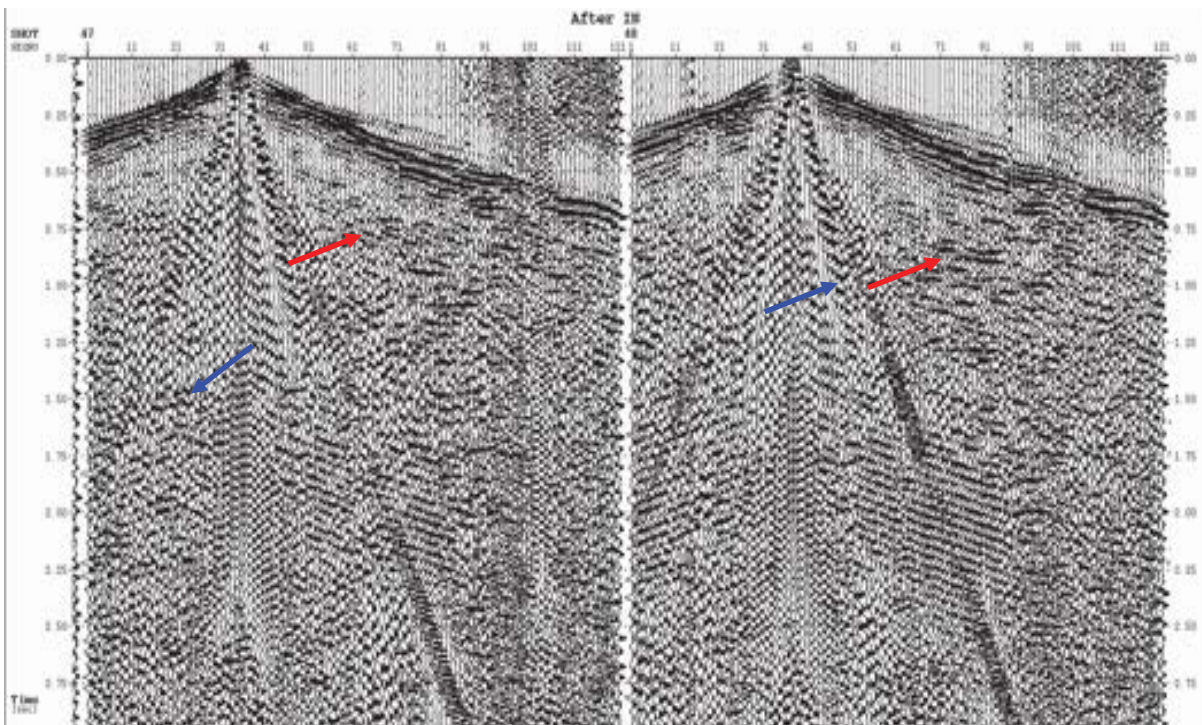


Figure 4.7: Example of raw data of the Line 103. The arrows point at: 1) reflections (red arrows) and 2) environmental noise (blue arrows).

Line 106

Line 106 was recorded with the same parameters of the previous line, except the number of sweep that was reduced to 2, because the line was located in zone characterized by a lower noise level. In Figure 4.8, an example of raw data from line 106 is reported. Strong reflections pointed by red arrows are evident in both shots. The blue arrows indicate the environmental noise. In particular, some human activity was going on during the acquisition and the effects are evident in the central portion of both records.

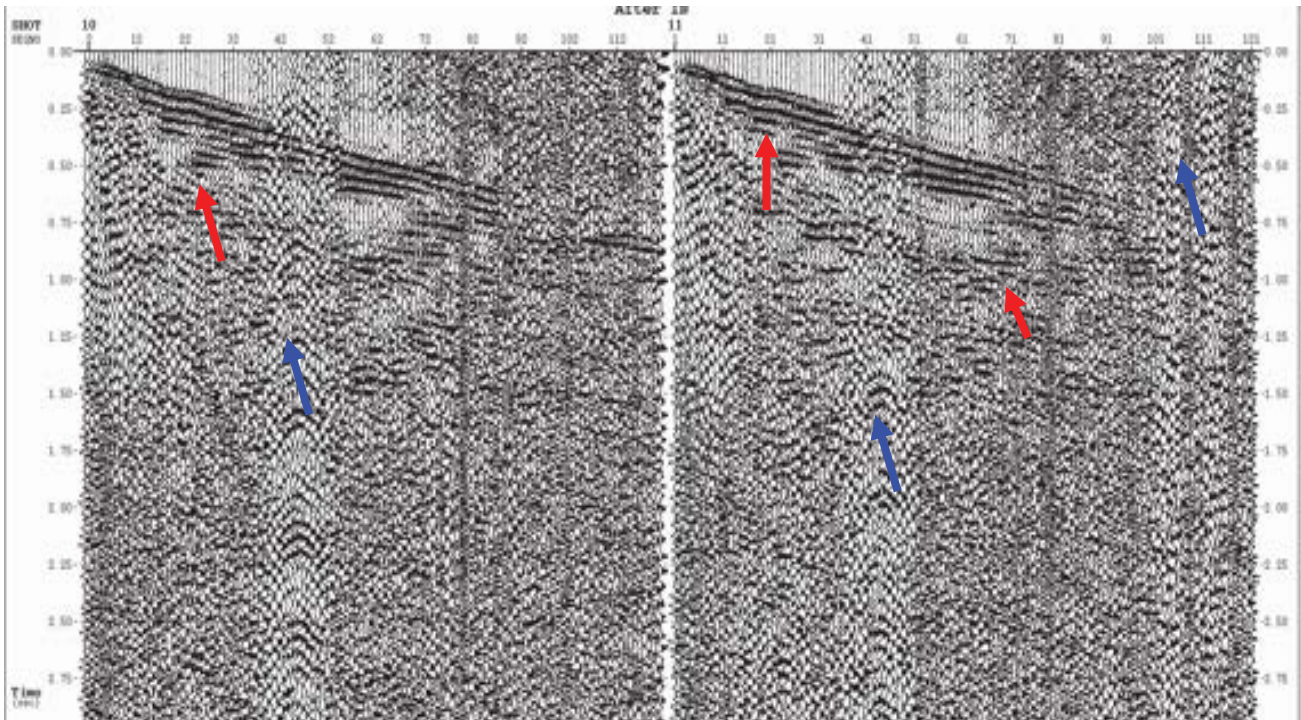


Figure 4.8: Example of raw data of the Line 106. The arrows point at: 1) reflections (red arrows) and 2) environmental noise (blue arrows).

Line 105

Before acquiring the line 105, new field tests were performed and, finally, three Vibrators were used with the following parameters:

- 1) sweep length: 16 s,
- 2) frequency range: 12-72 Hz,
- 3) N° Vibrators: 3,
- 4) N° sweeps: 2.

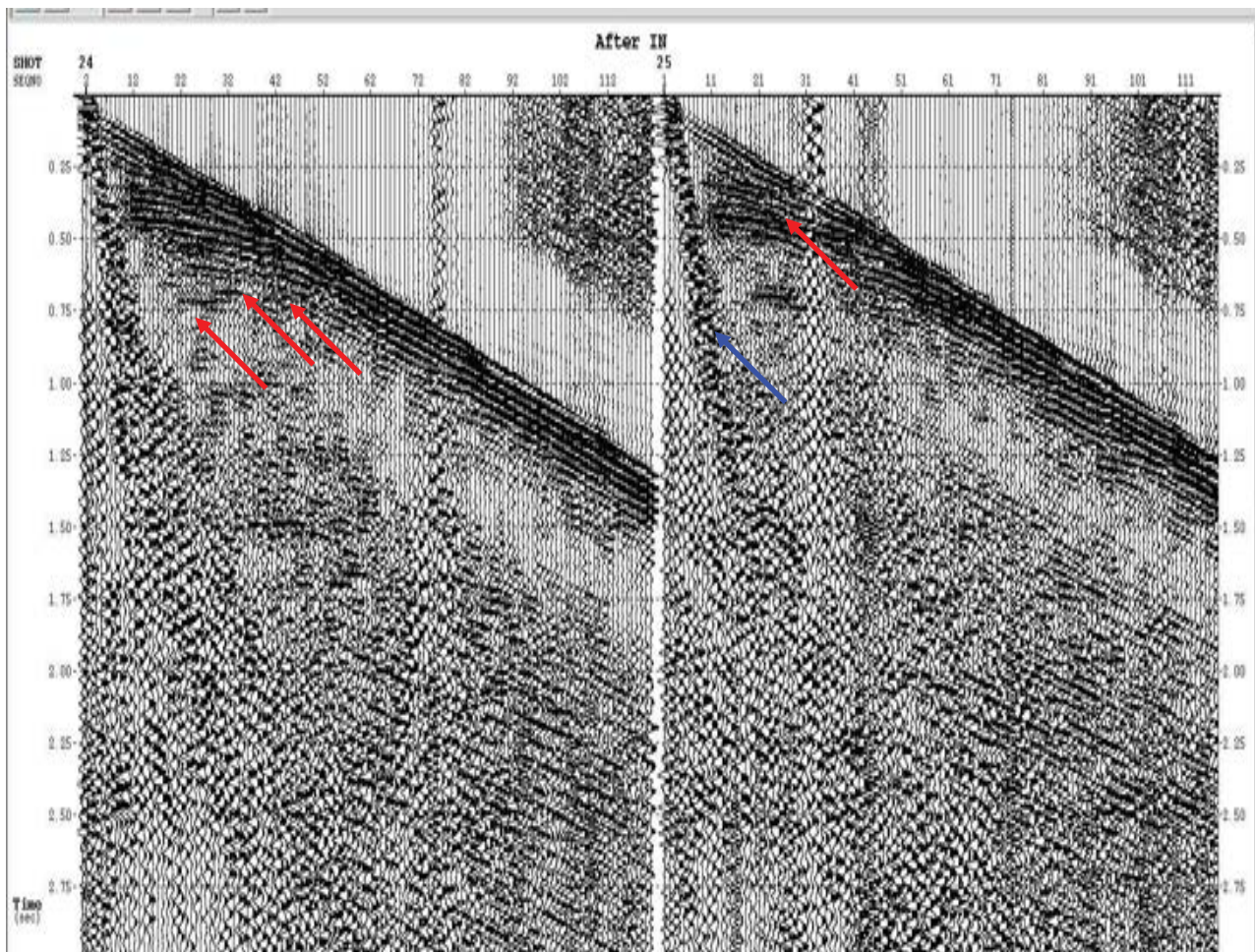


Figure 4.9: Example of raw data of the Line 105. The arrows point at: 1) reflections (red arrows) and 2) coherence noise (blue arrows).

In Figure 4.9, many reflections, pointed out by the red arrows are evident from about 200 ms to 1500 ms. The coherence noise (blue arrows) is present, and will be removed by the data processing.

Line 104

This line runs parallel to a road characterized by strong traffic. The first test showed that the local traffic strongly affected the quality of the data. Consequently, many tests were performed in order to improve the signal/noise ratio. In Figure 4.10, two shots acquired by using 2 sweeps (left panel) and 4 sweeps (right panel) are compared. Deep reflections pointed by red arrows are evident. Strong noise related to the traffic is present in both shots (orange arrows).

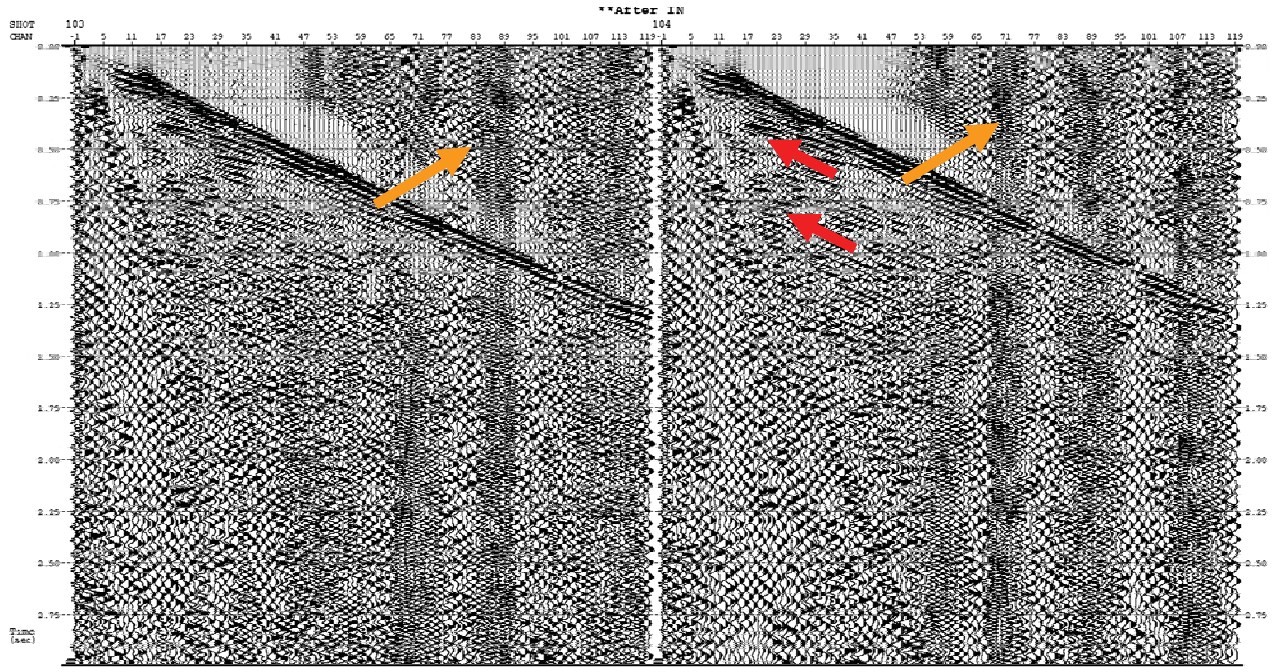


Figure 4.10: Comparison between two shots acquired using 2 sweeps (left panel) and 4 sweeps (right panel). Data quality is remarkable better in the 4 sweeps record (see the red arrows).

After the testing phase, the line was recorded by using the following parameters:

- 1) sweep length: 16 s,
- 2) frequency range: 12-72 Hz,
- 3) N° Vibrators: 3,
- 4) N° sweeps: 4.

6.5. Conclusions

The main objective of this task was to provide a velocity model in depth to link the log and geological information to the seismic data, and to provide an optimal input for a pre-stack depth migration, supplying a final depth seismic section. This study showed that processing and interpretation of the seismograms yielded a clear and consistent model of the velocity distribution in the survey area. Four velocity layers are distinguished: the top layer is a weathered surface layer with very low velocity (310-930 m/s); subjacent a layer with intermediate velocities is found with a dry upper part (830-1400 m/s) and a water-saturated lower part (1690-2020 m/s); it is underlain by a high velocity (2500-3360 m/s) layer. The central layer is composed of unconsolidated alluvial sediments; the high velocity layer is built out of volcanic rock (ignimbritic rhyolites and trachytes). The thickness of the central layer varies from several metres to almost 100 m. The central layer is practically absent at one location and the dry part of the central layer is found at only two spreads. It is likely that either one of the central layer sections may act as a hidden layer, which would result in errors in the thickness estimation.

A number of seismic refraction records is of poor quality, the measurements being hampered both by strong winds producing noise of shaking trees and by loose soils attenuating the impact of the source. When these impediments were absent, the measurements are of good quality.

Descriptions of outcrops of the volcanic rocks show that their composition, texture and degree of consolidation may highly vary from one unit to the next. Below hard, well-consolidated trachitic ignimbrites, much softer volcanic deposits such as tuffs and pumice, with significantly lower seismic velocities, may be present. These low-velocity layers are not reflected in the seismic refraction records. Therefore, the thickness of the high velocity layer is not only unknown, but may be limited to only several tens of metres, which is the thickness observed in outcrops on the island of Sant'Antioco, nearby the survey area.

Attempts to collect information on the horizontal velocity isotropy by carrying out refraction measurements along two perpendicular spreads were made at three locations. However only at one of these sites, bedrock velocities could be deduced from both spreads. Unfortunately, these measurements were intensely disturbed by wind generated noise and are thus not very reliable. The tentative values obtained, though, are similar and suggest the absence of significant anisotropy.

This study can be used for a better positioning of the coal-bearing layers (Produttivo Formation) and can help in the processing and time-depth migration of the reflection seismic survey.

6.6. Acknowledgements

The seismic reflection and refraction survey received funding through CarboSulcis, which is gratefully acknowledged.

We are also grateful to CarboSulcis for the facilities and helps offered in the fieldwork and for putting at our disposal logistics and safety equipment.

References

- Hagedoorn, J.G., 1959. The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections. *Geophysical Prospecting* 7, 158-181.
- Overmeeren, R.A. van, 2001. Hagedoorn's plus-minus method: the beauty of simplicity. *Geophysical Prospecting* 49, 687-696.

SEISMIC LINES

SULCIS BASIN SURVEY

Area: Sulcis Basin

Line 102: TVF STACKED SECTION

CDP: 101 - 817

Recording parameters

System: SERCEL 408-XL

Field format: SEG-D

Data length: 3 s

Sample rate: 2 ms

Field Filters: anti-alias

Geophone type: SM4 - SB (10 Hz)

Recording data: May 08

Energy source: VIBROSEIS

Number of traces: 121

Group interval: 20 m

Shot interval: 40 m

Geophone array: 12 geophones

Processing sequence

Reformat: from SEG-Y to Focus internal format

Quality control: display of all shot and trace editing

Amplitude recovery: based on velocity function

Field static corrections: computation of datum statics using refraction surveys

Deconvolution: Predictive Deconvolution

Median filter: trimmed mean dynamic dip filter

Gather: rearrange traces in common mid points

Velocity analysis

NMO correction

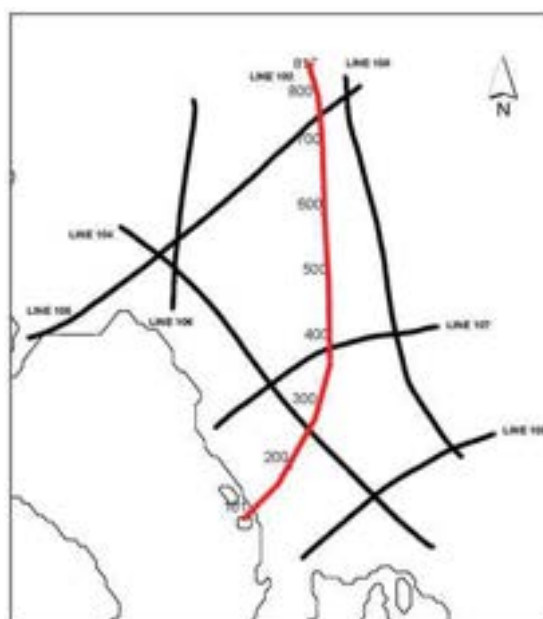
Residual statics corrections

Mute

Stack

Filter: bandpass 0 s 10-15/60-100
 0.5 s 10-15/40-90

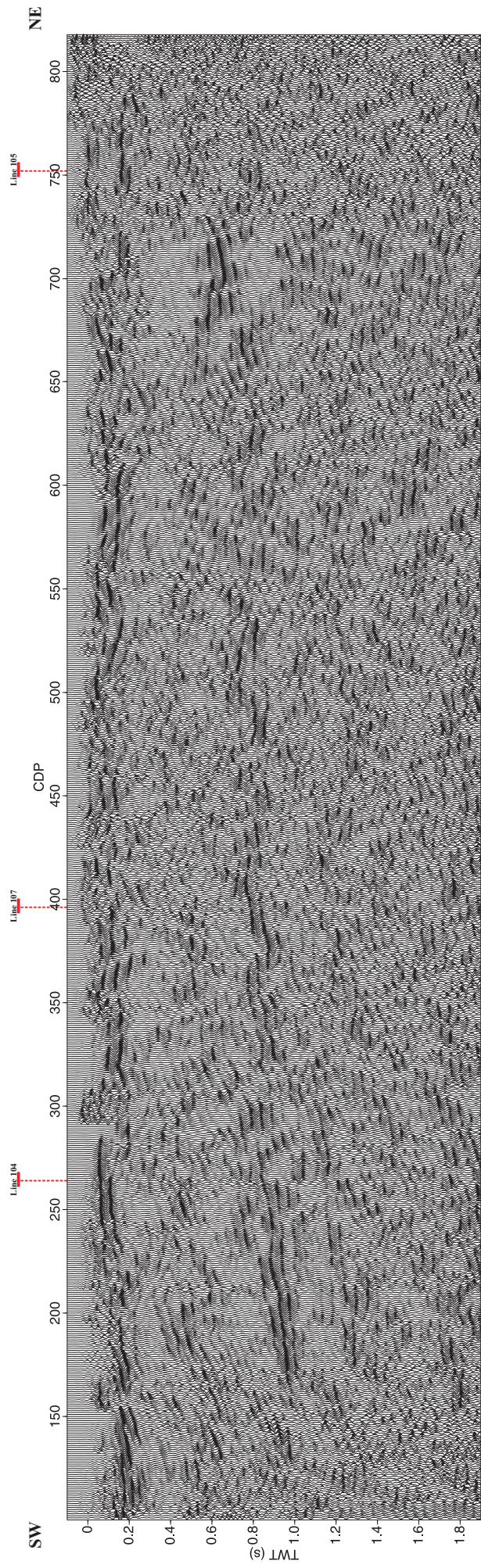
0 s refers to 0 m a.s.l.



Analyst: Michela Giustiniani

Processed by:

ISTITUTO NAZIONALE DI OCEANOGRAFIA E GEOFISICA SPERIMENTALE - OGS
DIPARTIMENTO DI GEOFISICA DELLA LITOSFERA
Borgo Grotta Gigante 42/C - 34010 Trieste (Italia)



SULCIS BASIN SURVEY

Area: Sulcis Basin

Line 102: FX DECONVOLUTION STACKED SECTION

CDP: 101 - 817

Recording parameters

System: SERCEL 408-XL

Field format: SEG-D

Data length: 3 s

Sample rate: 2 ms

Field Filters: anti-alias

Geophone type: SM4 - SB (10 Hz)

Recording data: May 08

Energy source: VIBROSEIS

Number of traces: 121

Group interval: 20 m

Shot interval: 40 m

Geophone array: 12 geophones

Processing sequence

Reformat: from SEG-Y to Focus internal format

Quality control: display of all shot and trace editing

Amplitude recovery: based on velocity function

Field static corrections: computation of datum statics using refraction surveys

Deconvolution: Predictive Deconvolution

Median filter: trimmed mean dynamic dip filter

Gather: rearrange traces in common mid points

Velocity analysis

NMO correction

Residual statics corrections

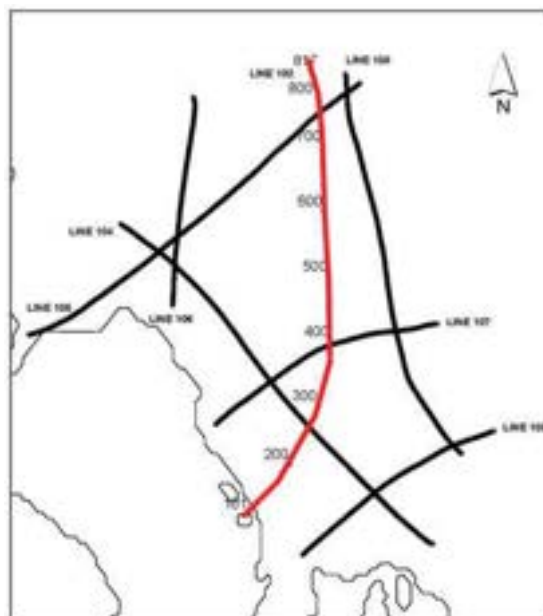
Mute

Stack

FX Deconvolution

Filter: bandpass 0 s 10-15/60-100
 0.5 s 10-15/40-90

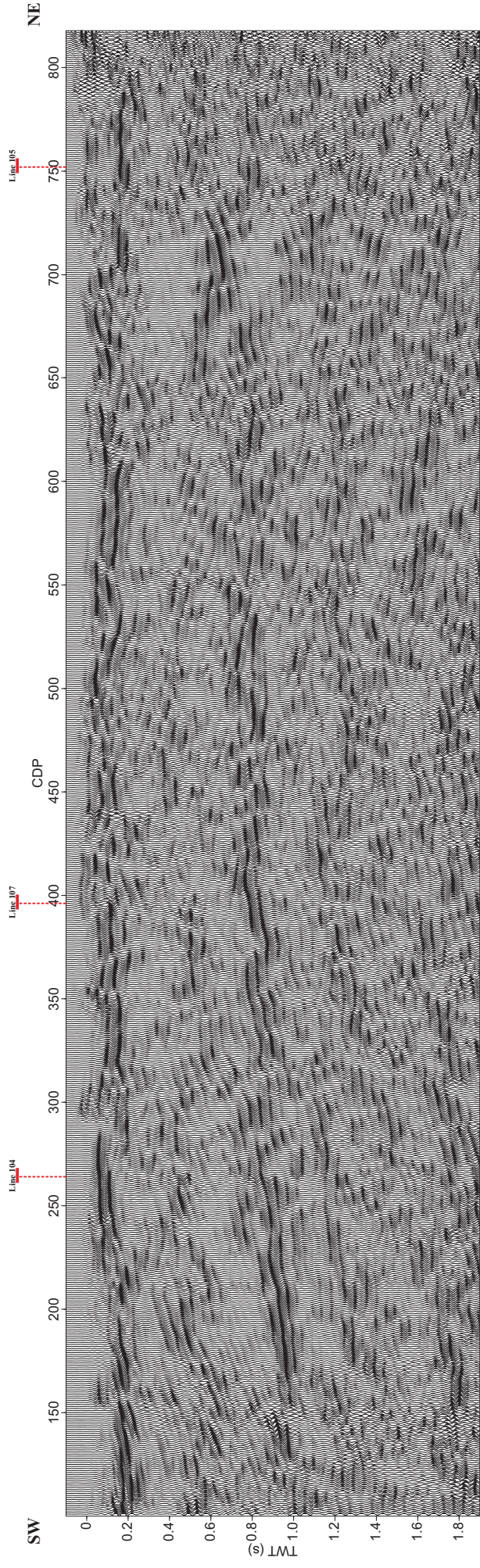
0 s refers to 0 m a.s.l.



Analyst: Michela Giustiniani

Processed by:

ISTITUTO NAZIONALE DI OCEANOGRAFIA E GEOFISICA SPERIMENTALE - OGS
DIPARTIMENTO DI GEOFISICA DELLA LITOSFERA
Borgo Grotta Gigante 42/C - 34010 Trieste (Italia)



SULCIS BASIN SURVEY

Area: Sulcis Basin

Line 103: TVF STACKED SECTION

CDP: 101 - 454

Recording parameters

System: SERCEL 408-XL

Field format: SEG-D

Data length: 3 s

Sample rate: 2 ms

Field Filters: anti-alias

Geophone type: SM4 - SB (10 Hz)

Recording data: May 08

Energy source: VIBROSEIS

Number of traces: 121

Group interval: 20 m

Shot interval: 40 m

Geophone array: 12 geophones

Processing sequence

Reformat: from SEG-Y to Focus internal format

Quality control: display of all shot and trace editing

Amplitude recovery: based on velocity function

Field static corrections: computation of datum statics using refraction surveys

Deconvolution: Predictive Deconvolution

Median filter: trimmed mean dynamic dip filter

Gather: rearrange traces in common mid points

Velocity analysis

NMO correction

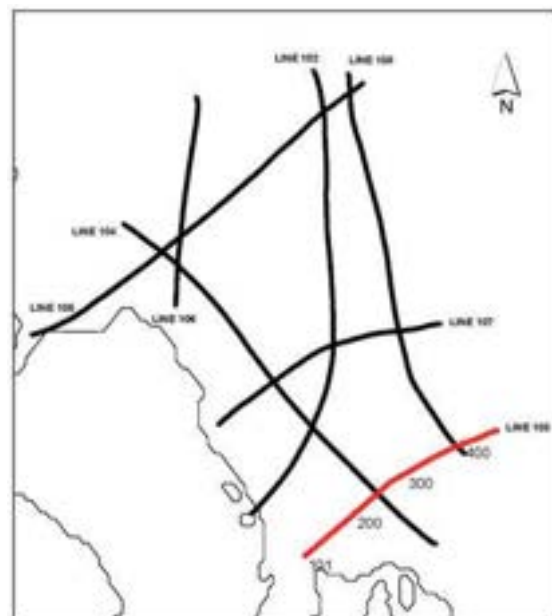
Residual statics corrections

Mute

Stack

Filter: bandpass 0 s 10-15/60-100
 0.5 s 10-15/40-90

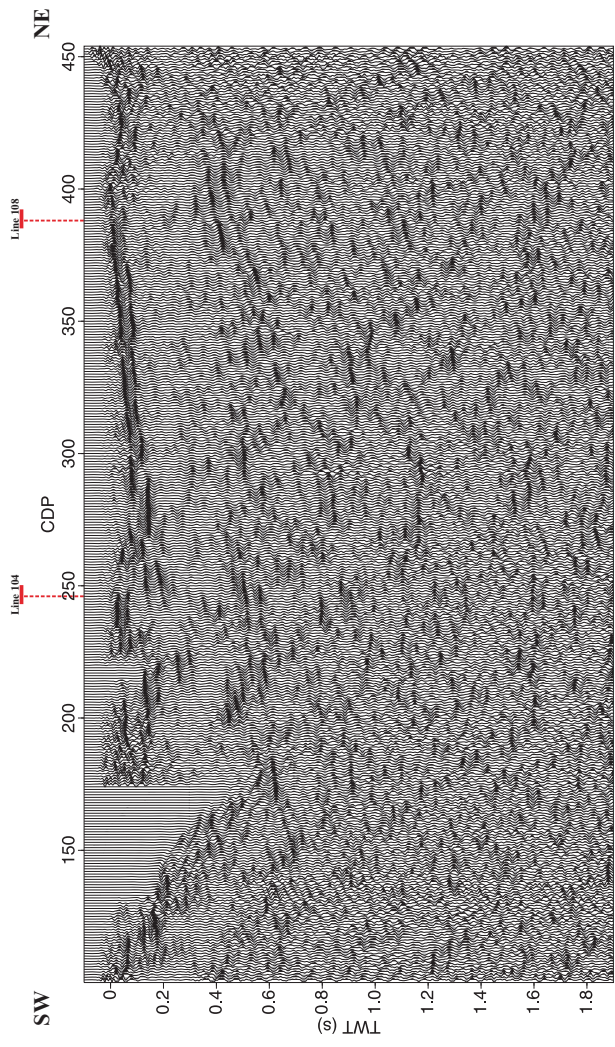
0 s refers to 0 m a.s.l.



Analyst: Michela Giustiniani

Processed by:

ISTITUTO NAZIONALE DI OCEANOGRAFIA E GEOFISICA SPERIMENTALE - OGS
DIPARTIMENTO DI GEOFISICA DELLA LITOSFERA
Borgo Grotta Gigante 42/C - 34010 Trieste (Italia)



SULCIS BASIN SURVEY

Area: Sulcis Basin

Line 103: FX DECONVOLUTION STACKED SECTION

CDP: 101 - 454

Recording parameters

System: SERCEL 408-XL

Field format: SEG-D

Data length: 3 s

Sample rate: 2 ms

Field Filters: anti-alias

Geophone type: SM4 - SB (10 Hz)

Recording data: May 08

Energy source: VIBROSEIS

Number of traces: 121

Group interval: 20 m

Shot interval: 40 m

Geophone array: 12 geophones

Processing sequence

Reformat: from SEG-Y to Focus internal format

Quality control: display of all shot and trace editing

Amplitude recovery: based on velocity function

Field static corrections: computation of datum statics using refraction surveys

Deconvolution: Predictive Deconvolution

Median filter: trimmed mean dynamic dip filter

Gather: rearrange traces in common depth points

Velocity analysis

NMO correction

Residual statics corrections

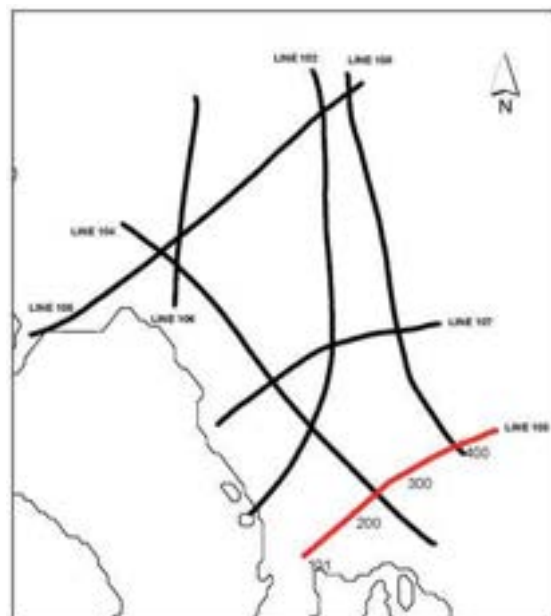
Mute

Stack

FX Deconvolution

Filter: bandpass 0 s 10-15/60-100
 0.5 s 10-15/40-90

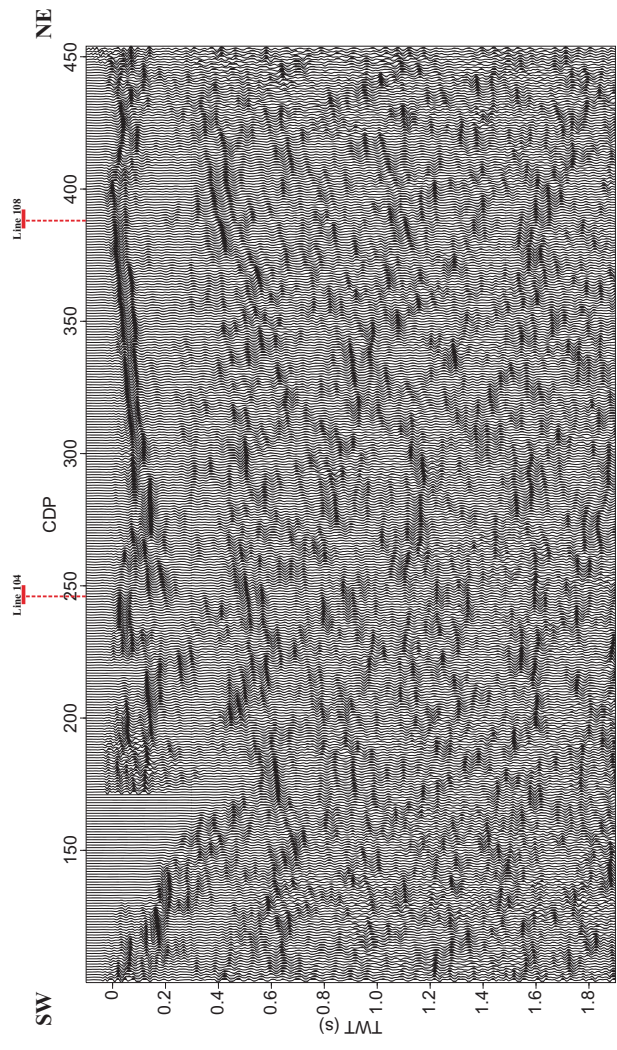
0 s refers to 0 m a.s.l.



Analyst: Michela Giustiniani

Processed by:

ISTITUTO NAZIONALE DI OCEANOGRAFIA E GEOFISICA SPERIMENTALE - OGS
DIPARTIMENTO DI GEOFISICA DELLA LITOSFERA
Borgo Grotta Gigante 42/C - 34010 Trieste (Italia)



SULCIS BASIN SURVEY

Area: Sulcis Basin

Line 104: TVF STACKED SECTION

CDP: 101 - 790

Recording parameters

System: SERCEL 408-XL

Field format: SEG-D

Data length: 3 s

Sample rate: 2 ms

Field Filters: anti-alias

Geophone type: SM4 - SB (10 Hz)

Recording data: May 08

Energy source: VIBROSEIS

Number of traces: 121

Group interval: 20 m

Shot interval: 40 m

Geophone array: 12 geophones

Processing sequence

Reformat: from SEG-Y to Focus internal format

Quality control: display of all shot and trace editing

Amplitude recovery: based on velocity function

Field static corrections: computation of datum statics using refraction surveys

Deconvolution: Predictive Deconvolution

Median filter: trimmed mean dynamic dip filter

Gather: rearrange traces in common mid points

Velocity analysis

NMO correction

Residual statics corrections

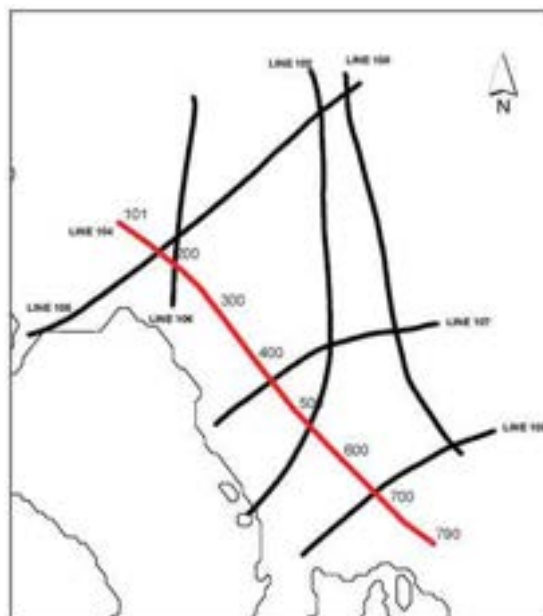
Mute

Stack

Filter: bandpass 0 s 10-15/60-100

 0.5 s 10-15/40-90

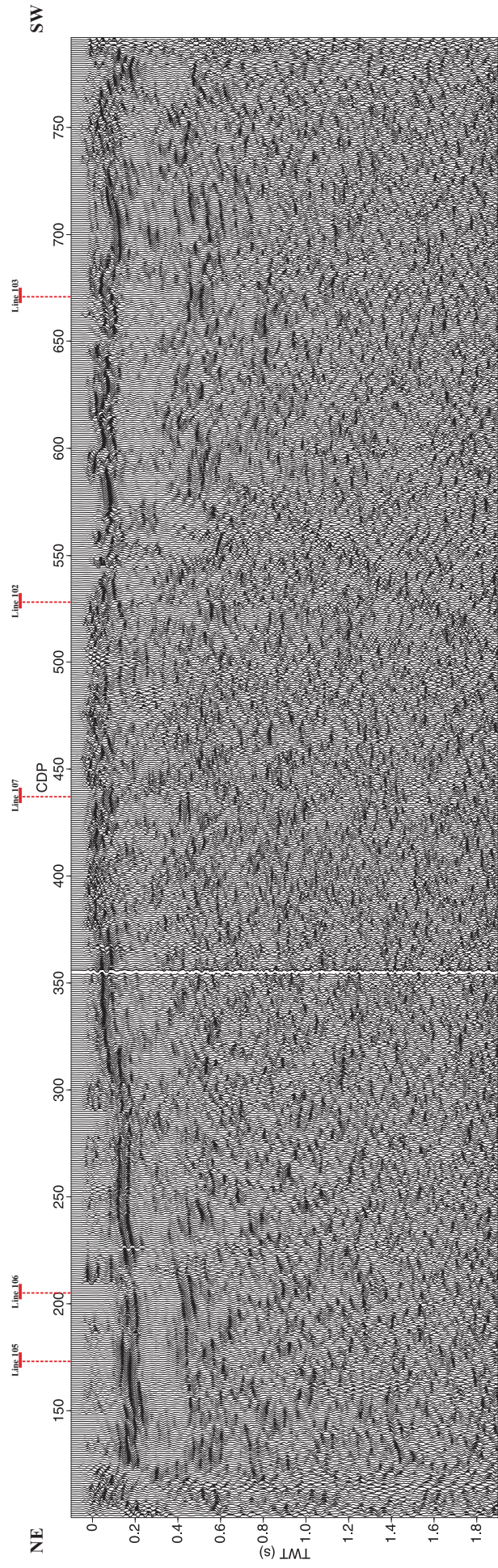
0 s refers to 0 m a.s.l.



Analyst: Michela Giustiniani

Processed by:

ISTITUTO NAZIONALE DI OCEANOGRAFIA E GEOFISICA SPERIMENTALE - OGS
DIPARTIMENTO DI GEOFISICA DELLA LITOSFERA
Borgo Grotta Gigante 42/C - 34010 Trieste (Italia)



SULCIS BASIN SURVEY

Area: Sulcis Basin

Line 104: FX DECONVOLUTION STACKED SECTION

CDP: 101 - 790

Recording parameters

System: SERCEL 408-XL

Field format: SEG-D

Data length: 3 s

Sample rate: 2 ms

Field Filters: anti-alias

Geophone type: SM4 - SB (10 Hz)

Recording data: May 08

Energy source: VIBROSEIS

Number of traces: 121

Group interval: 20 m

Shot interval: 40 m

Geophone array: 12 geophones

Processing sequence

Reformat: from SEG-Y to Focus internal format

Quality control: display of all shot and trace editing

Amplitude recovery: based on velocity function

Field static corrections: computation of datum statics using refraction surveys

Deconvolution: Predictive Deconvolution

Median filter: trimmed mean dynamic dip filter

Gather: rearrange traces in common mid points

Velocity analysis

NMO correction

Residual statics corrections

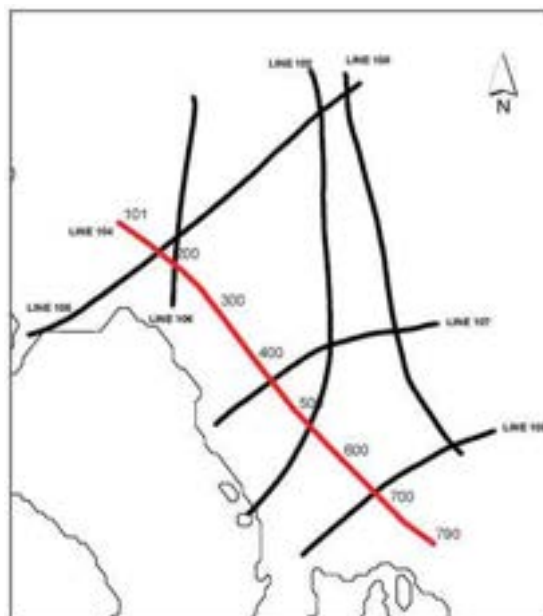
Mute

Stack

FX Deconvolution

Filter: bandpass 0 s 10-15/60-100
 0.5 s 10-15/40-90

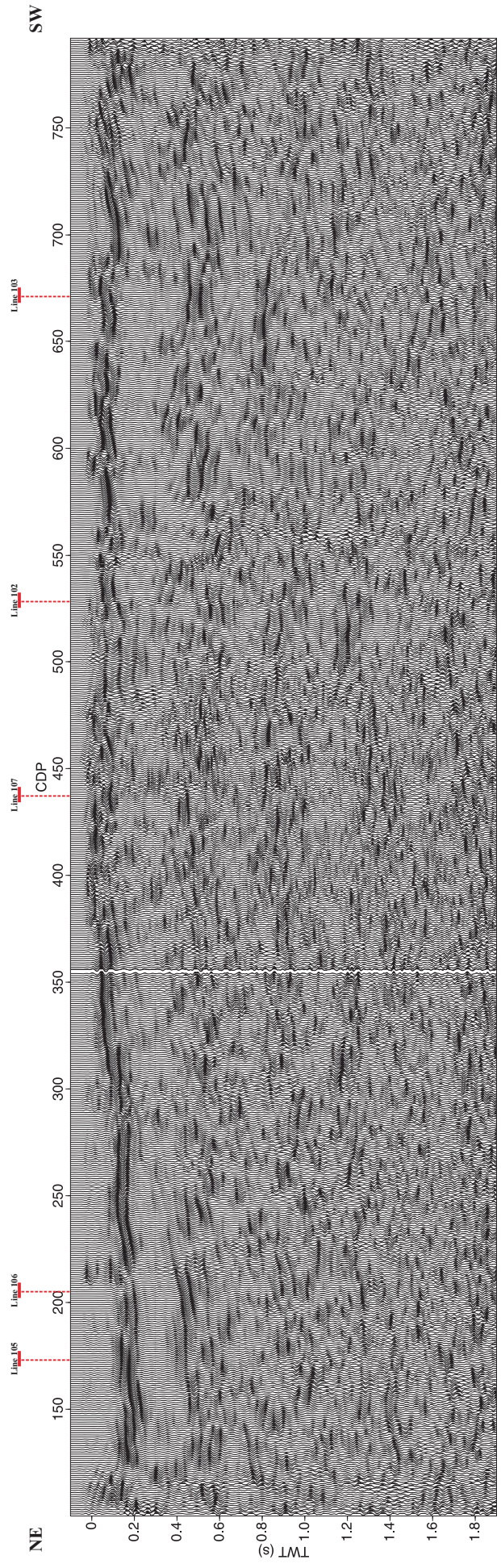
0 s refers to 0 m a.s.l.



Analyst: Michela Giustiniani

Processed by:

ISTITUTO NAZIONALE DI OCEANOGRAFIA E GEOFISICA SPERIMENTALE - OGS
DIPARTIMENTO DI GEOFISICA DELLA LITOSFERA
Borgo Grotta Gigante 42/C - 34010 Trieste (Italia)



SULCIS BASIN SURVEY

Area: Sulcis Basin

Line 105: TVF STACKED SECTION

CDP: 101 - 740

Recording parameters

System: SERCEL 408-XL

Field format: SEG-D

Data length: 3 s

Sample rate: 2 ms

Field Filters: anti-alias

Geophone type: SM4 - SB (10 Hz)

Recording data: May 08

Energy source: VIBROSEIS

Number of traces: 121

Group interval: 20 m

Shot interval: 40 m

Geophone array: 12 geophones

Processing sequence

Reformat: from SEG-Y to Focus internal format

Quality control: display of all shot and trace editing

Amplitude recovery: based on velocity function

Field static corrections: computation of datum statics using refraction surveys

Deconvolution: Predictive Deconvolution

Median filter: trimmed mean dynamic dip filter

Gather: rearrange traces in common mid points

Velocity analysis

NMO correction

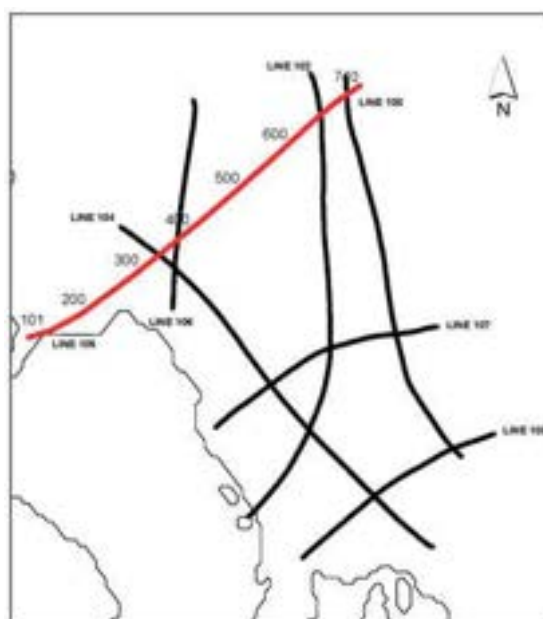
Residual statics corrections

Mute

Stack

Filter: bandpass 0 s 10-15/60-100
 0.5 s 10-15/40-90

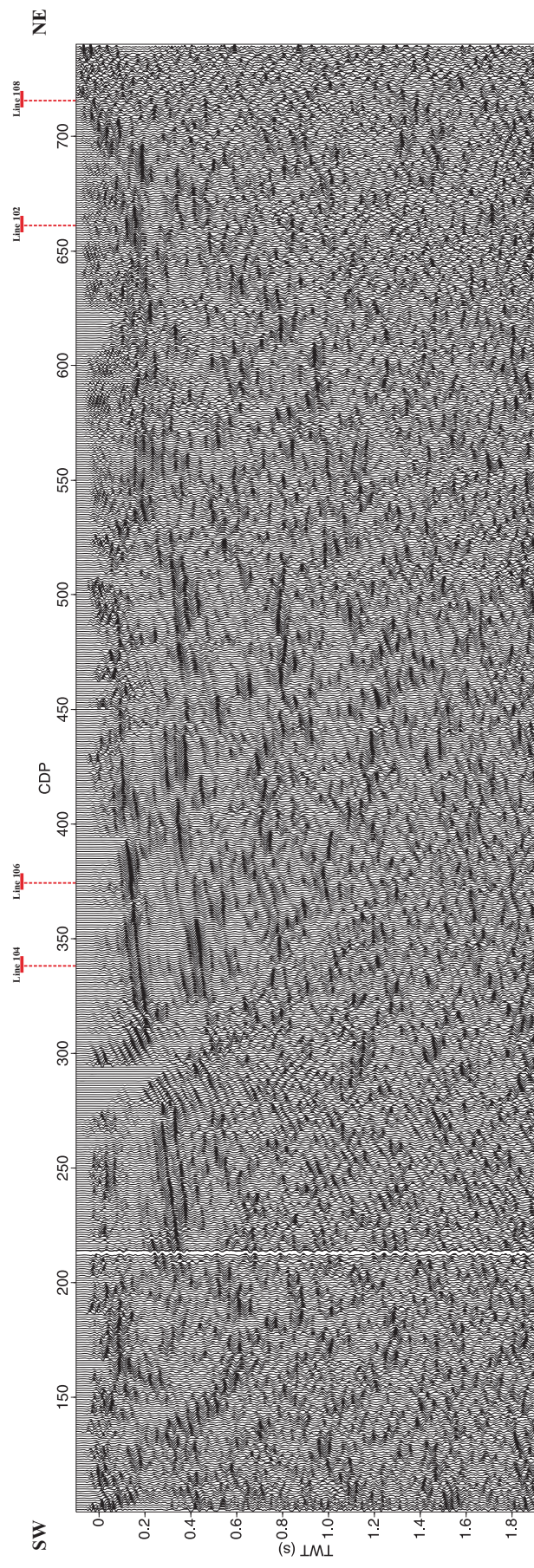
0 s refers to 0 m a.s.l.



Analyst: Michela Giustiniani

Processed by:

ISTITUTO NAZIONALE DI OCEANOGRAFIA E GEOFISICA SPERIMENTALE - OGS
DIPARTIMENTO DI GEOFISICA DELLA LITOSFERA
Borgo Grotta Gigante 42/C - 34010 Trieste (Italia)



SULCIS BASIN SURVEY

Area: Sulcis Basin

Line 105: FX DECONVOLUTION STACKED SECTION

CDP: 101 - 740

Recording parameters

System: SERCEL 408-XL

Field format: SEG-D

Data length: 3 s

Sample rate: 2 ms

Field Filters: anti-alias

Geophone type: SM4 - SB (10 Hz)

Recording data: May 08

Energy source: VIBROSEIS

Number of traces: 121

Group interval: 20 m

Shot interval: 40 m

Geophone array: 12 geophones

Processing sequence

Reformat: from SEG-Y to Focus internal format

Quality control: display of all shot and trace editing

Amplitude recovery: based on velocity function

Field static corrections: computation of datum statics using refraction surveys

Deconvolution: Predictive Deconvolution

Median filter: trimmed mean dynamic dip filter

Gather: rearrange traces in common mid points

Velocity analysis

NMO correction

Residual statics corrections

Mute

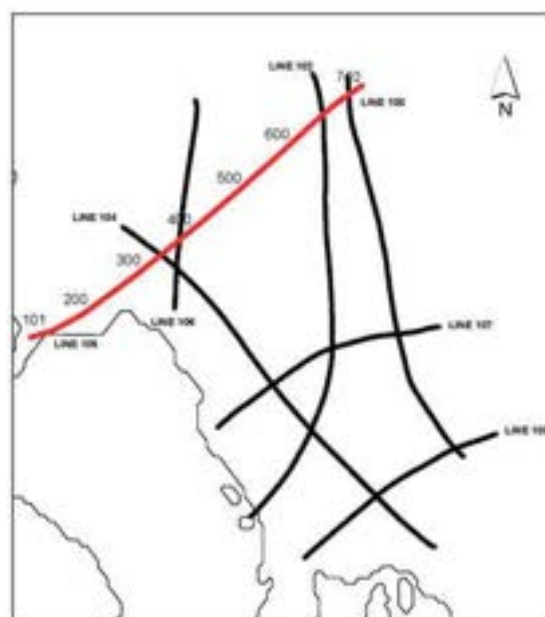
Stack

FX Deconvolution

Filter: bandpass 0 s 10-15/60-100

0.5 s 10-15/40-90

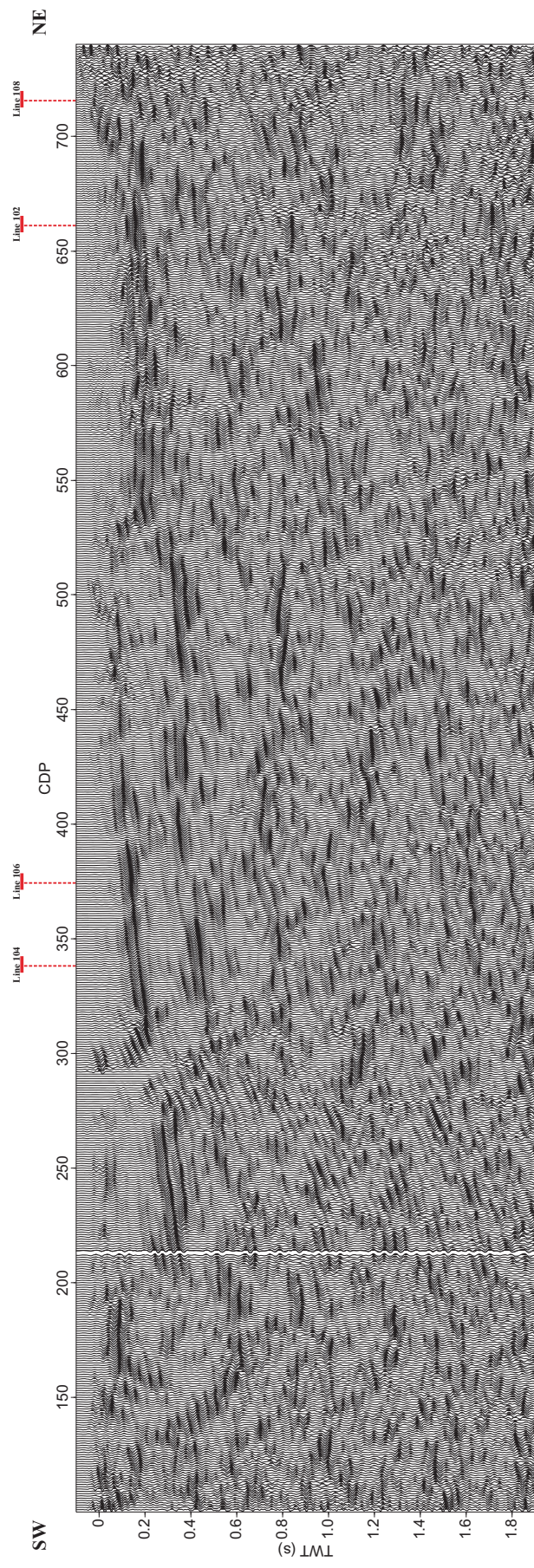
0 s refers to 0 m a.s.l.



Analyst: Michela Giustiniani

Processed by:

ISTITUTO NAZIONALE DI OCEANOGRAFIA E GEOFISICA SPERIMENTALE - OGS
DIPARTIMENTO DI GEOFISICA DELLA LITOSFERA
Borgo Grotta Gigante 42/C - 34010 Trieste (Italia)



SULCIS BASIN SURVEY

Area: Sulcis Basin

Line 106: TVF STACKED SECTION

CDP: 101 - 419

Recording parameters

System: SERCEL 408-XL

Field format: SEG-D

Data length: 3 s

Sample rate: 2 ms

Field Filters: anti-alias

Geophone type: SM4 - SB (10 Hz)

Recording data: May 08

Energy source: VIBROSEIS

Number of traces: 121

Group interval: 20 m

Shot interval: 40 m

Geophone array: 12 geophones

Processing sequence

Reformat: from SEG-Y to Focus internal format

Quality control: display of all shot and trace editing

Amplitude recovery: based on velocity function

Field static corrections: computation of datum statics using refraction surveys

Deconvolution: Predictive Deconvolution

Median filter: trimmed mean dynamic dip filter

Gather: rearrange traces in common mid points

Velocity analysis

NMO correction

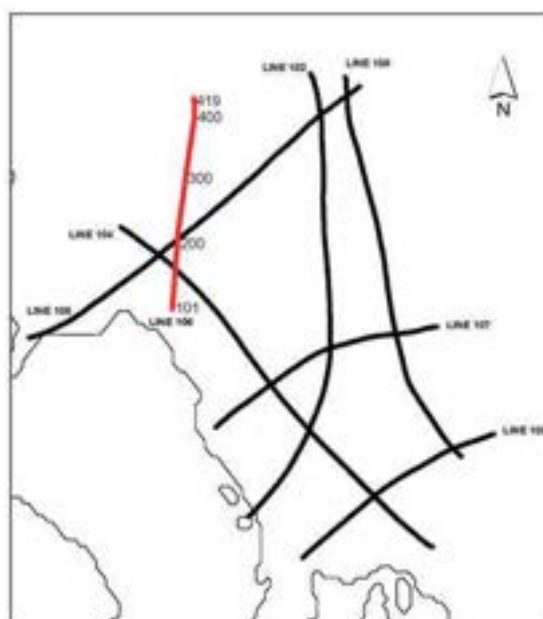
Residual statics corrections

Mute

Stack

Filter: bandpass 0 s 10-15/60-100
 0.5 s 10-15/40-90

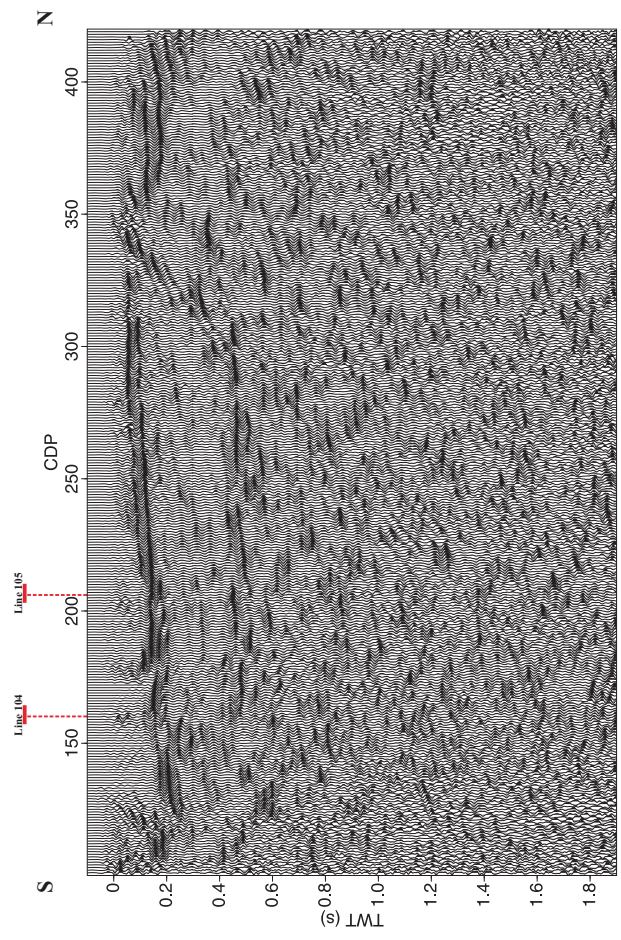
0 s refers to 0 m a.s.l.



Analyst: Michela Giustiniani

Processed by:

ISTITUTO NAZIONALE DI OCEANOGRAFIA E GEOFISICA SPERIMENTALE - OGS
DIPARTIMENTO DI GEOFISICA DELLA LITOSFERA
Borgo Grotta Gigante 42/C - 34010 Trieste (Italia)



SULCIS BASIN SURVEY

Area: Sulcis Basin

Line 106: FX DECONVOLUTION STACKED SECTION

CDP: 101 - 419

Recording parameters

System: SERCEL 408-XL

Field format: SEG-D

Data length: 3 s

Sample rate: 2 ms

Field Filters: anti-alias

Geophone type: SM4 - SB (10 Hz)

Recording data: May 08

Energy source: VIBROSEIS

Number of traces: 121

Group interval: 20 m

Shot interval: 40 m

Geophone array: 12 geophones

Processing sequence

Reformat: from SEG-Y to Focus internal format

Quality control: display of all shot and trace editing

Amplitude recovery: based on velocity function

Field static corrections: computation of datum statics using refraction surveys

Deconvolution: Predictive Deconvolution

Median filter: trimmed mean dynamic dip filter

Gather: rearrange traces in common mid points

Velocity analysis

NMO correction

Residual statics corrections

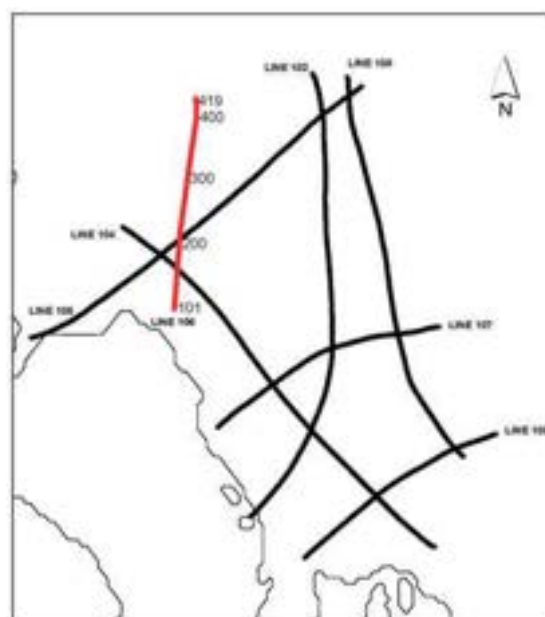
Mute

Stack

FX Deconvolution

Filter: bandpass 0 s 10-15/60-100
 0.5 s 10-15/40-90

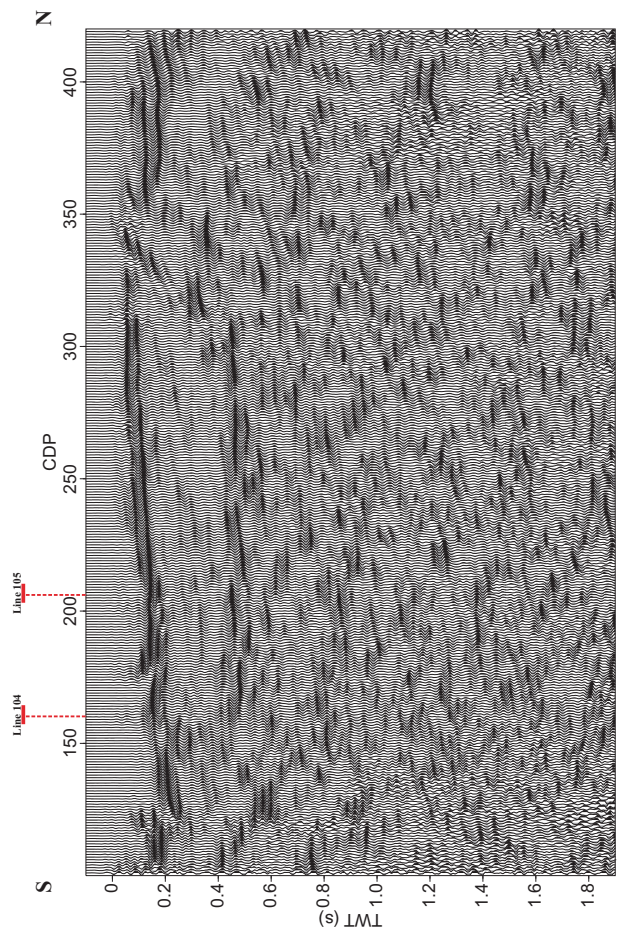
0 s refers to 0 m a.s.l.



Analyst: Michela Giustiniani

Processed by:

ISTITUTO NAZIONALE DI OCEANOGRAFIA E GEOFISICA SPERIMENTALE - OGS
DIPARTIMENTO DI GEOFISICA DELLA LITOSFERA
Borgo Grotta Gigante 42/C - 34010 Trieste (Italia)



SULCIS BASIN SURVEY

Area: Sulcis Basin

Line 107: TVF STACKED SECTION

CDP: 101 - 483

Recording parameters

System: SERCEL 408-XL

Field format: SEG-D

Data length: 3 s

Sample rate: 2 ms

Field Filters: anti-alias

Geophone type: SM4 - SB (10 Hz)

Recording data: May 08

Energy source: VIBROSEIS

Number of traces: 121

Group interval: 20 m

Shot interval: 40 m

Geophone array: 12 geophones

Processing sequence

Reformat: from SEG-Y to Focus internal format

Quality control: display of all shot and trace editing

Amplitude recovery: based on velocity function

Field static corrections: computation of datum statics using refraction surveys

Deconvolution: Predictive Deconvolution

Median filter: trimmed mean dynamic dip filter

Gather: rearrange traces in common mid points

Velocity analysis

NMO correction

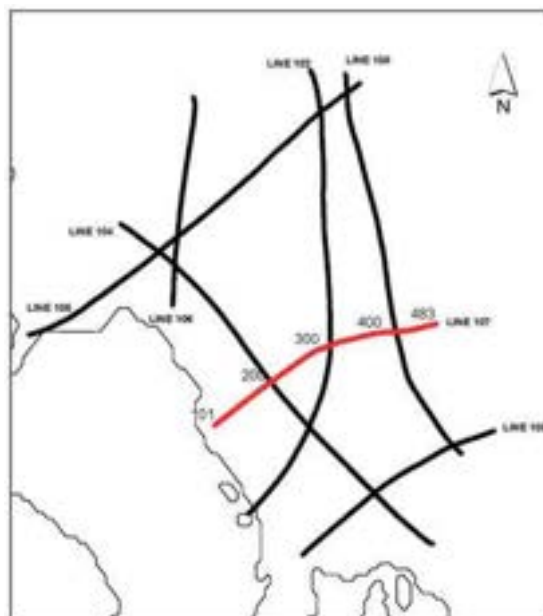
Residual statics corrections

Mute

Stack

Filter: bandpass 0 s 10-15/60-100
 0.5 s 10-15/40-90

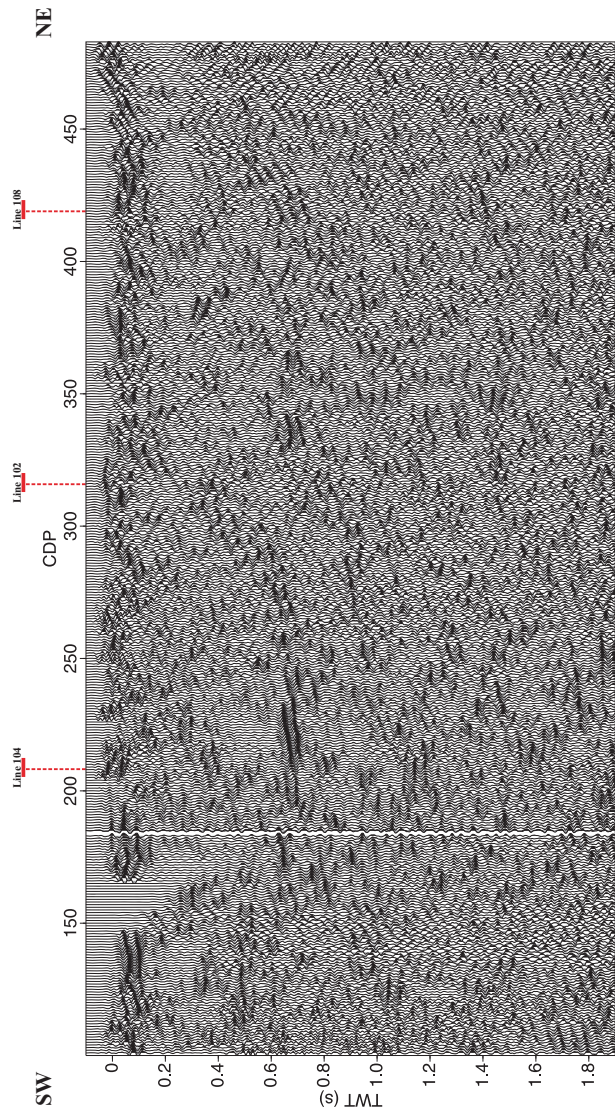
0 s refers to 0 m a.s.l.



Analyst: Michela Giustiniani

Processed by:

ISTITUTO NAZIONALE DI OCEANOGRAFIA E GEOFISICA SPERIMENTALE - OGS
DIPARTIMENTO DI GEOFISICA DELLA LITOSFERA
Borgo Grotta Gigante 42/C - 34010 Trieste (Italia)



SULCIS BASIN SURVEY

Area: Sulcis Basin

Line 107: FX DECONVOLUTION STACKED SECTION

CDP: 101 - 483

Recording parameters

System: SERCEL 408-XL

Field format: SEG-D

Data length: 3 s

Sample rate: 2 ms

Field Filters: anti-alias

Geophone type: SM4 - SB (10 Hz)

Recording data: May 08

Energy source: VIBROSEIS

Number of traces: 121

Group interval: 20 m

Shot interval: 40 m

Geophone array: 12 geophones

Processing sequence

Reformat: from SEG-Y to Focus internal format

Quality control: display of all shot and trace editing

Amplitude recovery: based on velocity function

Field static corrections: computation of datum statics using refraction surveys

Deconvolution: Predictive Deconvolution

Median filter: trimmed mean dynamic dip filter

Gather: rearrange traces in common mid points

Velocity analysis

NMO correction

Residual statics corrections

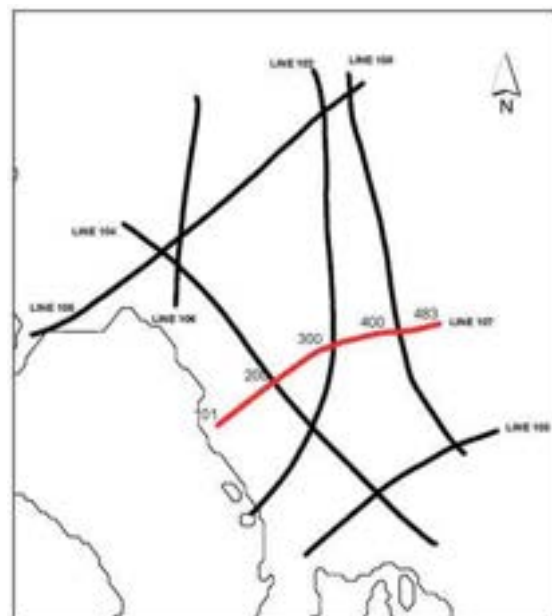
Mute

Stack

FX Deconvolution

Filter: bandpass 0 s 10-15/60-100
 0.5 s 10-15/40-90

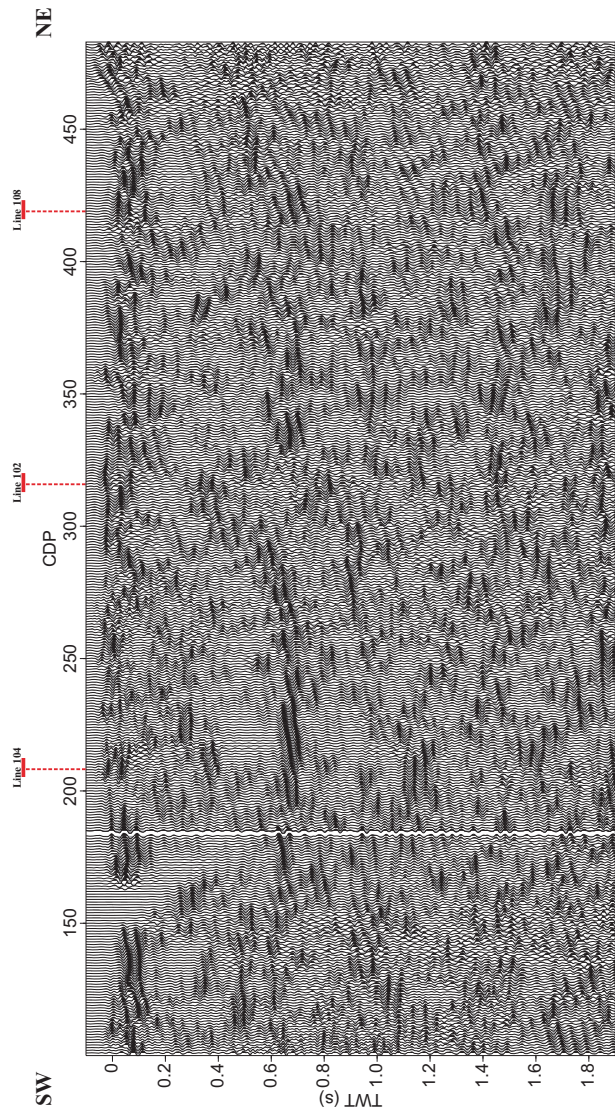
0 s refers to 0 m a.s.l.



Analyst: Michela Giustiniani

Processed by:

ISTITUTO NAZIONALE DI OCEANOGRAFIA E GEOFISICA SPERIMENTALE - OGS
DIPARTIMENTO DI GEOFISICA DELLA LITOSFERA
Borgo Grotta Gigante 42/C - 34010 Trieste (Italia)



SULCIS BASIN SURVEY

Area: Sulcis Basin

Line 108: TVF STACKED SECTION

CDP: 101 - 721

Recording parameters

System: SERCEL 408-XL

Field format: SEG-D

Data length: 3 s

Sample rate: 2 ms

Field Filters: anti-alias

Geophone type: SM4 - SB (10 Hz)

Recording data: May 08

Energy source: VIBROSEIS

Number of traces: 121

Group interval: 20 m

Shot interval: 40 m

Geophone array: 12 geophones

Processing sequence

Reformat: from SEG-Y to Focus internal format

Quality control: display of all shot and trace editing

Amplitude recovery: based on velocity function

Field static corrections: computation of datum statics using refraction surveys

Deconvolution: Predictive Deconvolution

Median filter: trimmed mean dynamic dip filter

Gather: rearrange traces in common mid points

Velocity analysis:

NMO correction

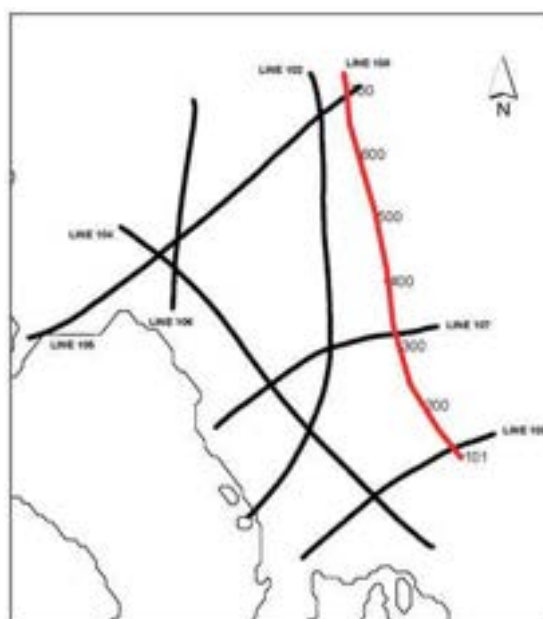
Residual statics corrections

Mute

Stack

Filter: bandpass 0 s 10-15/60-100
 0.5 s 10-15/40-90

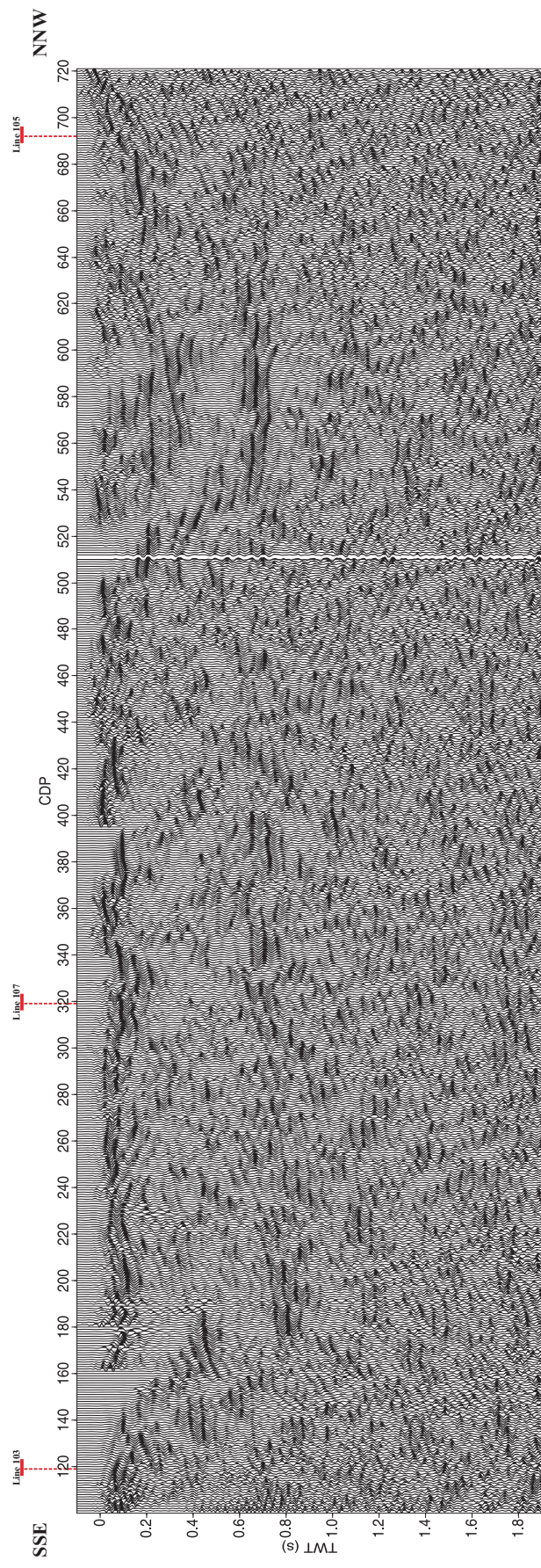
0 s refers to 0 m a.s.l.



Analyst: Michela Giustiniani

Processed by:

ISTITUTO NAZIONALE DI OCEANOGRAFIA E GEOFISICA SPERIMENTALE - OGS
DIPARTIMENTO DI GEOFISICA DELLA LITOSFERA
Borgo Grotta Gigante 42/C - 34010 Trieste (Italia)



SULCIS BASIN SURVEY

Area: Sulcis Basin

Line 108: FX DECONVOLUTION STACKED SECTION

CDP: 101 - 721

Recording parameters

System: SERCEL 408-XL

Field format: SEG-D

Data length: 3 s

Sample rate: 2 ms

Field Filters: anti-alias

Geophone type: SM4 - SB (10 Hz)

Recording data: May 08

Energy source: VIBROSEIS

Number of traces: 121

Group interval: 20 m

Shot interval: 40 m

Geophone array: 12 geophones

Processing sequence

Reformat: from SEG-Y to Focus internal format

Quality control: display of all shot and trace editing

Amplitude recovery: based on velocity function

Field static corrections: computation of datum statics using refraction surveys

Deconvolution: Predictive Deconvolution

Median filter: trimmed mean dynamic dip filter

Gather: rearrange traces in common mid points

Velocity analysis

NMO correction

Residual statics corrections

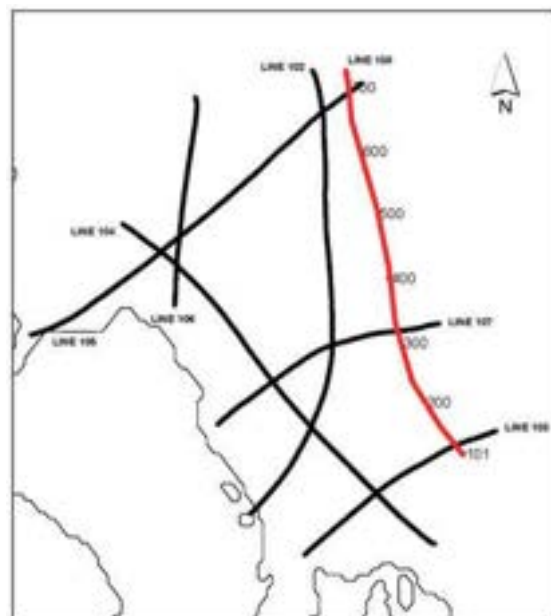
Mute

Stack

FX Deconvolution

Filter: bandpass 0 s 10-15/60-100
 0.5 s 10-15/40-90

0 s refers to 0 m a.s.l.

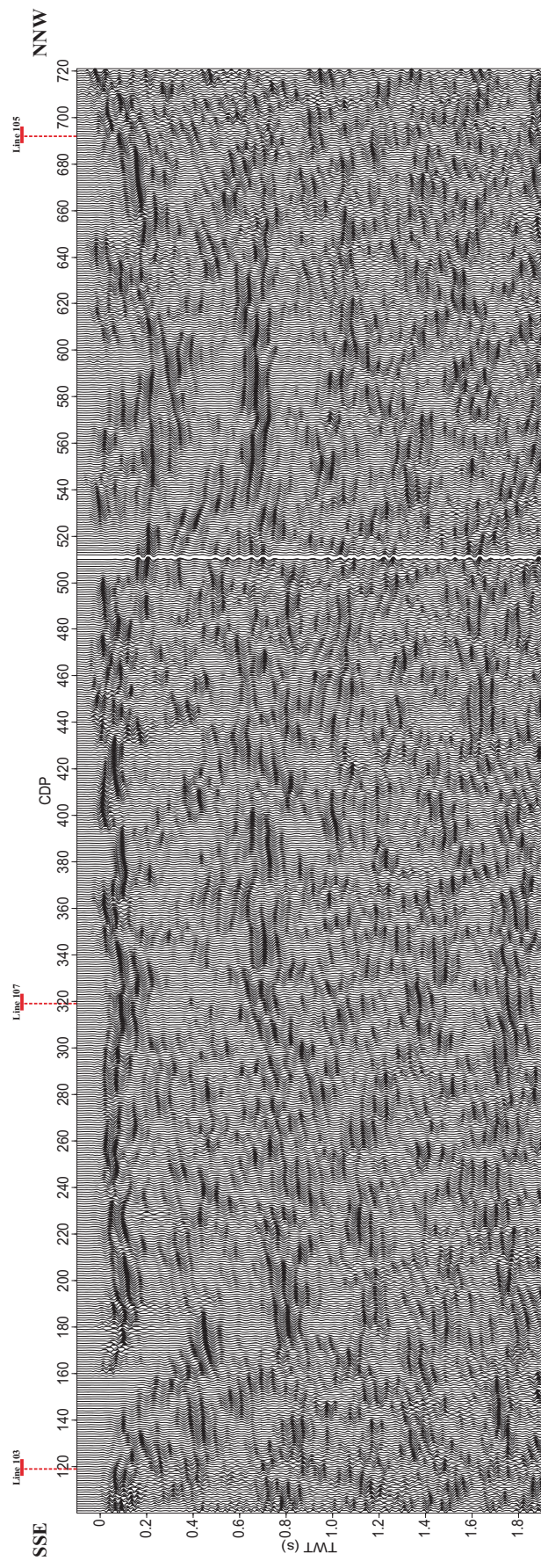


Analyst: Michela Giustiniani

A

Processed by:

ISTITUTO NAZIONALE DI OCEANOGRAFIA E GEOFISICA SPERIMENTALE - OGS
DIPARTIMENTO DI GEOFISICA DELLA LITOSFERA
Borgo Grotta Gigante 42/C - 34010 Trieste (Italia)



reflected event appears vertically below each source/receiver position, regardless of the true position of the reflecting interface (Hatton et al., 1986).

Seismic migration is the procedure that re-locates the subsurface reflecting interfaces of a seismic section, so resolving the areas of complex geology much better than non-migrated images. The closer the velocity field is to the real depth distribution of velocity, the nearer to the real-position of the reflectors is the relocation operated by the migration procedure. From here the tight link existing between the tomographic inversion and the migration procedures, often appearing in a recursive loop aimed to improve the velocity field through tests over the imaging quality (e.g. Vesnaver et al., 1999).

Both techniques will be applied on the data acquired in the framework of the WP 2A.1 by Geotec Spa in 2007 and 2008 in the permit area “Is Urigus”, to the south-west of the town of Carbonia (see WP2A.1 Seismic data acquisition. Final Report). The data gathered during these surveys were processed by OGS and TNO (see Report of WP2A.2: Seismic data processing). OGS and TNO proceeded also to the interpretation of the seismic units in terms of specific geological formations, so to provide a 3D model of the rock formation boundaries as well as of the main faults present in the area (see Report of WP2A.4: Seismic interpretation). The interpretation is based on the extrapolation of sub-surface data from drilling outside the permit area and on reasonable assumptions on seismic velocities of the formations. The velocity model so obtained was the starting point for the seismic tomographic inversion, and will be shortly summarized here below, before entering in the core of the WP2A.3.

1.1 The results of the seismic data interpretation.

The seismic survey encompassed seven multi-channels seismic profiles (MCS) acquired with a vibroseis energy source and twelve refraction seismic profiles in an area facing Sant’Antioco Island, in the southern portion of the “Is Urigus” permit area (green lines in Figure 1). The seismic lines describe a grid, with lines N-S oriented, about parallel to the main tectonic structures of the area, and other NE–SW oriented lines, about perpendicular to them. The target of the MCS survey was to define and map the setting of the Produttivo formation, while the refraction survey was aimed to define the velocity field of the near



surface (the weathered and sub-weathered layers) to compute the static corrections to be applied to the MCS data.

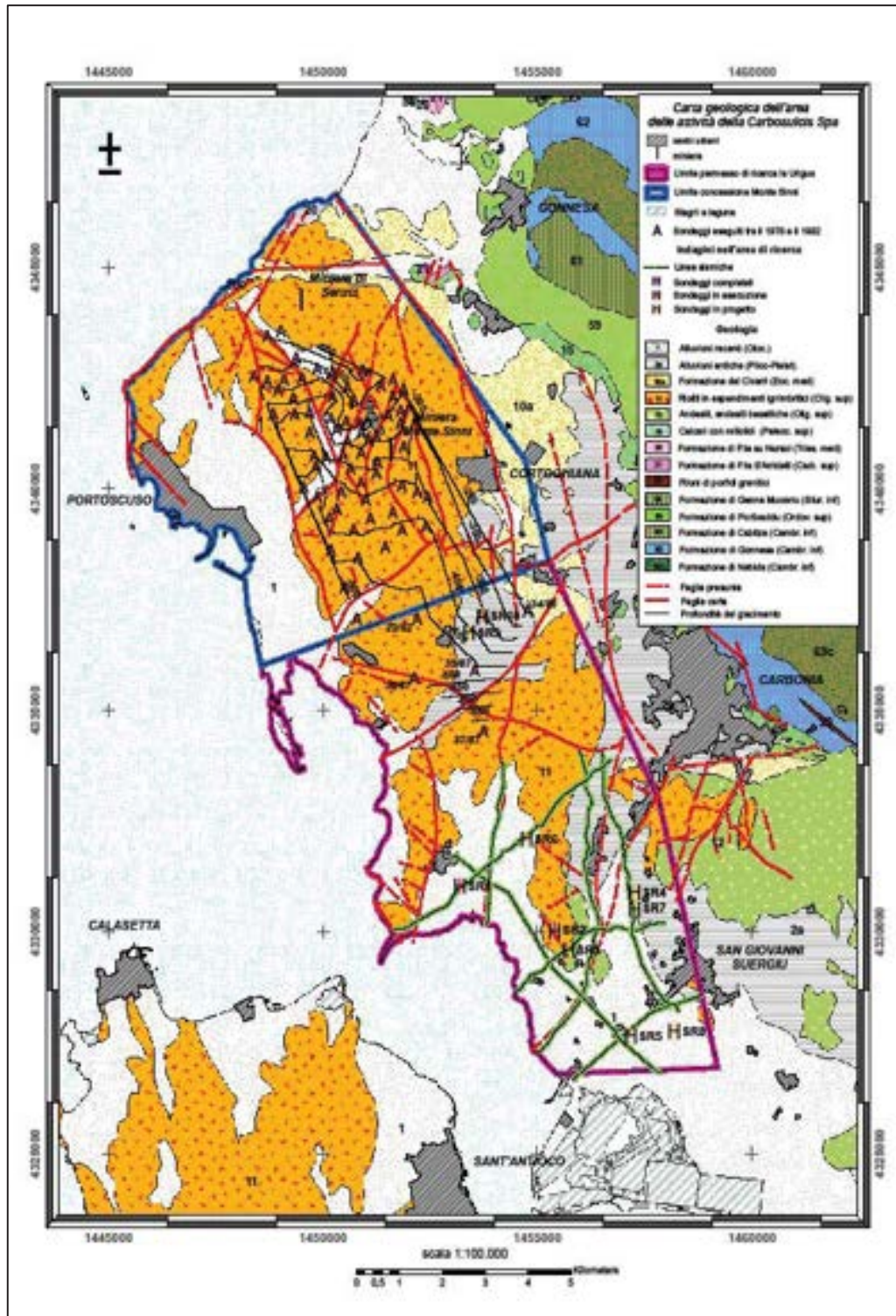


Figure 1: Geologic map of the “Monte Sinni” concession (blue) and “Is Urigus” Permit (purple). Green lines indicate the seismic profiles acquired within the project.



Constraints to the seismic interpretation were largely based on the geology of the Sulcis basin from surface and sub-surface data. Surface geology is summarized in Figure 1 and Figure 3, while a summary of the main geological formations within the area is in Appendix 1.

Table 1 summarizes the subsurface data that constrain the seismic interpretation.

TABLE 1

	Site 37/87	SR-1	SR-2	Carbonia
Top Volcano-sedimentary complex	Ground level	200 m	Ground level	Not present
Top Cixerri Fm.	470 m	-	>900 m	Ground level
Base Cixerri Fm. + Produttivo Fm.	750 m	-	-	330 m

Table 1. Summary of the subsurface geological data for “Is Urigus” Permit.

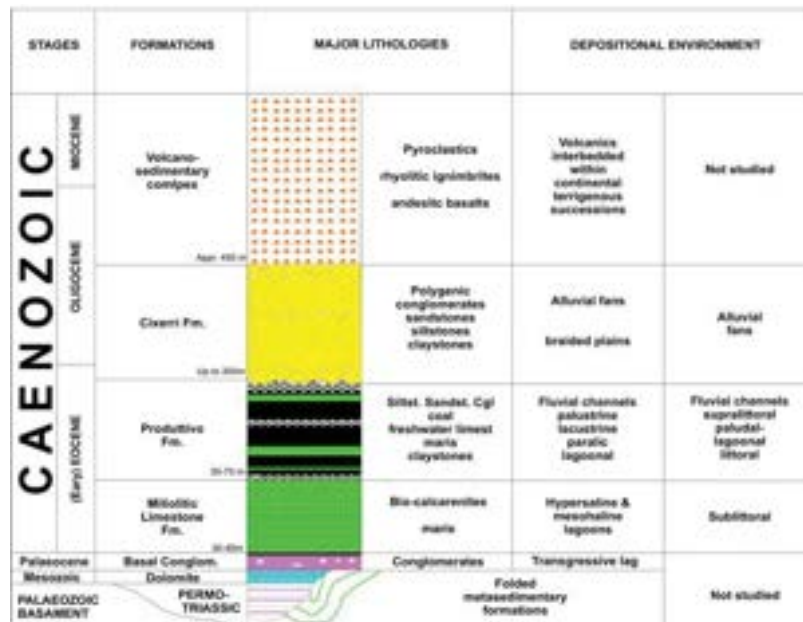


Figure 2. Stratigraphy of the main formations present in the “MonteSinni”-“Is Urigus” permits.



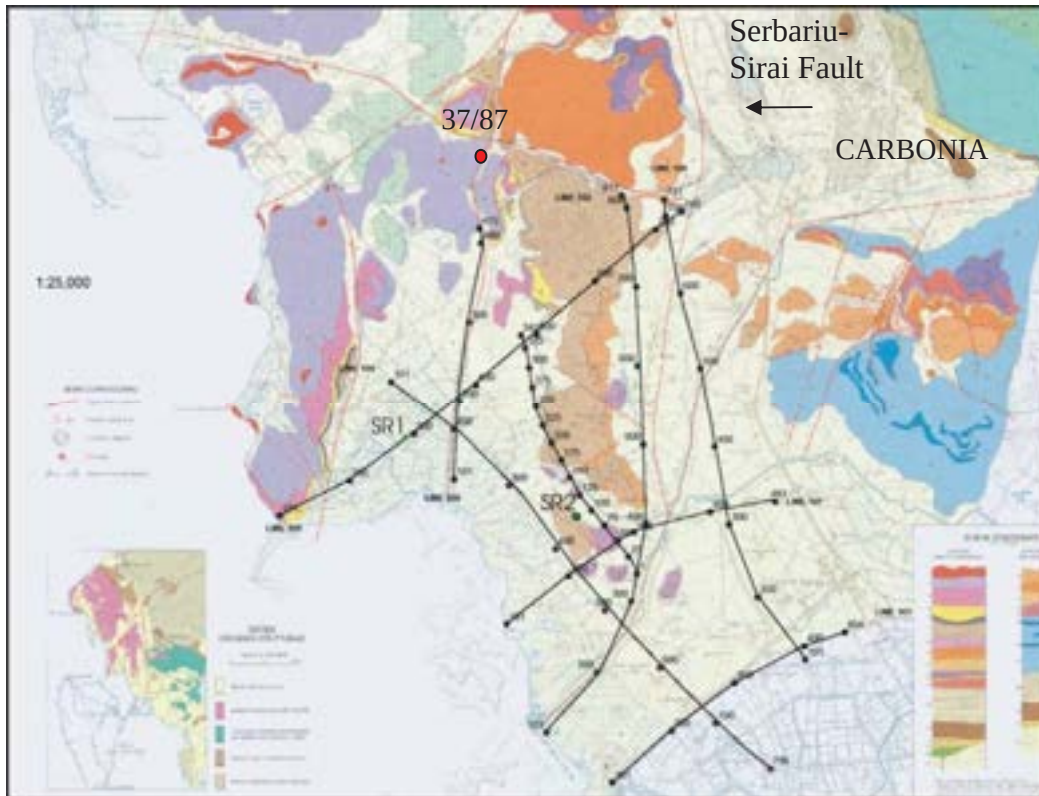


Figure 3. Geological map of the area with the seismic lines acquired within this project, plus the line acquired previously by OGS, to the East of the well SR2. Almost all the outcrops belong to the Volcano-sedimentary formation, whereas the blue colours on the eastern side of the map indicate the Andesitic member.

Four seismic sequences, limited by prominent, but discontinuous unconformities have been recognized. These sequences have been named, from the youngest to the oldest, Unit A, B, C and D, correlated the seismic sequences with geological units as summarized in Table 2. The correlation between seismic units and geological formation is subject to the limitations described earlier and is subject to be revised, according to the new data from the scheduled drilling.

TABLE 2

Seismic sequence	Geology
A	Quaternary alluvial deposits
B	Volcano-sedimentary complex
C	Cixerri+Produttivo+Miliolitic
D	Permo-Trias sediments

Table 2. The correlation between the seismic units and the geological formations in the “Is Urigus” Permit.



Seismic sequence A

Seismic sequence A is limited by the topographic surface and by the top of the Volcano-sedimentary complex. The Sequence A has a seismic facies that typically shows some low amplitude reflections with some higher amplitude events and medium continuity reflectors. The bottom of sequence A is generally marked by high amplitude discontinuous reflectors, as in the Matzaccara Basin (see Seismic lines 105 and 106 in Report of WP2A.2: Seismic data processing and Report of WP2A.4: Seismic interpretation).

Seismic Sequence B

The seismic facies of sequence B can be divided into two members, namely member B1 and member B2. The former has rather a regular high amplitude and low to medium continuity sub-parallel reflectors, whereas the latter consists of high amplitude hummocky reflectors with low to medium continuity. Member B2 was tentatively attributed to the Andesitic member of the Volcano sedimentary complex.

Seismic Sequence C

Seismic sequence C, the sequence below the Volcano-sedimentary complex, includes the Cixerri Formation, the Produttivo Formation and the Miliolitic Formation. It is similar to facies B1, but it has reflectors with slightly lower amplitude and lower continuity; it has often a discordant base that may reflect the onlap of the sequence on the Paleozoic Basement.

Seismic sequence D

Seismic sequence D lies below seismic sequence C and it is only observed in the southern portion of the permit area, where it fills a depression of the basement. This unit is poorly organized and it consists of discontinuous reflectors with some onlaps on a lower boundary: it was attributed to the Permo-Triassic continental deposits.

1.2 Time to depth conversion

The horizons interpreted on all the seismic sections in the time domain were converted to depth using all the available information about velocities as from the processing analysis performed within the project as well as from VSP data, summarized in

Table 3. As it may be seen, a single velocity is used for a whole formation. Only the volcano sedimentary complex is subdivided into two members, B1 and B2, B2 being characterized by



5. Conclusions.

The tomographic inversion, followed by the pre-stack depth migration of the seismic lines enabled to infer a 3D accurate depth velocity field and to image the correct geometries of the investigated structures. In particular, the lateral variations of velocities in the three considered sequences (see the maps for A, B and C, in Figure 23,

Figure 24 and Figure 25 respectively) show a certain consistency in the depth-maps of the correspondent layer bottom (Figure 26, Figure 27 and Figure 28 respectively). The same consistency is reflected in the depth migrated sections, confirming the validity of the inversion. It is noteworthy, that the tomographic inversion has been done on the most continuous and prominent reflections recognizable on all the lines around the traveltimes corresponding to the interpreted three reflectors. This means that for example our sequence A comprises the shallowest weathered layers, and not only the alluvial sequence. Similarly, the second reflector considered in the tomographic inversion is probably the bottom of B1 sequence of the geological interpretation, since B2 is discontinuous throughout the study area and less recognizable on the pre-stack data.

3-D visualizations of 2-D pre stack depth migration lines allowed us to evidence the monocline character of the sequences B and C, merging toward SW, hence allowing to extrapolate the trend to predict an indicative depth for the bottom of the ensemble of the Cixerri, Produttivo and Miliolitico Formations offshore. A more correct interpretation of the above results in terms of the geological formations will be possible comparing the results for example of Figure 45 with the well stratigraphy, when available.

6. References

- AA.VV. 2007. Carta Geologica d'Italia 1:50.000, Catalogo delle formazioni, in: Quaderni del Servizio Geologico d'Italia n°7, APAT ed., pp.291-308
- Agus M., Assorgia A., Cocozza T., Decandia F.A., Fadda A., Gandin A., Gimeno D., Ottelli L., Salvadori A., Sardu G., Secchi G., and Tocco S. 1994. Geologia, In: "Il bacino carbonifero del Sulcis, Geologia, Idrogeologia, Miniere" Fadda A., Ottelli L, and Perna G. eds., Carbosulcis spa, Cagliari, pp. 23-72
- Böhm G., Rossi G. and Vesnaver A. 1997. Adaptive regridding in 3-D reflection tomography, *Annali di Geofisica*, XL,1, 69-83.
- Böhm G. and Petronio L. 2003. 3D turning ray tomography in a real case. 65th EAGE Conference, Stavanger , Norway , Extended Abstracts, D-25.



Seismic data acquisition

The work programme foresaw the acquisition of 7 multi-channels seismic profiles (MCS) with a vibroseis energy source and 12 refraction seismic profiles in an area facing Sant'Antioco Island, in the southern portion of the Is Urigus Permit (green lines in Figure 1). The more or less N-S running seismic lines are parallel to the main structures, recognized in the area, while the more N/E–S/W lines are perpendicular to them. The precise location of the lines strongly depends on the accessibility of the area.

The target of the MCS survey was to define and map the setting of the Produttivo formation, while the target of the refraction survey was to define the velocity field of the near surface (the weathered and sub-weathered layers) to compute the static corrections to be applied to the MCS data. Reflection and refraction surveys were carried out by Geotec, OGS and TNO from May the 6th till May the 31st 2008, collecting approximately 40 km of multichannel reflection seismic data. This survey followed a test line recorded by OGS in July 2007, using dynamite as a source. The test line was shot in order to verify the capability of reflection seismic method to investigate through the thick volcanic sequence that partially outcrops in the Sulcis basin.

The main acquisition parameters for the reflection survey of 2008 were:

Active channel number	121
Station Interval	20 m
Spread Definition	split symmetric
Geophone array	Array of 12 geophones (10 Hz)
Source Offset	40 m
Source Type	Vibroseis
Sweep frequency	12-72Hz
Sweep length	12-16 s
Source Interval	40 m
Recorder	SERCEL 408-XL
Record Length	3 sec
Minimum Offset	10 m
Maximum Offset	2390m

Table 2 : Acquisition parameter for the reflection survey.

The acquisition has been performed by using geophones with a natural frequency of 10 Hz and each trace was composed by an array of 12 geophones distributed over a length of 10 meters. The nominal coverage was 30. The chosen pattern configuration was symmetrical (10m–2390m). At the end of each line, the pattern configuration changed from symmetrical to asymmetrical in order to preserve the coverage.

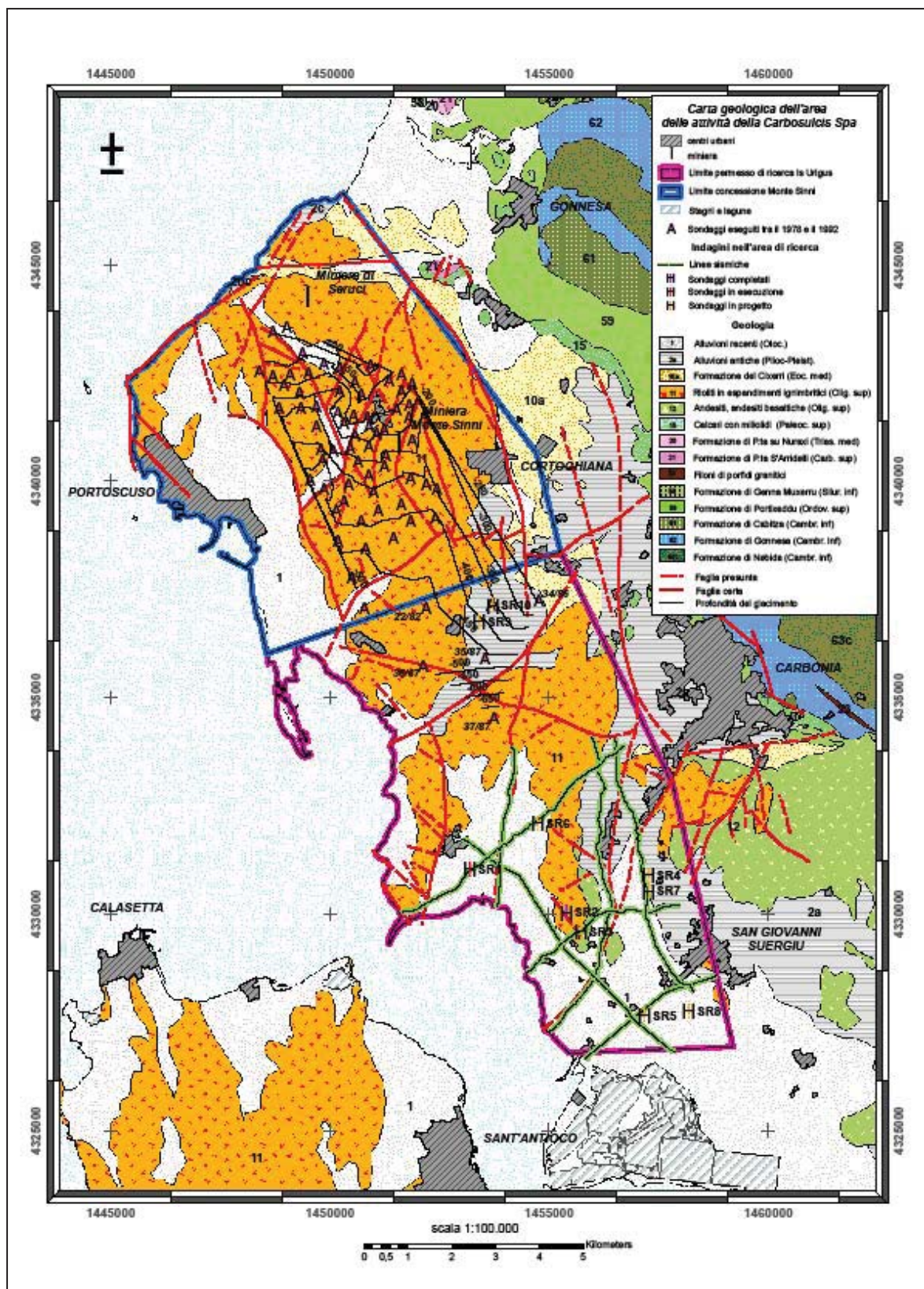


Figure 1: Geologic map of the M. Sinni Concession (Blue) and Is Uriqus Permit (Purple). Green lines indicate the position of the seismic profiles.

In order to better constrain the cross-points of the MCS lines and to improve the accuracy of the seismic velocities in the upper volcanic layers a refraction survey was performed at the crossing points of most of the MCS profiles.

Seismic data processing

MCS data processing was carried out at the OGS Processing Centre in Trieste (Italy). The processing was performed using the seismic software package Focus 5.4 from Paradigm Geophysical. The adopted sequence is shown in Figure 2. After the amplitude recovery, to balance the loss in amplitude mainly due to the internal friction and to the geometrical spreading, static corrections were applied to the seismic data to have a common reference plane (datum) and to remove the effects of the time delays due to the variability of the weathering or other shallow velocity anomalies. The chosen datum was 0 m above the sea level. The static corrections were calculated by using the results of the refraction seismic survey performed by TNO. A filter was applied in order to delete the frequencies higher than 72 Hz, the maximum frequency of the sweep transmitted to the ground. A Trimmed Mean Dynamic Dip Filter (TMDDF) was then applied in the shot domain, after the preliminary dynamic corrections, to improve the signal-to-random noise ratio. At each sample, TMDDF computes a series of trimmed means along rays (dips), using the sample itself and a defined number of samples from leading and trailing traces. The output sample is the trimmed mean that yields the highest amplitude. The object of this processing is to remove high amplitude noise without eliminating useful trace information and to improve the coherency of the resulting signal.

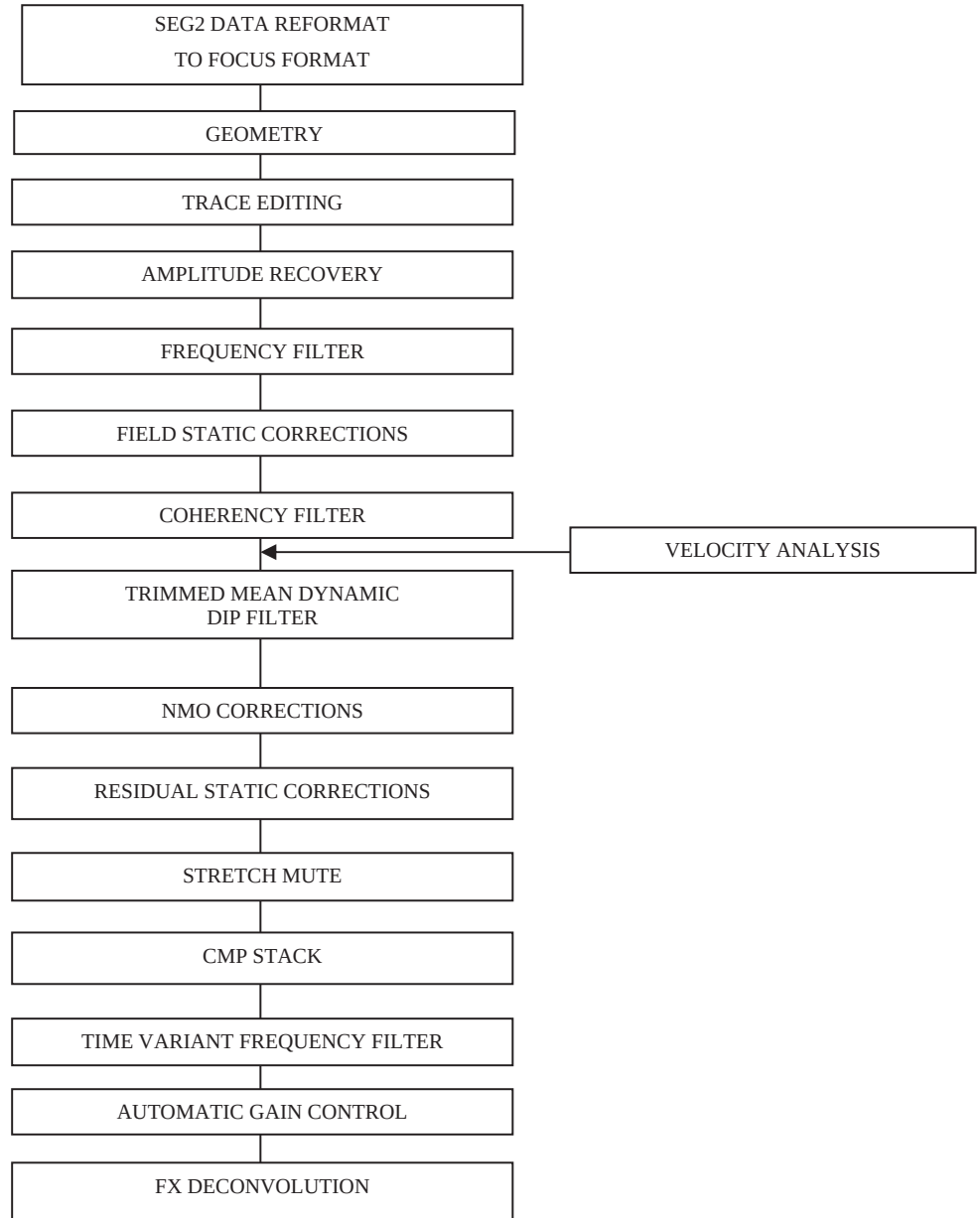


Figure 2: Processing sequence.

Velocity analysis has been performed by using an interactive analysis method. After applying the resulting normal move out correction (NMO), the traces were stacked obtaining classical seismic sections. A spatial (FX) predictive deconvolution was then applied to enhance lateral continuity of signal.

Two versions have been finalized for the interpretation: one with applied FX deconvolution and one without FX deconvolution.

The overall quality of the acquired data is quite good, even if in some lines, as the 104, the noise related to environmental conditions is strong. In all datasets, it is possible to identify

an important reflection at about 500 ms; deeper horizons are also evident, for example at about 750 ms and 1250 ms.

2. Regional Geology

Pre- tertiary formations

The Sulcis Basin, where the presence of a major coal deposit is known since mid of the 19th century, lies with an evident angular unconformity on the Paleozoic substrate. The substrate is mostly represented by the Ordovician-Silurian-Devonian successions, mainly consisting of metamorphic rocks (phyllite, quartzites, schists and marble). Paleozoic formations have been rarely drilled, since most of the drilling has stopped at the Eocene formation indicated by the mining term "Produttivo", which holds the coal deposits

In the Monte Sinni mine (Figure 1), the basement consists of Permo-Triassic conglomerates and greenish gray and red sandstones. It is a continental deposit, typical of a phase of intense dismantling, corresponding to the peneplanation of the Hercynian chain. This conglomerate may constitute the filling of depressions in the original basement, dismembered in horst and graben, before the ingression of the Epicontinental Sea at the beginning of the Mesozoic (AA.VV. 2007, Agus et al. 1994, Pasci et al. in press).

Tertiary formations

Miliolitico Formation

The deepest marine strata sampled by wells, is represented by about 30 to 40 m of shallow water transgressive limestone with Alveolinidae, Orbitolites, Miliolidae and calcareous algae (Miliolitico Fm, Early Eocene).

The Miliolitico is characterized by alternations of different shallow water environments. At the base of the formation dominate hypersaline lagoon deposits while toward the top are also common hyposaline, lacustrine and palustrine deposits. Near the top of the transgression the fauna is diminishing and associations are dominated almost exclusively by the presence of Miliolidae. The sharp decline in the diversity of the microfauna marks the beginning of the regression that reaches the climax in the middle Eocene with the complete emersion of the basin (AA.VV. 2007, Agus et al. 1994, Pasci et al. in press).

Produttivo Formation

In the Early Eocene, after the deposition of the Miliolitico Fm, salinity gradually decreased, as recorded by the deposition of lagoon limestone and marls. Finally marsh clays and freshwater limestones were deposited. Discontinuous, centimeter scale levels, with large gastropods and iso-oriented clams, usually indicate limnic episodes and the establishment of a euxinic environment, rich in transported organic matter. These episodes, intercalated with the early stages of coal, testify short marine incursions within the marsh basin. Clastic sediments, from river inputs, sometimes abruptly stop the almost exclusively carbonate sedimentation, producing various arenaceous-silt levels with carbonate cement. The coal mineralization is represented by a series of benches of coal, highly variable in thickness and lateral continuity, and therefore with different mining interests. They are grouped into several overlapping bands interspersed with sandstone, silt, clay, marl and limestone, to a maximum thickness of about 80 meters. In the “Monte Sinni” mines, the cumulative percentage of coal, related to the “Produttivo”, never goes below 20% and rarely exceeds 40%. (AA.VV. 2007, Agus et al. 1994, Pasci et al. in press).

Cixerri Formation

The Cixerri formation (Eocene to Oligocene), entirely consisting of continental deposits, outcrops only in the south-western Sardinia. Despite its limited distribution it plays an important regional role, being the product of continental sedimentation in the Iberian-Provencal block, which included the Sardinia region and testifies the belonging of the Corso-Sardinian block to the European continent before the opening of the western Mediterranean. The formation is made up of claystone and sandstone, with sparse conglomeratic and channel-levee deposits. The thickness, influenced by the palaeo-geographic setting of the area, is highly variable (from a few tens of meters to 300m maximum). (AA.VV. 2007, Agus et al. 1994, Pasci et al. in press).

Volcanic Formation

The emplacement of the Volcanic Formation took place during the Oligo-Miocene calc-alkaline effusive cycle (see also the next paragraph “Tectonic evolution”). Geodynamic events occurred mainly along a graben, which extended for about 200 km across the island from N to S (Fossa Sarda). Although the last eruptive phases occurred in the Miocene, the effusive activity is mostly attributed to the Oligocene

The main products of the magmatic activity are represented by andesite and ignimbrite, with prevalent basaltic terms and subordinate rhyolite-dacites. The total thickness reaches 1000 m. The presence of palaeosoils and sedimentary layers within this sequence, testifies stasis periods in the volcanic activity. Volcanic eruptions occurred at increasingly short intervals toward the top of the formation, as evidenced by the decrease in the thickness of the volcano-sedimentary inter-layers (AA.VV. 2007, Agus et al. 1994, Pasci et al. in press).

Tectonic evolution

The most important tectonic events occurred in the Tertiary, during which the island of Sardinia suffered the peripheral effects of the Alpine cycle. This phase produced the fracture and the displacement of the Paleozoic basement and the overlying Mesozoic sediments with the consequent formation of the Cixerri and Campidano troughs and the release of huge amounts of calc-alkaline magmas. The area of the Permit is affected by folding and numerous faults predominantly oriented in a NS and NNW-SSE direction. The fault system dissects the Permit area into a series of tilted blocks with a half graben setting. The size of individual blocks is highly variable and depends directly on the scale of the bounding faults, while the geometry of the blocks remains fairly constant and is repeated at different scales (AA.VV. 2007, Agus et al. 1994, Pasci et al. in press).

STAGES		FORMATIONS	MAJOR LITHOLOGIES	DEPOSITIONAL ENVIRONMENT	
CAENOZOIC	MIOCENE	Volcano-sedimentary complex	Pyroclastics rhyolitic ignimbrites andesitic basalts	Volcanics interbedded within continental terrigenous successions	Not studied
	OLIGOCENE	Cixerri Fm. <i>Up to 300m</i>	Polygenic conglomerates sandstones siltstones claystones	Alluvial fans braided plains	Alluvial fans
		Produttivo Fm. <i>30-75 m</i>	Siltst. Sandst. Cgl coal freshwater limest maris claystones	Fluvial channels palustrine lacustrine paralic lagoonal	Fluvial channels supralittoral paludal-lagoonal littoral
	(EARLY) EOCENE	Miliolitic Limestone Fm. <i>30-40m</i>	Bio-calcarenites maris	Hypersaline & mesohaline lagoons	Sublittoral
	Paleocene	Basal Conglom.	Conglomerates	Transgressive lag	Not studied
	Mesozoic	Dolomite	Folded metasedimentary formations		
PALAEOZOIC BASAMENT		PERMO-TRIASSIC			

Figure 3: Stratigraphy of the Monte Sinni Permit.

3. Data sources, constraints and discussions

The Quaternary deposits and the top of the Volcano-sedimentary complex

Constraints in the seismic interpretation are largely caused by the geology of the Sulcis basin, as described in the previous sections and known from surface and sub-surface data. Surface geology is summarized in Fig. 1 and Fig. 4. Volcano-sedimentary complex outcrops are near or at the surface along line 101, along most of the line 107, at the end of line 106, 107 and 108, in the middle part of line 104 and at the beginning and at the end of line 105. The pre-drilling of the SR-1 well (on line 105) drilled a thick sequence of Quaternary deposits and reached the top of the Volcano-sedimentary complex at about 200 m depth. This is in a good agreement with the presence of a strong and continuous reflector at shallow depth on both lines 105 and 106 that, in our interpretation, represents the top of the Volcano-sedimentary complex (Purple Unit in the interpreted lines). The top of the Volcano-sedimentary complex defines the bottom Quaternary sequence (Blue Unit in the interpreted sections).

6. Conclusion

The combination of the seismic survey with well information has significantly improved the knowledge of the southern part of the basin.

This knowledge could be further extended when well data can be tied accurately to the seismic, e.g. by performing a VSP surveys at the right locations.

Most noticeable was the deepening of the Produttivo Fm. towards the SW of the survey area.

Reaching the Produttivo Fm. in the southern part of the exploration Permit is important to define the potential of the area for CO₂ storage. Based on the seismic interpretation and the assumptions discussed earlier it is concluded that the Produttivo Fm. lies between 500 ms to 1000 ms TWT in the research area. Assuming the velocity model as discussed earlier this translates to a range of 1000 m to 1900 m depth.

The depth of the Produttivo Fm. at the SR-2 well location is probably more than 1300 m, when assuming approx. 300 m of Cixerri Fm. below the Volcanic-sedimentary complex. To drill SR-1 well until a depth of 1300 m might be useful, based on the initial drilling results (a requirement would be reaching the base of the Volcano-sedimentary complex above 1000 m).

7. Recommendations

Complete drilling the SR-1 well, preferably at least until a depth of 1000-1300 m. Even though the depth of the Produttivo Fm. is expected between 1000 and 1200 m., reaching the top of the Cixerri Fm. will establish of an important marker horizon in this location. If appropriate, a VSP survey could be run in the SR-1 well. The SR-1 well location is preferred over the SR-2 well location because it is closer to a seismic line and still has the chance to reach the top of the Produttivo Fm.

Tie the seismic survey of 2008 to the northern wells (SR-9, 87/35 and 87/37) with a new seismic line (Figure 24). The estimated length of this line is from 5 to 7 km. Due to the fact that the mobilization costs are expected to be relatively high, compared to the overall costs for the seismic acquisition and processing, it is recommended to acquire more seismic lines in order to increase the benefit in relation to the cost. Because of the satisfactory results of the 2008 survey, it is recommended that this seismic survey should use similar acquisition techniques as used before. Complete well SR-9 until reaching the base of the Miliolitic Limestone Fm. and run a VSP accordingly.

Deepen the SR-2 well, if it is expected that the extra depth will penetrate a marker horizon like the top of the Cixerri Fm. or (which is unlikely) the Produttivo Fm.



Figure 24: Proposed seismic lines. Map displaying the former survey area with previously recorded seismic lines in black and newly proposed seismic lines in green where the NS running line has the highest priority as it ties important wells to the initial survey.

1 - INTRODUCTION

The Eocene Sulcis Coal Basin, located in the south-western corner of the Island of Sardinia (Italy) (Figure 1), hosts extensive sub-bituminous deposits that cover an area of approximately 800 km² and have reserves estimated to be on the order of 1.2 billion tons. The producing units outcrop onshore near the towns of Gonnessa and Bacu Abis (Figure 1) and dip about 10° to the south-southwest, reaching depths of more than 800 m near the coast and over 1500 m offshore. These deposits are exploited to a depth of about 400 m using traditional mining techniques in the northern part of the basin, however the depth and thickness of the units towards the south make them more difficult to access.

The inaccessibility of the southern deposits using standard mining methods is the reason that Carbosulcis SpA., the government-owned coal mining company which holds the rights to the “Miniera Monte Sinni” mining concession, has begun a multi-disciplinary feasibility study into their potential exploitation using CO₂ – Enhanced Coal Bed Methane (CO₂-ECBM) technologies. With this approach CO₂ produced by the burning of the Sulcis coal in the near-by Portovesme power plant, operated by ENEL, would be captured and injected in >800 m deep wells in the southern concession for the recovery of methane gas. A critical by-product of this procedure would be the geological storage of man-made CO₂, thereby contributing to the mitigation of greenhouse gas emissions and, in turn, global climate change.

The Carbosulcis ECBM research project brings together various European experts on the topic of geological carbon capture and storage (CCS), including the Università di Roma “La Sapienza”, OGS, and Geotec from Italy, BRGM and IFP from France, Imperial College from the UK, and TNO from Holland. Together with Carbosulcis, these research groups are responsible for conducting various geological, geophysical, geochemical, and mineralogical studies on the deposit and surrounding area to better understand the site’s potential for safely storing CO₂ in the deep subsurface. The eventual goal of this work will be the creation of a CO₂-ECBM pilot plant in the Sulcis area, and the establishment of this Sardinian coal basin as a centre for research and excellence on this technology.

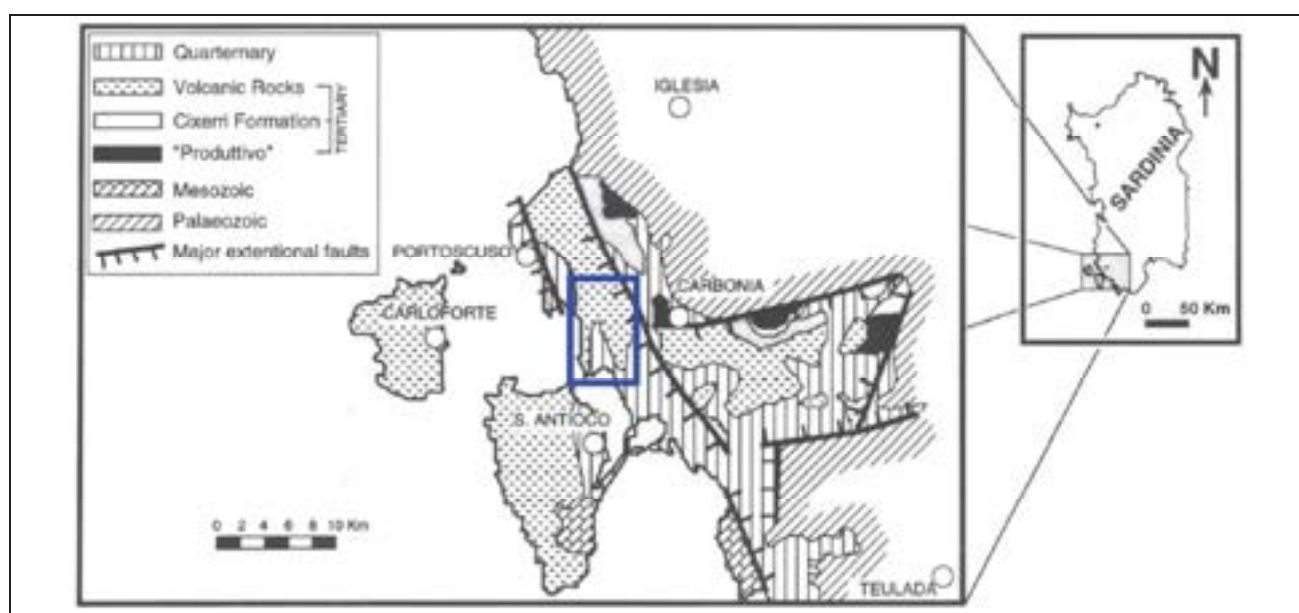


Figure 1 Regional geology and structure of the Sulcis area of SW Sardinia (from Dreesen et al., 1997). The location of the study area is outlined by the blue rectangle.



At this site (see blue box in Figure 1 for location) the Università di Roma “La Sapienza” has been given the task of conducting near-surface gas geochemistry surveys to define the baseline gas concentrations and fluxes. This baseline is needed for comparison with future monitoring programs once CO₂ injection begins, and to search for the existence of gas permeable faults that could, eventually, provide migration pathways for the injected CO₂ and re-mobilised CH₄. This work was originally defined as the collection of 300 soil gas samples plus CO₂ flux measurements, divided between a regional survey and a few detailed surveys on defined targets. In discussions with Carbosulcis personnel at the beginning of the sampling campaign in late June, 2009, this original plan was modified slightly to give more emphasis to a number of specific targets, resulting in one third of the samples being collected in the regional survey and the remaining two thirds being distributed amongst 6 detailed surveys.

The present report details the methods used and the results obtained during the near-surface gas geochemistry survey performed by Università di Roma “La Sapienza” personnel in the area of the coal mining concession. In summary, over 300 soil gas samples were collected at a depth of approximately 60 to 80 cm and analysed directly in the field for CO₂, H₂, and H₂S, as well as a smaller number of sample points for radon and thoron. Samples collected in stainless steel canisters were transported back to the laboratory and analysed for He, CO₂, O₂ + Ar, N₂, COS, SO₂, CH₄ and other light hydrocarbons. Field measurements were also made of CO₂ flux from the soil to the atmosphere at selected points.

CO₂ flux values were found to be very low, and well within the range of near-surface soil respiration. Soil gas CO₂ concentrations were generally low and within normal ranges for shallow soil gases (0.1 - 2%), although some areas had elevated values that ranged from 3 to 15%. Comparison with O₂ and N₂ results imply a shallow biogenic origin for these anomalies. Most CH₄ analyses were at or below the concentrations observed in atmospheric air (c. 2ppm), although a limited number of samples had elevated values from 3 to 6 ppm and one sample had 79 ppm. Other hydrocarbon gases were generally quite low, while sulfur gases were almost always below the detection limit of the analytical methods used. Rn showed a clear association with outcropping volcanic units, while Tn may be more closely associated with Quaternary sediments. Finally helium data are typically very close to the value observed in atmospheric air (5,225 ppb), although three samples were found to be between 6,000 and 10,000 ppb, and one highly anomalous sample reached a value of about 70,000 ppb.

At one location (where the highest He, CH₄ and CO₂ values were encountered) a series of near-by anomalous sample points define a NW-SE lineament. Otherwise anomalies are sparse and do not define any particular trend.

While the vast majority of points are well within the range of values expected from near-surface biological, physical, and chemical processes, the limited number of significant He, CH₄, and CO₂ anomalies encountered during this study indicate the need for further study to better ascertain their origin (i.e. either near-surface or deep, fault-related). This work could include repeat sampling in anomalous areas to confirm the anomalies, followed by vertical profiles and isotopic analyses, as well as soil sampling and associated biological studies. Continuous monitoring stations would also provide valuable information regarding temporal variability.



anomaly that bends from the SW-NE belt mentioned above towards the north. Although the association and moderately anomalous hydrocarbon values encountered at SR-10 could be explained by near-surface microbial processes, further study is recommended here to confirm this hypothesis.

Instead, what definitely requires follow-up sampling is helium, based on the extremely anomalous value of 70 ppm encountered at the southern boundary of the SR-10 grid (Figure 27d). This value is one of the highest encountered by the authors in various different geological settings throughout Italy, and thus its occurrence requires explanation. The fact that this point is surrounded on three sides by relatively background concentrations (maximum 5519 ppb) is curious, and may point towards sample contamination. That said samples were not collected to the south and thus there is the potential that an anomaly could trend in that direction. Vertical profile sampling and denser sampling around this point are needed to see if this anomaly is reproducible and, if it is, to determine its origin.

Finally radon values at this site (Figure 27e) are generally quite low, whereas the evenly-distributed, weakly-anomalous thoron values (Figure 27f) are most likely due to shallow, in situ production related to the local sediments and underlying volcanic rocks.

6 - SUMMARY AND CONCLUSIONS

A near-surface gas geochemistry study was conducted in the area of the “Miniera Monte Sinni” mining concession in southwestern Sardinia (held by Carbosulcis SpA) to define baseline conditions and to search for potential gas permeable faults. This work was conducted within a larger research project aimed at studying the potential for a combined CO₂ geological storage – CO₂-Enhanced Coal Bed Methane project within un-mineable coal beds of the Produttivo Formation within the Sulcis sedimentary basin.

During the present study over 300 points were sampled for a full suite of gas species found within the unsaturated soil horizon (including CO₂, O₂, N₂, He, Rn, Tn, CH₄ and other light hydrocarbons) as well as measurements of the flux of CO₂ from the ground surface to the atmosphere. A total of 82 samples were collected during a regional survey that covered an approximately 3x6 km area (i.e. about 5 samples per km²), with samples being collected almost exclusively within areas with surface Quaternary sediments due to the lack of a soil horizon above the volcanic rock units in the area. The remaining 227 samples were divided amongst six detailed surveys located within the regional area. These detailed surveys consisted of either transects across known or inferred faults or small grids at proposed CO₂-ECBM drilling locations (denoted as SR sites).

The results for the various measured parameters can be summarised as follows. Ethane concentrations are always very low and show no trends. There is a significant correlation between ethylene and propane, and in some locations both gases define localised anomalies. Considering that ethylene is well known to be a plant hormone and be produced microbially it is assumed that both of these gases are the result of near surface biological activity. The vast majority of measured CH₄ values are slightly above to significantly below the CH₄ concentration in the atmosphere (1.8 ppm), ranging from 0.5 to about 2.5 ppm. One sample has a weakly anomalous value of about 5 ppm whereas another has a high value of 79 ppm; this latter sample occurs in an almost anoxic sample with elevated N₂ (see below) and CO₂ and thus is likely caused by anaerobic microbial processes. Radon and thoron activities are generally low; the observation that the majority of anomalous values are found close to volcanic rock outcrops implies that these gases originate via the radiogenic decay of uranium in these near-surface volcanic and volcanoclastic units.

Although the vast majority of samples show normal soil gas CO₂ concentrations (i.e. from 0.5 to 2.5%), a significant number range up to 5% while a total of 8 samples range from 5 up to 15%. This range of values is similar to that observed in other coal-bearing or sedimentary basin regions, and much lower than that



observed in volcanic or intramontane basin areas. A statistical comparison of the entire Carbosulcis data set shows a strong inverse correlation between CO₂ and O₂ and an invariant relationship between CO₂ and N₂, implying a near-surface biological mechanism for the observed CO₂ anomalies. Nitrogen values define a single population that is normally distributed around the atmospheric concentration of 78% (except for one sample that is likely the result of anaerobic denitrification). CO₂ flux values are quite low and lie within the range for soil respiration in grassland areas. All samples lie in the range of 5 to 25 g m⁻² d⁻¹ except for one (72 g m⁻² d⁻¹) that was measured within a small town and thus may be due to anthropogenic factors. The correlation between soil gas CO₂ and CO₂ flux is very poor.

Whereas almost all samples have helium concentrations within the range of atmospheric values (i.e. 5225 ppb ± the instrument error of about 200 ppb), two samples have moderately high values around 9000 ppb and one sample has an extremely high concentration of 70,000 ppb. These three points are located within three different detailed survey locations (i.e. transect 1, SR6 and SR10), and thus it is difficult to explain their origin. Possible explanations include near-surface production related to decay of uranium in the local volcanic rocks, sample contamination, or migration of deep origin He. Further work would be required to determine the true cause.

In addition to this discussion of the values observed for the various measured parameters, a brief overview of the results obtained from each survey location are given below.

- Regional survey. Three samples have >7% CO₂, one in a town, two near a creek and an inferred fault. Radon and thoron show a good spatial relationship with outcropping volcanic rocks. All other parameters show background values and no significant trends.
- Transect 1. CO₂ and O₂ show anomalous, 60m long anomaly. One of these anomalous points also shows elevated N₂ and CH₄ values, whereas one point just to the west of the anomalous area has elevated He. An area along the west side of the transect shows coincident ethylene and propane anomalies.
- Transect 2. No significant anomalies or trends observed, other than moderately high diffuse thoron values likely due to in situ production in local sediments.
- Transect 3. Three spot anomalies for soil gas CO₂ ranging from 4 to 6.5%, likely related to moist sediments near creek bed. Other parameters do not show significant anomalies or trends.
- SR-6. Significant helium anomaly occurs in the middle of the sampling grid, surrounded by normal values. Uncertain if caused by highly localized source or sample contamination. Other parameters do not show significant anomalies or trends.
- SR-9. Almost entire area has moderately high soil gas CO₂ concentrations (3 to 7.3%). Higher values appear to be located near creek, although highest value was within a vineyard. Thoron values are moderately high, whereas all other parameters do not show significant anomalies or trends.
- SR-10. In contrast to SR-9, SR-10 has low CO₂ values but moderately high CH₄ values (2.5 to 5 ppm). In general the other measured hydrocarbon gases also show moderately high values. This site has the highest helium concentration measured during the present campaign (70 ppm) on the southern edge of the grid.

The present research has created an extensive near-surface gas geochemistry database for the southern part of the “Miniera Monte Sinni” mining concession, defining the baseline conditions for the area prior to the injection of anthropogenic CO₂ or the extraction of the resultant CH₄ from deep un-mineable coal seams. This baseline dataset will be important in the future as it will be needed for comparison with subsequent monitoring work during any eventual injection period, both from the point of view of leakage monitoring and carbon credit auditing.

This work shows no *direct* indication of leakage of naturally occurring deep gases that may be associated with the coal deposits or deeper units. This implies that the faults that occur in the area are not permeable to gas flow, that detailed surveys were not conducted at natural leakage points along the fault, or that sufficient pressure or gas volumes do not presently occur at depth to allow for migration to the surface. If leakage is not occurring then it should not occur in the future if the injection coal beds are not over pressurised. Of the anomalies discovered in the dataset, the majority are likely caused by near surface biological processes (e.g. soil gas CO₂, O₂, N₂, and CH₄, and CO₂ flux) while others may be linked with near surface geological sources (e.g. soil gas Rn, Tn, and, possibly, He). That said, subsequent work is suggested to confirm this preliminary conclusion. In particular the limited number of high helium values are more difficult to explain and more research would help exclude or prove a deep origin for these anomalies.

7 - POTENTIAL FUTURE WORK

Future work could take two forms: i) limited further baseline surveys to help clarify any uncertainties regarding the origins of the anomalies observed at the Carbosulcis site and extend the utility of the baseline work performed thus far; and ii) the development and undertaking of a specific monitoring program during the Carbosulcis injection phase based on the baseline study results.

7.1 Baseline improvement studies

Limited work prior to CO₂ injection would greatly extend the utility and robustness of the present baseline dataset, including:

- At sites with high anomalies, vertical profiles in the soil environment can be conducted to observe if values continue to increase with depth (implying a deeper origin) or are higher towards the surface (implying a shallow biological origin).
- Isotopic analyses (of CO₂ and CH₄) can be performed on chosen anomalous samples. As biologically produced gases have an isotopically light signature this information can help determine gas origin. With sufficiently high concentrations also ³He/⁴He ratios could be analysed.
- More detailed sampling could be conducted around anomalies to define their lateral extent. The use of more field analytical equipment would allow for on-site analysis of some components, such as helium, thus allowing the sampling campaign to be organised on the basis of obtained results.
- Soil analyses and microbial tests could be conducted on sites with anomalous CO₂ and CH₄ values to ascertain if the observed values could be produced by the in situ environment and associated microbial community.
- Surveying during a different period of the year to observe seasonal changes in gas concentrations and fluxes. This would extend the understanding of the potential range of natural values at the site (i.e. a seasonal baseline) and would help confirm a biogenic origin for some anomalies

7.2 Monitoring Strategy

The development of a near-surface gas-geochemistry monitoring plan for the Carbosulcis site during the CO₂ injection phase of the project will be directed based on two major issues: i) the engineering decisions made for the injection / extraction process and ii) the results of the baseline study. For the first point, the location

and number of injection / extraction wells, the estimated volumes of CO₂ to be injected, the estimated size of lateral plume development, and the local geology / structure immediately surrounding the injection site will greatly condition the sample location and density of the monitoring program. Regarding the second point, the baseline study (whether extended or not) will provide a robust statistical framework in which subsequent monitoring results can be put in context. These results have shown the concentration range of numerous natural gases (and CO₂ flux) and how their values are a function of the local land-form, land-use, and underlying geology. This information can be used to understand which parameters are best suited for the monitoring of the chosen injection site and what known or implied geological structures may be potential gas migration pathways. A short list of suggestions are given below.

- Once the engineering plans are finalised, a second more restricted baseline study must be conducted in the area surrounding the injection / extraction wells. The size of this study will depend on estimates of CO₂ plume migration and behaviour. These results will be compared with the more regional study, and will be used to interpret the subsequent monitoring results
- During the monitoring stage, the same area and points measured in the detailed baseline mentioned above should be repeated. As was conducted at the Weyburn CO₂-EOR site in Canada over a 5 year period, a chosen grid of points should be accurately surveyed and repeatedly sampled so as to show temporal and spatial variability. The number and frequency of the monitoring surveys would have to be decided based on discussions with the operator, however once a year for the first three years could be recommended. This periodic, discontinuous sampling could be supplemented by continuous monitoring with autonomous stations (see below).
- Depending on the location of the wells, sites defined as anomalous during the now completed baseline study could be integrated into the monitoring plan if they are within the “impact zone” around the injection (i.e. not only expected plume migration but also estimated pressure propagation, which may cause migration of methane associated with the coal deposits). In particular this could include Transect 1 (intersection of two faults, anomalous CH₄, N₂, He, CO₂), SR-6 (anomalous He), SR-9 (anomalous CO₂) and SR-10 (anomalous He). If fault traces occur in the vicinity of a chosen injection site, additional surveys may be needed above these structures.
- Detailed surveys should be conducted around the injection and extraction wells, both prior to and during injection of CO₂.
- The baseline study has highlighted the range of concentrations and fluxes for the area, and this data can be used to help focus on specific gas species that may provide more information during a monitoring program. For example
 - Methane – important to analyse because it forms the majority of the coal bed gas that will be displaced during the ECBM process. Baseline values are generally low, but this gas oxidises easily during its migration through the soil and thus it is possible that a leak could be masked
 - Ethane - the baseline study showed this gas to have very low concentrations in the soil and it is less easily oxidised than methane. This, combined with the fact that ethane can be a significant component of coal bed gas (up to 1%), means that this species could be used as an effective tracer. The exact composition of the coal bed gas from the Carbosulcis deposit is needed to understand if ethane, or other heavier hydrocarbon gases, occur in high enough concentrations for their use as surface tracers.
 - Carbon dioxide clearly must be analysed, however the baseline study has shown that there is a wide natural variation in the concentration values occurring in the area (from 2 to 15%). As such it is strongly recommended that isotopic analyses be undertaken of any significant

CO₂ anomalies as well as of the injected CO₂. In general CO₂ flux values were very low throughout the study area, thus this measurement has potential to delineate anomalous leakage signals.

- Radon values are generally low, with higher values being associated with the outcropping volcanic rocks on the eastern side of the study area. The use of radon would have to be carefully evaluated for a monitoring program, because although it may be transported from deeper volcanic units to the surface in areas having low baseline values (potentially giving a clear anomaly) the measurement technique in the field can be time consuming and may reduce the total number of samples that can be collected.
- Significant helium anomalies were found at three of the detailed study locations. Although the origin of these anomalies has not been adequately defined, their presence indicates the importance of considering this highly mobile gas at this site. If concentrations are sufficient, helium-3 / helium-4 isotope analyses could also be conducted to improve interpretation regarding the origin of the anomalies. Analyses should be conducted of the coal bed gas to see if there is any helium associated with it.
- Monitoring stations could be established at sites of interest to observe long-term variations and trends in soil gas concentrations. If the gas has a shallow biological origin, correlations will exist between soil gas concentration trends and daily or seasonal changes in meteorological parameters (e.g. temperature, water content, etc.). Instead if a leak is intercepted, the resultant monitoring results will have little correlation with near surface processes and will potentially exceed normal biological concentrations. Monitoring station deployment will depend on the site chosen for injection, but could include either around injection / extraction wells or at points defined on faults that have the potential as gas migration pathways.

8 - ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to express their sincere appreciation to various personnel of Carbosulcis SpA for their generous assistance during the field campaign of 2009, in particular Fabrizio Pisanu, Francesco Melis, and Mauro Cossu. We would also like to thank Daniele La Marra for his help during the sampling work.

9 - REFERENCES

- Alexander, M., 1977, *Introduction to Soil Microbiology*: New York, John Wiley and Sons, 467 p.
- Amundson, R.G., and Davidson, E.A., 1990, Carbon dioxide and nitrogenous gases in the soil atmosphere: *J. Geochem. Explor.*, v. 38, p. 13-41.
- Annunziatellis, A., Beaubien, S.E., Bigi, S., Ciotoli, G., Coltella, M., and Lombardi, S., 2008, Gas migration along fault systems and through the vadose zone in the Lateral caldera (central Italy): Implications for CO₂ geological storage: *Int. J. Greenhouse Gas Control*, v. 2/3, p. 353-372.
- Annunziatellis, A., Ciotoli, G., Lombardi, S., and Nolasco, F., 2003, Short and Long Term Gas Hazard: The Release of Toxic Gases in the Alban Hills Volcanic Area (Central Italy): *Journal of Geoch. Expl.*, v. 77, p. 93-108.
- Beccaluva, L., and Civetta, L., 1985, Geochronology in Sardinia: results and problems: *Rend. Soc. Ital. Mineral. Petrol.*, v. 40, p. 57- 72.

Stima delle capacità di stoccaggio della CO₂ nella formazione del Miliolitico contenente l'acquifero salino, estesa al bacino carbonifero del Sulcis.

La valutazione delle potenzialità di confinamento della CO₂ in un bacino sedimentario si effettua normalmente attraverso tre passaggi che forniscono stime via via più prossime alla reale capacità di confinamento. I tratti essenziali e molto semplificati di queste fasi sono:

- 1) Valutazione preliminare. Si effettua utilizzando le conoscenze geologiche regionali e puntuali disponibili. Questa fase permette di riconoscere la presenza di una o più formazioni porose e permeabili, generalmente acquiferi salini, atte ad ospitare la CO₂, e di una copertura (acquitardo) atta a impedire la fuga della CO₂. Il prodotto di questa fase è una valutazione statica delle potenzialità del bacino.
- 2) Valutazione intermedia. In questa fase sono individuate, mappate e caratterizzate, tramite prospezioni sismiche e sondaggi, tutte le strutture utili (trappole) per il confinamento. Prodotto di questa fase è la modellazione dinamica dell'iniezione di CO₂ ed una nuova valutazione delle potenzialità del bacino.
- 3) Valutazione finale. Richiede l'esecuzione di prove di iniezione in situ con monitoraggio del comportamento dell'acquifero ed affinamento del modello dinamico.

Per ognuna di queste fasi sono stati prodotti, nell'ambito di diversi progetti europei, degli standard di valutazione. In questa nota viene presentata e discussa la fase 1 utilizzando gli standard prodotti e riconosciuti nell'ambito del progetto europeo GeoCapacity descritti nel documento D24: Storage capacity standards del 2008 (1).

Prima di effettuare la stima si definiscono le condizioni al contorno.

Caratteristiche idrogeologiche essenziali

Il riconoscimento degli acquiferi e degli acquitardi, delle loro caratteristiche idrologiche e del loro assetto permette di individuare le formazioni porose e permeabili, possibili serbatoi per il contenimento della CO₂ e le formazioni di copertura necessarie al suo confinamento (2).

Le formazioni presenti nel bacino sono, dall'alto al basso:

Vulcaniti, differenziate in diversi membri con caratteristiche molto variabili. Hanno spessore di media sui 300m ma possono anche superare gli 800m (sondaggio SR-2). Le vulcaniti sono considerate complessivamente permeabili e affiorano su gran parte del bacino. Non sono quindi adatte al confinamento.

Cixerri, Si presenta con uno spessore che raggiunge i 300m ed è costituito da depositi continentali elastici (argille, arenarie e conglomerati) sostanzialmente impermeabili e che forniscono una buona copertura per le formazioni sottostanti.

Produttivo va suddiviso in due unità, una superiore impermeabile costituita da alternanze di argille e marne ed una inferiore costituita da livelli calcareo marnosi, conglomeratici ed arenacei dotata di buona permeabilità per fratturazione.

Miliolitico: ha uno spessore fino a 70m ed è prevalentemente carbonatico. Ha uno spessore tra 30 e 70m e va suddiviso in due unità, una superiore impermeabile costituita da alternanze di argille e

marne ed una inferiore costituita da livelli calcareo marnosi, conglomeratici ed arenacei dotata di buona permeabilità per fratturazione.

Tra Miliolitico e Produttivo è presente una barriera geologica che isola tra loro le due formazioni, riscontrata attraverso prove di permeabilità, e sostenuta dai fatti, poiché le attività di coltivazione nel Produttivo non riscontrano invasione della falda acquifera sottostante.

Il Miliolitico è dotato di permeabilità elevata dovuta a carsismo e fratturazione ed è sede di un acquifero salmastro. Prove di pompaggio effettuate in alcuni pozzi nella miniera di Nuraxi Figus hanno fornito portate fino a 40 l/s senza sensibili cali del livello piezometrico (3).

In base a quanto sopra si esaminerà la capacità di confinamento della CO₂ nel Miliolitico. Tenendo presente che ulteriori e significativi contributi possono provenire dal Produttivo nell'ambito del progetto per la valutazione di produzione CBM ed ECBM attualmente in corso, e dal basamento. Campioni da quest'ultimo hanno infatti fornito (sondaggio 6/79) (4) dei valori di porosità attorno al 15%.

Il progetto europeo Geocapacity, release D24: Storage Capacity Standard propone la formula:

$$M_{CO_2} = A * h * NG * \emptyset * \rho_{CO_2r} * S_{eff}$$

Dove:

M_{CO_2} = capacità di confinamento in tonnellate

A = area del bacino

h = spessore medio dell'acquifero

NG = Net to gross Ratio

$\emptyset$ = porosità media dell'acquifero

ρ_{CO_2r} = Densità della CO₂ alle condizioni del reservoir

S_{eff} = Fattore di efficienza dello storage

La superficie su cui si estende il bacino carbonifero del Sulcis è di circa 400 km². Eliminando le aree abitate, le aree coltivate e gli affioramenti del Cixerri, l'area che è stata considerata utile per il confinamento nel bacino del Sulcis è di 160 km². Gli altri parametri sono stati definiti sulla base dei risultati di attività d'indagine sismica e di analisi di laboratorio elaborate dall'Università di Cagliari, attraverso il CINIGEO, ossia il Consorzio Interuniversitario Nazionale per l'Ingegneria delle Georisorse (4), integrata con la campagna di sismica realizzata precedentemente dalla sezione di georisorse (5) dell'Istituto di Ricerca Olandese TNO e da OGS, Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale nell'ambito del progetto CBM ECBM Sulcis. I valori impiegati per i parametri relativi al dimensionamento del serbatoio sono:

- spessore del Miliolitico = 70m,
- NG = 0.50, valore indicativo che tiene conto della presenza di livelli impermeabili all'interno del Miliolitico,
- $\emptyset$ = 0.15 porosità ricavata dalla stima delle velocità ottenute da dati sismici (Relazione Prof.ssa Fais – Università di Cagliari). Questo valore include la fratturazione ed il carsismo che caratterizzano l'acquifero nel Miliolitico.
- ρ_{CO_2r} densità della CO₂ alla profondità di confinamento (superiore ai 1000m) di 0.6 t/m³.

- S_{eff} valuta l'efficacia dell'iniezione. Nella fase di valutazione intermedia sopra descritta il suo valore può variare tra 0.1 e 0.4. Nella fase 1, che stiamo qui affrontando, il valore di S_{eff} va tenuto notevolmente più basso, in quanto non conoscendo in dettaglio le strutture utili al confinamento, che potrebbero avere superfici molto ridotte rispetto all'intero bacino, la raccomandazione del documento UE suggerisce di utilizzare cautelativamente circa il 10% dei valori sopra riportati.

Considerato il peso e l'indeterminazione nella valutazione di S_{eff} vengono prodotti due scenari, uno con un valore intermedio ed uno un po' più ottimista.

Con $S_{eff}=0.03$ si ottiene una capacità di confinamento di circa 95.000 t/km² che alla scala di bacino (160 km²) si portano a 15.2 Mt

Con $S_{eff}=0.06$, più ottimistico ma altrettanto cautelativo, si ottiene una capacità di confinamento di 190.000 t/km che alla scala di bacino si portano a 30.4 Mt.

Naturalmente queste stime si riferiscono esclusivamente alla formazione del Miliolitico che alloggia l'acquifero, alle quali in fase di eventuale stoccaggio, dovranno essere aggiunte le capacità della formazione di carbone profondo, il Produttivo, e potenzialmente quella del Basamento Paleozoico su cui poggia la formazione dell'acquifero.

Conclusioni

Da quanto visto è evidente che

- 1) il confinamento di ingenti quantità di CO₂ nel bacino del Sulcis è realistico se si prende in considerazione l'intera area del bacino
- 2) per ottenere valori più elevati di potenzialità di confinamento vanno considerate anche le formazioni del Produttivo e del Basamento. Le potenzialità del Produttivo sono in corso di valutazione nell'ambito del progetto CBM ed ECBM mentre quelle del Basamento sono largamente incognite. Da una stima cautelativa ed utilizzando i dati prodotti da uno studio precedente, possiamo raddoppiare le quantità sopra calcolate.

Raccomandazioni

- 1 La tenuta del confinamento è strettamente legata alla tenuta delle faglie presenti. Un primo studio effettuato dall'Università di Roma Sapienza ha verificato la tenuta delle faglie nell'area del Permesso di ricerca Is Urigus (6), e ha pubblicato i risultati nell'ambito del progetto CBM-ECBM Sulcis. Attualmente l'Università di Roma Sapienza, sta avviando una seconda attività di monitoraggio in continuo attraverso l'impiantazione di centraline di monitoraggio che rileveranno per un periodo esteso campioni di gas dal suolo in prossimità delle faglie più importanti dell'area del permesso di ricerca. Sulla base degli studi finora compiuti le faglie monitorate sono risultate inattive, tuttavia uno sviluppo ulteriore sarà ampliare lo studio alle altre strutture presenti nel Bacino.
- 2 È necessario completare l'esplorazione del bacino ampliando i rilievi sismici ed estendendo il programma di perforazione al fine di mappare e caratterizzare le strutture presenti e procedere alla fase 2 descritta in precedenza.

Bibliografia

- 1 EU GeoCapacity - Project no. SES6-518318 - Assessing European Capacity for Geological Storage of Carbon Dioxide; Deliverable D24: Storage capacity standards (2008). - Thomas Vangkilde-Pedersen; De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS).
- 2 Il Bacino Carbonifero del Sulcis - Geologia, Idrogeologia, Miniere (1994). Cap. III, Idrogeologia, pp. 74-110. - A. Fadda; L. Otelli; G. Perna.
- 3 Relazione Interna Carbosulcis CBS-GEOLO-13/2011: Portate acqua emunta attraverso l'eduzione dell'Acquifero del Miliolitico.
- 4 Consorzio Interuniversitario Nazionale per l'Ingegneria delle Georisorse - CINIGEO; Università di Cagliari - Caratterizzazione di dettaglio del suolo nell'area sud-occidentale del bacino carbonifero del Sulcis con attenzione alla formazione del Miliolitico e dell'acquifero che questa ospita (2010) - S. Fais.
- 5 Coalbed Methane and Enhanced Coalbed Methane Recovery as well as Geological Storage of CO₂ (carbon dioxide) in the Sulcis basin - WP2A Seismic data acquisition and interpretation (2010) - TNO ; OGS.
- 6 Coalbed Methane and Enhanced Coalbed Methane Recovery as well as Geological Storage of CO₂ (carbon dioxide) in the Sulcis basin - WP4A Reservoir Characterisation, WP4A.5 Soil gas monitoring and fault detection (2010) - Università Roma Sapienza.

Dott. Giuliano Brancolini
Ricercatore associato



27 aprile 2011

RIASSUNTO ESTESO

Le attività descritte nel presente Deliverable hanno come obiettivo principale la stima e la verifica delle capacità di stoccaggio geologico della CO₂ nell'acquifero profondo individuato nella Formazione del Miliolitico presente del Bacino Carbonifero del Sulcis. La ricerca è stata possibile grazie alla collaborazione della Carbosulcis SpA e in particolare all'Area Sviluppo e Ricerca e Servizi Tecnici dell'Interno Geologico nelle persone dell'ing. F. Pisanu e Dr. G. Sardu, che ha reso disponibili i dati geologici per realizzare il modello 3D e quelli petrofisici relativi alle prove di laboratorio eseguite con la collaborazione dell'Università di Cagliari e coordinate dalla Dr.ssa S. Fais.

Per il perseguimento di tale obiettivo, è stata condotta una attività di modellazione numerica basata sull'utilizzo del Sistema Integrato di Analisi Modellistica (SIAM) interamente sviluppato in RSE nell'ambito della Ricerca di Sistema, a partire dai dati geologici, petrofisici e sismici sia messi a disposizione da Carbosulcis che desunti dal database geologico incluso in SIAM. Ulteriori informazioni sono poi state acquisite da prove di laboratorio condotte nel corso della attività in collaborazione con l'Università di Cagliari.

La realizzazione del modello numerico in grado di soddisfare le esigenze dello studio si è sostanzialmente sviluppata attraverso quattro fasi successive e precisamente:

1. *realizzazione del modello geologico del sito.* L'area di studio concordata con Carbosulcis fa riferimento alla zona delimitata dal Permesso di Ricerca *Is Urigus* (Figura 1) ed ha un'estensione di circa 160 kmq, caratterizzata dalla presenza di un complesso sistema di faglie, sia regionali che locali. Considerazioni fisiche legate alle proprietà della CO₂ supercritica ed alla disponibilità di sufficienti informazioni geologiche e stratigrafiche hanno limitato il dominio del modello numerico ad una regione di circa 70 kmq posizionata nella porzione a SO della suddetta area. Il corrispondente modello geologico è stato quindi generato utilizzando il modulo MethodRdS di SIAM;
2. *realizzazione di un modello semplificato per analisi di sensitività.* Lo scopo di tale modello è quello di effettuare verifiche di accuratezza dell'approccio numerico adottato, tenendo conto delle specifiche caratteristiche morfologiche e strutturali del sito e delle proprietà di diffusività della CO₂;
3. *realizzazione del modello numerico per la simulazione fluidodinamica.* Il modello geologico è stato quindi opportunamente discretizzato nelle tre dimensioni ed integrato con la rappresentazione dettagliata delle strutture di faglia e di pozzo per generare il modello numerico 3D necessario per le simulazioni fluidodinamiche con il modulo Tough2RdS di SIAM;
4. *definizione degli scenari di iniezione e simulazione del transitorio di iniezione.*

Le informazioni necessarie alla generazione del modello geologico tridimensionale sono state ricavate a partire da linee sismiche disponibili per l'area in esame e da mappe isobate relative ad orizzonti sismici che individuano la base dei depositi alluvionali del Quaternario, la base del Complesso Vulcano-Sedimentario e la base del gruppo Cixerri-Produttivo-Formazione del Miliolitico, la cui posizione relativa è desumibile dalla stratigrafia di Figura 2. Non essendo disponibili informazioni più dettagliate, la caratterizzazione dell'acquifero e dello strato produttivo sovrastante è stata definita assumendo per ciascuno strato uno spessore medio pari a 75 m. L'andamento dell'acquifero mostra una evidente inclinazione con una profondità che aumenta in direzione NE-SO; poiché la CO₂ supercritica ha densità inferiore a quella del fluido salino, essa tende a diffondere verso l'alto e quindi in presenza di un serbatoio inclinato potrebbe risalire fino a profondità non idonee al mantenimento delle condizioni supercritiche. Inoltre la presenza di faglie impermeabili che compartimentano fortemente il dominio potrebbe causare per lo stesso motivo una risalita della CO₂ verso la superficie. Di conseguenza, si è reso necessario testare la capacità del modello numerico di simulazione di cogliere con sufficiente accuratezza la presenza di eventuali fenomeni di questo tipo e a tale scopo è stato predisposto il modello semplificato. Tale modello ha una estensione di 5x5 kmq ed una stratigrafia rappresentata schematicamente da superfici inclinate piane e parallele ed avente le medesime proprietà delle formazioni presenti (Figura 3).

La semplificazione della stratigrafia, la considerazione di una iniezione al centro di simmetria del dominio e la possibilità di isolare le singole strutture di faglia hanno consentito, variando le condizioni di iniezione e la posizione del pozzo e della eventuale faglia, di evidenziare il comportamento della CO₂ nel serbatoio e di comprendere meglio gli effetti della compartimentazione introdotta dalla presenza di faglie impermeabili. In Figura 4 sono riportati alcuni dei risultati più significativi. In primo luogo, sono stati confrontati gli effetti di una iniezione di CO₂ con portata di riferimento di 0.2 Mton/anno e della durata di 30 anni, effettuata mediante un pozzo verticale e un pozzo orizzontale, entrambi posizionati al centro del dominio ed alla profondità dell'acquifero in quel punto. È evidente in entrambi i casi che il pennacchio di CO₂ in risalita segue la pendenza dell'acquifero, ma tra i due il pozzo orizzontale risulta la tipologia di struttura di iniezione più idonea a sfruttare la configurazione dell'acquifero, poco potente (75 m). Tale risultato consente anche di orientare la struttura di iniezione che, se posizionata in direzione opposta a quella di risalita, contrasta la migrazione del pennacchio. Sono quindi state effettuate simulazioni parametriche in presenza o meno di una faglia impermeabile (Figura 4 in basso), in cui si evidenzia come l'effetto di risalita comporti l'interazione del pennacchio di CO₂ con la faglia stessa; particolarmente significativo è il fatto che durante la diffusione l'effetto di risalita finisce per aggirare la barriera costituita dalla faglia. Il modello di simulazione, infine, ha anche evidenziato come dopo un certo tempo la CO₂ in risalita arrivi ad una quota tale per cui le condizioni di supercriticità vengono meno, con conseguente passaggio alla fase gassosa e quindi con un aumento di volume e perdita delle condizioni di supercriticità.

I risultati ottenuti dalle precedenti analisi parametriche hanno quindi portato, vista anche la potenza non elevata del Miliolitico, ad eseguire i test di stoccaggio nel settore più a sud dell'area di studio in cui la CO₂ può essere confinata nell'acquifero in condizioni supercritiche. Infine, l'osservazione che, ovunque si collochi il pozzo di iniezione, la CO₂ si diffonde risalendo sempre il serbatoio avvalorava la scelta e garantisce un migliore sfruttamento dei volumi di stoccaggio disponibili.

Sulla base delle precedenti osservazioni, è stato quindi realizzato il modello numerico 3D per la simulazione del transitorio di iniezione, partendo dal modello geologico dettagliato e completandolo con ulteriori informazioni desunte da dati di perforazioni e da mappe geologiche che hanno consentito di migliorare la descrizione tridimensionale della stratigrafia sia in profondità che in superficie (limite di affioramento delle Vulcaniti). Alle diverse formazioni del modello geologico sono poi stati associati i necessari parametri fisici determinati sulla base dei dati provenienti da analisi di laboratorio effettuate su campioni prelevati durante sondaggi geologici nell'area di studio, nonché sulla base di valutazioni derivanti dall'analisi dei dati geologici di perforazioni presenti e di profili sismici, carte e sezioni geologiche disponibili per l'area. Laddove non erano disponibili dati specifici, sono stati ricavati dalla letteratura dati standard per tipologie di roccia analoghe a quelle presenti nel sito. Infine, è stato considerato il particolare profilo termico del sito, che presenta un andamento anomalo rispetto al gradiente medio terrestre, con temperature più elevate. La discretizzazione spaziale del dominio è stata realizzata seguendo la procedura automatica di SIAM, con un reticolo di calcolo comprendente 647367 celle prismatiche; tali celle hanno dimensioni massime dell'ordine di pochi metri nelle zone in cui è stato impostato un maggior dettaglio per rappresentare le strutture geologiche con la massima accuratezza possibile, con la conseguente necessità di elevate risorse computazionali. Il modello di simulazione 3D generato è illustrato in Figura 5, in cui sono messi in evidenza l'andamento in profondità delle formazioni geologiche modellate, il sistema di faglie e la proiezione sul piano delle celle del reticolo.

Il pozzo di iniezione, di tipo orizzontale, è stato collocato nell'area meridionale del dominio ad una profondità di 1850 m, in una posizione in cui lo strato di contenimento (caprock), costituito dalla formazione Cixerri, ha una potenza di 250 m e quindi tale da garantire un buon confinamento. Inoltre, la posizione scelta è sufficientemente lontana dalle strutture di faglia presenti che, se raggiunte da forti concentrazioni di CO₂, possono costituire zone potenzialmente critiche in relazione al rischio di fuga della CO₂.

Lo scenario di iniezione studiato è relativo alla iniezione di una portata costante di 0.2 Mton/anno per la durata di 30 anni, seguita da una fase di sola diffusione della CO₂ fino al tempo limite di 100 anni.

In Figura 5 è riportata la distribuzione della CO₂ al termine del periodo di iniezione; tale visualizzazione consente, sia pure a livello qualitativo, di evidenziare il posizionamento relativo del pennacchio rispetto alle superfici che delimitano le formazioni geologiche presenti, in particolare rispetto agli strati sovrastanti l'acquifero. A questo proposito si è osservato che il pennacchio non rimane ben confinato all'interno dell'acquifero, ma già dopo 3 anni di iniezione la CO₂ fuoriesce dall'acquifero penetrando nella formazione del Produttivo, finendo per raggiungere il tetto della formazione stessa, come evidenziato in Figura 6. La Formazione del Cixerri, che rappresenta il caprock, viene raggiunta ma non oltrepassata dalla CO₂ risalita, che quindi resta di fatto confinata all'interno della struttura acquifero-Produttivo.

Il picco massimo di incremento di pressione (8.53 bar) viene raggiunto dopo 3 anni sulla verticale del pozzo di iniezione, in corrispondenza dell'interfaccia tra Formazione del Produttivo e Formazione del Cixerri, zona in cui la CO₂ in risalita si accumula, non riuscendo a penetrare nello strato impermeabile sovrastante. Durante la fase di iniezione, tale picco si sposta verso Nord seguendo la direzione di risalita della CO₂. La percentuale di incremento rispetto alla pressione idrostatica iniziale, si mantiene dell'ordine del 4.5% e quindi ampiamente entro l'intervallo di sicurezza normalmente accettato (10%).

La simulazione effettuata con il modello 3D, infine, consente di effettuare una valutazione statica della capacità di stoccaggio dell'acquifero sulla base dei volumi realmente occupabili dalla CO₂ e tenendo conto delle condizioni caratteristiche del sito. In questo caso, tale valutazione ha portato ad una capacità stimata di 5.73 Mton, relativamente alla sola Formazione del Miliolitico e considerando una $S_{eff}=0.03$. Considerando che il dominio studiato è di circa 65 kmq mentre il bacino del Sulcis è ragionevolmente esteso per 160 kmq e estrapolando le stesse condizioni geologiche e termodinamiche di serbatoio, la capacità totale di stoccaggio sarebbe di 14,1 MTonn e non considera il Produttivo.

È importante sottolineare, infine, come il modello realizzato costituisca di fatto la base per effettuare l'ottimizzazione delle condizioni di iniezione e per valutare scenari alternativi in cui, ad esempio, si consideri la presenza di più pozzi in modo da consentire lo stoccaggio di maggiori quantità di CO₂ o l'iniezione di portate più consistenti; ciò è possibile grazie alle apposite funzioni predisposte nel modellatore MethodRdS di SIAM.

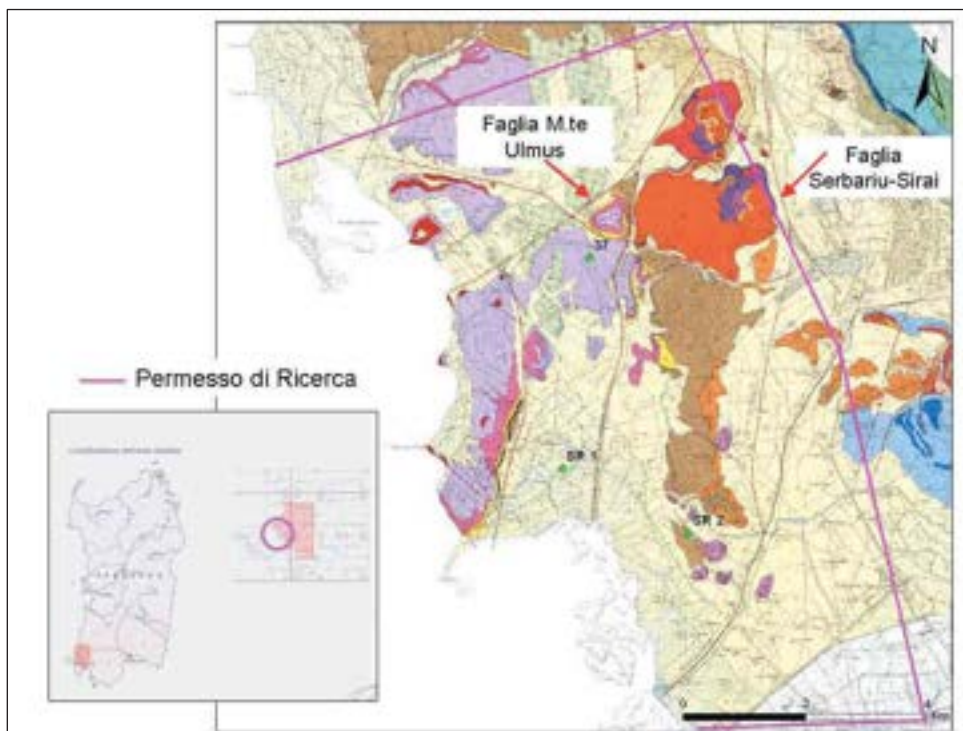


Figura 1 Provincia carbonifera del Sulcis. Carta geologica con indicazione dell'area di studio e di alcune faglie (particolare)

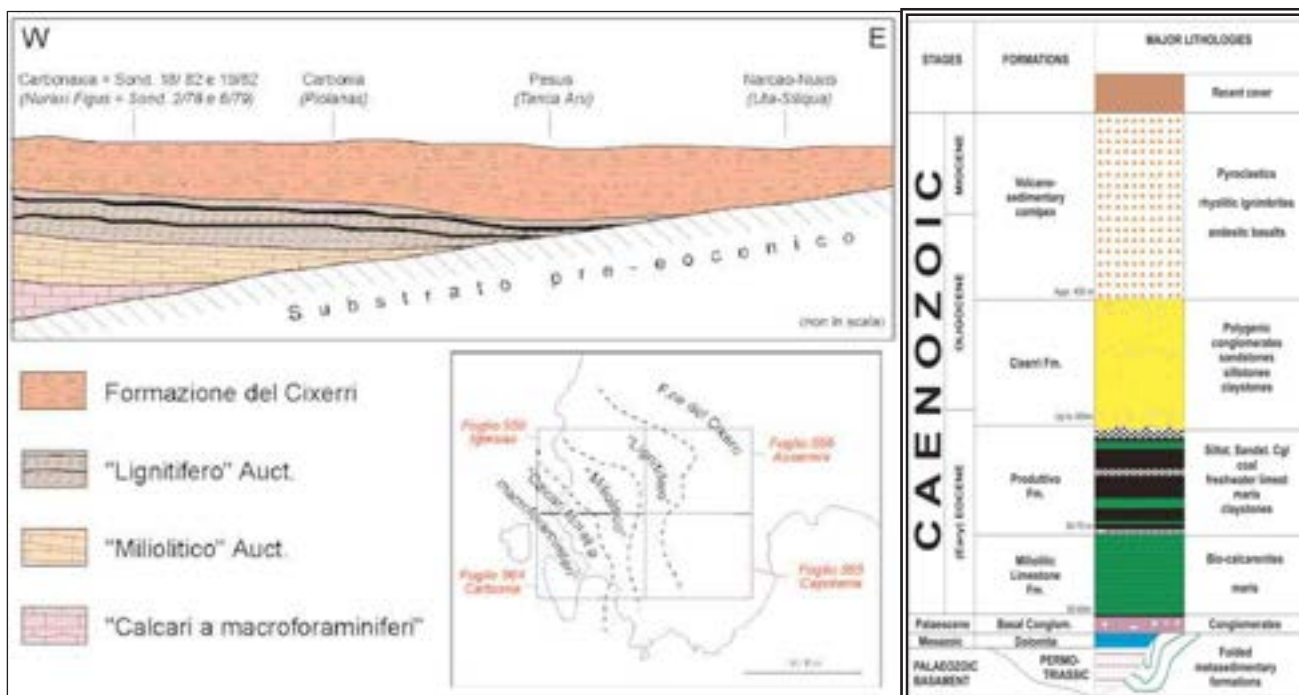


Figura 2 Sezione geologica e colonna stratigrafica rappresentative della sequenza delle formazioni nell'area di studio

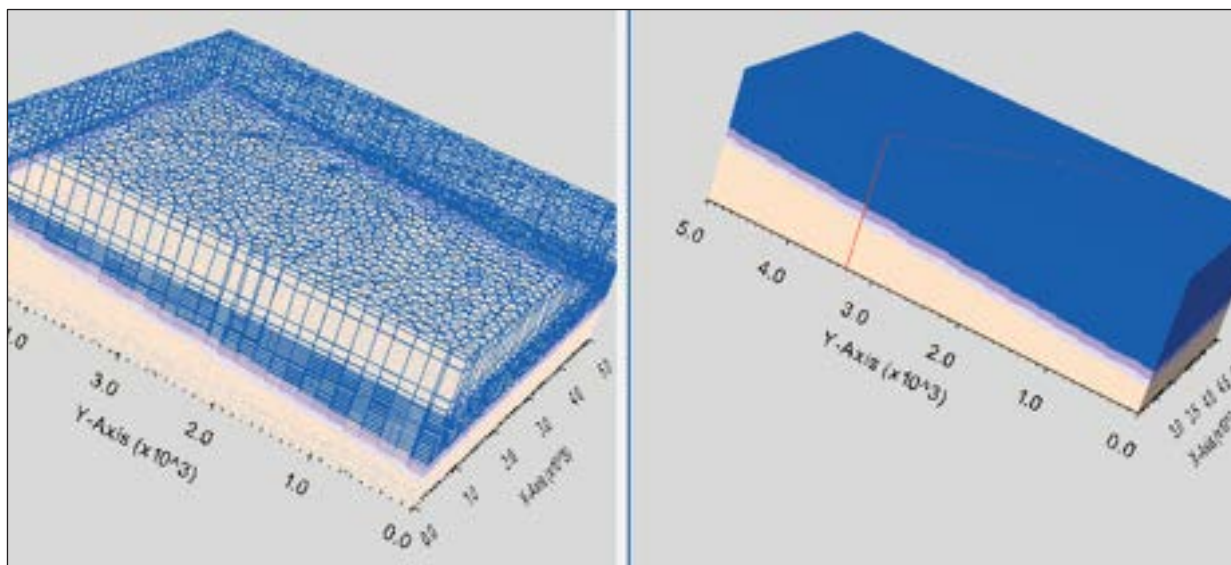


Figura 3 Modello di test. Discretizzazione spaziale(a sinistra) e sequenza geologica semplificata (a destra)

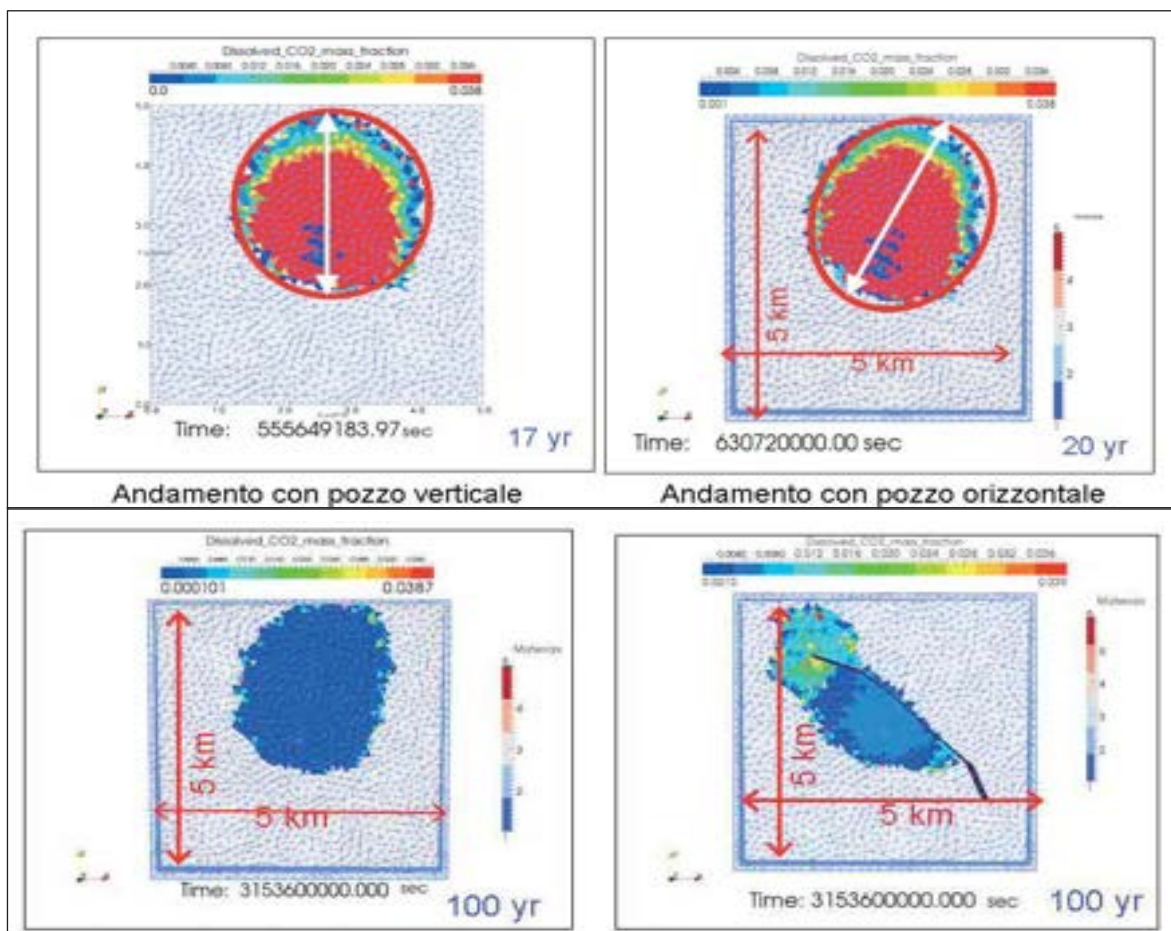


Figura 4 - Diffusione della CO₂ per diversi tipi di pozzo (in alto) ed in presenza o meno di faglia (in basso)

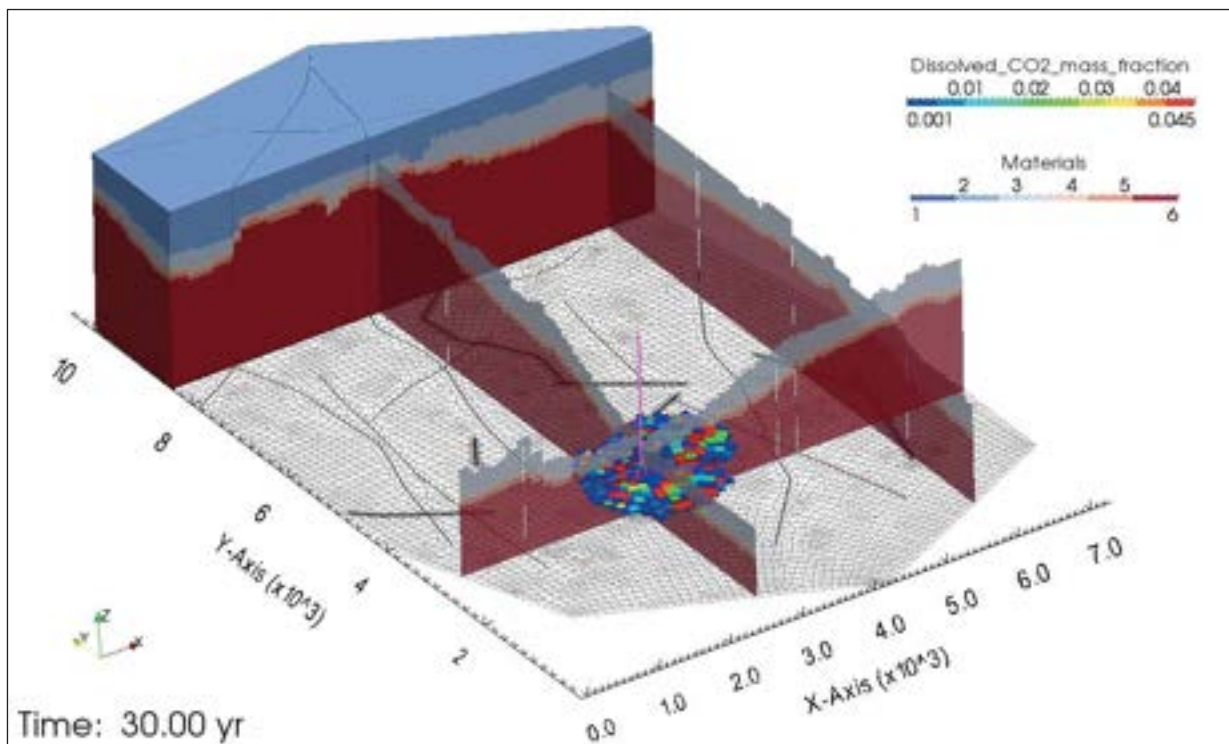


Figura 5 - Modello reale. Reticolo di calcolo 3D con evidenza dell'andamento in profondità delle formazioni geologiche modellate e del sistema di faglie. Distribuzione della CO₂ al termine del periodo di iniezione

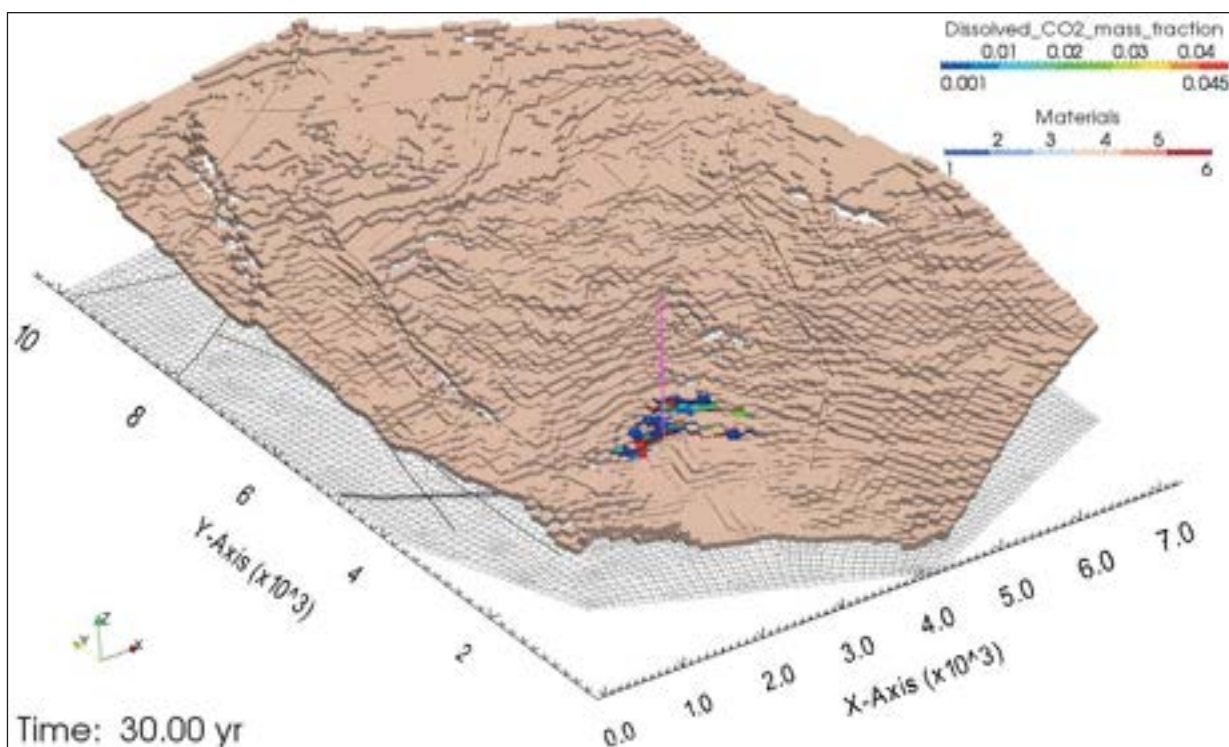


Figura 6 - Modello reale. Distribuzione della CO₂ dopo 30 anni di iniezione sulla sommità della formazione Produttivo

1 INTRODUZIONE

Il presente Rapporto è parte integrante della documentazione delle attività di Ricerca di Sistema previste dal Piano Annuale di Realizzazione 2011 nell'ambito del progetto Studi sull'utilizzo pulito dei combustibili fossili e cattura e sequestro della CO₂ (Area PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA E PROTEZIONE DELL'AMBIENTE) e ne costituisce il Deliverable n.9.

Le attività descritte nel presente rapporto tecnico sono il frutto di un Accordo di Collaborazione siglato tra Carbosulcis S.p.A. ed RSE S.p.A. (già ERSE S.p.A.). In particolare RSE ringrazia l'Area Sviluppo e Ricerca e Servizi Tecnici dell'Interno Geologico di Carbosulcis nelle persone dell'ing. F. Pisanu e Dr. G. Sardu, che con il loro supporto hanno reso disponibili i dati geologici e quelli petrofisici relativi alle prove di laboratorio eseguite con la collaborazione dell'Università di Cagliari e coordinate dalla Dr.ssa S. Fais.

L'obiettivo primario congiunto, al quale è finalizzata la Collaborazione, consiste nella stima e nella verifica delle capacità di stoccaggio geologico della CO₂ nell'acquifero profondo (Formazione del Miliolitico) del Bacino Carbonifero del Sulcis, bacino nel quale è anche presente una delle più importanti miniere di carbone della Sardegna, gestita dalla stessa Carbosulcis.

Come noto, la Sardegna è stata -ed in parte è ancora- una Regione ricca di giacimenti minerari la cui estrazione ha consentito lo sviluppo industriale, economico, culturale e sociale del territorio sardo stesso. La storia mineraria del bacino carbonifero sulcitano si lega strettamente alla storia della metallurgia e all'industria della generazione di energia elettrica, le principali attività industriali del Sulcis-Iglesiente.

L'inizio dell'attività estrattiva industriale nel bacino carbonifero sulcitano risale al 1853, con la prima concessione mineraria di Bacu Abis.

Le due miniere di Seruci e di Nuraxi Figus furono aperte negli anni 40 e furono progettate con criteri di assoluta avanguardia per i tempi. In particolare la miniera di Seruci ebbe, nel suo periodo di attività, produttività equiparabili a quelle delle migliori miniere europee del settore.

La maggior parte delle miniere sarde è stata chiusa nell'epoca attuale, fatta -appunto- eccezione per il bacino carbonifero del Sulcis-Iglesiente, il quale ancora oggi vive la fase di coltivazione del carbone.

Le miniere di carbone potrebbero essere utilizzate per il confinamento della CO₂, utilizzando anche la metodologia ECBM.

L'attività di modellazione prevista nell'ambito del Progetto in esame si pone come obiettivo la verifica della capacità di stoccaggio della CO₂ prodotta dalla centrale a carbone progettata presso il sito Carbosulcis in Sardegna, nei limiti del Permesso di Ricerca Is. Urigus.

Il sito minerario produttivo ubicato nel Bacino carbonifero del Sulcis, sul quale opera la Carbosulcis S.p.A. e dal cui sito (<http://www.carbosulcis.it/>) sono state reperite le informazioni di seguito riportate, presenta un'estensione complessiva di circa 500 km².

Su circa 100 km² si hanno prove certe dell'esistenza delle formazioni Eoceniche ospitanti il carbone e solo su 50 km² si hanno dati di ricerca ed esplorazione che consentono una valutazione, pur con diversi livelli di approssimazione, delle potenziali riserve produttive.

Circa la metà di questi 50 km² è stata oggetto di lavori minerari di prospezione, sondaggio e tracciamento che hanno consentito di individuare riserve minerarie carbonifere, mentre per i residui 25 km² la carenza di dati porta a dover considerare solo potenziali le riserve di carbone.

L'area del Bacino carbonifero in esame è coperta per 59,4 km² dalla concessione mineraria Monte Sinni, rilasciata alla Carbosulcis S.p.A. dall'Assessorato all'Industria della Regione Autonoma della Sardegna con decreto n. 241 del 1982 per la coltivazione del giacimento di combustibili solidi del Sulcis ed ha una durata di anni 30.

Le formazioni interessate allo stoccaggio sono da individuarsi nell'acquifero salino presente al di sotto dello strato produttivo, ossia nel Miliolitico ed, in particolare, nella porzione del sito in cui questa formazione sia ubicata a profondità sufficiente per garantire il confinamento della CO₂ in condizioni di fluido supercritico.

Nel quadro delle attività previste per la modellazione del sito, si è deciso di impostare un modello geologico a scala ridotta semplificato sia in termini stratigrafici sia in termini parametrici, su cui

realizzare dei casi test schematici e dimostrativi. Questi ultimi servono per creare una conoscenza pregressa del comportamento atteso dei materiali (rocce) e dei moti di diffusione dell'anidride carbonica in un caso realistico ma semplificato. Una volta ottenuti e analizzati i risultati di queste prime simulazioni, il modello viene complicato mediante l'introduzione delle opportune discontinuità litologiche, stratigrafiche, strutturali e viene esteso alla reale scala di bacino.

La quantità totale che si suppone di catturare ed iniettare nel sottosuolo è pari a 1.0 Mt/anno per 20 anni. A fini dimostrativi, la modellistica individua e simula un numero variabile di pozzi (da 3 a 5) in cui l'iniezione si spinge -per singolo pozzo- fino a 0.3 Mt/anno per 30 anni, anche per analizzare la capacità massima dei vari compartimenti iniettati.

7 CONCLUSIONI

I risultati ottenuti sono il risultato di una collaborazione tra Carbosulcis SpA e RSE con l'obiettivo di studiare le potenzialità di stoccaggio geologico della CO₂ nel bacino del Sulcis situato nella Sardegna sud-occidentale e in particolare nell'acquifero salino presente nella formazione del Miliolitico.

La ricerca ha evidenziato l'idoneità della metodologia geologica sviluppata da RSE per affrontare queste problematiche e il modello geologico 3D unitamente al primo test numerico, sono stati approntati con il codice SIAM-Sistema Integrato di Analisi Modellistica appositamente sviluppato per questo tipo di analisi. In estrema sintesi e alla luce delle assunzioni geologiche fatte e che andrebbero validate ad esempio con perforazioni profonde e analisi petrofisiche sulle carote, il processo di stoccaggio della CO₂ nel bacino del Sulcis sembra fattibile.

Il modello geologico elaborato è risultato molto complesso per le caratteristiche del sistema caprock-reservoir che ha in zona intermedia la formazione del Produttivo che, con il serbatoio del Miliolitico, presenta uno spessore medio di circa 150 metri. Nell'area di indagine inoltre sono presenti diverse faglie che sono state introdotte nel modello e classificate come regionali e locali con ben determinate caratteristiche petrofisiche.

Lo studio geologico locale ha evidenziato come le formazioni si immergono significativamente in direzione sud-sud ovest e questa realtà ci ha indotto ad eseguire una serie di test preliminari per verificare il comportamento della CO₂ anche in prossimità delle strutture fagliate e la configurazione di pozzo ottimale. I test hanno evidenziato come un'iniezione orizzontale sia più indicata agli scopi e come sia preferibile eseguirla in una posizione relativamente profonda e quindi posta verso la parte sud del dominio per garantire un migliore sfruttamento dei volumi disponibili.

Il primo test numerico è stato eseguito considerando quindi un'iniezione orizzontale di 0.2 MTonn/anno di CO₂ alla profondità di 1850 metri con durata di 30 anni e periodo di simulazione esteso fino a 100 anni. I risultati hanno evidenziato come la CO₂ migra verso l'alto interessando anche il Produttivo ma attestandosi al tetto della formazione che incontra la formazione del Cixerri che svolge il ruolo di caprock. La massima sovra-pressione a seguito del processo di stoccaggio viene raggiunta dopo 3 anni e resta abbondantemente sotto il 10% della pressione iniziale a garanzia dell'integrità del serbatoio.

È stato preparato anche un *case test* con iniezione di CO₂ multi pozzo per verificare le capacità di stoccaggio con volumetrie più elevate e la mutua influenza delle bolle di CO₂ in espansione.