



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Caratterizzazione e prova di miscele di acqua e carbone e sviluppo
di un sistema informativo geografico a supporto della scelta di siti
idonei allo stoccaggio di CO₂

R. Ciccu, A. Mazzella, C. Tilocca



Dipartimento di Geingegneria e
Tecnologie Ambientali

Report RdS/2010/20

CARATTERIZZAZIONE E PROVA DI MISCELE DI ACQUA E CARBONE E SVILUPPO DI UN SISTEMA INFORMATIVO GEOGRAFICO A SUPPORTO DELLA SCELTA DI SITI IDONEI ALLO STOCCAGGIO DI CO₂

Raimondo Ciccu, Alessandro Mazzella, Caterina Tilocca , Università degli Studi di Cagliari, Dipartimento di Geoingegneria e Tecnologie Ambientali

Settembre 2010

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione e Fonti Energetiche

Tema: Tecnologie di gassificazione del carbone con cattura e sequestro della CO₂

Responsabile Tema: Paolo Deiana, ENEA

INDICE

ABSTRACT.....	3
INTRODUZIONE.....	5
Il Bacino Carbonifero del Sulcis (Sardegna SW)	9
Inquadramento Geografico.....	9
Inquadramento Morfologico	10
Inquadramento Geologico	11
Inquadramento Tettonico-Strutturale.....	13
Inquadramento Giacimentologico	16
Inquadramento Mineralogico	17
Inquadramento Paesaggistico.....	20
UN GIS-DSS A SUPPORTO DELLA SCELTA DEI DITI IDONEI PER LO STOCCAGGIO DI CO2.....	23
Modello Digitale del Sulcis.....	23
Modello Strutturale del Sulcis	25
Modello 3D del “Produttivo”	26
Processing dei dati.....	34
Analisi Multi-Criteria BINARY ANALYSIS	36
Analisi Multi-Criteria WEIGHTED OVERLAY ANALYSIS	36
Un GIS-DSS a supporto della scelta dei siti idonei per lo stoccaggio di CO2.	36
CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	38

ABSTRACT

La corretta identificazione dei potenziali siti per lo Stoccaggio Geologico dei gas serra (come ad esempio la CO₂) rappresenta uno step operativo di fondamentale importanza perché sia garantito il successo del progetto. È palese che, più che mai nell'ambito delle tecnologie CCS (acronimo inglese per "Carbon Capture and Storage"), il buon esito di un progetto di Stoccaggio Geologico può dirsi raggiunto solo se, accanto alla riuscita tecnico-economica dell'impresa, risulta garantita la sicurezza per le popolazioni residenti e per gli ecosistemi ambientali direttamente esposti.

Il complesso delle valutazioni che debbono essere operate per l'identificazione del serbatoio geologico ottimale deve necessariamente tenere in considerazione un elevato numero di parametri, spesso assai eterogenei tra loro, che riguardano sia le caratteristiche intrinseche del corpo geologico e delle formazioni incassanti, che le condizioni ambientali al contorno e le limitazioni dettate da fattori antropici e/o politici.

La molteplicità e la variabilità di tutti questi parametri rende, di fatto, ogni scenario unico e, quindi, diviene impossibile la definizione di linee guida universalmente valide che possano guidare il Decision Maker nella redazione del progetto finale. Tali problematiche, rendono proibitivo per il Decision Maker il ricorso alla sua esclusiva esperienza e discrezionalità suggerendo, invece, l'utilizzo delle potenzialità di un **Sistema di Supporto Decisionale** (*in inglese DSS - Decision Support System*).

Nell'ambito delle tecnologie CCS, il connubio tra DSS e tecnologie GIS consente la realizzazione di strumenti particolarmente precisi e potenti per l'identificazione e la risoluzione di problemi tecnici (ad esempio, la localizzazione dei serbatoi geologici idonei a contenere elevati quantitativi di gas in pressione) e per l'identificazione e la valutazione tecnico-economica di alternative progettuali (ad esempio, la progettazione della più razionali soluzioni di monitoraggio ambientale) affinché sia garantito il giusto compromesso tra la riuscita tecnico-economica del progetto e la sicurezza per le popolazioni indigene e gli ecosistemi direttamente coinvolti.

Il presente lavoro di ricerca, esplorando il campo degli strumenti decisionali, presenta i primi risultati ottenuti nella realizzazione di uno strumento GIS-DSS per lo studio di prefattibilità di un progetto di CO₂-ECMB all'interno del Bacino Carbonifero del Sulcis (Sardegna, SW).

Il GIS-DSS oggetto del presente studio è stato interamente realizzato con ArcGIS Model Builder 9.3. I dati disponibili relativi al DTM del bacino, il modello 3D del corpo carbonifero, le carte geologiche, le foto aeree, l'uso del suolo ed i dati relativi ad i vincoli ambientali e territoriali, sono stati combinati attraverso il **Weighted Overlay Process (WOP)**. La procedura applicata rappresenta un particolare algoritmo di **Valutazione Multi-Criteria - MCE**. La valutazione MCE è una procedura di comparazione a criteri multipli che ha come scopo quello di contribuire allo sviluppo di un processo di apprendimento che alimenta lo stesso processo decisionale. Si tratta quindi di un metodo non monetario per esaminare la convenienza di progetti di investimento caratterizzati da un rilevante impatto di tipo ambientale, sociale ed economico nel contesto in cui vengono realizzati.

A differenza dell'Analisi Costi Benefici ACB, tecnica di valutazione monocriteriale che esprime il giudizio di convenienza in funzione del solo criterio monetario, l'analisi multicriteri AMC cerca di razionalizzare il processo di scelta del *Decision Maker* attraverso l'ottimizzazione di un vettore di più criteri, pesati secondo le priorità da questo fissate. I problemi decisionali con cui ci si scontra nel campo delle tecnologie CSS, tipicamente coinvolgono un insieme di alternative possibili ed un gran numero di criteri di valutazione

conflittuali e spesso non facilmente misurabili. Per questo motivo necessitano di metodologie decisionali che siano a criteri multipli e basate su sistemi di informazione geografici (GIS). Queste due distinte aree di ricerca, GIS ed analisi a criteri multipli AMC, possono beneficiare una dell'altra : da un lato infatti le tecniche GIS rivestono un ruolo importante nell'analizzare una grande varietà di dati necessari per il processo di decisione, dall'altro le metodologie di AMC offrono procedure capaci di elaborare e modellare le preferenze dei decisori incorporando il processo decisionale all'interno di un sistema geografico.

Nonostante il fatto che la maggior parte dei problemi di decisione spaziale sia multicriteri in natura dal momento che coinvolge varie dimensioni quali quella economica, sociale, ambientale e politica con interessi spesso in conflitto fra loro, le tecniche di *Decision Making* a criteri multipli sono state solo recentemente inserite ed integrate nel campo dell'analisi spaziale pervenendo al concetto di sistemi decisionali multicriteri spaziali o basati su GIS.

Un problema decisionale a criteri multipli e spaziale comporta l'esistenza di un insieme di alternative geograficamente definite fra le quali un ordinamento ed una scelta vengono effettuate nel rispetto di un dato insieme di criteri di valutazione. Le alternative sono geograficamente definite nel senso che il risultato dell'analisi (la decisione) dipende anche dalla loro distribuzione spaziale. In termini GIS le alternative possono essere rappresentate attraverso una primitiva geometrica (punto, linea, arco, raster) a cui sono associati i valori dei criteri di valutazione che sono memorizzati come attributi alfanumerici .

Le convenzionali tecniche di AMC non spaziali tipicamente usano la media o il totale degli impatti di un'alternativa su un sistema ambientale ritenendoli appropriati per l'intera area in considerazione : in altre parole gli approcci convenzionali assumono un'omogeneità spaziale all'interno dell'area di studio.

Questa assunzione è chiaramente poco realistica dal momento che i criteri di valutazione, o meglio gli attributi che servono a misurarli, variano nello spazio.

L'analisi multicriteri spaziale rappresenta pertanto un significativo passo in avanti rispetto alle tecniche di AMC convenzionali a causa della esplicita componente spaziale che richiede sia la conoscenza e la rappresentazione dei dati relativi ai criteri (criterion maps), sia la localizzazione geografica delle alternative.

I dati territoriali vengono processati usando le potenzialità informatiche del GIS ed i metodi di analisi multicriteri per ottenere le informazioni necessarie per supportare le decisioni.

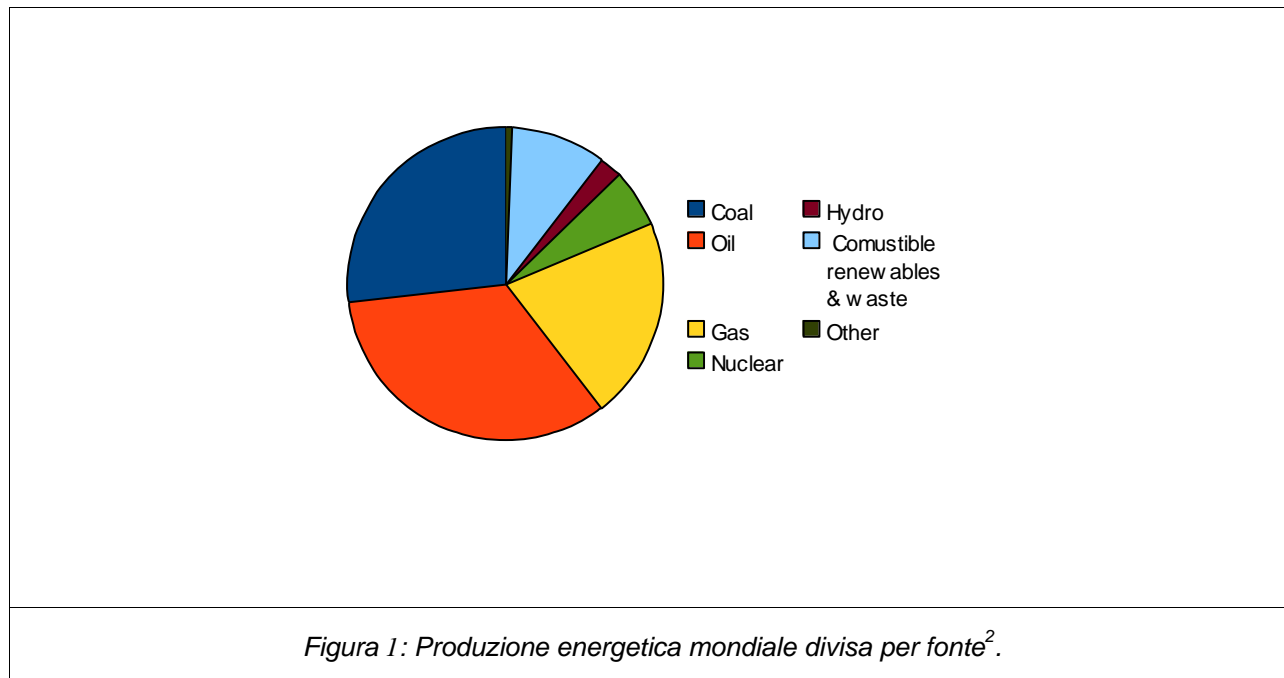
L'analisi a criteri multipli spaziale può essere pensata, quindi, come un processo che combina e trasforma i dati geografici di input in un output decisionale.

In particolare, la procedura applicata, procede attraverso l'assegnazione diretta sulla base di una scala di punteggio prestabilita (da 1 a 10, 100 o 1000, ecc...) di pesi relativi ai criteri che serve a stabilire un ordine di importanza relativa tra questi ultimi. In pratica i pesi misurano, attraverso valori numerici a-dimensionali, le priorità che si assegnano ai vari aspetti del problema e per tale motivo non hanno mai valore assoluto ma solo relativo. Ciascun indicatore di solito viene moltiplicato per il rispettivo peso prima di essere aggregato agli altri valori, come verrà spiegato oltre.

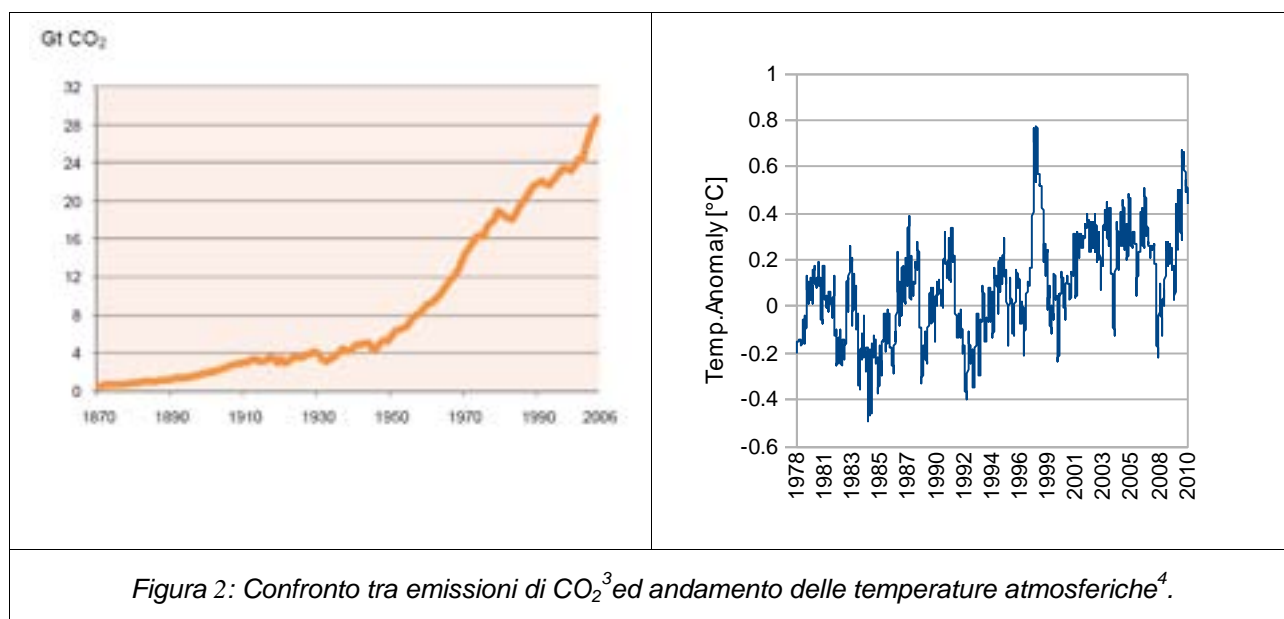
La versione attuale del GIS-DSS, perfettamente funzionante ma ancora in fase di sviluppo, può essere modificata per considerare un maggior numero di parametri di valutazione in ingresso e/o per produrre valutazioni differenti variando l'incidenza di ciascun parametro.

INTRODUZIONE

Secondo gli ultimi dati pubblicati dall'International Energy Agency, i combustibili fossili soddisfano, ad oggi, più del'80% del fabbisogno energetico mondiale ed il 98% dei trasporti¹ (Figura 1).



Il largo impiego di queste fonti energetiche non rinnovabili ha prodotto, a partire dagli anni della Rivoluzione Industriale, un progressivo aumento della concentrazione di gas serra in atmosfera e, conseguentemente, delle problematiche ambientali legate al rilascio in atmosfera dei gas serra prodotti durante la combustione (principalmente: CO₂, N₂O, CH₄ e O₃) (Figura 2).



1 - International Energy Agency, (2009). Key World Energy Statistics. France 2009, pp. 82

2 - International Energy Agency, (2009). Key World Energy Statistics. France 2009, pp. 82

Poiché, però, lo sviluppo economico di ciascun Paese necessita di elevati quantitativi di energia, si stima che i combustibili fossili resteranno una fonte energetica strategica per almeno altri cento anni, ovvero fino a quando non saranno disponibili tecnologie alternative in grado di soddisfare l'intero fabbisogno energetico mondiale. Per questo motivo, nel corso degli ultimi anni, l'interesse della comunità scientifica si è rivolto verso tutte le tecniche in grado di produrre una riduzione delle emissioni di gas serra in atmosfera.

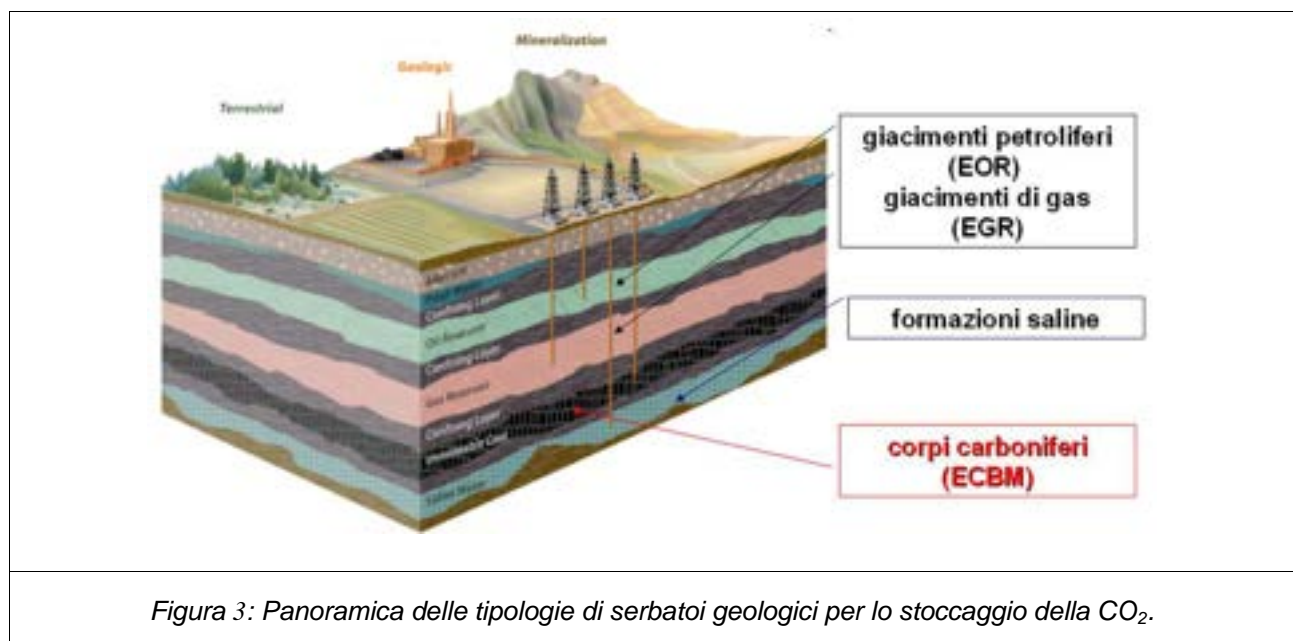
Tra le alternative possibili, a livello internazionale stanno acquisendo maggiore importanza le tecniche di sequestro geologico (Geological Carbon Sequestration, GCS) della CO₂.

Le esperienze condotte già da alcuni anni negli USA, in Canada ed in Australia hanno evidenziato i fattori di successo di tali tecniche:

- disponibilità e diffusione dei serbatoi geologici in grado di contenere a medio-lungo termine CO₂;
- elevata capacità di contenimento dei serbatoi geologici (alcuni studi indicano che, a scala mondiale, possano essere immagazzinate fino a 10.000 Gt di CO₂);
- possibilità di realizzare il GCS con tecnologie già esistenti, affidabili ed economiche;
- possibilità di pianificare il GCS già durante le fasi progettuali raggruppando, quando possibile, le sorgenti di CO₂ direttamente nei pressi dei siti di stoccaggio;

Le ricerche internazionali per la definizione dei serbatoi più idonei al contenimento di grossi quantitativi di CO₂, hanno identificato tre tipologie principali di serbatoi (Figura 3):

- i duomi salini che, grazie alle loro caratteristiche di mineralogiche e morfologiche, rappresentano delle trappole naturali perfette;
- i giacimenti petroliferi esauriti in cui si sfrutta la pressione di confinamento del gas per favorire la completa estrazione del petrolio e/o del gas naturale presente;
- i corpi carboniferi non più economici perché, ad esempio, troppo sottili o troppo profondi.



Tra le alternative presentate, l'iniezione di CO₂ all'interno di corpi carboniferi ha assunto, negli ultimi anni,

3 - International Energy Agency, (2009). CO₂ emission from fossil fuels. France 2009, pp. 82

4 - The Alabama Weather Page, url: <http://vortex.nsstc.uah.edu/data/msu/t2lt/uahncdc.lt>

una particolare rilevanza grazie al fatto che i processi chimici-biologici che si instaurano tra la fase carboniosa ed il gas iniettato determinano la liberazione del gas naturale (formato prevalentemente da una miscela variabile di Metano, Etano, Propano e Butano) imprigionato nella sostanza organica. Tale tecnica, nota con il nome **Enhanced Coal Bed Methane (ECBM)**, consente una riduzione della concentrazione di CO₂ in atmosfera grazie ad un controbilanciamento dei costi operativi per la cattura, la compressione, il trasporto, l'iniezione ed il monitoraggio ambientale con le rendite provenienti dallo sfruttamento del gas naturale.

L'esistenza di elevati rischi ambientali connessi alle caratteristiche dei gas iniettati richiede che vengano operate in maniera oculata:

- la scelta del serbatoio geologico in grado di contenere elevati quantitativi di CO₂ in pressione;
- la previsione della variabilità spazio-temporale delle caratteristiche del plume di gas iniettato;
- la progettazione della rete di monitoraggio ambientale in grado di definire eventuali perdite e/o migrazioni incontrollate.

Per realizzare tali obiettivi diventa di fondamentale importanza valutare correttamente un elevato numero di parametri, spesso assai eterogenei tra loro, che riguardano principalmente:

- le caratteristiche intrinseche del corpo geologico (in termini di morfologia, giacimentologica, composizione litologica e minero-petrografica, aspetti tettonici e strutturali, ecc...);
- le caratteristiche delle formazioni incassanti (in termini di morfologia, composizione litologica e minero-petrografica ed aspetti tettonici e strutturali, ecc...);
- le condizioni ambientali al contorno (presenza di flora e fauna, presenza di idrografia sotterranea e/o superficiale, ecc...);
- le limitazioni dettate da particolari vincoli antropici e/o politico-amministrativi (sussistenza di vincoli legislativi, ecc...).

La molteplicità e la variabilità di tutti questi parametri rende, di fatto, ogni scenario unico e, quindi, diviene impossibile la definizione di linee guida universalmente valide che possano guidare il *Decision Maker* nella redazione del progetto finale, rendendo proibitivo per il *Decision Maker* il ricorso alla sua esclusiva esperienza e discrezionalità suggerendo, invece, l'utilizzo delle potenzialità di un **Sistema di Supporto Decisionale** (in inglese **DSS - Decision Support System**). Un **DSS** viene definito, generalmente, come un software grafico interattivo che possiede adeguati strumenti matematici programmabili e/o di simulazione, in grado di affrontare e risolvere problemi non-strutturati pertinenti a specifici scenari in specifiche condizioni⁵.

Un DSS può assistere i *Decision Maker*:

- nel riconoscimento di uno o più problemi;
- nell'identificazione e nella valutazione tecnico-economica di soluzioni od/ed alternative possibili;

Nell'ambito delle tecnologie CCS, il connubio di strumenti DSS e tecnologie GIS consente la realizzazione di strumenti particolarmente precisi e potenti per l'identificazione e la risoluzione di problemi tecnici (ad esempio, la localizzazione dei serbatoi geologici idonei a contenere, in sicurezza, gas in pressione) e/o per l'identificazione e la valutazione tecnico-economica di soluzioni ed alternative possibili (ad esempio, la progettazione della più razionali soluzioni di monitoraggio ambientale) per garantire il giusto compromesso tra la riuscita tecnico-economica del progetto e la sicurezza per le popolazioni e gli ecosistemi direttamente coinvolti.

L'attività di ricerca ha mirato allo sviluppo di un GIS-DSS, ovvero un sistema informativo geografico

5 - Georgakatos A., Yao H., Brumbelow K., De Marchi C., Bourne S., Tidwell A., Visone L., (2002). Nile DST Overview. The Georgia Water Resources Institute/Georgia Tech. Atlanta, pp.29

“intelligente” , idoneo a:

- guidare e supportare il *Decision Maker* nella scelta del più idoneo serbatoio geologico e quindi,
- nella previsione del comportamento del gas iniettato e dunque,
- nella definizione della più idonea rete di monitoraggio ambientale.

Il tutto con il fine di processare informazioni ed ottenere riscontri affinché sia garantito il giusto compromesso tra la riuscita tecnico-economica e la sicurezza per le popolazioni indigene e gli ecosistemi direttamente coinvolti.

Il Bacino Carbonifero del Sulcis (Sardegna SW)

La conoscenza della morfologia, della geologia e della giacimentologia del territorio in studio è da considerarsi la base per lo sviluppo di qualunque progetto. Per questo motivo, nelle pagine che seguono, verranno delineate le principali caratteristiche dell'area in esame, così da costituire l'inquadramento per l'esposizione dei successivi step della ricerca.

Inquadramento Geografico

Il Bacino Carbonifero del Sulcis occupa un'area della Sardegna Sud-Occidentale che si sviluppa con andamento pressoché meridiano fra l'insenatura di Fontanamare a Nord ed il Golfo di Palmas a Sud; verso Est il limite del Bacino è dato dagli affioramenti Paleozoici, mentre ad Ovest è costituito dalla linea di costa (Figura 4). Alcuni studi recenti⁶, tuttavia, sostengono che il giacimento carbonifero si estenda oltre la linea di costa raggiungendo l'isola di San Pietro.

L'estensione areale del bacino così delimitato è stimata in circa 200 Km²⁷ ed interessa topograficamente parte del 1° Quadrante del Foglio 232 Isola di S.Pietro ed i Quadranti III e IV del Foglio 233 Iglesias della Carta d'Italia in scala 1:100.000.

Dal punto di vista cartografico tali aree sono inquadrare all'interno delle tavolette della carta IGM in scala 1:25.000 denominate rispettivamente: I° NE Nebida, I° SE Portoscuso, II° NE Calasetta, IV NO Iglesias, IV SO Cortoghiana, III NO Carbonia, III SO Golfo di Palmas; mentre, riferendosi alla Carta Tecnica della Regione Sardegna alla scala 1:10.000, essa resta individuata all'interno dei fogli 555 Iglesias e 564 Carbonia.

⁶ - Carbosulcis, Il Bacino carbonifero del Sulcis: geologia, idrogeologia, miniera, Carbosulcis S.p.A., Rimin S.p.A., Montan Consulting GMBH (1990-91), RIMIN S.p.A, pp. 143

⁷ - M.Carta, Note sulle miniere carbonifere del Sulcis., La Programmazione in Sardegna, Anno 10, Novembre-Dicembre 1976, pp 3-18

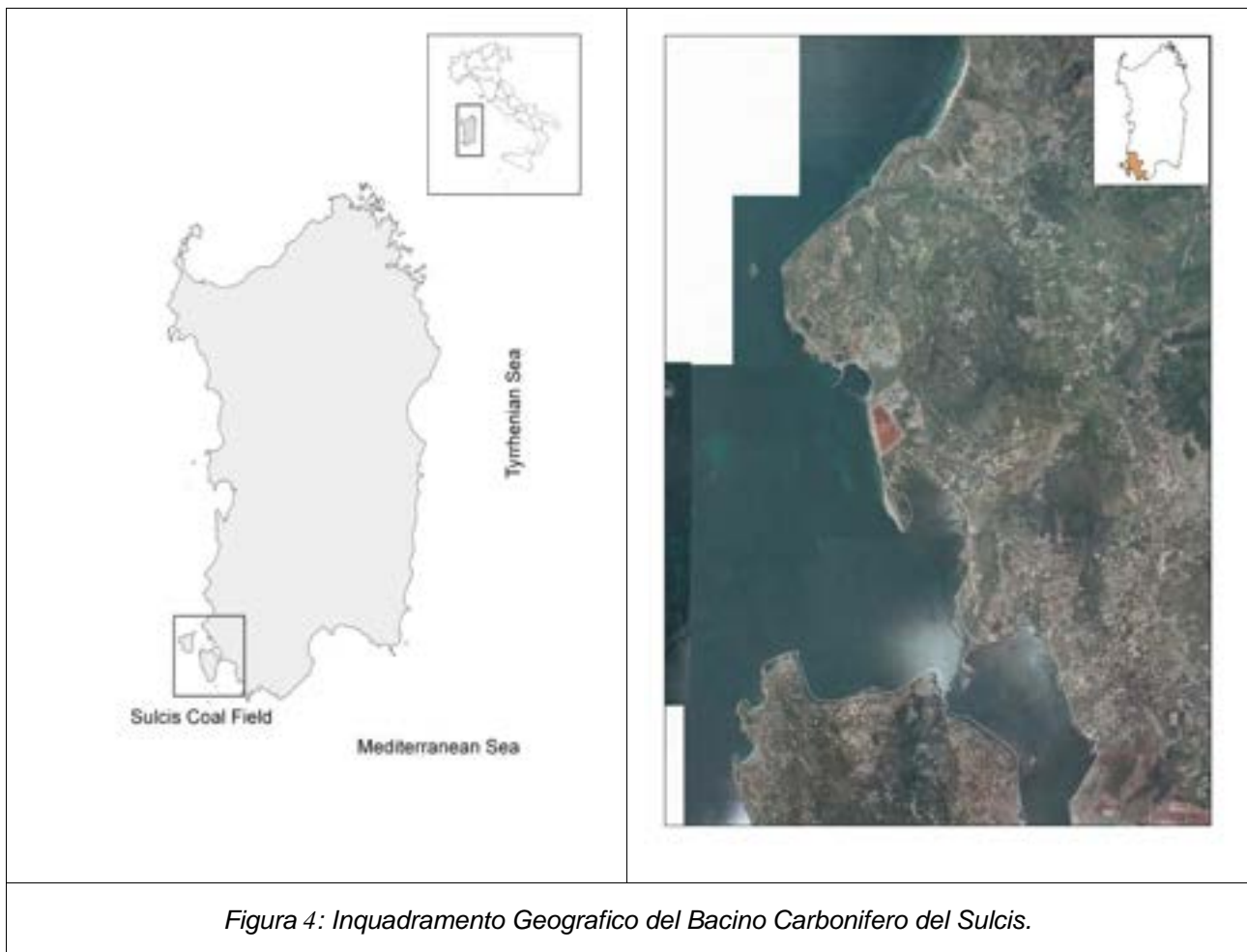


Figura 4: Inquadramento Geografico del Bacino Carbonifero del Sulcis.

Inquadramento Morfologico

La morfologia della regione è caratterizzata dalla presenza della copertura vulcanica di natura prevalentemente ignimbratica che mostra una giacitura generalmente tabulare sbandata verso SO con una pendenza media dell'8-10%.

Su tali espandimenti ignimbratici hanno operato sia gli agenti esogeni (precipitazioni, venti, irraggiamento solare) che hanno determinato un modellamento dei rilievi presenti, sia i processi endogeni che hanno determinato le principali strutture NS e EO.

In queste profonde incisioni e, soprattutto, negli acrocrici formati in corrispondenza degli alti strutturali del Monte Sinni e del Monte Sirai, vengono messe a nudo le successioni di episodi ignimbratici stratoidi che danno luogo ad una evidente gradonatura, dovuta alla differente competenza dei vari livelli di ogni singolo evento.

La fascia costiera a sud di Portoscuso-Portovesme mostra una morfologia piana dovuta all'accumulo di sedimenti recenti quali limi e sabbie. Tale area, seppure attualmente sede di un imponente polo industriale, mostra ancora caratteristiche paludose; analoga situazione si osserva nell'area a sud di Matzacara.

A sud della città di Carbonia, sulle ignimbrici tabulari, giacciono le vulcaniti di natura andesitica caratterizzate da corpi lavici a forma di cupole che creano una morfologia più accidentata di tipo montuoso-collinare.

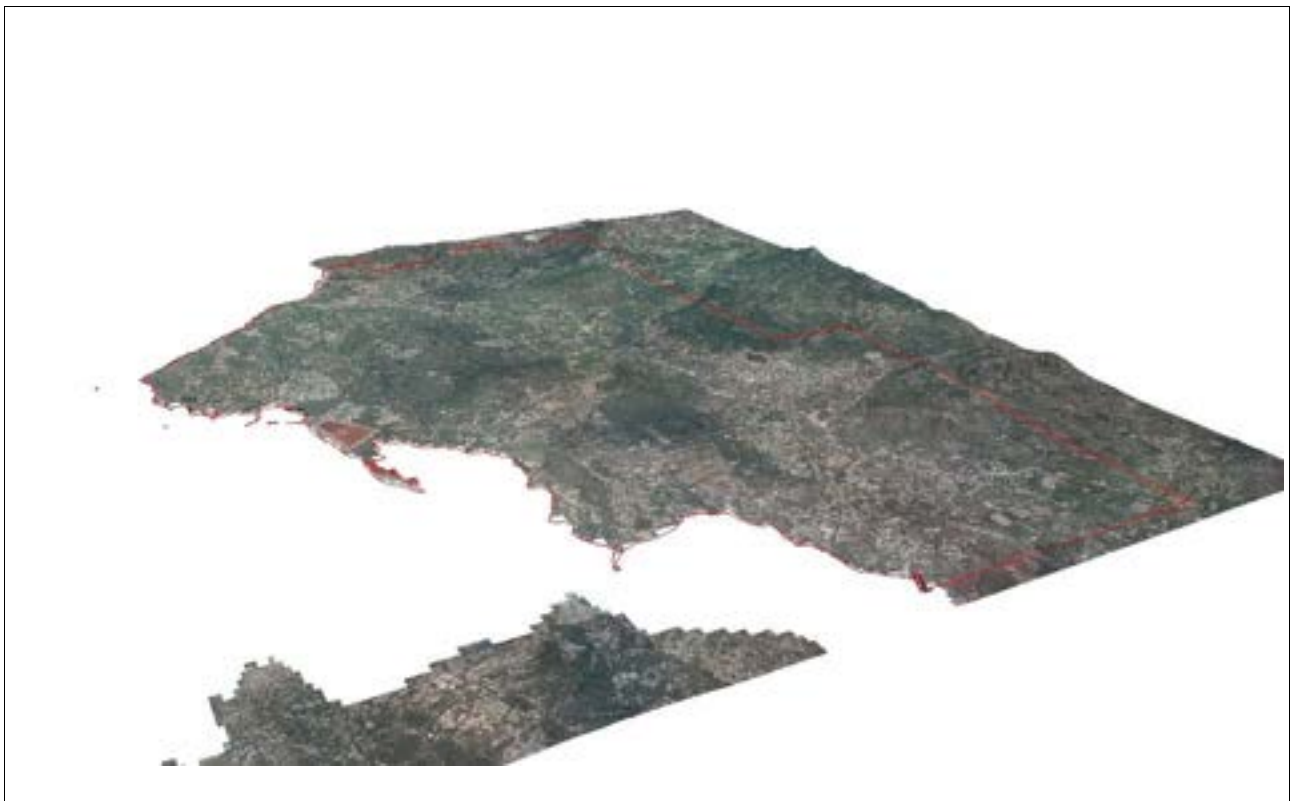


Figura 5: Ricostruzione 3D dell'area del Bacino Carbonifero del Sulcis.

Inquadramento Geologico

Nella **Figura 6** è riportato un mosaico della cartografia geologica ^{8 9 10} disponibile dell'area in esame.

8 - Assorgia A., Brotzu P., Callegari E., Fadda A., Lonis R., Ottelli L., Ruffini R., Abbrate T., (1993). Carta Geologica del Distretto Vulcanico Cenozoico del Sulcis (Scala 1:50.000).

9 - Tocco S., Marcello A., Mazzella A., Naitza S., Pretti S., Valera P., Valera R., (2008). Carta Metallogenica delle Georisorse della Sardegna (1:250.000)

10 - Carbosulcis, Il Bacino carbonifero del Sulcis: geologia, idrogeologia, miniera, Carbosulcis S.p.A., Rimin S.p.A., Montan Consulting GMBH (1990-91), RIMIN S.p.A, pp. 143

Figura 6: Cartografia geologica del Bacino Carbonifero del Sulcis.

Procedendo dal basso verso l'alto, una sezione stratigrafica generale della zona coperta dall'eruttivo, mostra le seguenti unità litologiche principali¹¹ (Figura 7):

- basamento paleozoico scistoso in trasgressione;
- puddinga basale di 1,5-2 metri fortemente cementata con ciottoli di calcare mesozoico, quarzo, scisto.
- calcari a milioliti con potenza da 4 a 25 m;
- formazione carbonifera (formata da alternanze di calcari, calcari marnosi e marne, argille, scisti e carbone) con potenze complessive da 15 a 140 m;
- arenarie intercalate ad Argille, talora inferiormente tendenti a resti vegetali, dette "Arenarie Produttive", e superiormente senza fossili dette "Arenarie Sterili";
- alternanze di conglomerati e argille con potenze di 25-30 m;
- vulcaniti del complesso trachitico.

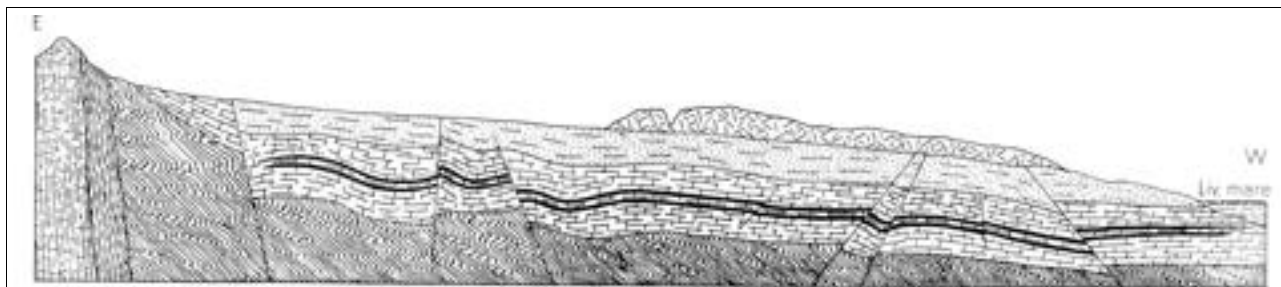


Figura 7: Ricostruzione schematica della stratigrafia del Bacino Carbonifero del Sulcis¹².

Inquadramento Tettonico-Strutturale

Dal punto di vista strutturale, l'area risulta interessata da una serie di fratture a carattere regionale con direzione prevalente NO-SE, NE-SO e subordinatamente E-O ricollegabili agli eventi tettonici che hanno interessato la Sardegna meridionale a partire dal Miocene e fino al Quaternario. Per effetto di questi sistemi di fratture il giacimento risulta strutturato in blocchi indipendenti sia dal punto di vista morfologico che da quello giacimentologico. Questo aspetto, unitamente alle condizioni di variabilità cui è stato sottoposto l'ambiente genetico, ha determinato "un carbone le cui caratteristiche variano oltre che da uno strato all'altro, da zona a zona, e particolarmente procedendo da Nord a Sud"¹³.

Gli studi bibliografici disponibili^{14 15}, individuano un complesso campo di frattura (Figura 8), nel quale sono stati individuati 13 elementi strutturali principali cui è collegata una fitta popolazione di fratture secondarie:

11 - Carta M., Note sulle miniere carbonifere del Sulcis., La Programmazione in Sardegna, Anno 10, Novembre-Dicembre 1976, pp 3-18

12 - Cavinato A., Giacimenti Minerari., UTET, Torino, 1964, pp. 686

13 - Carta M., Del Fa C., Agus M., Carbini P., (1978). Studio di una campionatura del I fascio della miniera di Seruci del bacino carbonifero del Sulcis., Resoconti dell'Associazione Mineraria Sarda, n° 1, pp. 111-169

14 - Valera R., (1966). Iglesias. Il campo di frattura: Relazione Conclusiva. Resoconti dell'Associazione Mineraria Sarda, vol. LXIX, pp. 19-27, ISBN/ISSN: 0376-2130.

15 - Diana G. F., (1985). Contributo alla conoscenza del Bacino Carbonifero del Sulcis: ricostruzione Geo-Strutturale dell'area di Seruci-Nuraxi Figus. Implicazioni e considerazioni sullo sviluppo delle future coltivazioni. Tesi di Laurea in Ingegneria Mineraria, Università degli Studi di Cagliari, relatori Prof. Tocco S., Dott. Ottelli L.

- **Linea di Matoppa**, con direzione E-O. Nella zona di Masua, coincide con l'incisione del canale di Matoppa. La sua prosecuzione orientale si indebolisce nel settore settentrionale di Monte S.Pietro (661 m), oltre il quale esce dalla base topografica.
- **Linea di Nebida**, con direzione N-NNO/S-SSE. Proviene dalla valle di Acquaresi e giunge fino alla zona di Monte Prelau, a NNO di Gonnese
- **Linea di Fontanamare**, parallela alla precedente. Da Fontanamare scende fino a Serra Pirastu (110 m) a ovest di Gonnese. La prosecuzione meridionale di questa frattura non è molto chiara, anche se è certo, sulla base di altri studi condotti in precedenza, che essa continui in direzione per parecchi km. La prosecuzione verso N coincide con l'andamento della costa.
- **Linea di Gonnese**, con direzione ENE-OSO.
- **Linea di S. Giovanni**, con direzione circa NE-SO. Delimita a settentrione il Monte S.Giovanni. Il suo estremo NE si perde nella zona delle discariche di Monteponi.
- **Linea Monte Scorra**, con direzione E-O. Dalla zona di Campumari, giunge fino a Campo Pisano. Il suo estremo occidentale si perde sotto il lembo post-paleozoico di Campumari, che non ne viene dislocato; sulla costa ad ovest di Campumari, si osservano numerose zone di frizione nelle rocce paleozoiche, ma una loro correlazione con la frattura descritta è alquanto problematica. Si deve inoltre tener presente la probabilità che essa venga spostata dalla linea di Nebida. Le soluzioni di continuità sono dovute alla zona delle discariche di Monteponi, e ad un tratto non chiaro negli scisti della Valle di Iglesias.
- **Linea di Monte Scorra II**, vicariante della precedente, con percorso tendenzialmente ONO-ESE. È limitata al settore occidentale dell'area in esame.
- **Linea della Gran Sorgente**, con direzione N-S. Nel settore meridionale, si arresta contro la linea di S.Giovanni. In questa zona, inoltre, presenta una biforcazione, peraltro non del tutto chiara.
- **Linea S.Giorgio**, con direzione ONO-ESE. Dalla zona di S.Giovaneddu, giunge fino alla miniera di S.Giorgio.
- **Linea di Palmari**, con direzione ENE-OSO, ripetutamente dislocata, che va da Iglesias a Monteponi.
- **Linea Canonica**, con direzione NO-SE. Provenendo dalla valle del R.Canonica, si perde sotto le alluvioni del Cixerri a est di Campo Pisano.
- **Linea di Funtana Perda**, da Campo Pisano verso sud
- **Linea del Marganai**, che da Iglesias raggiunge la valle del Corongiu.

Questo complesso sistema strutturale (collegato agli sconvolgimenti tettonici responsabili dell'inarcamento degli orizzonti carbonatici soggetti, di volta in volta, a fenomeni distensivi, compressivi e nuovamente distensivi particolarmente evidenti nelle arenarie) rappresenta la testimonianza più palese degli eventi tettonici a cui quest'area è stata soggetta nel corso delle ere geologiche per effetto dell'alternarsi di fenomeni distensivi, compressivi e nuovamente distensivi.

La presenza di queste fratture nel territorio è, come già evidenziato, la testimonianza più palese degli sconvolgimenti tettonici a cui quest'area è stata soggetta nel corso delle ere geologiche. Tali fenomeni tettonici, com'è ovvio, rappresentano delle zone di debolezza che potrebbero dare luogo a fenomeni di risalita della CO₂.

Per questo motivo la corretta modellizzazione dell'andamento strutturale rappresenta un requisito fondamentale per l'individuazione delle aree idonee (in termini di permeabilità e di compattezza) ad essere utilizzate come serbatoi per la CO₂ e per la progettazione della già citata rete di monitoraggio.

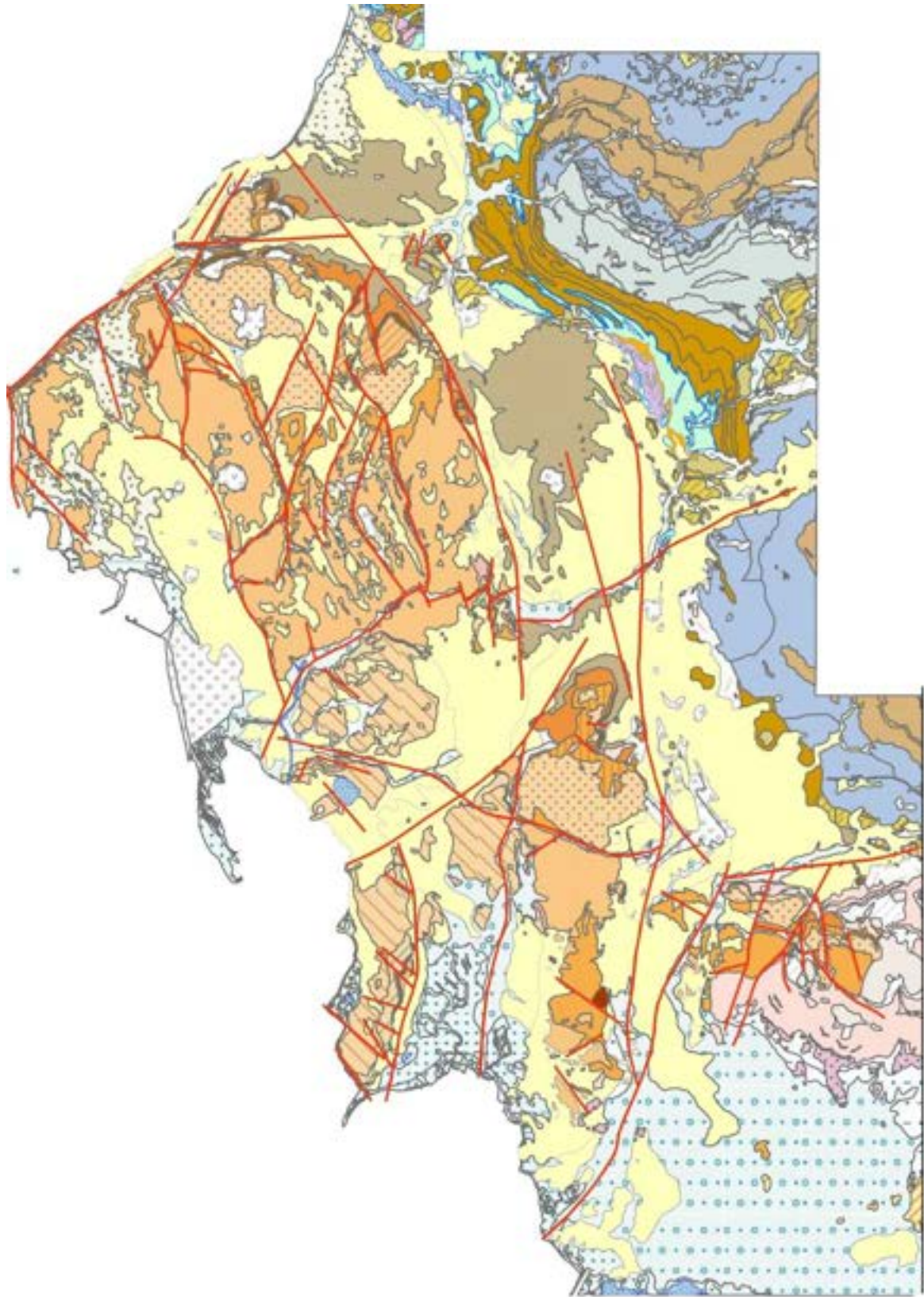


Figura 8: Ricostruzione geologico-strutturale del Bacino Carbonifero del Sulcis.

Inquadramento Giacimentologico

Un qualunque giacimento minerario, e in special modo quelli carboniferi, è inserito in contesti geologici spesso molto complessi, la cui esatta conoscenza diventa assolutamente necessaria per differenti ordini di motivazioni. A partire da quelle legate alla razionale valorizzazione fino a quelle, come in questo caso, legate all'individuazione all'interno del corpo minerario, dell'esistenza di particolari condizioni geologiche, mineralogiche e/o strutturali.

In particolare, lo sfruttamento del corpo minerario del giacimento carbonifero sulcitano per gli scopi della ricerca, non può prescindere dall'analisi di alcune problematiche legate a:

- condizioni petrogenetiche che ne hanno influenzato l'elevato contenuto in S;
- condizioni strutturali, testimoniate dalla presenza di un vasto e complesso campo di fratture, che ha prodotto una suddivisione in blocchi rigettati, piegati, modificati dell'intera formazione mineralizzata.

Tale corpo minerario, ospitato in una sequenza sedimentaria (Paleocene sup.-Oligocene) trasgressiva su terreni mesozoici e chiusa al tetto da una sequenza vulcanica riolitico-ignimbritica (Miocene), mostra una potenza da 40 a 100 m ed è costituito da livelli di carbone raggruppabili in diversi fasci, intercalati in una successione arenaceo-argilloso-marnosa e calcarea (Palocene sup.-Eocene inf.)¹⁶.

Mostra una generale giacitura con immersione a S-SO (con una pendenza media del 10% e profondità crescenti verso il mare di Portovesme a partire da un minimo di 250 m dalla superficie¹⁷), affiorando in modo discontinuo nel settore N-E del bacino e approfondendosi verso SO; in prossimità della costa, nei pressi di Portovesme, è stato incontrato dai sondaggi ad oltre 800m sotto il livello del mare.

Il corpo minerario risulta interessato da una serie di fratture a carattere regionale con direzione prevalente NO-SE, NE-SO e subordinatamente E-O ricollegabili agli eventi tettonici che hanno interessato la Sardegna meridionale a partire dal Miocene e fino al Quaternario. Per effetto di questi sistemi di fratture il giacimento risulta strutturato in blocchi a diversa quota, con generale approfondimento verso ovest.

Il modello genetico, comunemente accettato, prevede la formazione del deposito sulcitano attraverso le seguenti fasi [25]¹⁸:

Dopo una fase continentale in clima arido, caratterizzata dall'accumulo di sedimenti clastici (Permo-Trias) si ha l'ingressione del mare mesozoico con deposizione di orizzonti carbonatici. Segue una fase di continentalità.

Nel Paleocene sup. si ha un'ingressione marina su un paesaggio tettonizzato ed inciso dall'erosione, costituito dal basamento paleozoico pre-ercinico e da quelli carbonatici triassico-giurassici.

L'invasione marina paleocenica, caratterizzata inizialmente da condizioni ottimali di salinità e ossigenazione, tende a formare golfi ed insenature protette che, con l'instaurarsi del regime regressivo a partire dall'Ilerdiano sup., finiscono per assumere condizioni euxiniche ed ipoaline, trasformandosi poi in paludi e lagune.

Per una rottura di equilibrio, dalle foreste costiere presenti nelle zone bordiere o nelle aree già emerse giungono su questi ambienti detriti vegetali (soprattutto foglie, rami, spore, pollini) che danno luogo a spessi

16 - Agus M., Carta M., Delle caratteristiche minero-petrografiche, chimiche e tecnologiche del carbone della miniera Seruci-Nuraxi Figus., Atti della Facoltà di Ingegneria, Vol. 7, Anno IV, n° 2 Ottobre 1976, pp. 73-107

17 - Agus M., Carta M., Delle caratteristiche minero-petrografiche, chimiche e tecnologiche del carbone della miniera Seruci-Nuraxi Figus., Atti della Facoltà di Ingegneria, Vol. 7, Anno IV, n° 2 Ottobre 1976, pp. 73-107

18 - Carbosulcis, Il Bacino carbonifero del Sulcis: geologia, idrogeologia, miniera, Carbosulcis S.p.A., Rimin S.p.A., Montan Consulting GMBH (1990-91), RIMIN S.p.A., pp. 143

depositi di sostanza organica, che si vanno ad accumulare nel bacino subsidente.

Con il procedere della fase erosiva legata ad una tettonica attiva, arrivano dal continente gli apporti dapprima colloidali e microdetritici (argilliti più o meno carboniose, talora siltose) ed infine francamente detritici (arenarie e microconglomerati), che tendono a colmare le lagune e le depressioni morfologiche che si vanno formando.

La subsidenza sempre attiva favorisce l'ingessione di lingue marine entro le zone sempre più depresse che si vanno popolando di microfaune a Miliolidae. Questi livelli si interdigitano più volte entro depositi continentali ricchi in sostanza vegetale.

Nelle aree costiere si instaurano le condizioni più diverse, dipendenti dalla maggiore o minore apertura verso il mare e dall'arrivo o meno di colloidali insieme a nuove soluzioni ioniche.

Dove la vicinanza al mare aperto è più prossima e l'arrivo di detriti minore o nullo, si hanno acque limpide nelle quali riprendono sviluppo le popolazioni oligotipiche. Dove invece si hanno lagune chiuse, isolate dal mare da lingue sabbiose e con apporti esclusivamente continentali di tipo misto, ionico e colloidale, si hanno sedimenti carbonatico-argillosi, ovviamente, secondo il prevalere dell'uno o dell'altra componente sono più o meno marnosi con tendenza verso l'alto al prevalere della frazione carbonatica.

Per una successiva rottura di equilibrio si ripetono le stesse condizioni paleogeografiche ed il ciclo, chiusosi con calcari debolmente marnosi, riprende con sostanze vegetali accompagnate e seguite da detriti finissimi e colloidali.

Con l'esaurimento di tre cicli più o meno completi del tipo descritto si chiude, nel Sulcis, il periodo caratterizzato dalla successione litorale-paralica e ne inizia uno decisamente continentale, che dà luogo alla potente Formazione del Cixerri che costituisce la copertura del corpo minerario.

Inquadramento Mineralogico

Il carbone Sulcis è classificato come sub-bituminoso B/A (ASTM) o "glanzbraunkohle" (DIN)¹⁹, al limite delle ligniti picee. Nella tabella 1 sono riportate le caratteristiche chimiche di alcuni campioni di carbone Sulcis prelevati nel settore settentrionale della concessione mineraria:

	campione 1	campione 2	campione 3	campione 4
	Seruci T.V.	Seruci Granitello	Tipo R	Tipo P
M.V. totali	34,06%	44,76%	40,40%	40,40%
Ceneri	46,12%	12,32%	38,80%	41,80%
S totale	4,50%	7,18%	5,45%	5,47%
S piritico	2,75%	3,30%	1,62%	1,93%
S solfatico	0,05%	0,12%	0,42%	0,43%
S organico	1,70%	3,76%	3,41%	3,11%
CO ₂	n.d.	n.d.	7,50%	10,00%
C totale	39,13%	63,72%	42,60%	37,50%
C organico	n.d.	n.d.	40,55%	34,77%
H	2,90%	4,50%	2,40%	2,20%
N	n.d.	n.d.	0,79%	0,78%
Cl	n.d.	n.d.	0,05%	0,05
Potere Calorifico Superiore [MJ/Kg]	14,19	25,21	16,45	14,96

Macroscopicamente il carbone Sulcis si presenta di colore nero brillante con intercalazioni di strati e lenti a

19 - Agus M., Garbarino C., Solfo organico negli strati di carbone di un foro di sonda del bacino del Sulcis (Sardegna sud-occidentale)., Rendiconti Società Italiana di Mineralogia e Petrologia, Vol. 41, Anno 1986, pp. 69-74

lucentezza variabile (Figura 9); manifesta spesso intensi fenomeni di fratturazione secondo piani di clivaggio ortogonali tra loro e lungo i quali si osservano sottili scaglie di natura carbonatica²⁰.

	Tabella 1: Composizione Carbone Sulcis21	
	Gruppo Vitrinite	71.2 %
	Gruppo Exinite	11.6 %
	Gruppo Inertinite	5.6 %
	Altri Minerali	11.6 %
<i>Figura 9: Campione di Carbone Sulcis.</i>		

Le analisi petrografiche realizzate in passato^{22 23} hanno permesso di individuare i seguenti gruppi macerali:

- Gruppo Vitrinite (Vitrinite [P.R.=0,45-0,54], Telinite, Collinite): il gruppo della vitrinite è sempre presente sia sotto forma di piccoli lenti e piccoli straterelli intercalati agli altri gruppi macerali, sia sotto forma di grosse plaghe interessate da microfratture angolari e concordali. Tra queste si distinguono le tipiche fessure di contrazione quasi sempre presenti nella vitrinite, le cui dimensioni solitamente molto ridotte, possono assumere anche proporzioni considerevoli in seguito ad azioni tettoniche. In quest'ultimo caso si osserva come le fratture rilevate dall'analisi macroscopica si incontrino con le fratture di contrazione, creando numerose ramificazioni e rendendo il carbone estremamente fragile;
- Gruppo Exinite (Cutinite, Resinite, Sporinite, Alginite, Suberinite): i macerali del gruppo exinite sono presenti in letti di spessore variabile in alternanza a letti vitrinitici. Osservando sezioni di carbone tagliate verticalmente rispetto alla stratificazione, le cuticole si presentano con sezioni molto allungate e caratteristiche dentature che formano dei fasci il cui andamento sub-orizzontale subisce spesso dei piegamenti e rotture ricollegabili alle azioni tettoniche subite dal banco di carbone;
- Gruppo Inertinite (Sclerotinite, Micrinite, Semfusinite, Fusinite): i macerali del gruppo inertinite sono caratterizzati da individui a contorni ellissoidali di dimensioni micrometriche che mostrano, al loro interno, una struttura più o meno regolare.

Per ciò che riguarda gli altri minerali presenti, la bibliografia cita:

- la presenza pressoché costante della Pirite (diffusa sia sotto forma di minuscoli cristalli singoli aventi dimensioni comprese tra i 2 ed i 5 micron, sia sotto forma di elementi singoli o associati con

²⁰ - Agus M., Cara S., Garbarino C., Ottelli L., Tocco S., Distribuzione del solfo nei livelli di carbone della I vena del bacino carbonifero terziario del Sulcis (Sardegna SW)., Congresso Internazionale di Geoingegneria Torino, 27-30 Settembre 1989, Vol. 1, pp. 323-329

²¹ - Agus M., Garbarino C., Solfio organico negli strati di carbone di un foro di sonda del bacino del Sulcis (Sardegna sud-occidentale)., Rendiconti Società Italiana di Mineralogia e Petrologia, Vol. 41, Anno 1986, pp. 69-74

²² - M. Carta, Problemi di trattamento e dell'utilizzazione dei carboni con tenore elevato di zolfo ed in particolare del carbone Sulcis., Atti della Facoltà di Ingegneria, Vol. 19, Anno X, n° 2 Ottobre 1982, pp. 243-273

²³ - Agus M., Cara S., Garbarino C., Ottelli L., Tocco S., Distribuzione del solfo nei livelli di carbone della I vena del bacino carbonifero terziario del Sulcis (Sardegna SW)., Congresso Internazionale di Geoingegneria Torino, 27-30 Settembre 1989, Vol. 1, pp. 323-329

dimensioni fino a 200 micron) (Figura 10);

- la presenza abbondante di una fase carbonatica (costituita da calcite e, subordinatamente, dolomite) di riempimento delle microfrazture di contrazione presenti nella fase Vitrinitica (Figura 11);
- la presenza di una fase argillosa (prevalentemente Caolino) sotto forma di sottili letti o come riempimento di celle appartenenti a plaghe inertiniche.
- la presenza subordinata di cristalli di Quarzo, Gesso, Ossidi di Ferro e Fosfati di Calcio.

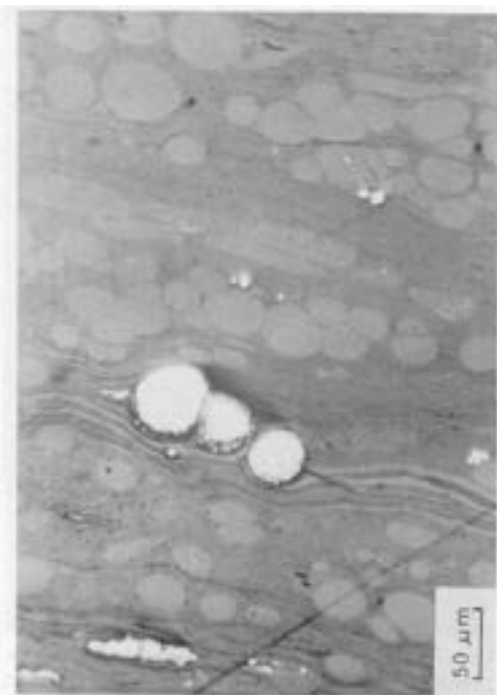


Figura 10: Pirite framboidale (160x).

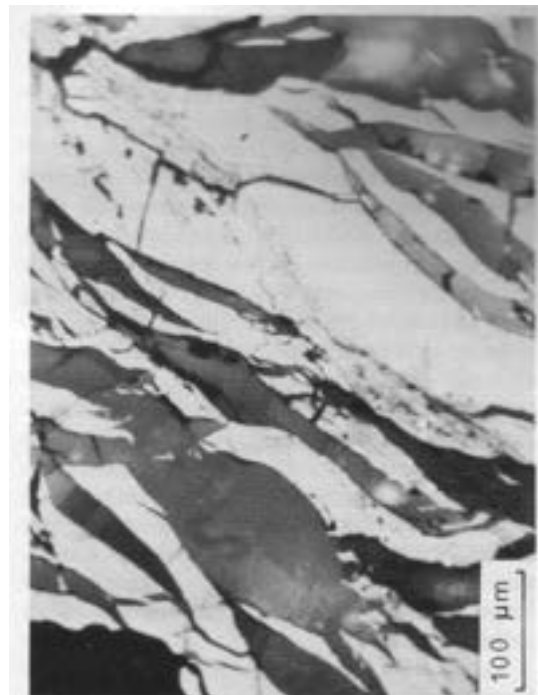


Figura 11: Calcite di riempimento nelle fratture della Vitrinite²⁴.

In relazione a quanto evidenziato precedentemente, risulta evidente come la caratteristica fondamentale del carbone Sulcis sia data dai suoi elevati contenuti in zolfo (S). Il S è un elemento costantemente presente nel carbone la cui presenza, forme e distribuzione dipendono dalla sua genesi e dalle caratteristiche dei paleo-ambienti nei quali è avvenuta la sedimentazione della fase vegetale. In particolare, la bibliografia suggerisce che il S può essere presente in un corpo carbonifero nelle differenti forme di²⁵:

- Zolfo organico, legato al carbonio nei composti organici del carbone;
- S piritico legato nei solfuri inorganici, essenzialmente pirite con marcassite subordinata;
- S Solfatico, in particolare del solfato di Ca, la cui quantità è generalmente trascurabile se il carbone non ha subito processi di ossidazione.
- Zolfo Elementare.

Un aspetto particolarmente importante del bacino del Sulcis risiede nel fatto che la distribuzione dello zolfo dimostra spesso notevoli variazioni sia spazialmente, sia verticalmente, dentro ciascuno strato degli strati carboniferi. Tale variazione è frequente per i giacimenti di origine paralicca, nei quali si ritrovano concentrazioni elevate di pirite spesso nelle zone di tetto e di letto dello strato ed in corrispondenza di

24 - Agus M., Studio petrografico del carbone della miniera di Seruci., Rendiconti Società Italiana di Mineralogia e Petrografia n.38, 1981, pp. 385-404

25 - Agus M., Garbarino C., Solfo organico negli strati di carbone di un foro di sonda del bacino del Sulcis (Sardegna sud-occidentale)., Rendiconti Società Italiana di Mineralogia e Petrologia, Vol. 41, Anno 1986, pp. 69-74

particolari orizzonti, spesso fossiliferi, che corrispondono a sensibili modificazioni del paleo-ambiente originario.

Inquadramento Paesaggistico

Il territorio interessato dal presente studio comprende i comuni di Gonnese, Iglesias, Portoscuso, Carbonia, Calasetta, Sant'Antioco, S.Giovanni Suergiu, Tratalias. Dal punto di vista paesaggistico, l'area giace all'interno della regione dell'Sulcis-Iglesiente.

La vasta regione montuosa dell'Iglesiente ha una forma pressochè triangolare, con limiti orografici piuttosto precisi: la stretta base è costituita dalla depressione del Cixerri, che si prolunga ad occidente con la valle del Flumentepido, mentre gli altri lati sono rappresentati dalla costa e dal margine occidentale del Campidano, che si congiunge al vertice di Capo Frasca nel golfo di Oristano. Tra il mare e la superficie piatta del Campidano si stende un massiccio montuoso vasto e complesso ma abbastanza omogeneo; la costa è, invece, caratterizzata da scogliere e spiagge estese tra cui spicca Piscinas, con le sue famose dune di sabbia, o l'insenatura di Masua che guarda il faraglione calcareo di Pan di Zucchero. Sono però le numerose aree minerarie che caratterizzano il paesaggio e che oggi fanno parte del Parco Geominerario della Sardegna: caratteristici i villaggi minerari di Monteponi, S.Giovanni, Campo Pisano, Nebida e Masua costruiti fin dal XIX secolo per sfruttare le risorse minerarie del bacino metallifero (prevalentemente coltivazioni di piombo e zinco), che conservano ancora oggi i resti dell'attività estrattiva. La storia dell'uomo è testimoniata da numerose emergenze archeologiche storico-artistiche come il nuraghe Domu de s'orcu di Domusnovas, il tempio punico-romano di Antas, le architetture medievali e tardogotiche di Iglesias.

La regione del Sulcis è delimitata da limiti geografici abbastanza precisi: a Nord-Est confina con il Campidano, a Nord-Ovest con la depressione fluviale Flumentepido-Cixerri (che lo distingue dall'Iglesiente) ad Est la dorsale montana che va dal Monte Arcosu al Capo Spartivento; a Sud-Ovest la regione si affaccia con una lunga costa articolata sul mare che bagna le isole di S.Pietro e S.Antioco che hanno gli stessi lineamenti morfologici del Basso Sulcis. Il territorio, frequentato fin dall'epoca preistorica per la ricchezza dei giacimenti minerari, è caratterizzato da una ricca vegetazione di macchia mediterranea (Figura 12). Gli antichi centri di origine agricola (flurriadoxius) o pastorale (medaus) sono frequenti in tutto l'areale. Le ricchezze archeologiche sono numerose: si ricorda la necropoli a demus de janas di Montessu, gli insediamenti fenicio-punici di Bithia, Monte Sirai e Sulci, il complesso culturale di Sant'Antioco. Completano il quadro delle attrattive culturali le chiesette di Perdaxius e di Nuxis, la cattedrale di Tratalias e di Sant'Antioco (Figura 13).

Il sistema urbano del Sulcis-Iglesiente è individuato dal caratteristico edificato sparso che contraddistingue il tipo di popolamento delle campagne risalente alla fine del '700 ed a vocazione pastorale ed agricola.

Oltre agli elementi di particolare pregio storico già elencati, assume particolare rilevanza il bene costituito dalla fascia costiera nel suo insieme. Questa, pur essendo composta da elementi appartenenti a diverse specifiche categorie di beni (le dune, le falesie, gli stagni, i promontori ecc.) costituisce nel suo insieme una risorsa paesaggistica di relevantissimo valore: non solo per il pregio (a volte eccezionale) delle sue singole parti, ma per la superiore, eccezionale qualità che la loro composizione determina.

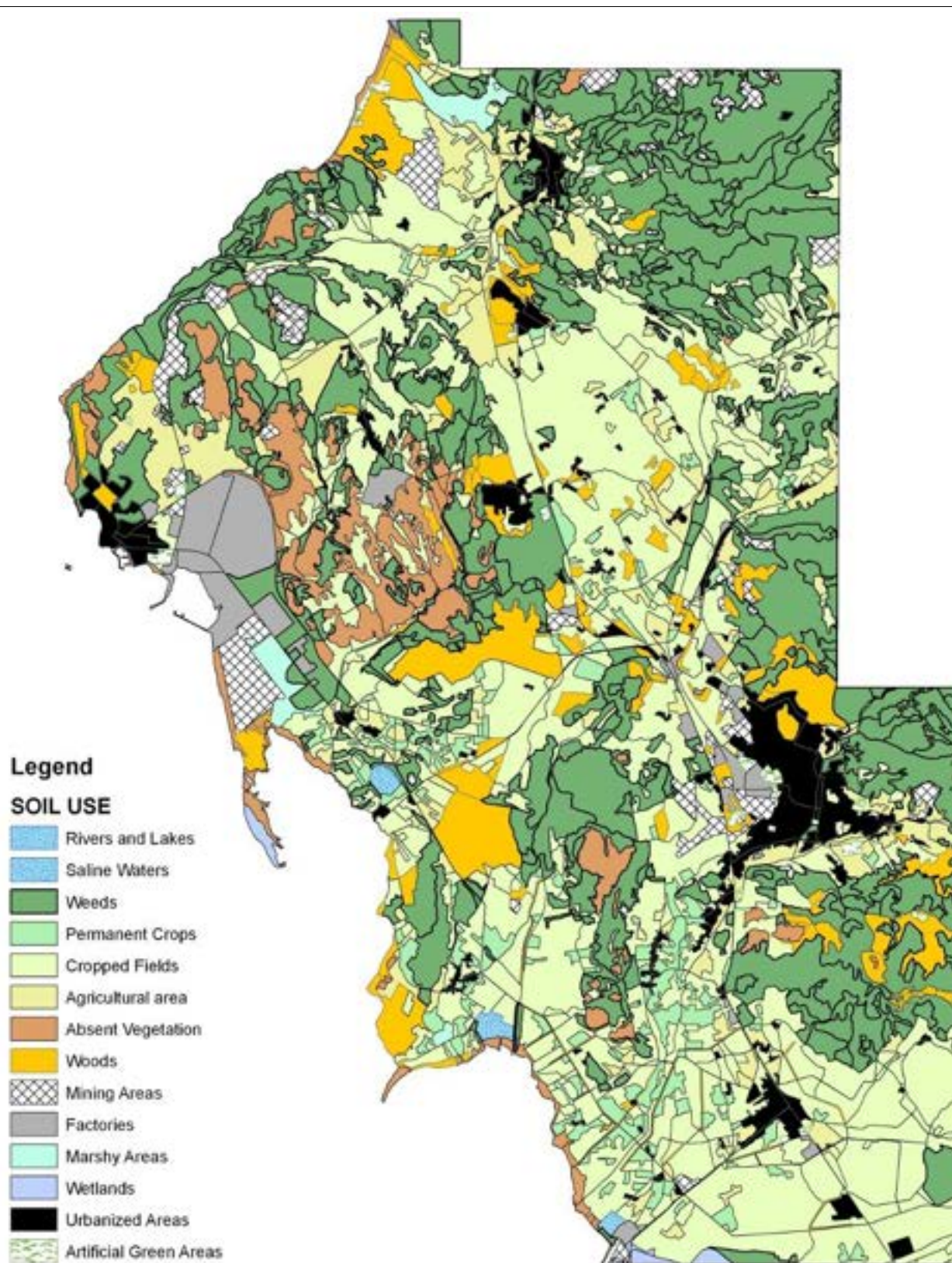


Figura 12: Uso del suolo.

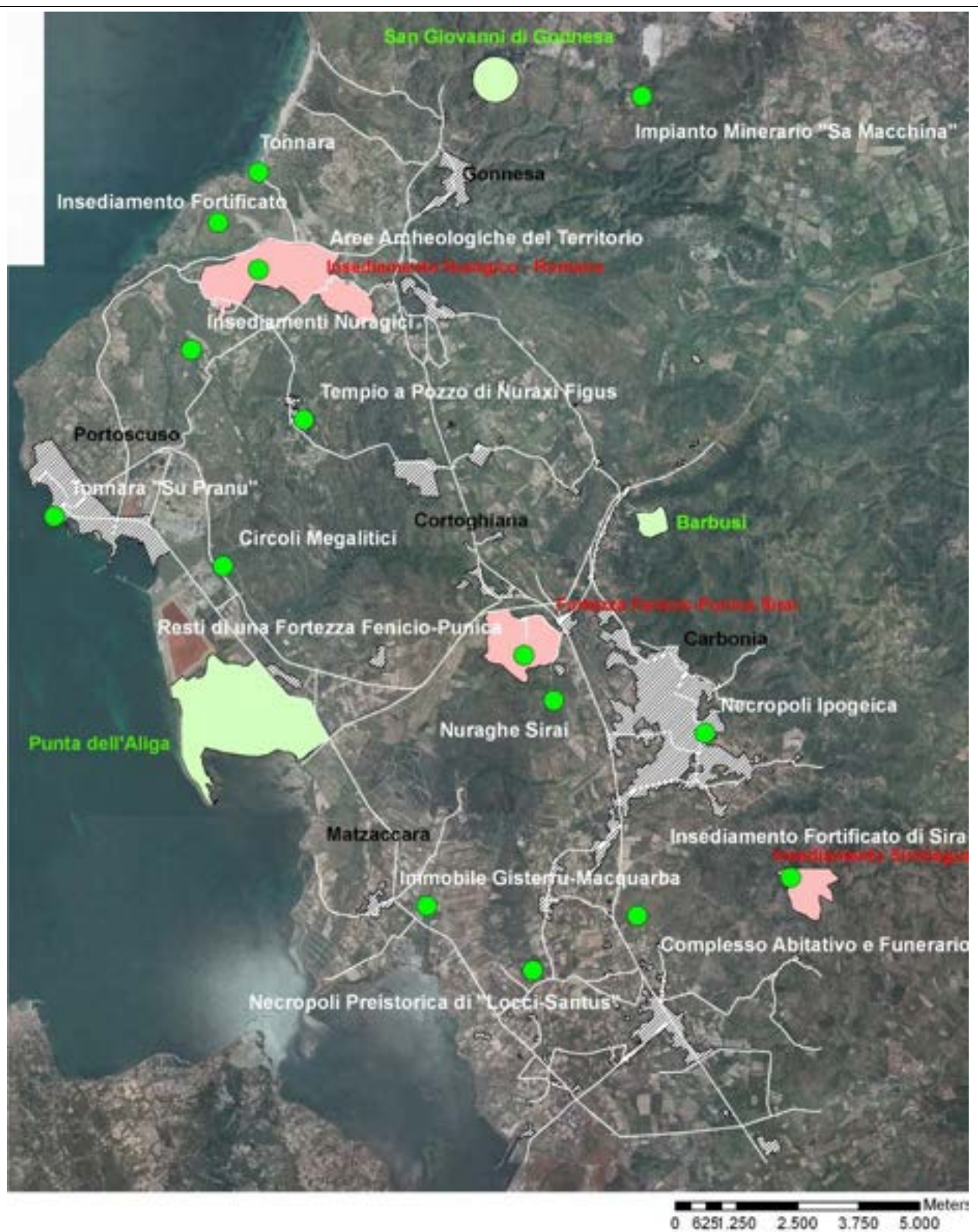


Figura 13: Ubicazione delle principali risorse archeologiche del territorio del Sulcis.

UN GIS-DSS A SUPPORTO DELLA SCELTA DEI DITI IDONEI PER LO STOCCAGGIO DI CO₂.

Le condizioni nelle quali ricorre il giacimento carbonifero del Sulcis rappresentano, per diversi versi, una situazione problematica per la razionale impostazione di un progetto di CO₂-ECMB.

Da un lato le caratteristiche geologiche, tettoniche e strutturali del corpo carbonifero e delle formazioni incassanti, dall'altro l'esistenza di vincoli antropici e paesaggistici, obbligano ad una attenta valutazione perché possa essere perseguito l'optimum dal punto di vista tecnico-economico e, soprattutto, sia tutelata la salute e la sicurezza delle persone e degli ecosistemi direttamente esposti.

Difatti, le zone di frattura da cui il Bacino Sulcitano è percorso, essendo zone di estrema debolezza, influenzano strettamente gli schemi di drenaggio superficiale e profondo e potrebbero rappresentare delle pericolose vie di risalita per i gas iniettati.

Modello Digitale del Sulcis

Partendo dai dati topografici disponibili è stato creato il modello digitale del terreno (DTM) dell'area oggetto del presente studio. I dati di elevazione utilizzati sono quelli provenienti dai punti quotati e dalle curve di livello desunte dalla cartografia tecnica regionale in scala 1:10.000 (Figure 14-15).

La modellizzazione 3D è stata realizzata attraverso la costruzione di un TIN (triangulated irregular network) (Figura 16). I dati satellitari disponibili, unitamente alla copertura delle foto aeree, sono stati utilizzati per costruire un modello del paesaggio (Figura 17), fondamentale per la successiva fase analitiche.

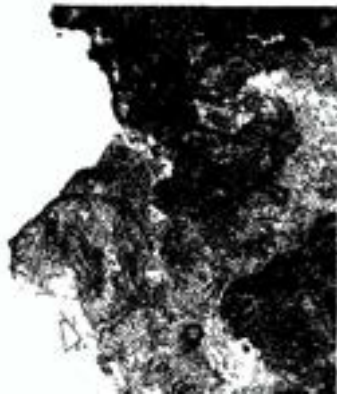


Figura 14: Mosaico curve di livello.



Figura 15: Mosaico punti quotati.



Figura 16: DTM dell'area in esame.

Partendo dal DTM del bacino, si è proceduto alla costruzione della carta delle pendenze e dell'esposizione delle formazioni rocciose (Figura 17).

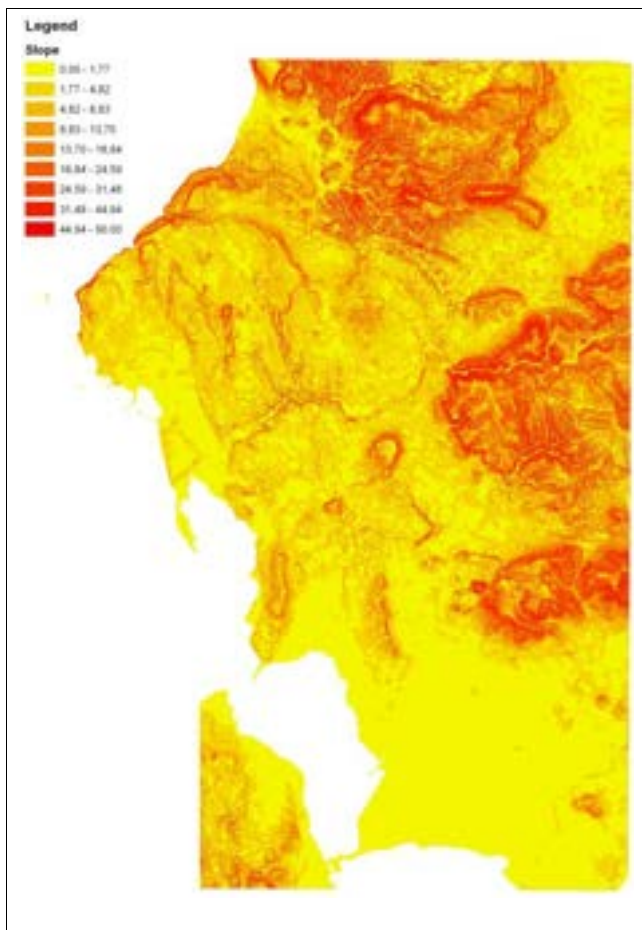


Figura 17: Carta delle pendenze.

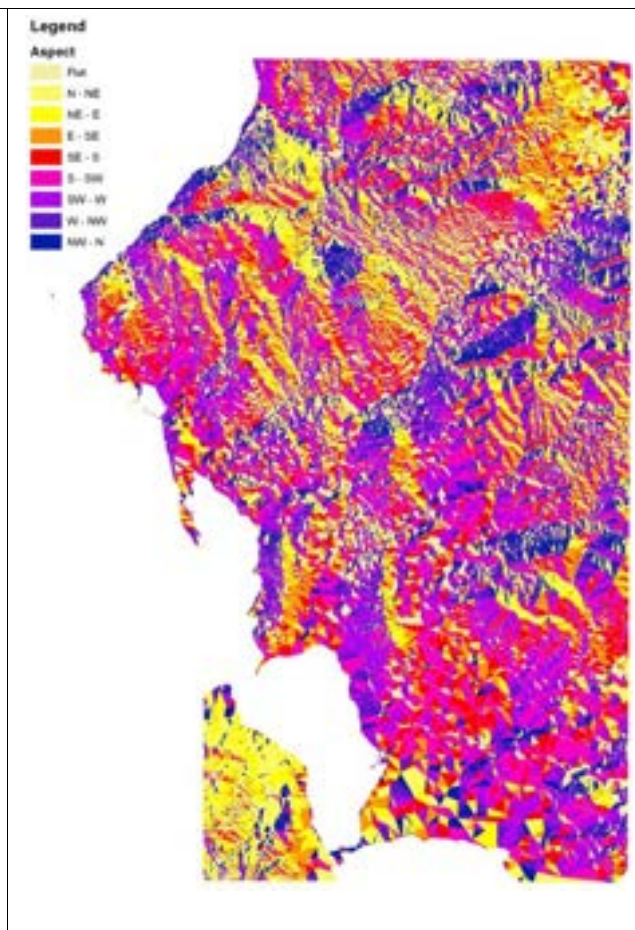


Figura 18: Carta dell'esposizione.

Modello Strutturale del Sulcis

Attraverso l'analisi congiunta della bibliografia disponibile²⁶, della cartografia geologica^{27 28 29 30}, dei dati satellitari e delle foto aeree, si è proceduto alla costruzione di un modello strutturale per l'area del bacino in esame^{31 32} (Figura 19). Tale analisi ha consentito l'identificazione di sotto-domini strutturali nei quali non fossero riconoscibili evidenti strutture tettoniche (Figura 20).

L'identificazione di questi sottodomini costituirà la base per il procedimento di modellizzazione 3D del corpo carbonifero all'interno del bacino sulcitano.

26 - Valera R., (1966). Iglesiasite. Il campo di frattura: Relazione Conclusiva. Resoconti dell'Associazione Mineraria Sarda, vol. LXIX, pp. 19-27, ISBN/ISSN: 0376-2130.

27 - Carbosulcis, Il Bacino carbonifero del Sulcis: geologia, idrogeologia, miniera, Carbosulcis S.p.A., Rimin S.p.A., Montan Consulting GMBH (1990-91), RIMIN S.p.A, pp. 143

28 - Diana G. F., (1985). Contributo alla conoscenza del Bacino Carbonifero del Sulcis: ricostruzione Geo-Strutturale dell'area di Seruci-Nuraxi Figus. Implicazioni e considerazioni sullo sviluppo delle future coltivazioni. Tesi di Laurea in Ingegneria Mineraria, Università degli Studi di Cagliari, relatori Prof. Tocco S., Dott. Ottelli L.

29 - Tocco S., Marcello A., Mazzella A., Naitza S., Pretti S., Valera P., Valera R., (2008). Carta Metallogenica delle Georisorse della Sardegna (1:250.000)

30 - Assorgia A., Brotzu P., Callegari E., Fadda A., Lonis R., Ottelli L., Ruffini R., Abbrate T., (1993). Carta Geologica del Distretto Vulcanico Cenozoico del Sulcis (Scala 1:50.000).

31 - Mazzella A., (2009) L'utilizzo di tecnologie GIS per la ricostruzione tridimensionale di corpi geologici profondi: il caso del Bacino Carbonifero del Sulcis (Sardegna SW). Resoconti dell'Associazione Mineraria Sarda. Iglesias, vol. CXII/CXIII, pp. 87-95, ISBN/ISSN: 0376-2130.

32 - Mazzella A., Mazzella A., (2010). A combination of TIN meshing, geometric extrapolation and linear interpolation for deep ore bodies modeling: case of Sulcis Coal Basin (Sardinia, Italy). Proceedings of IAMG 2010, Budapest 28 August-2 September 2010, pp.



Figura 19: Procedimento di ricostruzione delle strutture tettoniche.



Figura 20: Individuazione dei domini strutturali.

Modello 3D del “Produttivo”

La procedura di modellizzazione del Produttivo è basata sui dati dei sondaggi eseguiti nell'arco degli ultimi 30 anni dalla Società Carbosulcis SpA, titolare della concessione mineraria all'interno del bacino ³³.

Per poter costruire il modello 3D del giacimento minerario, si è resa necessaria una preventiva fase di ricerca e riordino dei dati; successivamente si è proceduto all'importazione dei dati all'interno dell'ambiente GIS (Gauss-Boaga Roma40 Fuso 1) ed alla creazione di un DB per la memorizzazione e la gestione degli attributi dei 122 sondaggi disponibili.

Per ciascun sondaggio disponibile sono stati registrati **(Figura 21)**:

- tutte le informazioni relative alla localizzazione plano-altimetrica dell'intestazione del foro di sonda (espresse in EPSG: 3003);
- l'identificazione del sondaggio attraverso il codice numerico definito da Carbosulcis SpA;
- l'anno di esecuzione del foro;
- la profondità del tetto della formazione “Produttiva”;

33 - Diana G. F., (1985). Contributo alla conoscenza del Bacino Carbonifero del Sulcis: ricostruzione Geo-Strutturale dell'area di Seruci-Nuraxi Figus. Implicazioni e considerazioni sullo sviluppo delle future coltivazioni. Tesi di Laurea in Ingegneria Mineraria, Università degli Studi di Cagliari, relatori Prof. Tocco S., Dott. Ottelli L.

- ove disponibile, la profondità del letto della formazione “Produttiva”.

POINT_X [m]	POINT_Y [m]	POINT_Z [m]	SAMPLE ID [-]	YEAR [-]	TOP [m]	BED [m]
1453545.91	4335881.33	37.87	35'87	1987	-539	-559
1450780.02	4337080.12	32.39	19'82	1982	-501	-576
1452177.86	4337079.08	49.1	22'82	1982	-520	-599

Figura 21: Estratto del DB degli attributi dei sondaggi.

Tale step operativo ha consentito di importare all'interno dell'ambiente GIS tutti i dati disponibili sulle campagne esplorative effettuate all'interno del bacino. Tali dati hanno costituito la base per la successiva fase di modellizzazione 3D.

Le già richiamate caratteristiche strutturali del bacino, indice di evidenti sconvolgimenti tettonici, proibiscono l'utilizzo di una qualunque tecnica di modellizzazione basata su qualsivoglia algoritmo interpolativo pena il perseguimento di pericolosi errori numerici. Questa considerazione ha richiesto lo studio di una tecnica interpolativa *ad hoc* per la modellizzazione del giacimento.

Tale tecnica si basa sulla combinazione di un algoritmo di TIN, uno di estrapolazione geometrica ed uno di interpolazione lineare^{34 35}.

Per ciascuno dei sottodomini strutturali identificato attraverso l'analisi del DTM, delle carte geologiche, delle foto aeree, si è proceduto ad una modellizzazione preliminare attraverso l'applicazione dell'algoritmo di Delauney per la creazione di un TIN (Figura 22). La scelta di tale algoritmo consente il duplice vantaggio di poter definire una rete di triangoli esclusivamente sulla base dei punti misurati (senza alcun tipo di interpolazione) ed, inoltre, l'unicità dei risultati ottenuti. Tale procedimento ha consentito la creazione, per ogni sottodominio strutturale, di un modello morfologico 3D per il tetto ed il letto del giacimento (Figura 23).

34 - Mazzella A., Mazzella A., (2010). A combination of TIN meshing, geometric extrapolation and linear interpolation for deep ore bodies modeling: case of Sulcis Coal Basin (Sardinia, Italy). Proceedings of IAMG 2010, Budapest 28 August-2 September 2010, pp.

35 - Mazzella A., (2009) L'utilizzo di tecnologie GIS per la ricostruzione tridimensionale di corpi geologici profondi: il caso del Bacino Carbonifero del Sulcis (Sardegna SW). Resoconti dell'Associazione Mineraria Sarda. Iglesias, vol. CXII/CXIII, pp. 87-95, ISBN/ISSN: 0376-2130.

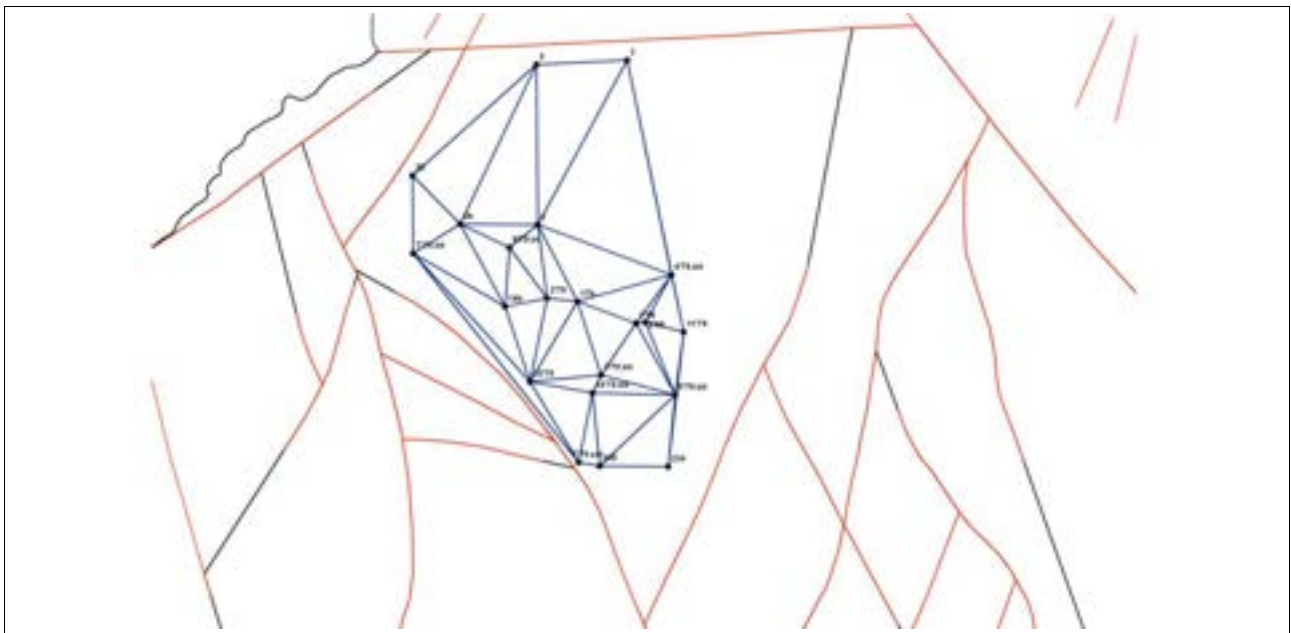


Figura 22: Procedimento di triangolazione di Delauney applicato ai sondaggi.

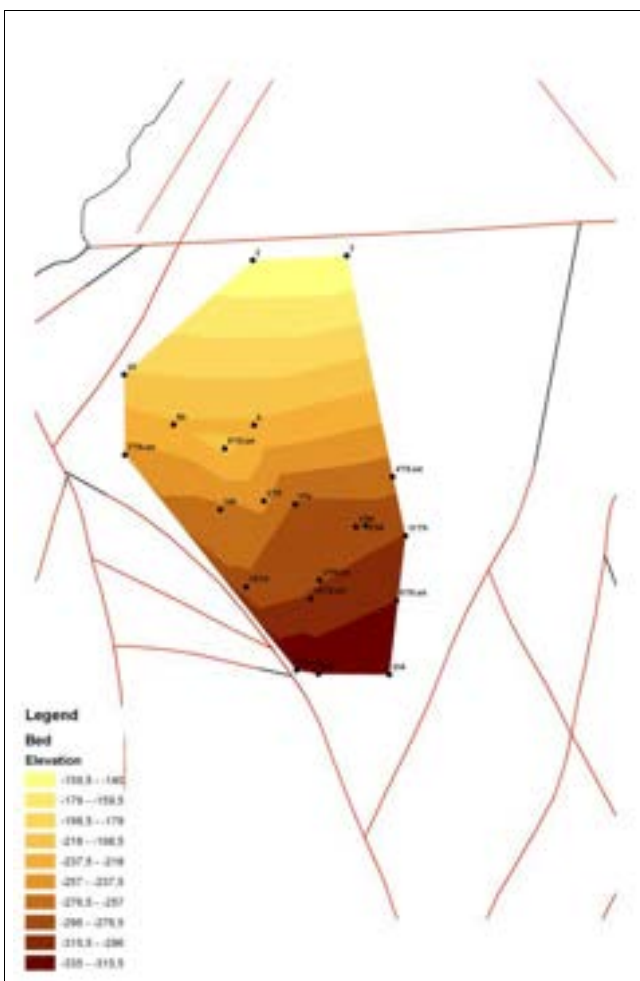


Figura 23: Ricostruzione 3D per il letto del Produttivo nel sottodominio strutturale am_d_04

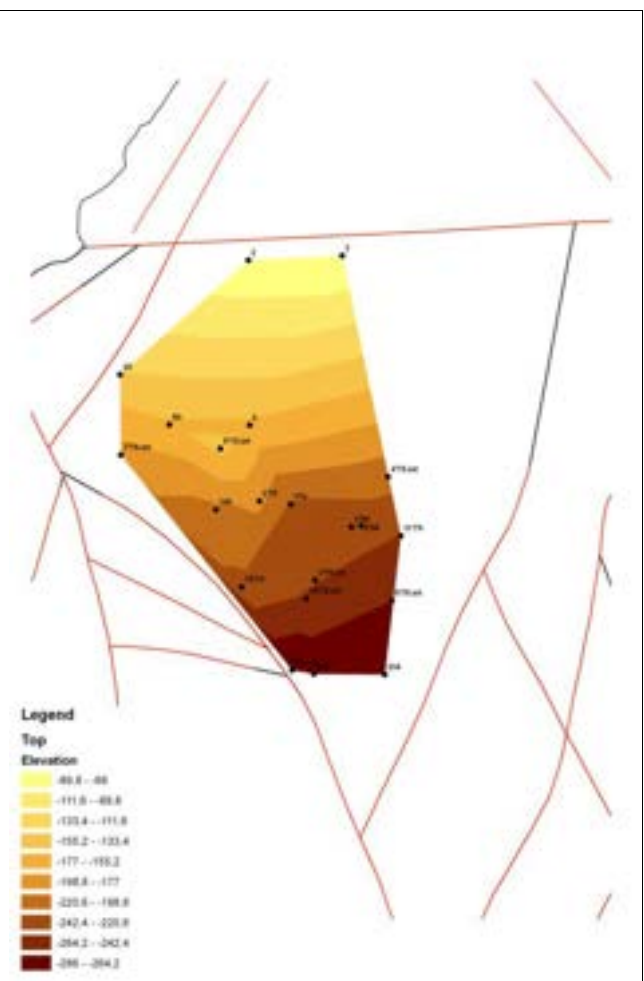


Figura 24: Ricostruzione 3D per il tetto del Produttivo nel sottodominio strutturale am_d_04

Poiché numero e disposizione spaziale dei dati puntuali interni ai sottodomini strutturali non risultano ottimali

per costruire dei prodotti cartografici che ricoprano per intero l'intera estensione del bacino carbonifero, si è deciso di realizzare un infittimento della maglia di campionatura originale.

Per realizzare tale infittimento si è proceduto attraverso l'applicazione di un algoritmo geometrico articolato in diversi step operativi.

Per ogni sottodominio strutturale, si è proceduto all'individuazione dei lati del TIN idonei per l'applicazione della procedura di infittimento geometrico della maglia reale scegliendo quei lati i cui prolungamenti non intersecassero nessun altro lato del TIN stesso.

Per ciascun lato così individuato, si è proceduto al suo prolungamento fino all'intersezione con il bordo del sottodominio (Figura 24). Ciascun punto determinato dall'intersezione tra il prolungamento del lato considerato ed il confine del sottodominio in studio è andato a costituire un punto di infittimento della maglia di campionatura reale. Nei punti determinati attraverso la procedura descritta, il valore di profondità del tetto del "Produttivo" è stato calcolato attraverso l'estrapolazione lineare dei valori di profondità misurati nei punti reali giacenti sulla medesima semiretta (Figura 25) mediante l'equazione:

$$Z_{k+1} = \frac{Z_k - Z_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} (x_{k+1} - x_{k-1}) + Z_{k-1}$$

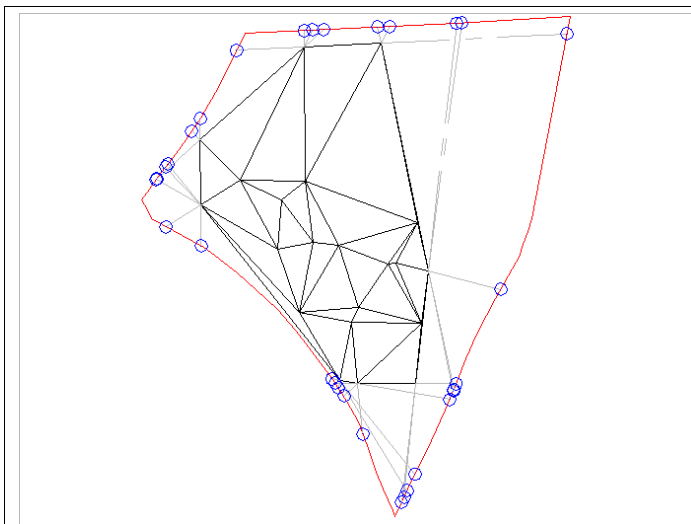


Figura 25: Procedimento di infittimento geometrico del TIN originale.

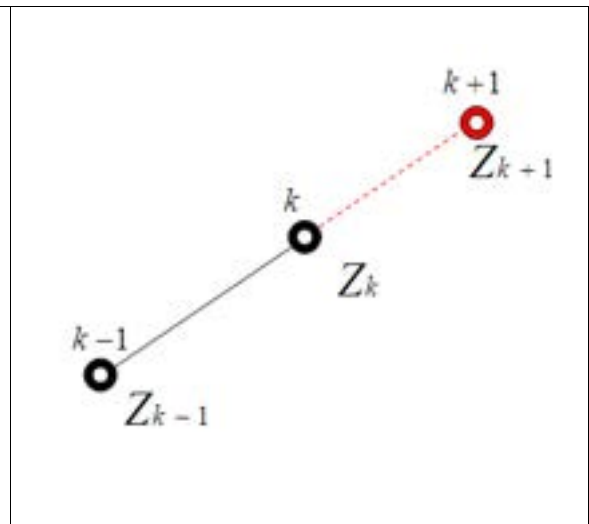


Figura 26: Rappresentazione schematica del procedimento di estrapolazione geometrica applicato.

L'operazione di infittimento per estrapolazione lineare, applicata a tutti i sottodomini spaziali, ha consentito di accrescere la maglia di campionatura reale costituita da 122 punti validi fino ad ottenere un totale di 272 dati puntuali (tra punti reali e punti calcolati) (Figura 27). La qualità dei risultati ottenuti attraverso l'algoritmo di estrapolazione lineare, valutata sulla base del confronto tra dati estrapolati e valori reali vicini, unitamente allo scopo del presente lavoro, che mira alla presentazione di una tecnica di ricostruzione 3D per corpi geologici profondi, rende lecita la successiva fase di interpolazione nonostante il basso numero di dati disponibili.

in un precedente studio³⁶ l'autore ha già dimostrato la validità dell'interpolazione lineare in campo

topografico (relativamente al caso dell'interpolazione di dati altimetrici) ed evidenziato come questa tecnica sia in grado di fornire, in maniera semplice e rapida, dei risultati confrontabili con quelli ottenibili con le altre comuni tecniche di interpolazione (ad esempio il kriging e l'IDW).

DOMAIN [-]	AREA [km2]	PERIMETER [km2]	X_CENTROID [m]	Y_CENTROID [m]	Z_CENTROID [m]	SAMPLES [-]	SAMPLE DENSITY [sample/km2]
am_d_01	0.290	4.437	1447903.61	4344509.59	48.49		
am_d_02	0.438	3.101	1448359.27	4344438.45	130.00		
am_d_03	0.363	3.044	1447979.05	4343769.87	150.96		
am_d_04	5.399	10.089	1449765.17	4343819.26	149.85	59	10.927
am_d_05	1.530	5.953	1448084.35	4342229.91	88.18		
am_d_06	0.297	3.199	1448736.19	4343204.11	156.91		
am_d_08	1.558	6.605	1451192.70	4343893.90	143.00	26	16.693
am_d_09	2.433	12.726	1452292.89	4341389.05	107.54	27	11.098
am_d_10	5.344	13.089	1452974.07	4341578.91	121.44		
am_d_11	7.289	14.747	1448201.67	4339844.43	14.50		
am_d_12	3.677	8.545	1449378.31	4341179.20	76.88	40	10.877
am_d_13	1.415	5.834	1450477.28	4341880.17	143.37	37	26.152
am_d_14	0.525	3.616	1451358.26	4342319.37	109.43		
am_d_15	1.097	5.838	1450899.90	4340983.24	96.73	25	22.791
am_d_16	2.502	9.546	1451582.35	4339973.00	60.00	28	11.191
am_d_17	2.064	7.319	1452152.82	4340108.75	70.95	30	14.538
am_d_18	0.760	3.928	1449920.75	4339415.51	40.00		
am_d_19	1.232	6.545	1450707.72	4339159.83	71.56		
am_d_20	1.305	5.926	1450340.29	4338061.74	31.30		
am_d_21	2.678	8.903	1451446.00	4336389.85	33.58		
am_d_22	6.808	11.353	1452897.26	4337236.67	51.01		
am_d_23	1.764	7.109	1455039.06	4337651.73	67.87		

Figura 27: Tabella riepilogativa delle caratteristiche dei sottodomini strutturali.

A questo punto, attraverso una nuova applicazione dell'algoritmo di Delauney, si è proceduto alla creazione di un modello 3D per il tetto e per il letto del giacimento in ciascuno dei sottodomini strutturali identificati (Figura 28-29).

Lo step operativo conclusivo è stato operare, per ciascuno dei sottodomini strutturali, una estrapolazione tra la superficie geometrica modellizzata per il tetto e quella del letto (Figura 30-31).

A questo punto, noto in ogni punto interno ai domini modellizzati, il valore della profondità del tetto e del letto del Produttivo, è stato possibile creare il modello della potenza dello stesso (Figura 32).

Per estendere la modellizzazione 3D della morfologia e della potenza dello strato "Produttivo" anche ai sottodomini strutturali per i quali non fossero disponibili dati puntuali sufficienti, si è proceduto alla realizzazione di uno studio geostatistico dei dati modellizzati. Dapprima è stato calcolato il semivariogramma sperimentale dei dati di profondità del tetto e del letto dello strato "Produttivo". L'applicazione dell'algoritmo di kriging ai dati disponibili, utilizzando i parametri di variabilità (*sill, range, nugget effect*)³⁷ definiti dalla precedente analisi variografica, si è ottenuto un modello 3D valido per l'intero bacino sulcitano (Figura 33-34-35).

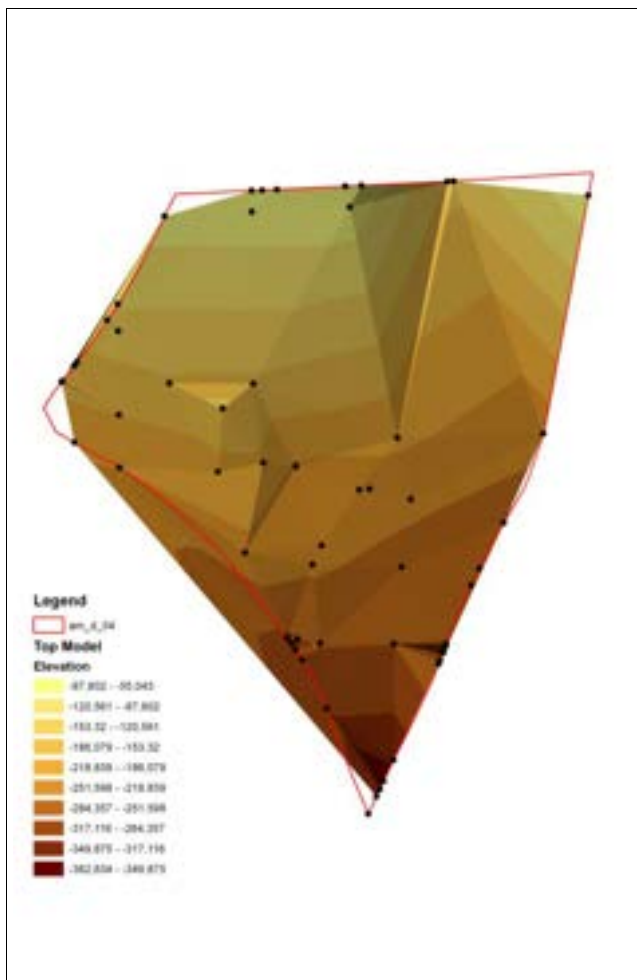


Figura 28: Esempio di modellizzazione 3D del tetto del giacimento nel sottodominio strutturale am_d_04.

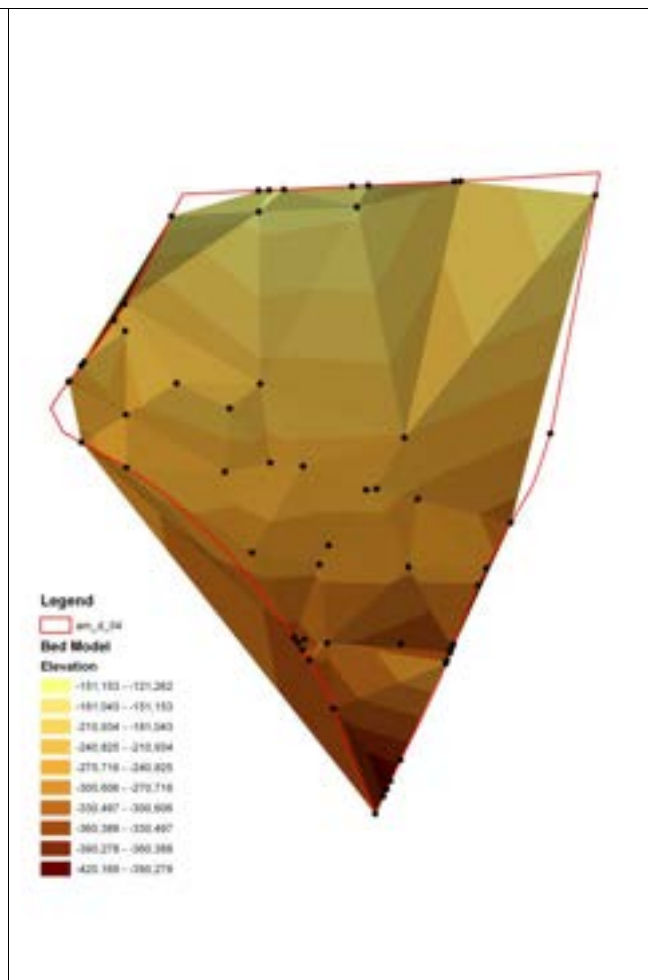


Figura 29: Esempio di modellizzazione 3D del letto del giacimento nel sottodominio strutturale am_d_04.

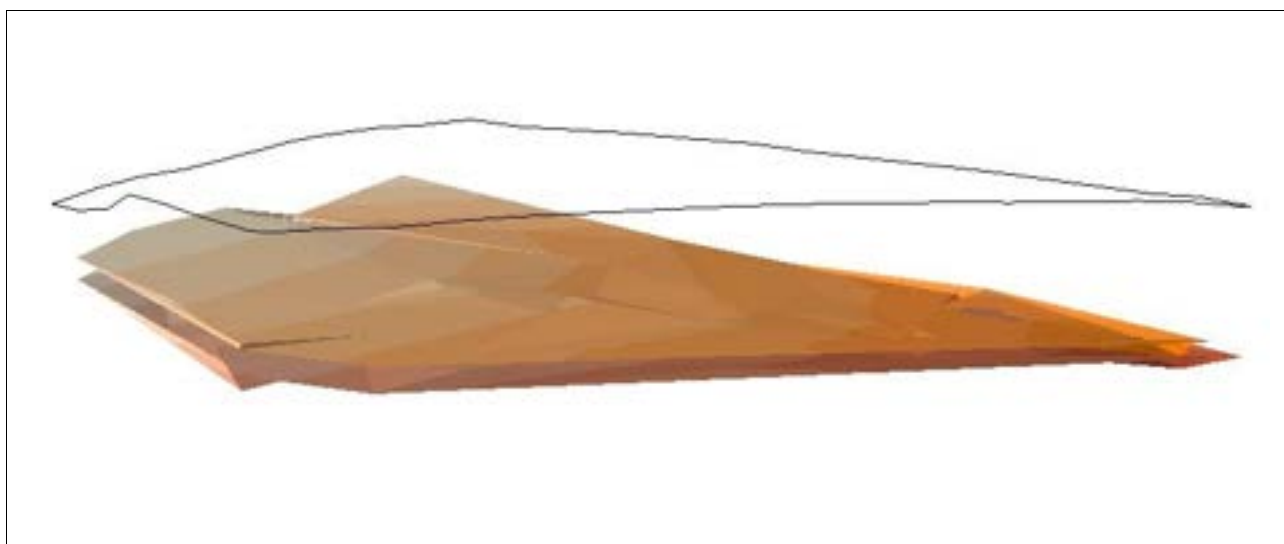


Figura 30: Rappresentazione 3D del risultato delle modellazione del tetto e del letto del Produttivo.

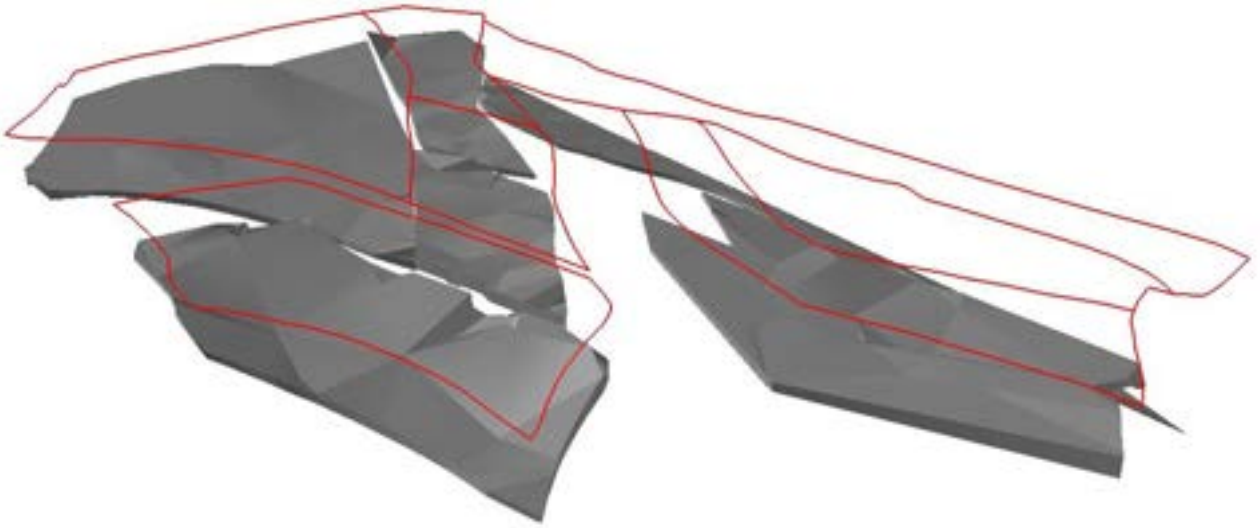


Figura 31: Rappresentazione 3D del risultato della modellizzazione ottenuta attraverso la procedura descritta.

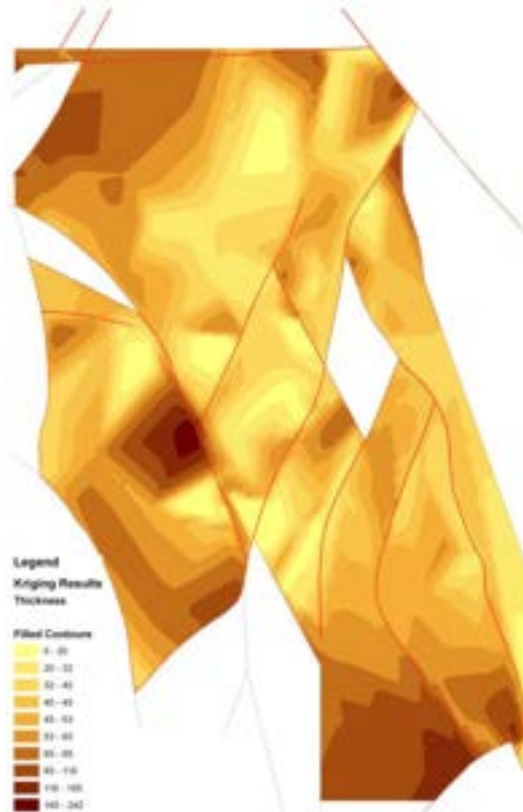


Figura 32: Rappresentazione 3D del risultato della modellizzazione ottenuta attraverso la procedura descritta.

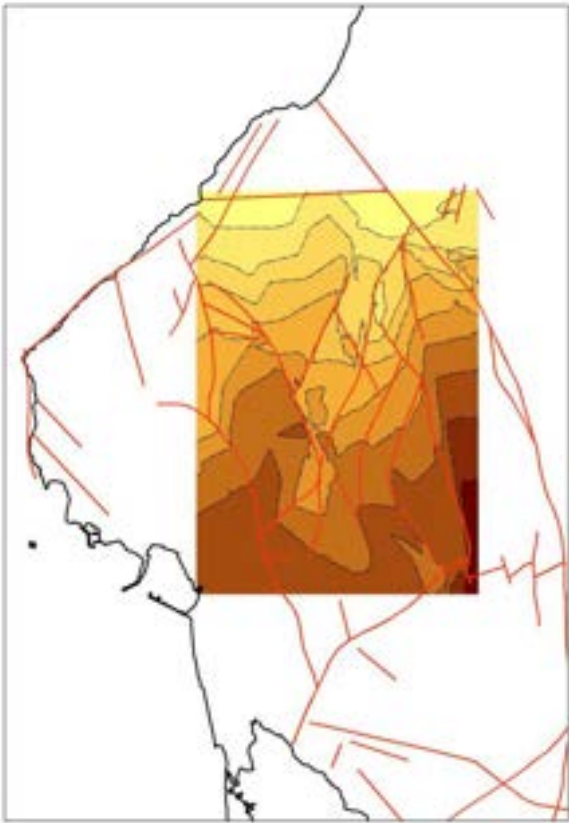


Figura 33: Risultato modellizzazione 3D per il tetto del Produttivo.

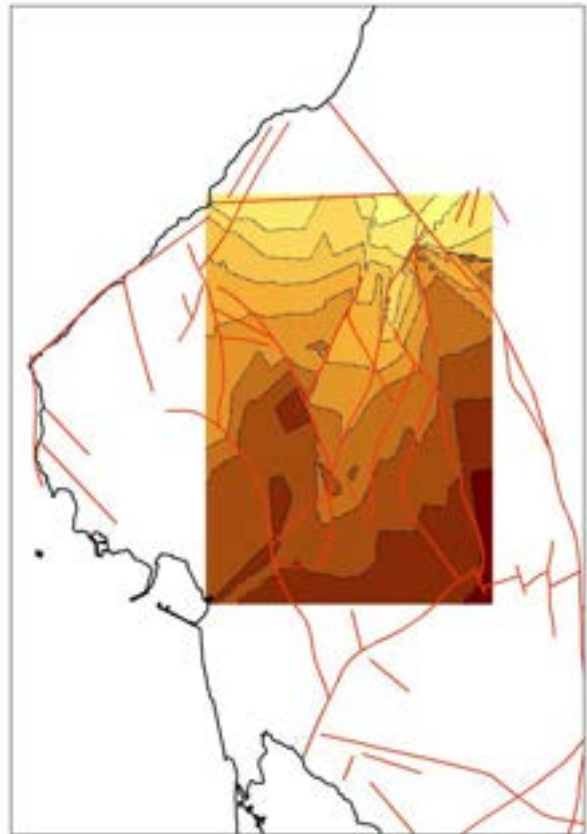


Figura 34: Risultato modellizzazione 3D per il letto del Produttivo.

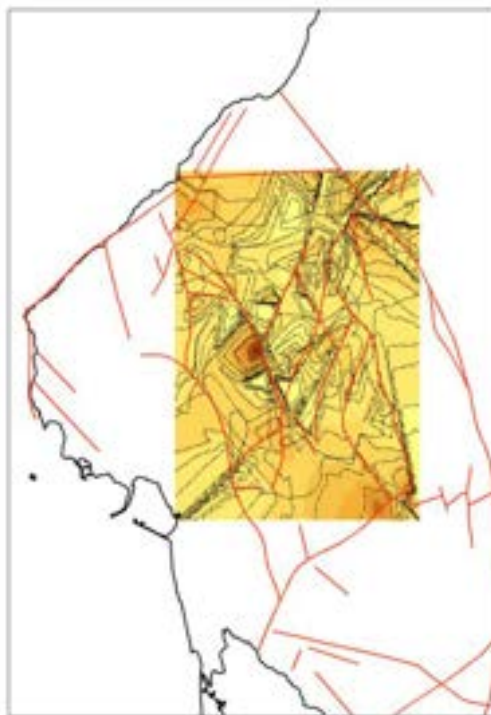


Figura 35: Risultato modellizzazione 3D per la potenza del Produttivo.

Processing dei dati

La fase del *data processing* rappresenta lo step operativo di maggiore importanza nella costruzione di un Sistema di Supporto alle Decisioni. Tale fase comprende in particolare:

- il complesso di operazioni che, su diversi livelli, devono essere compiute sui dati (dalla classificazione, all'elaborazione finale passando per le necessarie fasi di analisi, trattamento, unione, integrazione, interrogazione, ecc...);
- l'intero complesso di operazioni per la preparazione dei dati spaziali per le successive analisi attraverso, ad esempio, la loro conversione in un formato unico che possa essere processato dal software scelto;
- un complicato processo decisionale basato su analisi e valutazione dei dati.

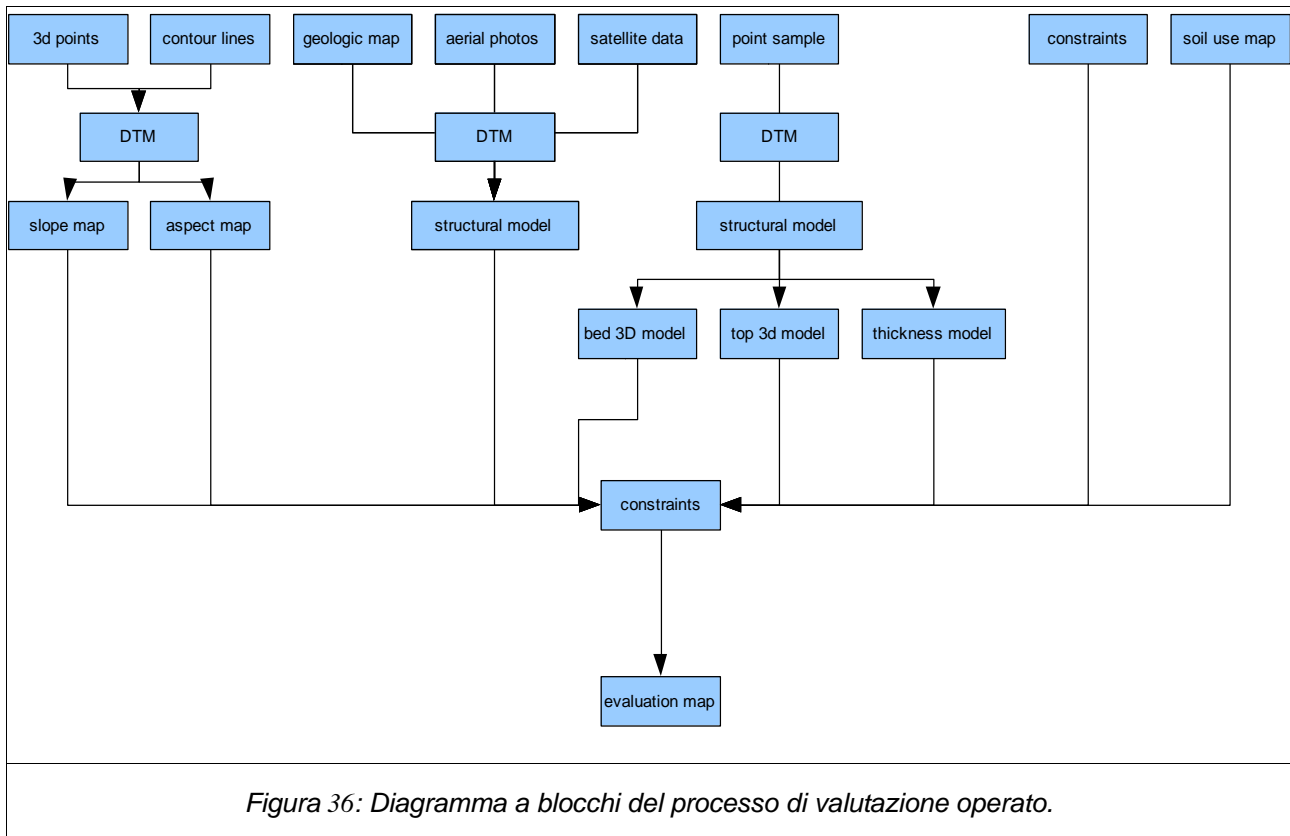
La maggior parte dei problemi relativi alla progettazione ed alla gestione del territorio necessitano di metodologie decisionali che siano a criteri multipli e basate su sistemi di informazione geografici (GIS).

Queste due distinte aree di ricerca, GIS ed analisi a criteri multipli AMC, possono beneficiare una dell'altra : da un lato infatti le tecniche GIS rivestono un ruolo importante nell'analizzare una grande varietà di dati necessari per il processo di decisione, dall'altro le metodologie di AMC offrono procedure capaci di elaborare e modellare le preferenze dei decisori incorporando il processo decisionale all'interno di un sistema geografico.

Nonostante il fatto che la maggior parte dei problemi di decisione spaziale sia multicriteri in natura dal momento che coinvolge varie dimensioni quali quella economica, sociale, ambientale e politica con interessi spesso in conflitto fra loro, le tecniche di decision making a criteri multipli sono state solo recentemente inserite ed integrate nel campo dell'analisi spaziale pervenendo al concetto di sistemi decisionali multicriteri spaziali o basati su GIS.

Le motivazioni esposte hanno suggerito lo sviluppo di un sistema informatico intelligente in grado di coadiuvare il Decision Maker nel processo di identificazione di aree idonee allo stoccaggio geologico di CO₂ all'interno del bacino carbonifero del Sulcis-Iglesiente. Per questo motivo il *data processing* è stato implementato mediante il **Model Builder di ArcGis 9.3**.

Nella **Figura 36** è schematicamente riportato il diagramma a blocchi del processo di valutazione multi-criteria adottato per quantificare l'idoneità/non-idoneità delle bacino carbonifero del Sulcis-Iglesiente ad ospitare un progetto di CO₂-ECBM al proprio interno sulla base dei tematismi indicati nelle pagine precedenti.



Attraverso il **Model Builder** di **ArcGis** è possibile realizzare valutazioni multi-criteria attraverso due differenti metodologie³⁸:

- la prima definita “Binary Analysis”;
- la seconda tramite detta “Weighted Overlay Analysis”.

L’analisi multicriteria MCDA (Multi Criteria Decision Aid) è una procedura di comparazione a criteri multipli che ha come scopo quello di contribuire allo sviluppo di un processo di apprendimento che alimenta lo stesso processo decisionale³⁹. Si tratta quindi di un metodo non monetario per esaminare la convenienza di progetti di investimento caratterizzati da un rilevante impatto di tipo ambientale, sociale ed economico nel contesto in cui vengono realizzati. La particolarità dell’analisi multicriteri consiste nella formulazione di un giudizio di convenienza di un intervento in funzione di più criteri di riferimento, esaminati in maniera autonoma o interattiva. A differenza dell’Analisi Costi Benefici ACB, tecnica di valutazione monocriteriale che esprime il giudizio di convenienza in funzione del solo criterio monetario, l’analisi multicriteri AMC cerca di razionalizzare il processo di scelta del *Decision Maker* attraverso l’ottimizzazione di un vettore di più criteri, pesati secondo le priorità da questo dichiarate.

In questo modo si possono abbracciare in un unico procedimento valutativo sia i criteri di carattere economico, monetizzabili, sia i criteri extra economici misurabili solo in termini fisici o qualitativi e si offre una griglia metodologica più realistica grazie anche al contributo apportato da settori di ricerca di recente sviluppo quali la teoria degli insiemi, l’algebra matriciale, la ricerca operativa, l’informatica.

38 - <http://webhelp.esri.com> dated 06/12/2007

39 - Las Casas G. (1992). Geographical Information System e valutazione del paesaggio sub urbano. In: G. De Plano (a cura di) La gestione delle risorse ambientali nel progetto metropolitano. (Quaderni di Ricerca 8). Cagliari, Istituto di Urbanistica della Facoltà di Ingegneria di Cagliari: 151-178.

Analisi Multi-Criteria BINARY ANALYSIS

Il processo di Binary Analysis consente una valutazione di idoneità di ciascun criterio attraverso i singoli valori (1) per definirne l'idoneità e lo (0) per definirne la non-idoneità. La valutazione finale viene effettuata attraverso l'utilizzo delle funzioni di **map algebra** attraverso l'operatore booleano **AND**. Il risultato finale di questo tipo di valutazione è rappresentato da un indice che può assumere valori compresi nell'intervallo 0-1. Gli svantaggi di questo tipo di approccio sono rappresentati prevalentemente dal fatto che tutti i criteri di valutazione risultano avere la stessa importanza ai fini della valutazione e che, per come è strutturato l'algoritmo binario, non esiste niente al di fuori del valore di idoneità (1) e non-idoneità (0).

Analisi Multi-Criteria WEIGHTED OVERLAY ANALYSIS

La Weighted Overlay Analysis è, invece, una tecnica che consente, attraverso l'applicazione di una scala numerica di valutazione a differenti criteri di input, un'analisi integrata più approfondita. La WOA risulta più completa sia perchè consente l'utilizzo di una scala di valutazione continua (compresa tra un minimo, convenzionalmente il valore 0 o un valore negativo, ed un massimo), sia perchè permette di attribuire dei fattori di ponderazione di ciascuno dei criteri che ne riflettono l'importanza relativa rispetto agli altri. Questo tipo di analisi, quindi, risulta più efficace laddove i criteri di valutazione non hanno la medesima influenza all'interno del processo valutativo. Lo scopo della pesatura dei criteri è quello di esprimere l'importanza di ciascun criterio di valutazione in riferimento all'importanza degli altri: i criteri di valutazione più importanti avranno, infatti, un peso maggiore nella valutazione globale che verrà effettuata, rispetto al peso di quelli meno influenti. In questo contesto lo strumento GIS, completo degli strumenti per le analisi multi-criteria, diviene l'interfaccia tra la tecnologia ed il *Decision Maker*.

Appare evidente quindi che, in questo tipo di analisi, l'elemento critico è rappresentato, più che dalla definizione dei singoli valori di idoneità, dalla fase di scelta dei coefficienti di ponderazione di ciascuno dei criteri. Per ridurre gli eventuali errori prodotti dalla soggettività nella scelta delle scale di valutazione e dei coefficienti di ponderazione, nel presente studio sono state condotte tre differenti analisi utilizzando tre diverse strategie valutative.

Un GIS-DSS a supporto della scelta dei siti idonei per lo stoccaggio di CO₂.

Tutti i dati e le informazioni disponibili sono confluiti all'interno del **Model Builder** di **ArcGIS 9.3**. Il processo valutativo realizzato attraverso un'analisi multicriteria realizzata attraverso il procedimento WOP ha prodotto mappe di valutazione combinando, attraverso appositi coefficienti di ponderazione stabiliti durante la fase di realizzazione del GIS-DSS (ma modificabili in qualsiasi momento per tenere conto della soggettività dell'utilizzatore) l'influenza di ciascun layer di input.

La scala di valori di idoneità (su base 0-5) utilizzata da questa versione beta del GIS-DSS è riportata nella **Tabella 3**⁴⁰.

Combinando le informazioni esplicitate in Tabella 3, il valore di idoneità (S) di ciascuna delle i celle interne al bacino sulcitano è definita attraverso l'**Equazione 2**:

40 - R. Ciccu, P. Deiana, A. Mazzella, C. Tilocca, A GIS-DSS for a CO₂-ECMB project feasibility study: case of Sulcis Coal Basin (Sardinia, Italy)

$$S = \frac{\sum_1^n w_i * V_i}{\sum_1^n w_i} \quad (2)$$

dove:

- w_i rappresenta il coefficiente di ponderazione relativo all'i-esimo tema di input (cfr. **Tabella 3**);
- V_i rappresenta il valore di idoneità della cella considerata nell'i-esimo tema di input.

Tabella 3: Suitability levels for different factors for identifying potential sites for CO2-ECBM

	influence	1	2	3	4	5
coal body depth	HIGH	0 – -25	-25 – -100	-100 – -200	-200 – -400	-400 – -800
coal body thickness	HIGH	0 – 25	25 – 50	50 – 100	100 – 150	150 – 250
main faults distance	HIGH	0 – 50		50 – 100		100 – 200
environmental constraints	HIGH	protected areas	-	-	-	free areas
geology	MEDIUM	sedimentary deposits	weathered sedimentary rocks	strong sedimentary rocks	metamorphic rocks	magmatic rocks
soil use	MEDIUM	urbanized areas, mining areas, wetlands,...	agricultural fields (permanent crops)	agricultural fields (not permanent crops)	mediterranean scrub	no vegetation
elevation	MEDIUM	500 – 300	300 – 150	150 – 50	50 – 25	25 – 0
slope	LOW	90% – 45%	45% – 30%	30% – 15%	15% – 5%	5% – flat

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Nel campo delle tecnologie legate alla cattura ed allo stoccaggio geologico della CO₂, l'identificazione del serbatoio geologico per il contenimento del gas iniettato deve tenere in considerazione un elevato numero di parametri che, com'è ovvio, sono assai eterogenei tra loro che riguardano sia le caratteristiche intrinseche del corpo geologico e delle formazioni incassanti, che le condizioni ambientali al contorno e le limitazioni dettate da fattori antropici e/o politici.

La molteplicità e la variabilità di tutti questi parametri rende, di fatto, ogni scenario unico e, quindi, diviene impossibile la definizione di linee guida universalmente valide che possano guidare il Decision Maker nella redazione del progetto finale. Tali problematiche, rendono proibitivo per il Decision Maker il ricorso alla sua esclusiva esperienza e discrezionalità suggerendo, invece, l'utilizzo delle potenzialità di un Sistema di Supporto Decisionale (in inglese DSS - Decision Support System).

Nell'ambito delle tecnologie CCS, il connubio tra DSS e tecnologie GIS consente la realizzazione di strumenti particolarmente precisi e potenti per l'identificazione e la risoluzione di problemi tecnici (ad esempio, la localizzazione dei serbatoi geologici idonei a contenere elevati quantitativi di gas in pressione) e per l'identificazione e la valutazione tecnico-economica di alternative progettuali (ad esempio, la progettazione della più razionali soluzioni di monitoraggio ambientale) affinché sia garantito il giusto compromesso tra la riuscita tecnico-economica del progetto e la sicurezza per le popolazioni indigene e gli ecosistemi direttamente coinvolti.

Il sistema di supporto alle decisioni realizzato e presentato in questa sede rappresenta un potente strumento di analisi in grado di risolvere il problema dell'identificazione, all'interno di una vasta e complessa area come quella del bacino carbonifero del Sulcis-Iglesiente, di serbatoi geologici idonei a contenere, in sicurezza, elevati quantitativi di gas ad alta pressione.

Le analisi preliminari condotte durante la fase di beta-testing del GIS-DSS sviluppato, hanno consentito di individuare, all'interno di un'area campione al centro del bacino carbonifero del Sulcis-Iglesiente, le aree che possedessero i più alti requisiti di idoneità (Figura 36).

Nella Figura 36 è presentato il risultato di una valutazione realizzata adottando l'analisi MCE attraverso l'algoritmo di WOA condotta attraverso i parametri discussi in Tabella 3: le aree evidenziate con il colore verde rappresentano quelle che rispondono, in maniera migliore, ai requisiti di idoneità del GIS-DSS; contrariamente quelle in rosso rappresentano le aree identificate dal GIS-DSS come non-idonee.

La versione attuale del GIS-DSS, ancora in fase di sviluppo e di potenziamento, offre uno strumento potente ma flessibile per la valutazione di parametri geologici, giacimentologici, strutturali, ambientali, ecc..., in grado di:

- variare il numero, oltreché la tipologia, dei temi di input considerati per la valutazione finale;
- modificare i parametri di valutazione (in termine di indice di idoneità e/o di coefficiente di ponderazione) di ciascun criteria;
- valutare e confrontare differenti condizioni ambientali e/o scenari progettuali.

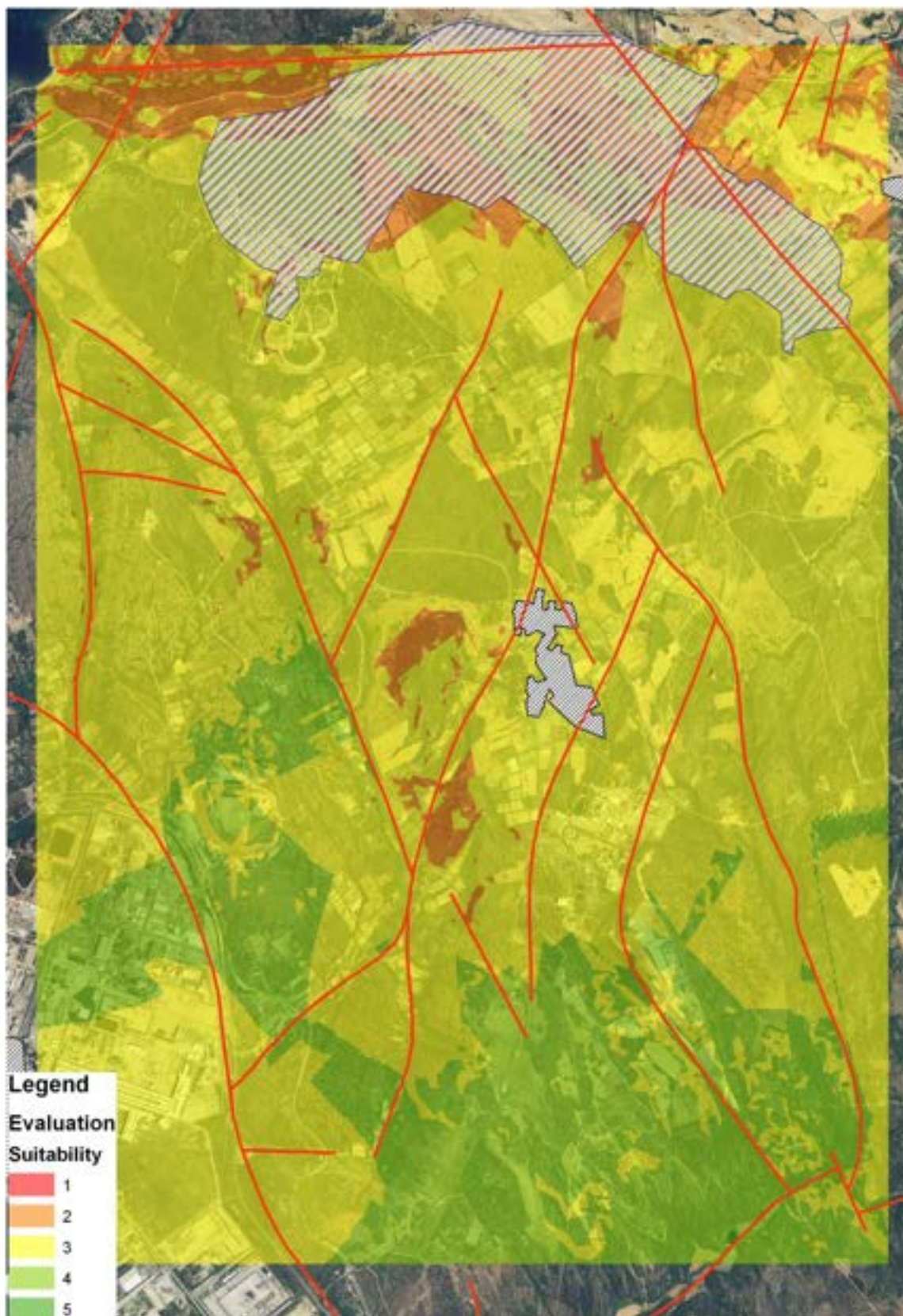


Figura 37: Valutazione di idoneità del settore centro-settentrionale del bacino carbonifero del Sulcis-Iglesiente.