



## Ricerca di Sistema elettrico

# Linee guida per il monitoraggio geochimico dei siti di interesse per lo stoccaggio geologico della CO<sub>2</sub> e loro applicazione presso l'area del bacino minerario del Sulcis

*S. Lombardi, S. Graziani, A. Annunziatellis,  
S. Colella, M.C. Tartarello*

LINEE GUIDA PER IL MONITORAGGIO GEOCHIMICO DEI SITI DI INTERESSE PER LO STOCCAGGIO GEOLOGICO DELLA CO<sub>2</sub> E LORO APPLICAZIONE PRESSO L'AREA DEL BACINO MINERARIO DEL SULCIS

S. Lombardi, S. Graziani, A. Annunziatellis, M.C. Tartarello  
Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Cattura e sequestro della CO<sub>2</sub> prodotta dall'utilizzo di combustibili fossili

Obiettivo: Tecnologie per la rimozione permanente della CO<sub>2</sub>

Responsabile del Progetto: Stefano Giammartini, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Monitoraggio geochimico per lo stoccaggio geologico della CO<sub>2</sub> e sua applicazione presso l'area del bacino minerario del Sulcis*"

Responsabile scientifico ENEA: Paolo Deiana

Responsabile scientifico per L'Università degli Studi di Roma "Sapienza": Salvatore Lombardi

## Indice

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>4</b>
1.1	CCS, CARBON CAPTURE AND STORAGE .....	4
1.2	IMPORTANZA DEL MONITORAGGIO.....	6
<b>2</b>	<b>SINTESI DELLA NORMATIVA EUROPEA E LEGISLAZIONE ITALIANA SUL CCS .....</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>MONITORAGGIO GEOCHIMICO DEI SITI DI INTERESSE PER LO STOCCAGGIO GEOLOGICO DELLA CO<sub>2</sub> ..</b>	<b>16</b>
3.1	OBIETTIVI DEL MONITORAGGIO .....	16
3.2	PREPARAZIONE DEL PIANO DI MONITORAGGIO.....	18
3.3	MONITORAGGIO DURANTE LE DIVERSE FASI DELLO STOCCAGGIO DELLA CO <sub>2</sub> .....	20
3.3.1	<i>FASE I: Pre-iniezione</i> .....	20
3.3.2	<i>FASE II: Iniezione</i> .....	21
3.3.3	<i>FASE III: Post-iniezione</i> .....	22
3.3.4	<i>FASE IV: Chiusura del sito</i> .....	22
<b>4</b>	<b>APPLICAZIONE PRESSO L'AREA MINERARIA DEL SULCIS .....</b>	<b>23</b>
4.1	METODI DI MONITORAGGIO UTILIZZATI .....	25
4.1.1	<i>Descrizione del sistema di monitoraggio</i> .....	26
4.1.2	<i>Controllo remoto</i> .....	27
4.2	RISULTATI E DISCUSSIONI .....	28
4.2.1	<i>Campionamento dei gas del suolo</i> .....	28
4.2.2	<i>Monitoraggio in continuo</i> .....	28
<b>5</b>	<b>BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA .....</b>	<b>30</b>

# 1 Introduzione

## 1.1 CCS, Carbon Capture and Storage

A causa dell'utilizzo di combustibili fossili s'immettono nell'atmosfera ingenti quantitativi di anidride carbonica che stanno alterando il ciclo naturale del carbonio. Si è visto come questo contribuisca al "riscaldamento del pianeta" (effetto serra), ai conseguenti cambiamenti climatici attuali e come potrebbe portare a fenomeni più pericolosi quali l'acidificazione degli oceani con la conseguente ricaduta sugli organismi marini (scomparsa di numerose specie planctoniche alla base della catena alimentare).

È difficile predire i livelli di concentrazione futuri delle emissioni antropiche di CO<sub>2</sub> poiché questo sarà dettato non solo dalla combustione d'idrocarburi, ma da una vasta gamma di fattori demografici, fattori socio-economici, ambientali, e tecnologici, tra cui:

- crescita della popolazione;
- crescita economica e globalizzazione del commercio;
- intensità energetica della produzione industriale;
- utilizzo dei combustibili fossili per la fornitura totale di energia.

Il Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico (IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change) ha ipotizzato un insieme di possibili scenari nella relazione speciale sulle emissioni (Special Report on Emissions Scenarios - SRES), pubblicato nel 2000. La figura 1 illustra le stime di concentrazione futura di CO<sub>2</sub> basate su ipotesi di aumenti di emissioni antropiche associate ai differenti scenari (SRES) e mostra un potenziale aumento che può arrivare tra 470 e 570 ppm entro il 2050 e, nello scenario peggiore, raggiungere gli 860 ppm entro il 2100.

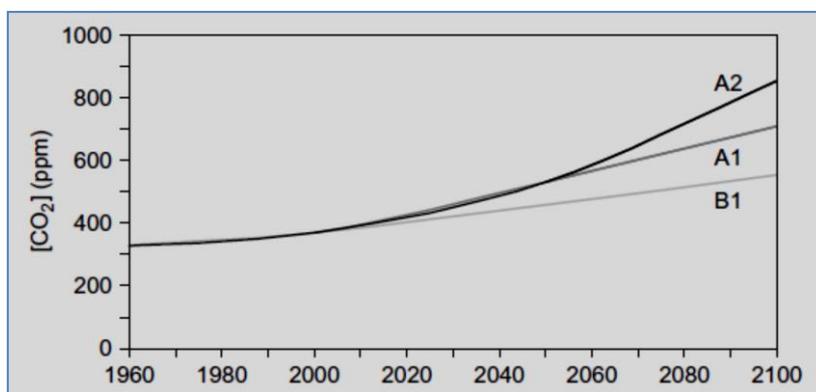


Figura 1. Concentrazioni stimate di CO<sub>2</sub> risultanti dalle emissioni nei differenti scenari SRES (IPCC, 2000).

L'IPCC ha identificato lo stoccaggio geologico dell'anidride carbonica (CCS – Carbon Capture Storage) come uno degli approcci potenzialmente più efficaci per ridurre le emissioni di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) e mitigare il *global warming* (IPCC, 2007). Tra le varie tecnologie il *geological storage* (GS) è stato inoltre descritto come l'approccio tecnicamente più fattibile (IPCC, 2005).

Nello stoccaggio geologico, infatti, la CO<sub>2</sub> viene intrappolata per lunghi periodi di tempo in adeguati siti geologici come risultato di meccanismi fisici e geochimici. Le tecnologie CCS implicano la cattura della CO<sub>2</sub> dalle centrali elettriche alimentate con combustibili fossili (carbone, petrolio o gas) e dagli impianti industriali (quali acciaierie, cementifici, raffinerie, ecc.), il suo trasporto per mezzo di *pipeline* o via nave verso un sito di confinamento e l'iniezione attraverso un pozzo in una formazione geologica adatta (adeguati spessori, sufficiente porosità e permeabilità e capacità d'immagazzinamento) a contenerla per un lungo periodo (Fig. 2).

Il sistema di confinamento consiste in una barriera a bassa permeabilità, che non permette alla CO<sub>2</sub> la migrazione verso l'alto.

Esistono diverse tipologie di "trappole geologiche" potenzialmente idonee allo stoccaggio geologico di CO<sub>2</sub>. Gli scenari considerati più vantaggiosi in termini di rapporto costi/benefici e di volumi stoccabili sono i seguenti:

- Acquiferi salini profondi:

Le formazioni saline sono considerate forti candidate per il CCS a causa delle loro caratteristiche di formazione come la porosità, le dimensioni e la profondità. Offrono un potenziale di stoccaggio della CO<sub>2</sub> molto superiore in termini di volumi stoccabili rispetto a qualsiasi altro tipo di struttura geologica. Inoltre, queste formazioni sono generalmente più profonde di altre strutture geologiche garantendo una dispersione inferiore nelle altre formazioni. A profondità maggiori, la migrazione della CO<sub>2</sub>, come il movimento dei fluidi in genere è ostacolato anche dalla totale assenza di vie preferenziale di fuga, come i pozzi (Celia et al., 2009).

- Giacimenti esauriti di petrolio e gas naturale:

Queste strutture hanno trattenuto petrolio e gas al di sotto del sottosuolo per migliaia, se non milioni di anni e le caratteristiche strutturali dei *reservoir* sono generalmente note.

Il recupero degli idrocarburi tramite EOR (*Enhanced Oil Recovery*), inoltre, è una tecnica già ampiamente utilizzata che prevede l'iniezione di CO<sub>2</sub> in formazioni geologiche al fine di riuscire ad estrarre più petrolio/gas. Queste formazioni geologiche possono, tuttavia, avere un numero di pozzi profondi che potrebbero rappresentare come vie di fuga per il gas.

- Giacimenti di carbone non sfruttabili:

Sono un potenziale sito di stoccaggio perché la CO<sub>2</sub> ha un'alta affinità con il carbone e viene facilmente adsorbita. Gran parte delle formazioni idonee si trovano a profondità comprese tra 800 e 4.000 metri, dove la pressione è sufficientemente elevata per immagazzinare la CO<sub>2</sub> in fase liquida. La CO<sub>2</sub> iniettata nella roccia serbatoio va a riempire gli interstizi liberi al di sotto della roccia di copertura. La fattibilità tecnica dello stoccaggio geologico in giacimenti di carbone dipende dalla presenza di un sistema di confinamento, dalla permeabilità del carbone oltre alla durata del progetto di CCS, al tipo di carbone, e ad altri fattori (IPCC, 2005). Tali siti possono rappresentare una valida opzione per il futuro, una volta risolto il problema tecnico di come iniettare grandi volumi di CO<sub>2</sub> nel carbone a bassa permeabilità.

In riferimento a questi tipi di scenario è opportuno segnalare che, associato allo stoccaggio, è spesso possibile attuare l'ECBM (*Enhanced Coal Bed Methane recovery*) ossia il recupero di metano grazie all'iniezione di CO<sub>2</sub> con conseguente riduzione dei costi generali del CCS.

- Altre strutture geologiche:

Una varietà di altri tipi di formazioni geologiche o strutture potrebbe essere utilizzata per sequestrare la CO<sub>2</sub> iniettata, tra cui basalti, scisti ricchi di petrolio e gas, e miniere profonde abbandonate. Ciascuno di questi potenziali serbatoi ha una varietà di vantaggi e svantaggi per sequestrare CO<sub>2</sub>. I Basalti, per esempio, nonostante siano efficaci per lo stoccaggio della CO<sub>2</sub>, per la composizione chimico-mineralogica possono non essere l'ideale per il CCS, perché hanno in genere una bassa porosità e permeabilità, e possono avere fratture che possono rappresentare un rischio per le perdite di CO<sub>2</sub>.

## 1.2 Importanza del monitoraggio

Sebbene sia l'esperienza acquisita in numerosi progetti esistenti di stoccaggio geologico di CO<sub>2</sub>, sia lo studio di analoghi naturali e industriali, dimostri che l'anidride carbonica può essere confinata in sicurezza in diverse formazioni geologiche, esiste comunque la possibilità di migrazioni impreviste verso altri ricettori (come le falde acquifere sotterranee) o fughe in atmosfera del gas iniettato.

In quest'ottica la possibilità di monitorare efficacemente il processo di stoccaggio assume una grande importanza diventando una componente indispensabile per il controllo e per la sicurezza dei siti di CCS.

Le ragioni per attuare il monitoraggio dei siti di stoccaggio sono numerose e riguardano l'operatività (controllo e ottimizzazione del processo di iniezione), la sicurezza, l'ambiente (minimizzare l'impatto sulla popolazione, fauna e ecosistema), la società (fornire informazioni utili agevolando la comunicazione con l'opinione pubblica) e l'economia (verifica dei volumi effettivi di CO<sub>2</sub> immagazzinata nel sottosuolo).

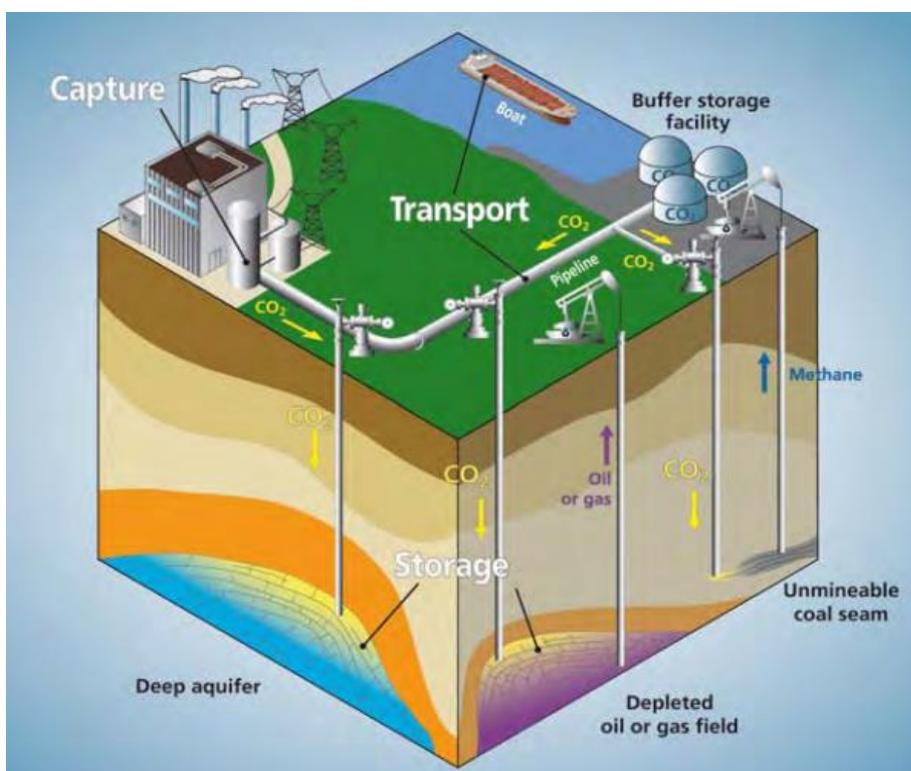


Figura 2. Schema di cattura, trasporto e stoccaggio della CO<sub>2</sub> (©BRGM)

Sinteticamente il monitoraggio è uno strumento utile a verificare che non insorgano problemi che possano compromettere l'attività di stoccaggio. Con tecniche di monitoraggio efficaci, si riesce a fornire dati attendibili che risultano utili anche per ottenere più facilmente la *public acceptance*.

Per avere dati interessanti per la rendicontazione un adeguato progetto di monitoraggio deve proporsi di:

- Determinare la "baseline":

Poiché la CO<sub>2</sub> è naturalmente presente nell'ambiente, sia in atmosfera sia nel suolo e poiché la CO<sub>2</sub> misurata nel terreno presenta concentrazioni che possono variare anche marcatamente sia nello spazio che nel tempo (ad esempio, giornalmente, a livello stagionale e/o annuale e quindi con variazioni temporali legate a diverse condizioni di pressione, temperatura o umidità oppure variazioni spaziali legate, ad esempio, a fenomeni di degradazione della materia organica), può essere molto difficile discriminare variazioni di concentrazioni ascrivibili alla semplice oscillazione

naturale da quelle potenzialmente legate a perdite o migrazione di CO<sub>2</sub> di origine endogena. Per questo motivo è importantissimo un adeguato studio della “baseline” prima dell'iniezione finalizzata ad acquisire un adeguato database che permetta di interpretare correttamente i risultati del monitoraggio durante e dopo l'iniezione.

- Controllare le fasi di iniezione:

Monitorare l'integrità del pozzo, la velocità del flusso, e le pressioni di formazione. I pozzi per l'iniezione della CO<sub>2</sub>, oltre a quelli di osservazione e quelli pre-esistenti abbandonati, poiché mettono in collegamento diretto la roccia serbatoio con la superficie, devono essere attentamente monitorati per prevenire fughe di gas. Gli attuali sistemi di monitoraggio geochimico, comunemente usati nell'industria petrolifera, possono essere installati sopra i pozzi per garantire la tempestività dei sistemi di allarme e la sicurezza.

- Misurare la quantità di CO<sub>2</sub> immagazzinata:

Il monitoraggio geofisico con metodi indiretti delle zone più prossimali al serbatoio (per esempio con sismica 3D e 4D) permette di valutare le vie di migrazione del gas e gli eventuali *plume* associati all'iniezione di CO<sub>2</sub>. Il monitoraggio geochimico in superficie può essere utile a verificare se le eventuali fughe hanno raggiunto la superficie nonché a fornire dati utili alla quantificazione del volume di CO<sub>2</sub> rilasciato nell'atmosfera. Questo dato di emissioni antropiche è di notevole importanza e va contabilizzato nei registri nazionali dei gas serra e nei registri europei (EU ETS – Emissions Trading System). Questa informazione di monitoraggio può anche essere utilizzata per fare previsioni, per calibrare i modelli esistenti e per confermare i meccanismi di cattura.

- Verificare le eventuali vie di fuga:

Le vie di migrazione dei gas possono essere artificiali (ad esempio pozzi profondi) o naturali (sistemi di fratture e faglie) e richiedono un monitoraggio geochimico mirato. Si rende necessario uno studio della porosità e della permeabilità delle strutture geologiche, dopo un rilevamento geologico - strutturale, con la correlazione tra i sistemi di faglie cartografate e le aree di anomalie messe eventualmente in luce dalla prospezione dei gas del suolo.

## 2 Sintesi della normativa europea e legislazione italiana sul CCS

Le regole di progettazione e di gestione di un sito di stoccaggio devono essere stabilite dalle amministrazioni competenti e gli operatori sono tenuti a rispettarle per garantire la sicurezza e l'efficienza delle attività di CCS. Devono essere definiti i criteri di sicurezza per la salute umana e l'ambiente, per assicurare che gli impatti ambientali siano trascurabili sia a breve che a lungo termine. Attraverso la normativa bisogna esigere che gli operatori rispettino una prassi conforme ed utile a prevenire qualsiasi perdita o anomalia.

Dopo che siano stati valutati i rischi, è importante che ogni fase delle operazioni di stoccaggio sia opportunamente legiferata. La sicurezza deve essere dimostrata già prima dell'inizio delle operazioni di stoccaggio nella selezione dei siti, anche se le principali problematiche sono associate alla fase operativa: grazie al calo di pressione, infatti, una volta terminata l'iniezione, il sito diventa più sicuro.

Per la caratterizzazione del sito di stoccaggio devono essere esaminati: la roccia serbatoio e la roccia di copertura, la presenza di faglie o pozzi, le falde contenenti acqua potabile, la densità abitativa e i vincoli ambientali in superficie. Dopodiché la valutazione dei rischi deve comprendere anche gli eventi imprevedibili con le potenziali perdite di CO<sub>2</sub> (Fig.3).

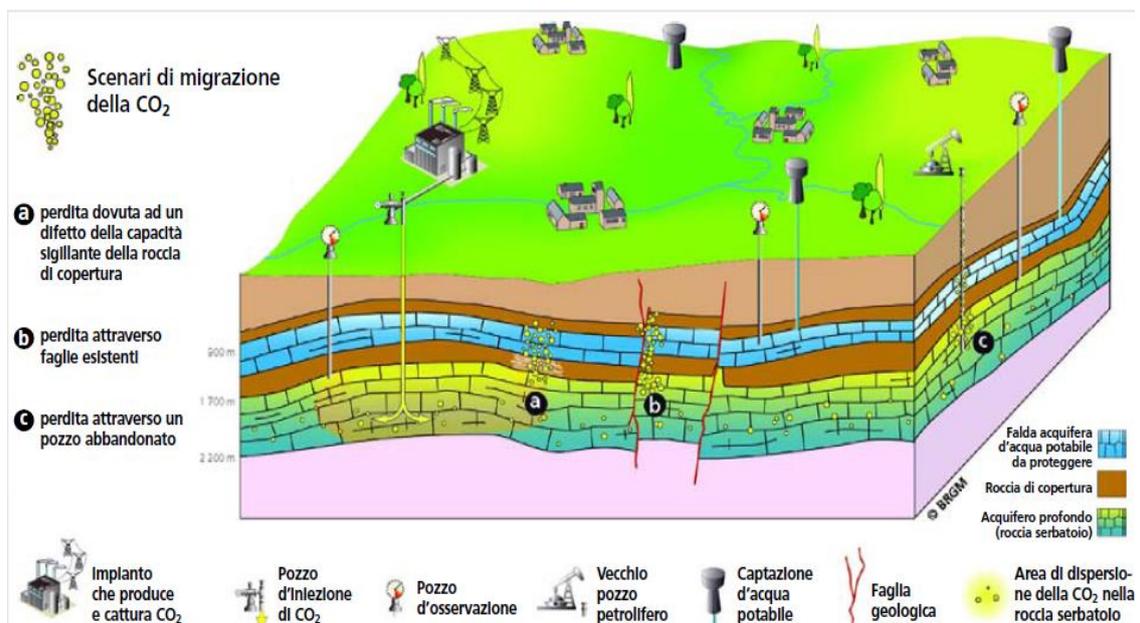


Figura 3. Scenari con potenziali perdite di CO<sub>2</sub> (©CO<sub>2</sub>GeoNet)

A livello legale, in Europa il documento di riferimento principale è la **direttiva UE 2009/31/CE**, che stabilisce un quadro normativo per assicurare che la cattura e lo stoccaggio della CO<sub>2</sub> sia un'opzione di mitigazione dell'effetto serra realmente attuabile in maniera responsabile e nel rispetto della sicurezza.

L'Italia ha recepito la normativa europea con il **Decreto Legislativo 162 del 14 settembre 2011**, in vigore dal 5 ottobre 2011.

### Direttiva europea UE 2009/31/CE

L'Unione europea (UE) istituisce un quadro giuridico per la sicurezza dello stoccaggio geologico del biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>). Questo nuovo quadro mira a prevenire e, qualora ciò non sia possibile, eliminare gli effetti negativi delle emissioni di CO<sub>2</sub> e qualsiasi rischio per l'ambiente e la salute umana.

La direttiva rientra nel pacchetto "Energia e cambiamenti climatici", l'Unione europea ha proposto un progetto di direttiva nel gennaio 2008 al CCS d'indirizzo (Proposta di una direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio relativa allo stoccaggio geologico di anidride carbonica, 2008). La versione finale è stata

accettata nel mese di aprile 2009 e pubblicata nel giugno 2009 (Direttiva CCS UE, 2009). La direttiva finale CCS è stata rivista secondo le otto fasi principali di un impianto CCS progetto di distribuzione:

- Screening,
- Ricognizione del sito,
- Perforazione di pozzi e di prova,
- Piano di sviluppo del sito,
- Costruzione,
- Operazione di stoccaggio,
- Chiusura,
- Post - chiusura.

La tabella seguente presenta brevemente la direttiva e il regolamento, il dominio di applicazione, gli obiettivi, e gli emendamenti per consentire le attività di CCS in Europa:

<b>DIRETTIVA 2009/31/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO</b> <b>del 23 aprile 2009 relativa allo stoccaggio geologico di biossido di carbonio e recante modifica della direttiva 85/337/CEE del Consiglio, delle direttive del Parlamento europeo e del Consiglio 2000/60/CE, 2001/80/CE, 2004/35/CE, 2006/12/CE, 2008/1/CE e del regolamento (CE) n. 1013/2006 del Parlamento europeo e del Consiglio</b>		
Testo	<a href="http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0114:0135:IT:PDF">http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0114:0135:IT:PDF</a>	
Cattura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Direttiva 96/61/CE (prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento).</li> <li>• Direttiva 85/337/CEE (valutazione dell'impatto ambientale di determinati progetti pubblici e privati sull'ambiente).</li> <li>• Direttiva 2008/1/CE</li> </ul>	
Trasporto	Direttiva 85/337/CEE (valutazione dell'impatto ambientale di determinati progetti pubblici e privati sull'ambiente)	
Stoccaggio geologico di CO <sub>2</sub>	Scelta dei siti	Gli stati membri mantengono il diritto di determinare le aree nelle quali poter selezionare i siti. Gli SM che intendono permettere il CCS, dovrebbero procedere a una valutazione della capacità di stoccaggio disponibile nel loro territorio.
	Licenza di esplorazione	Requisito stabilito dagli Stati membri (SM), Aperto a tutti i soggetti in possesso delle capacità necessarie, Permessi concessi sulla base di criteri obiettivi, pubblicati e non discriminatori, per una superficie di volume limitata e per un tempo limitato. I titolari hanno il diritto esclusivo di esplorazione del potenziale complesso di stoccaggio. Se non ci sono le attività svolte, gli SM stabiliscono che l'autorizzazione venga ritirata.

<p>Studi preliminari</p>	<p><u>Raccolta dati per costruire un modello geologico tridimensionale:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Geologia e geofisica,</li> <li>• Idrogeologia,</li> <li>• Ingegneria del reservoir,</li> <li>• Geochimica,</li> <li>• Geomeccanica,</li> <li>• Sismicità,</li> <li>• Presenza di vie naturali e artificiali che potrebbero essere le vie di fuga,</li> <li>• Domini circostanti il complesso di stoccaggio che possono essere interessati</li> <li>• Distribuzione della popolazione nella regione,</li> <li>• Vicinanza di risorse naturali,</li> <li>• Possibili interazioni con altre attività,</li> <li>• Vicinanza alle potenziali fonti di CO2</li> </ul>
<p>Studi preliminari</p>	<p><u>Modelli del complesso di stoccaggio</u></p> <p>Caratterizzare il complesso in termini di:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Struttura geologica,</li> <li>• Proprietà geomeccaniche, geochimiche,</li> <li>• Caratterizzazione del sistema di fratture e la presenza di eventuali vie di fuga,</li> <li>• Superficie ed estensione verticale del complesso di stoccaggio,</li> <li>• Volume dei vuoti,</li> <li>• Distribuzione fluido basale,</li> <li>• Altre caratteristiche rilevanti,</li> <li>• Incertezze valutate (gamma di scenari e limiti di confidenza).</li> </ul> <p><u>Sicurezza e caratterizzazione del pericolo</u></p> <p>I fattori da considerare:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Possibili tassi di iniezione e caratteristiche della CO<sub>2</sub>,</li> <li>- Efficacia della modellazione,</li> <li>- Processi reattivi,</li> <li>- Simulazione del serbatoio utilizzato,</li> <li>- Simulazioni a breve e a lungo termine</li> </ul>

	<p>Caratterizzazione della sicurezza sulla base di modelli dinamici:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pressione e temperatura (velocità di iniezione vs stoccaggio),</li> <li>- Superficie ed estensione verticale della CO<sub>2</sub> in funzione del tempo,</li> <li>- Natura del flusso di CO<sub>2</sub> nella roccia serbatoio,</li> <li>- Meccanismi di cattura di CO<sub>2</sub>,</li> <li>- Capacità di stoccaggio e gradienti di pressione nel sito di stoccaggio,</li> <li>- Rischio di fratturazione della formazione di stoccaggio e della copertura,</li> <li>- Rischio di penetrazione di CO<sub>2</sub> nella copertura,</li> <li>- Il rischio di fuoriuscite dal sito di stoccaggio,</li> <li>- Tasso di migrazione,</li> <li>- Tassi di impermeabilizzazione delle fratture,</li> <li>- Cambiamenti nella chimica del fluido di formazione e le reazioni successive e applicazione del modello reattivo per la valutazione degli effetti,</li> <li>- Spostamento dei fluidi nella formazione,</li> <li>- Aumento della sismicità e deformazione a livello di superficie.</li> </ul> <p>Caratterizzazione del pericolo effettuata per caratterizzare il potenziale di fuoriuscita. Considerare:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Possibili vie di fuoriuscita,</li> <li>- Potenziale entità delle fuoriuscite per le vie di fuga identificate,</li> <li>- Parametri critici che incidono sulle possibili fuoriuscite,</li> <li>- Gli effetti secondari dello stoccaggio di CO<sub>2</sub> compresi fluidi all'interno delle formazioni e le nuove sostanze che si formano con lo stoccaggio di CO<sub>2</sub>,</li> <li>- Eventuali altri fattori che potrebbero rappresentare un pericolo per la salute umana o per l'ambiente.</li> </ul>
<p>Piano di sviluppo del sito</p>	<p>Valutazione del rischio:</p> <p>Coprire una gamma di scenari sviluppati sotto la caratterizzazione del pericolo. Comprendono:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Valutazione dell'esposizione (sulla base delle caratteristiche dell'ambiente, attività antropiche, il comportamento potenziale di stoccaggio e la migrazione della CO<sub>2</sub>, possibili vie di fuga),</li> <li>- Valutazione degli effetti,</li> <li>- Caratterizzazione del rischio (valutazione della sicurezza e l'integrità del sito a breve e lungo termine).</li> </ul>
<p><i>Operazioni di stoccaggio</i> Fase di iniezione</p>	<p>Fase di iniezione:</p> <p>Il flusso di CO<sub>2</sub> consiste prevalentemente di biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>) può contenere accidentalmente sostanze associate alla fonte e sostanze in traccia aggiunte per aiutare a monitorare e verificare la migrazione di CO<sub>2</sub>.</p> <p>Concentrazioni di sostanze accidentalmente aggiunte potrebbero:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pregiudicare l'integrità del sito di stoccaggio o delle infrastrutture di trasporto,</li> <li>- Rappresentare un rischio significativo per l'ambiente o la salute umana,</li> <li>- Violerebbero le norme della legislazione comunitaria applicabile.</li> </ul> <p>Gli Stati membri garantiscono che l'operatore accetti e inietti flussi di CO<sub>2</sub> solo dopo l'analisi della composizione (comprese le sostanze corrosive) dei corsi d'acqua e valutazione dei rischi effettuata.</p>

		<p>È necessario quindi registrare le quantità e le proprietà dei flussi di CO<sub>2</sub> conferiti e iniettati (compresa la composizione).</p>
	<p>MONITORAGGIO</p>	<p>Monitorare gli impianti di iniezione, del complesso di stoccaggio, e l'intorno per:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Confrontare il comportamento effettivo con i modelli dinamici di CO<sub>2</sub> e dell'acqua di formazione nel sito di stoccaggio,</li> <li>• Rilevare irregolarità significative,</li> <li>• Rilevare migrazioni di CO<sub>2</sub>,</li> <li>• Rilevare fuoriuscite di CO<sub>2</sub>,</li> <li>• Rilevare effetti negativi significativi sull'ambiente circostante, l'acqua potabile, sulla popolazione umana o sulla biosfera,</li> <li>• Valutare l'efficacia di eventuali azioni correttive,</li> <li>• Aggiornare la valutazione della sicurezza e dell'integrità del complesso di stoccaggio nel breve e lungo termine.</li> </ul> <p>Il piano di monitoraggio viene predisposto dal gestore, presentato e approvato dall'autorità competente. Il piano di monitoraggio va aggiornato almeno ogni 5 anni per tener conto delle variazioni del rischio valutato di fuoriuscita, modifiche dei rischi valutati per l'ambiente e la salute umana, delle nuove conoscenze scientifiche, miglioramenti nella migliore tecnologia disponibile.</p> <p>Il piano di monitoraggio comprende la baseline, le fasi operative e e quelle di post-chiusura. Specifica:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Parametri monitorati,</li> <li>• Tecnologia di monitoraggio utilizzata e motivazione della scelta della tecnologia,</li> <li>• Stazioni di monitoraggio e logica del campionamento spaziale,</li> <li>• Frequenza di applicazione e temporale logica del campionamento.</li> </ul> <p>Monitoraggio continuo o intermittente di:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fughe di emissione di CO<sub>2</sub> nell'impianto di iniezione,</li> <li>• Flusso volumetrico di CO<sub>2</sub> nella testa del pozzo di iniezione,</li> <li>• Pressione e temperatura di CO<sub>2</sub> nella testa pozzo di iniezione,</li> <li>• Analisi chimica del materiale iniettato,</li> <li>• Temperatura e pressione del serbatoio.</li> </ul> <p>La tecnologia di controllo basata sulle migliori prassi disponibili al momento della progettazione. Il modello viene aggiornato ed eventualmente ricalibrato in base alle differenze tra il comportamento previsto e osservato.</p> <p>Rendicontazione:          Almeno una volta l'anno, la presentazione all'autorità competente di:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tutti i risultati del monitoraggio (comprese informazioni sulla tecnologia utilizzata),</li> <li>- Quantità e le proprietà dei flussi di CO<sub>2</sub> conferiti e iniettati nel periodo di riferimento (compresa la composizione),</li> <li>- Prova della costituzione e del mantenimento della garanzia finanziaria.</li> </ul>

		<p><b>Ispezioni ordinarie e straordinarie:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Per verificare e promuovere il rispetto dei requisiti della direttiva e di monitorare gli effetti sull'ambiente,</li> <li>- Comprendere attività (impianti di iniezione, la valutazione delle operazioni di iniezione e monitoraggio, controllo delle registrazioni pertinenti),</li> <li>- Controlli di routine effettuati almeno una volta ogni anno fino a 3 anni dopo la chiusura e ogni 5 anni fino al trasferimento della responsabilità all'autorità competente,             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le ispezioni straordinarie effettuate, se l'autorità competente informata o messa a conoscenza di fuoriuscite o irregolarità importanti, se i rapporti mostrati insufficienti rispetto delle condizioni di autorizzazione, per indagare gravi denunce o quando ritenuto opportuno.</li> <li>- L'autorità competente rilascia una relazione sui risultati dell'ispezione (disponibile al pubblico entro 2 mesi).</li> </ul> </li> </ul>
		<p><b>Misure in caso di irregolarità importanti o di fuoriuscite di gas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- L'operatore informa immediatamente l'autorità competente e adotta le necessarie misure correttive,</li> <li>- Le misure devono essere adottate in base a un piano di misure correttive relative alla protezione della salute umana.</li> </ul>
	<p><i>Operazioni di stoccaggio</i></p> <p>Fase di chiusura</p>	<p>Si stabilisce la chiusura dell'impianto su richiesta sostanziale del gestore, previa autorizzazione dell'autorità competente o se l'autorità competente stessa stabilisce il ritiro del permesso.</p> <p>L'operatore rimane responsabile della manutenzione, monitoraggio, controllo, rendicontazione e delle misure correttive sulla base del piano di post-chiusura presentati e approvati dalla competente autorità fino a quando la responsabilità viene trasferita all'autorità competente.</p> <p>Viene incaricato un operatore di sigillare il sito di stoccaggio e di smantellare gli impianti di iniezione.</p> <p>Il piano provvisorio post-chiusura aggiornato (tenendo conto dell'analisi di rischio, e dei miglioramenti tecnologici), viene presentato all'autorità competente e approvato come definitivo piano di post-chiusura.</p> <p>SULLA BASE DELLE INFORMAZIONI RACCOLTE E DEI MODELLI, SI PROCEDE CON L'APPLICAZIONE DEL PIANO DI MONITORAGGIO.</p>
	<p><i>Operazioni di stoccaggio</i></p> <p>Fase di post-chiusura</p>	<p>Questa fase include lo stato dopo la chiusura del sito, e il successivo trasferimento di responsabilità all'autorità competente.</p> <p>La responsabilità per il sito di stoccaggio viene trasferita all'autorità competente quando tutte le evidenze disponibili indicano che la CO<sub>2</sub> sarà completamente confinata in via permanente, dopo un periodo minimo di 20 anni, l'iniezione verrà interrotta e se saranno adempiuti gli obblighi finanziari, il sito verrà sigillato.</p>

		<p>Nomina di un operatore per la rendicontazione e la verifica di conformità del sito, l'assenza di fuoriuscite individuabili, l'evoluzione del sito di stoccaggio verso la stabilità a lungo termine.</p> <p>Gli SM si impegnano a rendere il rapporto a disposizione della Commissione entro 1 mese dalla ricezione.</p> <p>Dopo il trasferimento di responsabilità, il monitoraggio viene ridotto ad un livello che consenta di individuare fuoriuscite o irregolarità importanti. SI RENDE IL MONITORAGGIO FLESSIBILE, intensificandolo qualora ci fossero perdite e sospendendolo se non più necessario.</p> <p>Contributo finanziario del gestore per coprire la chiusura, post-chiusura e per le autorità nazionali di coprire i costi di monitoraggio dopo il trasferimento di responsabilità (per un periodo di 30 anni).</p>
--	--	--

### Decreto Legislativo 162 del 14 settembre 2011

Il decreto legislativo 162/2011 definisce le modalità di rilascio delle licenze di esplorazione e delle autorizzazioni allo stoccaggio, i controlli delle Autorità preposte, le attività di monitoraggio dei siti e l'apparato sanzionatorio. Il decreto legislativo, emanato su delega comunitaria del 2009 (legge 96/2010) prevede per i gestori dei siti di stoccaggio precisi obblighi di monitoraggio e controllo ambientale. Il provvedimento costituisce la base normativa per avviare progetti e investimenti di "Carbon Capture and Storage (CCS) sul territorio italiano.

Secondo la normativa, l' idoneità di una formazione geologica ad essere adibita a sito di stoccaggio è determinata mediante la caratterizzazione e la valutazione del potenziale complesso di stoccaggio e dell'area circostante secondo criteri fissati.

La caratterizzazione di un sito si articola in tre fasi:

- Fase 1: raccolta dei dati sul sito (geologia, idrogeologia, sismicità, ecc.) e sull'area circostante (popolazione, vicinanza a risorse o a siti protetti, ecc.);
- Fase 2: creazione di modelli informatici a partire dai dati rilevati per caratterizzare il sito sotto diversi aspetti (struttura geologica, caratteristiche geomeccaniche e geochimiche, volume disponibile e altro);
- Fase 3: caratterizzazione del comportamento dinamico di stoccaggio, caratterizzazione della sensibilità e valutazione dei rischi.

Le esplorazioni necessarie per ottenere le informazioni richieste per la scelta di un sito di stoccaggio non possono essere realizzate senza un'apposita licenza, rilasciata dall'autorità competente, per il tempo necessario per esplorare il sito.

Il titolare di una licenza di esplorazione ha il diritto esclusivo di esplorazione del potenziale complesso di stoccaggio di CO<sub>2</sub>.

Le domande di licenza di stoccaggio devono essere presentate all'autorità competente di ogni Stato membro e devono contenere alcune informazioni sul gestore, la caratterizzazione del sito di stoccaggio e del complesso di stoccaggio, la valutazione della sicurezza di stoccaggio, il quantitativo totale di CO<sub>2</sub> da iniettare e la composizione dei flussi di CO<sub>2</sub>, i provvedimenti preventivi, una proposta di piano di monitoraggio, i provvedimenti correttivi, un piano provvisorio per la fase post-chiusura, la prova della garanzia finanziaria, ecc. L'autorità competente deve verificare il rispetto delle disposizioni applicabili della presente direttiva e delle altre disposizioni legislative del diritto dell'Unione, nonché accertare che il sito è gestito da una persona affidabile e competente sotto il profilo tecnico.

L'autorità competente riesamina la situazione ed eventualmente aggiorna o, al limite, revoca l'autorizzazione allo stoccaggio:

- in caso di fuoriuscite o irregolarità importanti;
- per il mancato rispetto delle condizioni fissate nelle autorizzazioni o rischi di fuoriuscite o di irregolarità importanti;
- per eventuali inadempienze del gestore rispetto alle condizioni indicate nell'autorizzazione;
- in base a risultati scientifici e progressi tecnologici, e in ogni caso, cinque anni dopo il rilascio dell'autorizzazione e in seguito ogni dieci anni.

Per quanto riguarda gli obblighi in materia di gestione, chiusura e post-chiusura è vietato aggiungere rifiuti o altro materiale al flusso di CO<sub>2</sub> per smaltirli. Il gestore deve dimostrare che il flusso di CO<sub>2</sub> risponde a questi criteri e deve conservare un registro dei flussi conferiti al sito.

Il gestore deve monitorare gli impianti di iniezione, il complesso di stoccaggio ed eventualmente l'ambiente circostante, secondo le indicazioni del piano di monitoraggio approvato dall'autorità competente.

Il monitoraggio serve in particolare a confrontare il comportamento effettivo della CO<sub>2</sub> nel sito di stoccaggio con il comportamento ricavato dai modelli al fine di rilevarne scostamenti significativi. Il monitoraggio serve inoltre a controllare, la migrazione di CO<sub>2</sub> e le eventuali fughe, nonché a verificare gli eventuali impatti sull'ambiente e sulla popolazione. Il piano di monitoraggio deve essere aggiornato almeno ogni cinque anni.

Almeno una volta all'anno il gestore deve comunicare all'autorità competente alcune informazioni, ad esempio: i risultati del monitoraggio del sito di stoccaggio, i quantitativi e le caratteristiche dei flussi di CO<sub>2</sub> e la prova del mantenimento della garanzia finanziaria.

In caso di fuoriuscite o irregolarità importanti, il gestore è tenuto a informare immediatamente l'autorità competente e ad adottare i provvedimenti correttivi necessari descritti nel relativo piano approvato dall'autorità competente. L'autorità competente può imporre al gestore di adottare provvedimenti correttivi supplementari e se questi non interviene può adottare direttamente dei provvedimenti recuperando dal gestore i costi sostenuti.

Un sito può essere chiuso se le condizioni indicate nell'autorizzazione sono soddisfatte, su richiesta del gestore o su decisione dell'autorità competente (ad esempio in seguito alla revoca dell'autorizzazione allo stoccaggio).

Dopo la chiusura del sito, il gestore continua ad essere responsabile, in particolare della messa in sicurezza del sito e della dismissione degli impianti di iniezione. Il gestore è inoltre soggetto agli stessi obblighi che gli erano imposti durante la gestione, in base al piano provvisorio di post-chiusura approvato dall'autorità competente.

Successivamente, la responsabilità è trasferita all'autorità competente quando: tutti gli elementi disponibili concorrono a indicare che la CO<sub>2</sub> stoccata è completamente e permanentemente confinata; è trascorso un periodo minimo di tempo dalla chiusura del sito; è stato verificato che tutti gli obblighi finanziari sono stati rispettati; il sito è stato correttamente sigillato e tutti gli impianti di iniezione sono stati smontati.

Il decreto legislativo 162/2011 ripercorre e definisce la prassi da seguire in ogni tappa delle attività di stoccaggio e a livello nazionale, come afferma la SEN<sup>1</sup>, "lo sviluppo di soluzioni CCS ... non si può escludere che avrà un ruolo importante nel sistema energetico per la generazione a carbone pulito ... e in combinazione con sistemi a biomassa e a gas, e per settori ad elevata intensità di emissioni (es. cemento). L'Italia intende quindi continuare a contribuire alla ricerca in questo campo, monitorando con attenzione l'evoluzione di questa opportunità". E poi precisa che "lo sviluppo di alcuni progetti sui metodi di cattura e confinamento della CO<sub>2</sub>, in un'ottica di partecipazione al programma europeo e di opportunità di sviluppo in aree extra-europee", è una delle quattro priorità per la ricerca italiana assieme alle rinnovabili, alle smart grid e all'efficienza energetica.

<sup>1</sup> Strategia Energetica Nazionale per un'energia più competitiva e sostenibile: Documento per consultazione pubblica; Ottobre 2012; §3.3 "Un approccio flessibile al percorso di decarbonizzazione di lungo e lunghissimo termine"; pag. 39, pag.46

### 3 Monitoraggio geochimico dei siti di interesse per lo stoccaggio geologico della CO<sub>2</sub>

In base a quanto esposto nel quadro legislativo, affinché un sito possa essere ritenuto idoneo ai fini del CCS (Direttiva n. 31 del 23 Aprile 2009, recepita in Italia con il decreto legislativo n.162 del 14 settembre 2011), devono essere garantiti diversi parametri, principalmente di tipo geologico, quali:

1. Sufficiente profondità del serbatoio per garantire lo stato supercritico della CO<sub>2</sub> (800 m, in condizioni standard). È opportuno considerare comunque che tale profondità non dovrà essere troppo elevata per non pregiudicare la permeabilità e la porosità (e quindi la capacità) del sito;
2. Integrità del caprock in modo da evitare possibili fuoriuscite di CO<sub>2</sub>;
3. Sufficiente capacità di stoccaggio, tale da poter immagazzinare la quantità di CO<sub>2</sub> rilasciata dalla sorgente di emissione identificata;
4. Buone proprietà petrofisiche del *reservoir*, per assicurare una buona iniettività della CO<sub>2</sub> con ottimizzazione dei costi. Uno dei punti fondamentali del CCS, infatti, è che deve essere realizzabile non solo tecnicamente ma anche economicamente.

Le strutture che non soddisfano uno o più dei criteri sopra citati dovrebbero essere escluse.

Altro motivo di esclusione di potenziali siti di stoccaggio è la presenza di “conflitti di interesse”. Tale condizione si realizza, ad esempio, quando siti profondi con elevata porosità possono anche essere potenzialmente idonei per la produzione di energia geotermica o, in alternativa, possono rappresentare riserve strategiche per lo stoccaggio di gas naturale.

Una volta stabilita l’idoneità del sito, si deve procedere alla progettazione e realizzazione di un piano di monitoraggio. Si deve premettere che il monitoraggio è strettamente “*site specific*”, ovvero dipende dalle caratteristiche geologiche e idrogeologiche del sito di stoccaggio selezionato. Occorre pertanto affiancare al monitoraggio geochimico un’attenta ricostruzione tridimensionale della geologia riguardante l’intorno del sito di stoccaggio stesso, che contenga informazioni sulla presenza di discontinuità tettoniche e parametri delle formazioni interessate e l’eventuale presenza di acquiferi sia superficiali che profondi. Si tratta, in sintesi, di elaborare un modello geologico-strutturale completo, sulla base del quale progettare il piano di monitoraggio geochimico più idoneo. Solo in questo modo potrà essere garantita l’affidabilità e la sicurezza dell’intero sistema.

Poiché in base alle normative descritte, gli organi di competenza possono richiedere dimostrazioni pratiche sulla sicurezza del processo di stoccaggio geologico e sull’assenza di significativi impatti ambientali legati al CCS, il monitoraggio potrà essere anche uno degli strumenti principali attraverso il quale si potrà dimostrare che il progetto di stoccaggio risponde tutti i requisiti richiesti dal decreto legislativo. La figura 3 illustra alcuni esempi di requisiti che possono essere necessari per ottenere l’autorizzazione per un progetto di stoccaggio geologico della CO<sub>2</sub>.

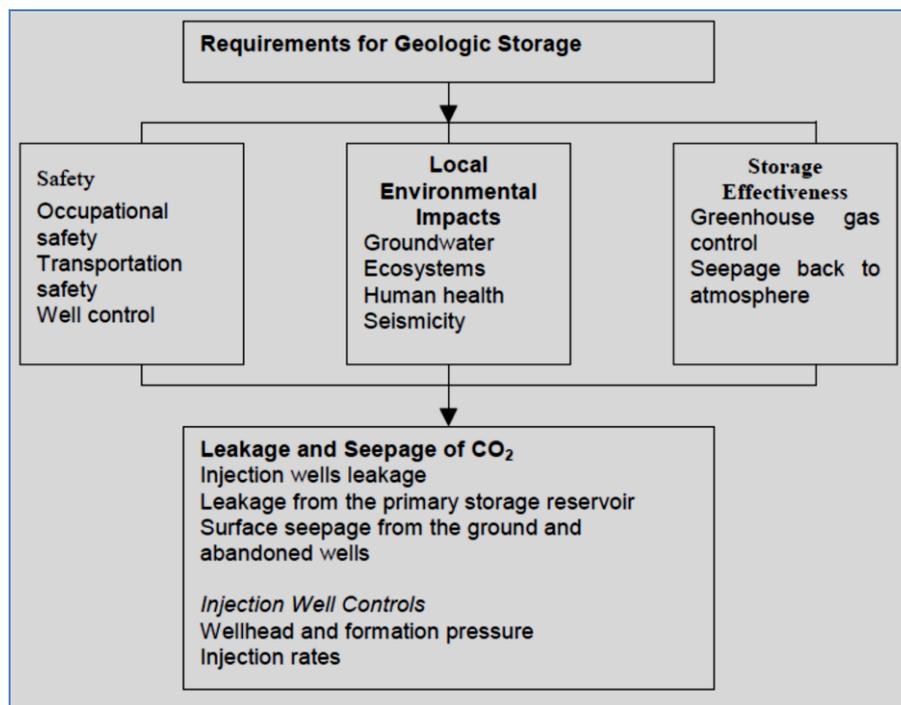
#### 3.1 Obiettivi del monitoraggio

Sebbene il processo di stoccaggio sia molto complesso e sia potenzialmente interessato da molteplici problematiche legate sia alla sicurezza del sito (e degli operatori) sia alle possibili implicazioni ambientali, se ci si concentra agli aspetti da considerare nelle attività di monitoraggio, il modello diventa un po’ più semplice e può essere imperniato su due tematiche principali:

- Individuazione delle eventuali fughe di anidride carbonica (in termini di estensione, ubicazione e natura) sia in atmosfera che al di fuori della struttura geologica in cui è stata iniettata;
- controlli sul processo di iniezione (tassi di iniezione a testa-pozzo e pressioni di formazione).

Per rispondere al primo punto è necessaria un'adeguata capacità di monitoraggio del flusso e della concentrazioni di CO<sub>2</sub> sia con misure dirette superficiali, sia con metodi indiretti per le determinazioni in profondità. Nel primo caso sarà necessario misurare la CO<sub>2</sub> in fase gassosa e/o disciolta, nel secondo, invece, sarà necessaria la capacità di individuare la presenza di CO<sub>2</sub> in fase supercritica.

Per rispondere al secondo punto è necessario un controllo continuo del processo di iniezione con un monitoraggio delle infrastrutture (in particolare del pozzo di iniezione); dei tassi di iniezione; della pressioni alla testa-pozzo e delle pressioni di formazione.



**Figura 4. Requisiti necessari per ottenere il permesso di stoccaggio (Benson et al, IPCC workshop on carbon dioxide capture and storage).**

Oltre ai due aspetti principali descritti sopra, per un adeguato monitoraggio del processo di stoccaggio è necessario controllare anche altri parametri che potrebbero essere utili sia per valutare l'efficacia del processo di stoccaggio sia, nel caso di perdite, per valutare l'origine del problema, progettare un sistema di bonifica e valutare gli impatti ambientali, con particolare riferimento a:

- valutare come effettivamente viene utilizzato il volume disponibile per lo stoccaggio;
- fornire informazioni sul grado di solubilità e di intrappolamento per mineralizzazione;
- individuare le faglie o altre vie di fuga che possono causare la fuoriuscita di CO<sub>2</sub>;
- determinare la qualità delle acque sotterranee in funzione del potenziale arricchimento in CO<sub>2</sub>;
- rilevare e monitorare le concentrazioni di CO<sub>2</sub> nella zona vadosa e terreni;
- valutare gli impatti sugli ecosistemi;
- riconoscere la micro-sismicità associata alle iniezioni di CO<sub>2</sub>.

La conoscenza e il controllo delle informazioni relative a questi parametri, seppur considerati secondari, fornisce in realtà maggiori garanzie sulla sicurezza e sull'efficienza dello stoccaggio geologico.

### 3.2 Preparazione del piano di monitoraggio

Il piano di monitoraggio deve riguardare tutte le fasi dello stoccaggio geologico dell'anidride carbonica e deve essere predisposto in accordo con quanto previsto dalle normative nazionali e comunitarie.

Per la massima efficacia del monitoraggio, il piano deve essere specifico per il sito di interesse per lo stoccaggio e in base agli scopi che si vogliono ottenere, deve prevedere l'utilizzo della tecnologia appropriata. I sistemi di misura e rilevamento devono garantire ovviamente una ottima attendibilità dei dati raccolti sia in termini di accuratezza della misura che di ripetibilità. Il piano di monitoraggio, pertanto deve essere costituito da un pacchetto di misure diverse, ognuna idonea ai momenti specifici (fasi) dello stoccaggio. Sebbene venga prefissato uno schema di riferimento con indicazioni dettagliate per ciascuna fase del progetto (iniezione, post-iniezione, chiusura), il piano di monitoraggio deve essere dinamico e flessibile, cioè deve permettere modifiche o adattamenti in base ai risultati del monitoraggio stesso e all'evoluzione del progetto. Una strategia su misura, capace di integrare tutti questi aspetti, consentirà di ottimizzare le attività di monitoraggio e di ridurre i costi. L'adattamento del piano alle condizioni particolari dell'area è una componente essenziale nell'analisi del rischio e nella verifica della sicurezza e dell'efficienza del sito, data la complessità dei diversi scenari geologici

Inizialmente un'attenta caratterizzazione geologica del sito dovrebbe consentire la modellizzazione del suo comportamento in condizioni normali e fornire gli elementi per progettare il piano di monitoraggio più idoneo.

Il diagramma di flusso di fig. 4 sviluppato da EPA, è invece un utile strumento per valutare e comprendere tutti i potenziali impatti per analizzare le vulnerabilità dei recettori legati al processo di stoccaggio secondo quanto prescritto delle normative europee.

Riassumendo, in base a quanto esposto, nel progettare una strategia di monitoraggio è necessario effettuare una serie di scelte in funzione delle condizioni geologiche e ingegneristiche come:

- caratteri geologici, geometria e profondità della roccia serbatoio;
- dimensioni dell'area di dispersione della CO<sub>2</sub>;
- possibili vie di fuga del gas;
- tempo e portata di iniezione;
- caratteristiche in superficie: topografia, densità di popolazione, infrastrutture, ecosistemi.

Il monitoraggio di un sito di stoccaggio della CO<sub>2</sub> è già realizzabile grazie alle numerose tecniche attualmente disponibili (o in via di implementazione), ereditate da altre applicazioni, tra cui l'industria petrolifera, lo smaltimento di rifiuti liquidi pericolosi in formazioni geologiche profonde, il monitoraggio delle acque sotterranee, la conservazione degli alimenti (Benson et al, 2002a.; 2002b).

In particolare, considerando nel dettaglio alcuni degli aspetti che sarebbe opportuno monitorare, si osserva ad esempio quanto segue:

- Le misurazioni della velocità di iniezione di CO<sub>2</sub> sono una pratica comune nei giacimenti di idrocarburi e gli strumenti sono già disponibili da produttori commerciali. Tipicamente tali strumenti consistono in sistemi in grado di determinare la caduta di pressione in fase di iniezione. I recenti miglioramenti tecnologici consentono misurazioni accurate e controllo dell'iniezione, anche al variare delle condizioni di pressione e temperatura (Wright e Majek, 1998);
- Negli anni sono diventate ordinarie le misurazioni della pressione di iniezione, sia a testa pozzo che nella formazione geologica. Un'ampia varietà di sensori di pressione, trasduttori, estensimetri, diaframmi ed indicatori di livello di capacità sono già disponibili e adatti per il monitoraggio delle pressioni di iniezione di CO<sub>2</sub>.
- Negli ultimi due decenni, sono stati sviluppati e venduti sensori in fibra ottica di pressione e temperatura. I cavi in fibra ottica sono calati in pozzetti, collegati ai sensori e forniscono misure di pressione nella formazione geologica in tempo reale. Questi nuovi sistemi sono destinati a fornire misurazioni molto affidabili e ben controllate (Brown e Hartog, 2002).

In sintesi, lo stato di conoscenze attuali è più che sufficiente a soddisfare le esigenze di controllo dei tassi di iniezione di CO<sub>2</sub>, e delle pressioni alla testa-pozzo e nella formazione. Queste misure forniranno indicazioni quantitative dell’anidride carbonica iniettata in un sito di stoccaggio, utile per la rendicontazione e per la verifica e il confronto con i modelli elaborati precedentemente, come richiesto dalla normativa europea.

Le misure dirette di CO<sub>2</sub> in aria, acqua o suolo possono essere richieste come parte del programma di monitoraggio. Ad esempio, la concentrazione di CO<sub>2</sub> nell’aria nei pressi dei pozzi di iniezione o nei pozzi abbandonati può essere monitorata per precauzione al fine di garantire la sicurezza dei lavoratori e del pubblico al sito di stoccaggio. Inoltre, vicino ai pozzi, periodicamente il monitoraggio delle acque sotterranee può assicurare che lo stoccaggio di CO<sub>2</sub> non stia alterando la qualità delle acque. La misura diretta delle concentrazioni di CO<sub>2</sub> e dei prodotti di reazione di CO<sub>2</sub> possono inoltre essere importanti per valutare la solubilità e le interazioni acqua-gas-roccia.

Sebbene il monitoraggio in continuo della CO<sub>2</sub> è già utilizzato in diversi campi come nell’industria, nella progettazione (es: sistemi HVAC-Heating, Ventilation and Air Conditioning), nelle serre, nei controlli delle emissioni per combustione o nel controllo degli ambienti in cui l’anidride carbonica è un rischio significativo (come le fabbriche di birra ), allo stato attuale, rispetto alle misure descritte precedentemente per i tassi di iniezione, le pressioni di formazione, etc, i sistemi per le misure dirette in continuo di anidride carbonica nel suolo e nell’acqua superficiale necessitano di ulteriori sviluppi per poter garantire la messa in posto di reti di monitoraggio efficaci con costi accettabili.

I sistemi di monitoraggio diretti si basano di norma su principi di rilevamento IR e sono indicati come analizzatori di gas a infrarossi (IRGA-NDIR). La gascromatografia e la spettrometria di massa sono i metodi più accurati per misurare la concentrazione di CO<sub>2</sub>, ma necessitano del campionamento in contenitori di acciaio e non sono idonei per misure *in situ*.

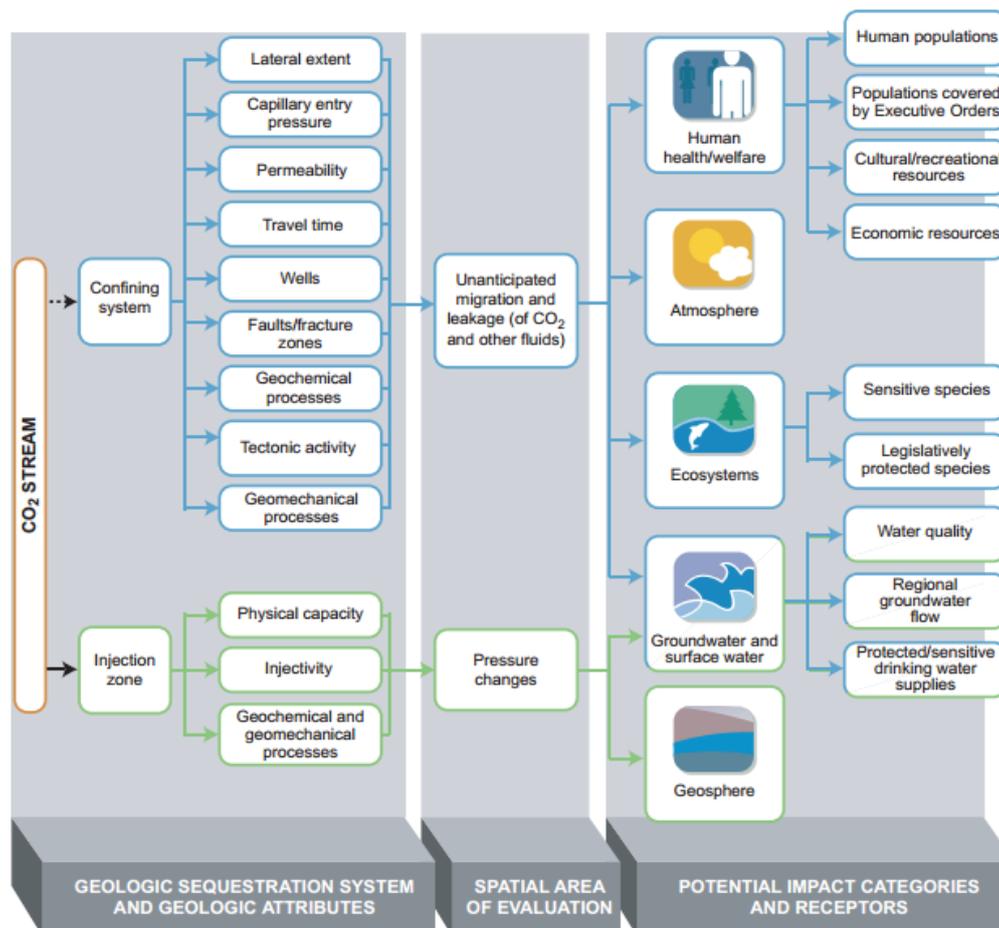


Figura 5. Vulnerability Evaluation Framework - VEF – (U.S. EPA, 2008).

I metodi geochimici sono utili sia per monitorare direttamente il movimento di CO<sub>2</sub> nel suolo che per la comprensione delle reazioni che avvengono tra la CO<sub>2</sub> e i minerali (Gunter et al, 1998). I campioni di gas possono essere raccolti sia in ambiente superficiale (*soil gas survey* – monitoraggio in continuo – analisi dei gas disciolti), sia direttamente nella formazione utilizzando un campionatore downhole sia dal pozzo. I campioni di fondo pozzo sono notevolmente più costosi, ma hanno il vantaggio di essere più rappresentativi dei fluidi di formazione perché non sono depressurizzati. I metodi per la raccolta di campioni nel fluido del fondo pozzo sono ben sviluppati e il campionamento geochimico è ormai altamente testato.

Sui campioni di fluido possono essere effettuate anche altre analisi relative a gli ioni maggiori (es. Na, K, Ca, Mg, Mn, Cl, Si, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> e SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), pH, alcalinità, isotopi stabili (ad esempio <sup>13</sup>C, <sup>14</sup>C, <sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H), e gas, compresi gli idrocarburi, CO<sub>2</sub> e dei suoi isotopi associati (Gunter et al, 1998;2001).

Gran parte di questi parametri possono essere misurati con metodi analitici standard già disponibili anche per monitoraggi in tempo reale. L'uso di traccianti naturali (isotopi di C, O, H e gas nobili associati alla CO<sub>2</sub> iniettata, gas nobili, SF<sub>6</sub> e perfluorocarburi) può inoltre fornire indicazioni preziose sul movimento della CO<sub>2</sub> nel sottosuolo e sulle sue reazioni con la formazione geologica (Emberly et al, 2002; Blencoe et al., 2001; Cole, 2000; Kennedy e Torgersen, 2001). I traccianti danno la possibilità di identificare in modo univoco la fonte di emissioni di CO<sub>2</sub> e, in sostanza, rispondere alla domanda 'che origine ha la CO<sub>2</sub>?'

In particolare, poca attenzione è stata data alla comprensione dell'impatto delle interazioni tra la CO<sub>2</sub> e i minerali. Attualmente tra gli studi riguardanti lo stoccaggio della CO<sub>2</sub>, suscita un grande interesse geologico l'analisi delle interazioni fra la CO<sub>2</sub> e le formazioni geologiche profonde, poco dopo che la CO<sub>2</sub> viene introdotta nell'ambiente (Bachu e Gunter, 1994; Czernichowski et al, 1996; Johnson et al, 2001; Knauss et al, 2001). Molto resta ancora da imparare circa la cinetica delle interazioni con i minerali, perciò i dati di monitoraggio possono essere utili per predire il grado di velocità di reazione con i minerali e la solubilità.

### 3.3 Monitoraggio durante le diverse fasi dello stoccaggio della CO<sub>2</sub>

#### 3.3.1 FASE I: Pre-iniezione

La fase di pre-iniezione comprende la progettazione, l'ottenimento delle autorizzazioni e la costruzione delle infrastrutture. In questa fase le operazioni di monitoraggio prevedono misure vere e proprie e rilievi geologico-strutturali finalizzati a caratterizzare il sito, stabilire il territorio che deve essere monitorato e riconoscere nel sito selezionato i luoghi specifici, dove è necessario concentrare le misure (zone a maggiore vulnerabilità).

In questa fase è possibile testare differenti tecnologie, per individuare quelle più idonee al sito.

Sulla base di diversi parametri quali l'estensione del reservoir, l'ubicazione e direzione delle principali strutture e il volume di CO<sub>2</sub> da stoccare si potrà stimare l'estensione dell'area da monitorare. I modelli statici e dinamici elaborati saranno utili in questo momento del lavoro per ridurre i rischi, prevenendo differenti scenari.

Inoltre, in questa fase, è fondamentale mettere in campo misure dirette mirate a determinare la "baseline" del sito selezionato e le sue variazioni (range di valori stagionali dovuto a fattori climatici). La conoscenza della "baseline" di riferimento permette di individuare, in modo più possibile oggettivo, una soglia su base geostatistica per la determinazione di eventuali anomalie già presenti nell'area, che potrebbero rappresentare punti di fuoriuscita naturali di gas. Al fine di individuare zone di anomalie potenzialmente specchio della presenza di vie di migrazione di gas è opportuno predisporre un campionamento dei gas del suolo a scala regionale seguito da un campionamento di maggior dettaglio per una più accurata caratterizzazione delle anomalie stesse. Per la predisposizione della strategia di campionamento più adatta si rimanda a quanto proposto da Oldenburg et al (2003). La densità del campionamento acquista una notevole importanza, giacché una griglia troppo grande potrebbe non individuare piccole anomalie, mentre una griglia troppo stretta che copra l'area d'iniezione potrebbe essere economicamente proibitiva. Per garantire la massima sicurezza del sito, periodicamente è bene eseguire nuove campagne di Soil Gas Survey

a scala regionale da compiersi stagionalmente in tutta l'area per la determinazione di eventuali nuove zone anomale nonché per contribuire alla corretta definizione della baseline.

Poiché come accennato nei capitoli precedenti la concentrazione di CO<sub>2</sub> nel suolo è legata a fattori ambientali quali pioggia, temperatura, pressione barometrica, umidità del suolo e dell'acqua e quindi, al pari di molte altre variabili ambientali, è soggetta a notevoli variazioni intorno al valore medio, è importantissimo avere a disposizione un dataset esteso che permetta comprendere a pieno i valori tipici di CO<sub>2</sub> che caratterizzano il sito di studio. La messa in funzione di sistemi di monitoraggio geochimico in continuo già dalla fase pre-iniezione permette di acquisire questo tipo di informazioni e si rileva quindi imprescindibile per una corretta caratterizzazione del sito. Solo con l'ausilio di queste informazioni, infatti, sarà possibile discriminare concentrazioni potenzialmente indicatrici di microfughe dal serbatoio da semplici variazioni naturali.

### 3.3.2 FASE II: Iniezione

Durante la fase di iniezione gli obiettivi principali del monitoraggio sono: controllare il flusso; confermare e quantificare il volume di gas immesso e verificare che non ci siano perdite o fughe inattese. In questa seconda fase del CCS il piano di monitoraggio dovrà prevedere l'installazione di stazioni di monitoraggio in continuo sia in prossimità della testa-pozzo d'iniezione sia in zone sensibili come aree popolate o protette, sia nei punti critici messi in evidenza dalle misure effettuate nella fase I (aree anomale).

Naturalmente anche in questa fase la scelta dei punti di monitoraggio rappresenta un aspetto critico: stabilire a priori dove è più probabile un'eventuale fuga dal serbatoio di stoccaggio è di fondamentale importanza per il successo delle attività di monitoraggio. In questa fase il monitoraggio continuo della concentrazione della CO<sub>2</sub> è fondamentale per determinare con accuratezza le variazioni rispetto alla baseline definita nella fase precedente. Rispetto alla fase pre-iniezione, questa fase deve però essere caratterizzata anche dal monitoraggio costante di tutti i parametri chimico-fisici (pressione, temperatura, concentrazione dei gas) necessari alla determinazione di eventuali fughe dal serbatoio di stoccaggio.

Il monitoraggio del sito in fase di iniezione è fondamentale non solo per i problemi legati alla sicurezza, ma anche per certificare la permanenza della CO<sub>2</sub> nel sito di stoccaggio. In questo contesto è importante ricordare che uno dei principali limiti legati all'affermazione della tecnologia CCS è rappresentato proprio dalla reale capacità delle trappole selezionate di trattenere la CO<sub>2</sub> iniettata. La disponibilità di un efficace sistema di monitoraggio in tempo reale durante la fase di esercizio rende quindi il CCS non solo un processo sicuro rispetto ad eventuali fughe (la possibilità di individuare velocemente un problema permette di predisporre rapidamente delle contromisure) ma ne può anche certificare il successo garantendo che la CO<sub>2</sub> iniettata rimane effettivamente intrappolata. Nella fase d'iniezione, i sensori di CO<sub>2</sub> dovranno essere affiancati da altri strumenti di misura per determinare le variazioni indotte dall'iniezione della CO<sub>2</sub>. Tra i parametri fondamentali da monitorare in questa fase si hanno:

- Concentrazione della CO<sub>2</sub>;
- Temperatura;
- pH;
- Conducibilità.

La fase iniziale del monitoraggio è un momento molto delicato in quanto oltre alla raccolta di dati fondamentali per la corretta interpretazione dei fenomeni in atto, i risultati raccolti dovranno essere utilizzati anche per una corretta calibrazione e ottimizzazione degli intervalli di misura. In generale sarà opportuno predisporre dapprima un monitoraggio più intenso seguito da una fase in cui la frequenza e la tipologia di misure saranno adattate e rese più idonee grazie alla miglior conoscenza del sito. L'interpretazione dei dati può, infatti, aiutare a raffinare il modello iniziale e a modificare, se necessario, il piano di monitoraggio. Se si verifica una significativa migrazione della CO<sub>2</sub>, potrebbe essere necessario per esempio modificare l'area, l'intensità e le tecnologie di monitoraggio. Inoltre è importante in questa fase

sorvegliare lo stato del pozzo: il deterioramento della testa-pozzo potrebbe causare perdite, guasti, e variazioni di pressioni che devono essere mitigate.

### 3.3.3 FASE III: Post-iniezione

Nella fase di post-iniezione è auspicabile mantenere attivo il monitoraggio in continuo per almeno un anno dalla chiusura del sito, ed eseguire un campionamento superficiale di gas del suolo su scala regionale al termine di tale periodo.

Tale periodo potrebbe però dover essere allungato, in accordo con la normativa europea, secondo la quale il monitoraggio post-iniezione deve comunque fondarsi sulle informazioni raccolte ed elaborate con i modelli durante l'applicazione del piano di monitoraggio (art.13, paragrafo 2 della direttiva EU 31/2009) che viene aggiornato comunque ogni 5 anni al fine di tener conto delle modifiche del rischio valutato di fuoriuscite.

A completamento delle misure da effettuare, opportune indagini da effettuare in superficie e vicino al reservoir dovrebbero essere effettuate per confermare il volume finale di CO<sub>2</sub> iniettata nel sottosuolo. Può essere inoltre necessario continuare il monitoraggio continuo in aree specifiche caratterizzate da elevata vulnerabilità, secondo i parametri per la valutazione del rischio a lungo termine. A questo proposito l'approccio metodologico dovrebbe essere basato su quanto segue:

- per la fase di post-iniezione bisogna decidere il tipo e la frequenza del monitoraggio a lungo termine. Tali decisioni dovrebbero essere basate sulle caratteristiche del sito, e potrebbero includere la selezione di un insieme ridotto di tecniche di monitoraggio utilizzate durante la fase d'iniezione;
- il piano di monitoraggio sarà necessariamente flessibile fino alla fase di chiusura del sito quando le decisioni possono essere prese sulla base delle condizioni del sito durante tutte le operazioni precedenti.

### 3.3.4 FASE IV: Chiusura del sito

La fase di chiusura del sito avviene dopo aver ottenuto il permesso di chiudere l'impianto di stoccaggio. Durante la chiusura, un monitoraggio periodico può essere utile per dimostrare che il processo di CCS ha funzionato come previsto, che i meccanismi di stoccaggio a lungo termine sono attivi, e che la CO<sub>2</sub> è stabilmente immagazzinata nel serbatoio selezionato.

Per questa fase le considerazioni da fare sono:

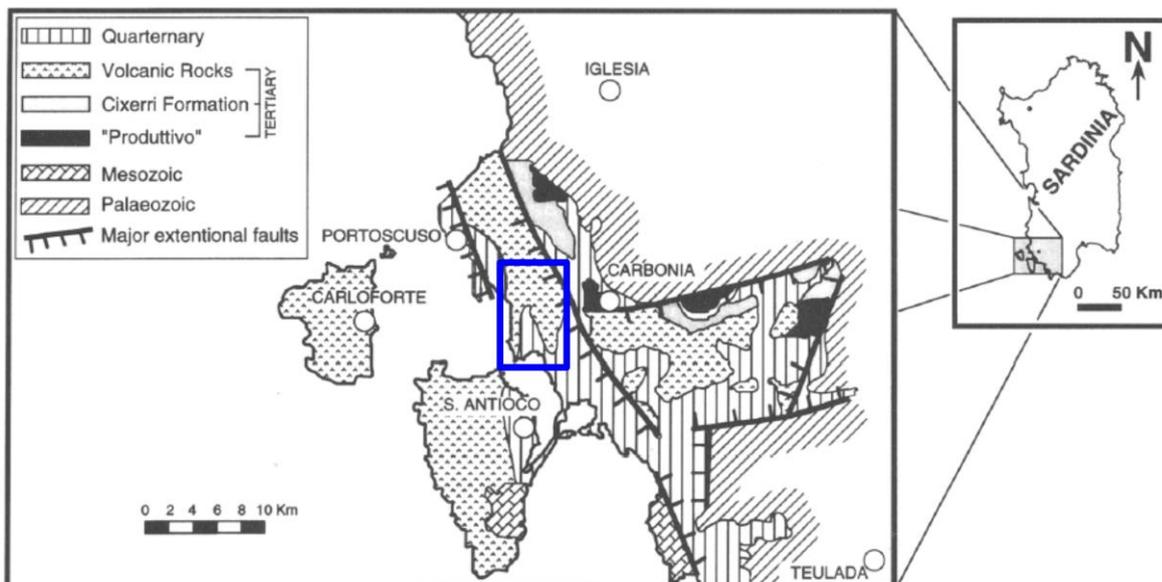
- esigenze di monitoraggio, incluse le tecniche e le frequenze di monitoraggio, pianificate sulla base dei risultati ottenuti durante le fasi d'iniezione e post-iniezione del CCS.
- monitoraggio adattato alle caratteristiche specifiche del sito;

Quanto previsto dovrà includere piani di emergenza in caso di perdite o altre criticità che potrebbero rendere necessari ulteriori controlli.

## 4 Applicazione presso l'area mineraria del Sulcis

Il bacino carbonifero eocenico del Sulcis, che si trova nella parte sud-occidentale della Sardegna (Italia) (Figura 5), è caratterizzato da estesi depositi sub-bituminosi che coprono una superficie di circa 800 km<sup>2</sup> le cui riserve sono state stimate in circa 1,2 miliardi di tonnellate. L'unità produttiva in affioramento vicino alle città di Gonnesa e Bacu Abis (Figura 5) immerge a circa 10° sud-sud-ovest, raggiungendo profondità superiori agli 800 m vicino alla costa e oltre 1500 metri in mare aperto. Questi depositi sono 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 di fatto non sfruttabili economicamente.

Carbosulcis SpA., l'azienda di estrazione di carbone che detiene la concessione mineraria per la "Miniera Monte Sinni", ha avviato uno studio multidisciplinare di fattibilità in un'ottica di potenziale sfruttamento del settore sud del giacimento mediante CCS, e in particolare utilizzando tecnologie "CO<sub>2</sub> - Enhanced Coal Bed Methane" (CO<sub>2</sub>-ECBM). L'idea è quella di catturare la CO<sub>2</sub> prodotta dalla combustione del carbone estratto nella parte nord e utilizzato nella vicina centrale di Portovesme, gestita dall'ENEL, e ri-iniettarla in pozzi profondi più di 800 m ubicati a sud, per il recupero del gas metano. Un importante aspetto di questa procedura sarebbe che oltre alla produzione di CH<sub>4</sub> si avrebbe lo stoccaggio geologico della CO<sub>2</sub> antropica e quindi una riduzione delle emissioni di gas serra in atmosfera.



**Figure 5. Assetto geologico - strutturale dell'area del Sulcis, sud-ovest della Sardegna (from Dreesen et al., 1997). L'area d'interesse è evidenziata da un rettangolo azzurro.**

In particolare, l'Università di Roma "La Sapienza" ha condotto nell'area di studio (vedi rettangolo azzurro in Figura 5) analisi chimiche dei gas del suolo per definire la baseline delle concentrazioni di gas e i flussi e ha portato avanti un piano di monitoraggio geochimico per definire l'idoneità del sito allo stoccaggio dell'anidride carbonica. Come abbiamo visto nelle sezioni relative ai piani di monitoraggio, infatti, la conoscenza della baseline è imprescindibile per controllare adeguatamente il sito di stoccaggio in fase di esercizio. Tale studio infatti permette sia di conoscere le variazioni naturali proprie del sistema naturale, sia di identificare le zone potenzialmente più vulnerabile alla migrazione di gas che potrebbero, durante l'iniezione, costituire vie di fuga per CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>.

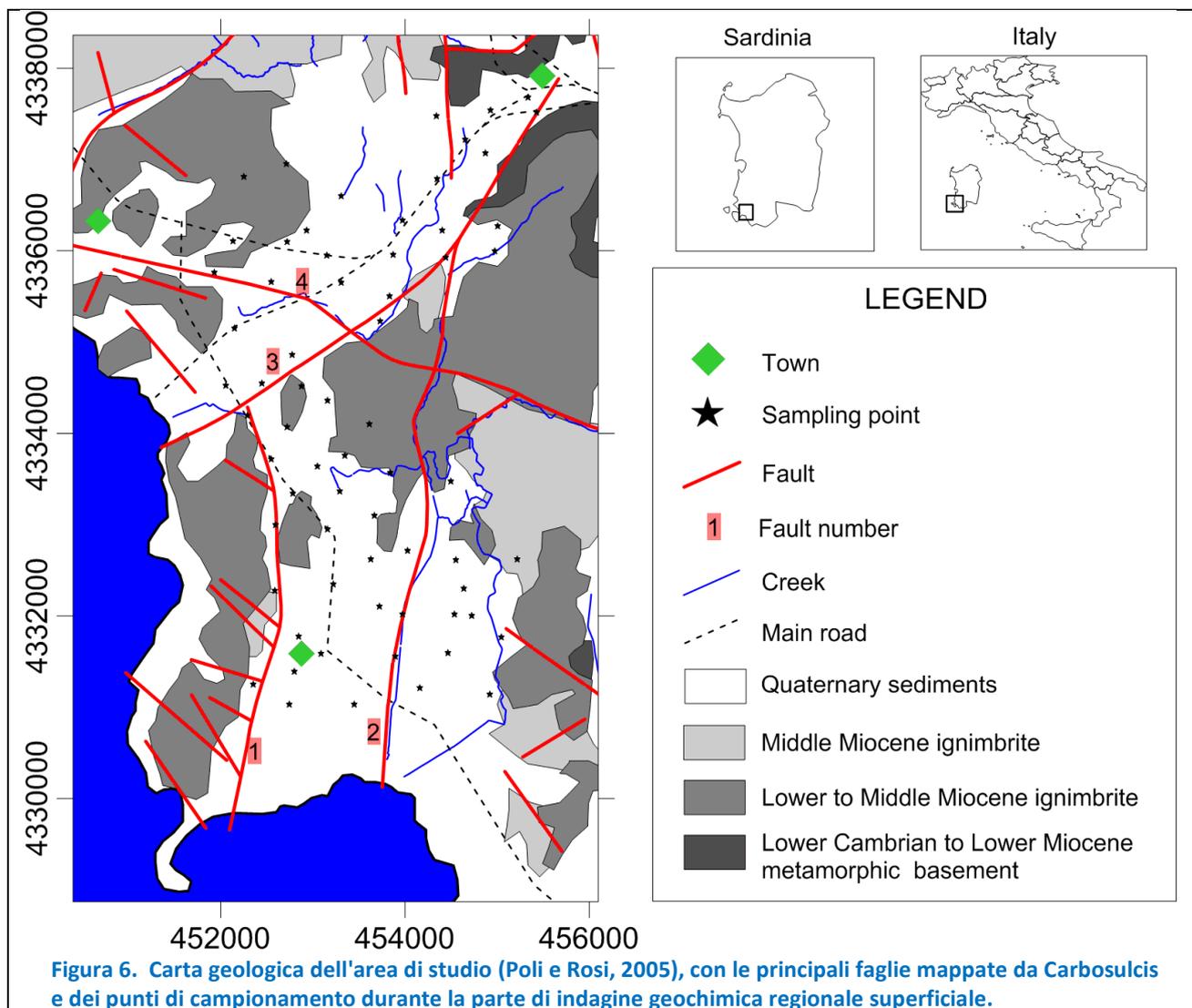
Lo studio ha previsto una prima fase di prospezione dei gas del suolo con l'analisi di più di 300 campioni di gas del suolo oltre all'effettuazione di altrettante misure di flusso di CO<sub>2</sub>, divisi tra un'indagine regionale e alcune indagini di dettaglio su obiettivi definiti. È seguita una seconda fase in cui sono state installate

centralinie per le misure geochimiche in continuo ubicate in siti selezionati sia sulla base dei risultati della prospezione dei gas del suolo, sia delle indicazioni legate all'assetto geologico-strutturale dell'area.

Caratterizzazione geologica del sito

Il Bacino carbonifero del Sulcis si è iniziato a formare durante l'inizio del Terziario in un regime di tettonica estensionale. Nel bacino si sono susseguiti depositi sedimentari e depositi vulcano-sedimentari, tra cui: Paleogene depositi marini e continentali (produttivi di carbone), vulcaniti calcocalcine dell'Oligocene-Miocene (ignimbriti) e depositi fluviali e fluviali -lacustri del Neogene al Quaternario. Attualmente il bacino si estende su una superficie di circa 200 km<sup>2</sup> e confina a est con rocce di basamento Paleozoico e a ovest con il mare.

I depositi Paleogenici del bacino del Sulcis raggiungono uno spessore massimo di 140 m e mostrano una caratteristica sequenza trasgressivo-regressivo. È all'interno del picco di regressione che sedimenti continentali sono stati depositati (Dreesen et al., 1997). Questa unità di carbone, la cosiddetta Formazione Produttiva, è composta alla base da calcari marini poco profondi (Calcarea un Miliolidi) e non uniformemente coperti da depositi fluviali grossolani detritici (Cixerri Formazione).



La Formazione produttiva dell'Eocene ha una nota estensione areale nel sottosuolo di oltre 100 km<sup>2</sup>, affioranti a est dell'area di studio e di immersione a 8-10°-SSO. Si va da spessori di 40 m nella zona di Monte Sinni miniera (a 400 metri di profondità) ad un massimo di 70 m verso SW. Per quanto riguarda gli attuali

sondaggi questo significa che il carbone è coperto da spessori maggiori nel sud dell'area di studio rispetto al settore settentrionale.

In associazione con l'apertura del Mar Mediterraneo occidentale e la rotazione in senso antiorario del blocco sardo-corso (Vigliotti e Langenheim, 1998), l'attività vulcanica nella regione si è verificata nel corso di due fasi principali: un periodo iniziale (28,4-17,7 Ma) dominato dalla messa in posto di vulcaniti calcocaline, alternati a flussi di lava basaltica, e a prodotti piroclastici seguito da un periodo successivo (17,6-13,8 Ma) caratterizzato dalla emissione di grandi volumi, calcocalini per peralcaline, dacitici di ignimbriti riolitiche (Poli e Rosi, 2005 e riferimenti ivi). Questi depositi dacitici di ignimbriti riolitiche si trovano in affioramento in tutta l'area di studio in corrispondenza con gli alti topografici.

Infine i sedimenti quaternari (Neogene) variano da ghiaie a sabbie a sud e lungo la costa, a conglomerati con sabbia, limo e argilla nelle parti più settentrionali della zona di studio.

Gli studi geologico-strutturali hanno dimostrato che la formazione Produttiva è caratterizzata da blocchi orientati EW e NNW-SSE, che possono essere correlati alla rotazione antioraria del blocco sardo-corso durante le successive fasi tettoniche dell'orogenesi alpina (Poli e Rosi, 2005). Le deformazioni post-vulcaniche sono invece moderate, con faglie subverticali che hanno portato alla parziale sommersione del bacino (Dreesen et al., 1997).

Sebbene le grandi strutture regionali non coinvolgano direttamente l'area di studio (Figura 5), sulla combinazione di osservazioni sul campo sono stati definiti un numero di sistemi di faglie locali. Nella Figura 6 sono riportate quattro faglie significative: 1) una struttura orientata NS lungo il confine orientale delle ignimbriti affioranti, 2) una struttura orientata NS che segue il lineamento del torrente, 3) una struttura SW-NE, lungo il confine settentrionale delle ignimbriti affioranti e 4) una struttura NW-SE.

In generale, l'area di studio può essere descritta come una pianura interrotta da colline scoscese e moderatamente alte. Le pianure sono costituite da sedimenti quaternari, mentre le colline sono costituite dalle unità vulcaniche calcocaline. L'uso del suolo nelle zone pianeggianti è principalmente agricolo, campi di grano e vigneti. Le zone collinari sono invece coperte da erba e cespugli, mentre un settore al centro dell'area di studio è fortemente alberato con pini mediterranei. Come visibile in figura 3, il campionamento del gas del suolo regionale è stato generalmente limitato alla pianura a causa della mancanza di una copertura del suolo significativa sulle colline vulcaniche.

#### 4.1 *Metodi di monitoraggio utilizzati*

Sulla base di quanto premesso e degli studi effettuati in diversi contesti geologici e, in particolare, di tutte le attività messe in campo nell'area della concessione mineraria "Monte Sinni" nell'area del Sulcis, si ritiene che per un adeguato controllo dei siti di stoccaggio secondo un "modello di monitoraggio" geochimico ben programmato sia necessario effettuare le seguenti attività di studio/monitoraggio:

1. Rilevamento geologico strutturale dell'area. Tale studio dovrà mettere in evidenza la presenza di faglie e/o fratture sia al fine di verificare l'idoneità del potenziale sito di stoccaggio, sia di fornire supporto alla migliore ubicazione delle altre tipologie studi proposte nel modello di monitoraggio.
2. Identificazione delle famiglie geologico-strutturali e litologiche presenti nell'area al fine di individuare eventuali situazioni di criticità legate alla presenza di potenziali zone di maggiore permeabilità gas (sia primaria che secondaria).
3. Prospezione dei gas del suolo finalizzata alla determinazione della "baseline". Tali misure, oltre a permettere di comprendere lo stato del sistema naturale in condizioni indisturbate (e quindi a comprenderne le variazioni rispetto ai valori "normali") permetteranno di ottenere informazioni preziosissime da utilizzare in tutte le attività di coinvolgimento della popolazione locale. Tali studi dovranno interessare tutte le fasi del processo di stoccaggio (prima, durante e dopo l'iniezione di CO<sub>2</sub>).
4. Verifica della eventuale permeabilità delle strutture geologiche messe in luce dalla prospezione geologico-strutturale attraverso lo studio della correlazione tra i sistemi di faglie cartografate e le aree di anomalie messe eventualmente in luce dalla prospezione dei gas del suolo.

5. Installazione di stazioni monitoraggio geochimico (misura di CO<sub>2</sub> libera e/o disciolta) in continuo in zone del sito di stoccaggio opportunamente selezionate sulla base di quanto descritto nei punti precedenti. L'obiettivo di tali sistemi sarà quello di verificare la presenza di variazioni a lungo termine e/o di trend nella concentrazione dei gas misurati. La tipologia di variazione misurata (a lungo o breve termine) è molto importante per comprendere se l'origine della variazione è biologica o di altra natura. Nel primo caso, infatti, essendoci un potenziale legame con modifiche delle condizioni ambientali, le variazioni saranno a breve termine (ciclicità giornaliera e/o stagionale).

Nell'analisi e nel monitoraggio dei siti di stoccaggio esistono numerose tecniche chimiche e isotopiche per la ricerca di fughe in ambiente terrestre e marino. Un metodo che risulta promettente è la misura diretta della CO<sub>2</sub> con sensori NDIR (non-dispersive infrared) applicato ad ambienti subaerei, in zone insature di terreno e in falde acquifere o in mare. Per la determinazione della CO<sub>2</sub> esistono oggi sensori NDIR delle dimensioni di una moneta con una risoluzione di pochi ppm. Il tipo di monitoraggio proposto prevede l'inserimento di sensori nel suolo a diverse profondità con la necessità di alimentazione elettrica via cavo o con batterie, memorizzazione e/o trasmissione dei dati ad un server centrale. Per una corretta raccolta dei dati è necessario il posizionamento dei sensori in modo da non alterare in modo significativo le vie di fuga dei gas.

Un problema non secondario riguarda la calibrazione. I sensori NDIR sono soggetti ad un drift del segnale e hanno bisogno di una periodica ri-calibrazione; hanno una vita che dipende principalmente dal tempo di accensione della lampada e dalle condizioni di stress meccanico e termico a cui vengono sottoposti. L'estrazione periodica del sensore dal sito e la sua sostituzione o la sua ri-calibrazione potrebbe essere costosa o impraticabile poiché i sensori sono completamente inseriti sottosuolo. La calibrazione avviene esponendo la camera di rilevazione del sensore a miscele con concentrazioni note di CO<sub>2</sub> (*standard*). Per la soluzione di questo problema possono essere prese in considerazione diverse soluzioni:

- Stimare il drift del sensore e correggere così la risposta a posteriori;
- In fase di posizionamento del sensore, predisporre una via di iniezione e recupero dello *standard*;
- Posizionare coppie di sensori, utilizzandone solo uno per il normale campionamento e accendo l'altro ad intervalli molto più lunghi al fine di verificare, e in certe condizioni ricalibrare il sensore principale;
- Posizionare più sensori fin dall'inizio con accensione differenziata nel tempo; si comincerà ad utilizzare un nuovo sensore quando è previsto la fine del ciclo di vita del sensore precedente.

I sensori NDIR, sono realizzati per lavorare in aria, in un range di umidità da zero al 95% purché non condensata. Per far lavorare questi tipi di sensori in condizioni diverse come ad esempio in acqua o in terra sono necessari alcuni accorgimenti. Ottimi risultati sono stati ottenuti inserendo il sensore NDIR in un *case* stagno, separato da una sottile membrana di TeflonAF spessa poche decine di micron e posizionata su un apposito supporto poroso e resistente. Numerosi test sono stati eseguiti in acque marine e pozzi profondi a pressioni superiori ai 40 bar. Variando lo spessore della membrana e il tipo di supporto poroso si possono raggiungere pressioni superiori ai 600 bar. Questo tipo di soluzione ha il vantaggio di poter misurare concentrazioni di CO<sub>2</sub> in fase gassosa, o disciolta in acqua (pCO<sub>2</sub>).

#### 4.1.1 Descrizione del sistema di monitoraggio

La configurazione del sistema di monitoraggio prevede il collegamento di sonde di piccole dimensioni (82 mm di diametro x 230 mm di altezza), collegate via cavo a un'unità centrale che ne gestisce il funzionamento, fornisce l'alimentazione e assicura la possibilità di memorizzazione e di trasferimento dei

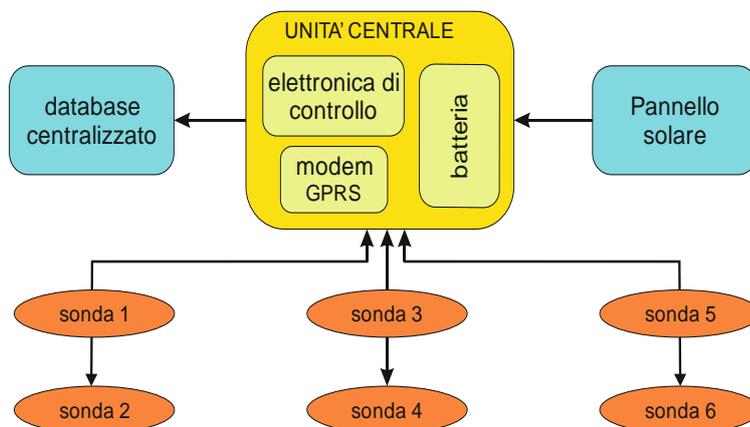
dati. La tensione di alimentazione del sistema è 12 V. Le specifiche tecniche delle sonde sono illustrate in tabella I.

Questa configurazione è stata preferita a un disegno di campionamento in cui le sei sonde sono ubicate tutte alla stessa profondità, perché nel primo caso è possibile anche una stima del flusso di anidride carbonica calcolato sulla base del gradiente di concentrazione alle due diverse profondità e al coefficiente di diffusione della CO<sub>2</sub> proprio del tipo di suolo/roccia presente.

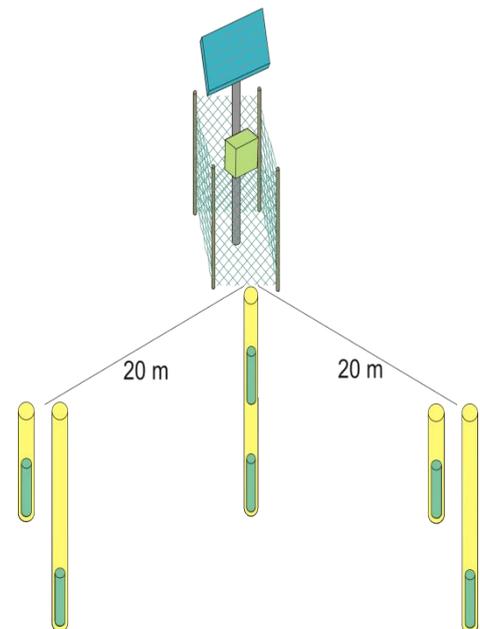
Tabella I. **Caratteristiche tecniche dei sensori utilizzati**

Parametro	Metodo di misura	Range
CO <sub>2</sub> – sensore 1	Sensore NDIR	0-5%
CH <sub>4</sub> – sensore 1	Sensore NDIR	0-5%
CO <sub>2</sub> – sensore 2	Sensore NDIR	0-10%
Temperatura	Sensore digitale	-10°C / +85°C
Pressione	membrana	15 – 115 KPa (0-60m prof.)

Ogni stazione di monitoraggio può controllare fino a 6 punti di misura corrispondenti a 3 coppie di sonde ubicate a 3 e 5 metri di profondità.



**Figura 7.** Diagramma a blocchi raffigurante lo schema di funzionamento delle stazioni di monitoraggio



**Figura 8.** Le 6 sonde collegate ad ogni stazione di monitoraggio sono posizionate ad una distanza di 20 metri l'una dall'altra e a due diverse profondità (3 e 5 metri).

Il sistema prevede inoltre la possibilità di essere rapidamente interrogato dalle autorità locali consentendo tempestivi interventi in caso di rilevazione di anomalie nelle concentrazioni di CO<sub>2</sub>.

#### 4.1.2 Controllo remoto

I dati raccolti dalle sonde sono memorizzati nell'unità centrale su una sd-card. I dati memorizzati possono essere trasferiti via modem o rete locale dopo ogni campionamento ad un database ubicato in un server centrale. Il sistema sfrutta una connessione gprs/UMTS e prevede che ogni stazione di monitoraggio, caratterizzata da un ID univoco, trasferisca i dati sul medesimo database. Questa possibilità semplifica

enormemente le operazioni di gestione ed elaborazione dei dati raccolti da reti di monitoraggio complesse. Utilizzando l'interfaccia web è anche possibile modificare numerose impostazioni tra cui tempo di misura, intervallo di analisi.

## 4.2 Risultati e discussioni

### 4.2.1 Campionamento dei gas del suolo

Durante la prospezione dei gas del suolo sono stati raccolti ed analizzati oltre 300 campioni ad una profondità di circa 60 a 80 cm. Le determinazioni di CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S, nonché un numero minore di punti campione per radon e toron sono state effettuate direttamente *in situ*. Negli stessi punti stati inoltre raccolti campioni conservati in contenitori di acciaio inox per le analisi di laboratorio. Tali analisi hanno riguardato CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> + Ar, N<sub>2</sub>, COS, SO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e altri idrocarburi leggeri, He. Il piano di campionamento ha infine previsto 300 misure di flusso di CO<sub>2</sub> effettuate negli stessi punti sopra descritti.

I valori di flusso di CO<sub>2</sub> sono risultati essere molto bassi, e ben all'interno del range di valori attesi in prossimità della superficie. Anche le concentrazioni di CO<sub>2</sub> sono generalmente basse rientrano nei valori normali per gas del suolo superficiale (0,1-2%), anche se in alcune zone hanno elevati valori che vanno dal 3 al 15 %. Il confronto con O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> implica un'origine biogenica poco profonda per queste anomalie. La maggior parte delle analisi di CH<sub>4</sub> mostra concentrazioni uguali o inferiori alle riscontrate nell'atmosfera (c. 2ppm), sebbene un numero limitato di campioni abbia valori elevati che vanno da 3 ai 6 ppm e un campione contiene 79 ppm. Gli altri idrocarburi sono generalmente molto bassi, mentre lo zolfo è quasi sempre al di sotto del limite di rilevazione dei metodi analitici utilizzati. Il Rn ha dimostrato una chiara associazione con le unità vulcaniche affioranti, mentre il Tn può essere più strettamente associato con sedimenti quaternari. Infine i valori di elio sono in genere molto vicini a quelli osservati nell'atmosfera (5.225 ppb), anche se tre campioni sono risultati essere tra 6.000 e 10.000 ppb, e un campione altamente anomalo ha raggiunto un valore di circa 70.000 ppb.

In prossimità del punto di campionamento dove sono riscontrati i più alti valori di He, CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, una serie di anomalie descrive un allineamento NW-SE, mentre nel resto dell'area d'interesse, le anomalie diffuse non descrivono nessun trend.

Mentre la grande maggioranza dei punti rientra nel range dei valori attesi attribuibili ai processi superficiali biologici, fisici e chimici, un numero limitato di anomalie significative di He, CH<sub>4</sub>, e CO<sub>2</sub> indica la necessità di ulteriori studi per meglio accertare la loro origine (sia in superficie sia in profondità, in relazione alle faglie). Questo lavoro potrebbe includere di ripetere il prelievo dei campioni, eseguire profili verticali, analisi isotopiche e studi biologici associati per confermare le anomalie.

### 4.2.2 Monitoraggio in continuo

I sensori sviluppati per le misure in continuo di anidride carbonica hanno dimostrato di essere idonei al monitoraggio delle aree di stoccaggio geologico della CO<sub>2</sub> sia in termini di sensibilità sia in termini di rapporto costo-risultati.

In particolare la grande mole di dati raccolta ha dimostrato:

- la capacità dei sistemi di acquisire dati per lunghi periodi;
- la notevole variabilità naturale delle concentrazioni di anidride carbonica;
- la necessità di apportare piccoli accorgimenti finalizzati ad aumentare il periodo di monitoraggio esente da deriva strumentale.

Le misure effettuate dalle sonde sommerse hanno inoltre evidenziato che:

- la variabilità naturale delle concentrazioni misurate è molto minore nel monitoraggio della CO<sub>2</sub> disciolta;
- se correttamente equipaggiate con membrane semipermeabili, le sonde realizzate sono in grado di funzionare correttamente anche in acqua.

Il robusto database acquisito ha quindi fornito importanti informazioni per la definizione della baseline grazie alla possibilità di registrare le concentrazioni di anidride carbonica in diverse stagioni, e quindi in funzione di diversi gradi di attività della degradazione della materia organica.

Sulla base di questi risultati nonché in considerazione delle nuove acquisizioni, sarà quindi possibile avere un quadro completo delle variazioni naturali di anidride carbonica nei tre siti monitorati. Tali dati costituiranno la base su cui valutare l'andamento delle concentrazioni in un'ipotetica fase di iniezione e post-iniezione del processo di CCS permettendo di discriminare l'eventuale presenza di reali fughe dal serbatoio di stoccaggio da segnali imputabili a variazioni naturali.

Il lavoro effettuato nelle diverse fasi di questo progetto suggerisce la possibilità di considerare l'insieme di prospezioni periodiche dei gas del suolo (monitoraggio discontinuo e valutazione della baseline dell'intera area interessata dal CCS), di monitoraggio continuo in punti selezionati e di un accurata indagine geologico-strutturale come un modello di monitoraggio dei siti di stoccaggio che, grazie all'uso di strumenti sinergici può aiutare a comprendere il comportamento del sistema naturale in condizioni indisturbate e, di conseguenza, a discriminare la presenza di "vere" anomalie.

## 5 Bibliografia e sitografia

**Bachu, S. and W.D. Gunter** (1994): Aquifer Disposal of CO<sub>2</sub>: Hydrodynamic and Mineral Trapping, *Energy Conversion and Management*, 35, pp. 269-279.

**Benson, S.M., R. Hepple, J. Apps, C.F. Tsang, and M. Lippmann** (2002a): Lessons Learned from Natural and Industrial Analogues for Storage of Carbon Dioxide in Deep Geologic Formations, *Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-51170*.

**Benson, S.M., J. Apps, R. Hepple, M. Lippmann, C.F. Tsang, and C. Lewis** (2002b): Health, Safety, and Environmental Risk Assessment for Geologic Storage of Carbon Dioxide: Lessons Learned from Industrial and Natural Analogues, Sixth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-6), Kyoto, Japan, 1-4 October, 2002.

**Blencoe, J.G., D.R. Cole, J. Horita, and G. Moline** (2001): Experimental Geochemical Studies Relevant to Carbon Sequestration, *Proceedings of the First National Symposium on Carbon Sequestration*, U. S. National Energy Technology Laboratory, Washington DC.

**Brown, G. A. and A. Hartog** (2002): Optical Fiber Sensors in Upstream, Oil and Gas, *Journal of Petroleum Technology*.

**Celia, M., J. Nordbotten, S. Bachu, M. Dobossy, and B. Court**. 2009. Risk of leakage versus depth of injection in geologic storage. *Energy Procedia* 1:2573–2580.

**Cole, D.R.** (2000): Isotopic Exchange in Mineral-Fluid Systems IV, The Crystal Chemical Controls on Oxygen Isotope Exchange Rates in Carbonate-H<sub>2</sub>O and Layer Silicate-H<sub>2</sub>O Systems, *Geochimica Cosmochimica Acta*, 64, pp. 921-931.

**Czernichowski-Lauriol, I., et al.** (1996): Analysis of Geochemical Aspects of Underground Disposal of CO<sub>2</sub>: Scientific and Engineering Aspects, *In: Deep Injection and Disposal of Hazardous and Industrial Wastes*, J. Apps and C.F. Tsang, eds., Academic Press.

**Direttiva europea sullo stoccaggio della CO<sub>2</sub>**

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0114:0135:IT:PDF>

**Dreesen, R., Bossiroy, D., Swennen, R., Thorez, J., Fadda, A., Ottelli, L., and Keppens, E.**(1997), A depositional and diagenetic model for the Eocene Sulcis coal basin of SW Sardinia, *in* Gayer, R., and Pegek, J., eds., *European Coal Geology and Technology*, Geological Society of London Special Publication, no. 125, p. 49-75.

**Emberley, S., I. Hutcheon, M. Shevalier, K. Durocher, W.D. Gunter, and E.H. Perkins** (2002): Geochemical Monitoring of Fluid-Rock Interaction and CO<sub>2</sub> Storage at the Weyburn CO<sub>2</sub> Injection Enhance Oil Recovery Site, Saskatchewan, Canada, Sixth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-6), Kyoto, Japan, 1-4 October, 2002.

**Gunter, W.D., R.J. Chalaturnyk, and J.D. Scott** (1998): Monitoring of Aquifer Disposal of CO<sub>2</sub>: Experience from Underground Gas Storage and Enhanced Oil Recovery, *Proceedings of GHGT-4*, Interlaken, Switzerland, pp. 151-156.

**IPCC, 2005.** *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Sequestration*, B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, and L. Meyer (eds.). Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK. Available:

[http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_and\\_data\\_reports\\_carbon\\_dioxide.htm](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports_carbon_dioxide.htm).

**IPCC, 2007.** *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Available:

[http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf).

**IPCC** Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage, 2005.

[http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srcs/srcs\\_wholereport.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srcs/srcs_wholereport.pdf)

**Johnson, J.W., J.J. Nitao, C.I. Steefel, and K.G. Knauss** (2001): Reactive Transport Modeling of Geologic Sequestration in Saline Aquifers: the Influence of Intra Aquifer Shales and the Relative Effectiveness of Structural, Solubility, and Mineral Trapping During Prograde and Retrograde Sequestration, *Proceedings of the First National Symposium on Carbon Sequestration*, U. S. National Energy Technology Laboratory. Washington DC.

**Kennedy, B.M. and T. Torgersen** (2001): Multiple Atmospheric Noble Gas Components in Hydrocarbon Reservoirs: A Study on the Northwest Shelf, Delaware Basin, SE, New Mexico. Submitted to *Geochimica Cosmochimica Acta*, Also *Lawrence Berkeley National Laboratory Report, LBNL-47383*.

**Knauss, K., J.W. Johnson, C.I. Steefel, J.J. Nitao** (2001): Evaluation of the Impact of CO<sub>2</sub>, Aqueous Fluid, and Reservoir Rock Interactions on the Geologic Sequestration of CO<sub>2</sub>, with Special Emphasis on Economic Considerations, *Proceedings of the First National Symposium on Carbon Sequestration*, U. S. National Energy Technology Laboratory. Washington DC.

**Rackley, S.A.** (2010) Carbon Capture and Storage. Elsevier

**Strutt, M.H., S.E. Beaubien, J.C. Baubron, M. Brach, C. Cardellini, R. Granieri, D.G. Jones, S. Lombardi, L. Penner, F. Quattrocchi, and N. Voltattorni** (2002): Soil Gas as a Monitoring Tool of Deep Geological Sequestration of Carbon Dioxide: Preliminary Results from the Encana EOR Project in Weyburn, Saskatchewan (Canada), Sixth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-6), Kyoto, Japan, 1-4 October, 2002.

**Sistema per lo scambio di quote di emissione (Emission Trading Scheme - ETS)**

[http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/index_en.htm)

**Sito della Commissione Europea sulle tecnologie CCS**

[http://ec.europa.eu/clima/policies/brief/eu/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/brief/eu/index_en.htm)

**Tanura, S., N. Imanaka, M. Kamikawa, and G. Adachi** (2001): A CO<sub>2</sub> Sensor Based on a Sc<sub>3</sub> Conducting Sc<sub>1/3</sub>Zr<sub>2/3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> Solid Electrolyte, *Sensors and Actuators B*, 73, pp. 205-210.

**U.S. EPA. 2008.** *Vulnerability Evaluation Framework for Geologic Sequestration of Carbon Dioxide*. EPA 430-R-08-009. U.S. Environmental Protection Agency.

**U.S. EPA. 2010.** *Monitoring Plans for Geologic Sequestration*. U.S. Environmental Protection Agency.

**Wright, G. and Majek** (1998): Chromatograph, *RTU Monitoring of CO<sub>2</sub> Injection*. *Oil and Gas Journal*, 20 July, 1998.

## 6 Curriculum del gruppo di ricerca

Il Centro di Ricerca CERi, istituito con Decreto Rettorale n. 00353 del 31 luglio 2003 (su delibera conforme del Senato accademico del 24 aprile 2003 e del Consiglio di Amministrazione del 22 luglio 2003) promuove, coordina ed esegue attività di ricerca nel campo dei rischi geologici (frane, inondazioni, rischio sismico e vulcanico) e della bonifica dei siti inquinati, sperimentando la messa a punto di metodologie innovative (ex art. 1 comma 2 dello Statuto). Per perseguire i propri obiettivi il Centro articola le proprie attività (ex art. 4 comma 2 dello Statuto) in:

- ricerche sperimentali, di laboratorio e di campo, e ricerche teoriche per l'analisi della pericolosità e del rischio di frana;
- ricerche sperimentali, di laboratorio e di campo, e ricerche teoriche per l'analisi della pericolosità e del rischio di esondazione;
- ricerche sperimentali, di laboratorio e di campo, e ricerche teoriche per l'analisi della pericolosità e del rischio di inquinamento, compresa la bonifica dei siti inquinati, dei grandi sistemi acquiferi idropotabili causati anche da eventi di piena;
- ricerche sperimentali, di laboratorio e di campo, e ricerche teoriche per l'analisi della pericolosità e del rischio sismico;
- ricerche sperimentali e teoriche per lo sviluppo di sistemi di monitoraggio di eventi naturali connessi con il rischio idrogeologico e sismico, per il preavviso e allarme a fini di protezione civile;
- definizione di linee guida e standard operativi basati sui risultati delle ricerche, innovativi nel campo della normativa nazionale di riferimento;
- specifici percorsi di alta formazione nazionale e internazionale, con la possibilità di attivare dottorati di ricerca e borse post-doc, finanziati con canali autonomi;
- divulgazione scientifica con pubblicazioni, incontri, convegni nazionali e internazionali;
- sviluppo di metodologie informatiche per la realizzazione di cartografia tematica;
- attività di consulenza mediante contratti e/o convenzioni, secondo quanto disposto dal Regolamento d'Ateneo, e di assistenza tecnico-scientifica nel campo di rischi geologici alla pubblica amministrazione, ad enti locali, regionali e comunitari, ad organizzazioni nazionali ed internazionali, ad altri enti privati.