



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Linee guida per il monitoraggio geochimico dei siti di interesse per lo
stoccaggio geologico della CO₂ e loro applicazione presso l'area del
bacino minerario del Sulcis

S. Lombardi, A. Annunziatellis, S. Graziani e L. Ruggiero



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

CENTRO DI RICERCA CERI

Report RdS/2012/208

LINEE GUIDA PER IL MONITORAGGIO GEOCHIMICO DEI SITI DI INTERESSE PER LO STOCCAGGIO GEOLOGICO DELLA CO₂ E LORO APPLICAZIONE PRESSO L'AREA DEL BACINO MINERARIO DEL SULCIS

S. Lombardi, A. Annunziatellis, S. Graziani e L. Ruggiero (Sapienza Università di Roma, CERI)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Studi sull'utilizzo pulito dei combustibili fossili e cattura e sequestro della CO₂

Responsabile del Progetto: Stefano Giammartini, ENEA

Indice

<i>Sommario</i>	4
<i>Introduzione</i>	5
<i>Linee Guida</i>	7
Premessa	7
Caratteristiche generali di un sistema di monitoraggio geochimico per lo stoccaggio della CO2	8
Parametri e Metodologia.....	8
Piano di Monitoraggio.....	8
<i>Monitoraggio in continuo</i>	9
Descrizione del sistema di monitoraggio	10
Prima installazione.....	11
Manutenzione straordinaria – Maggio 2012.....	12
<i>Elaborazione dati</i>	14
<i>Conclusioni</i>	19
<i>Riferimenti bibliografici</i>	20

Sommario

Oggetto del documento è lo svolgimento di attività relative a studi e sperimentazioni di reti di monitoraggio geochimico.

Nel corso della precedente annualità della Ricerca di Sistema Elettrico è stata predisposta ed avviata presso l'area del bacino carbonifero del Sulcis una rete di monitoraggio geochimico, costituita da tre centraline di misura delle concentrazioni di gas migranti dal sottosuolo.

Le attività del presente documento prevedono:

- La predisposizione di linee guida per la progettazione e realizzazione di sistemi di monitoraggio geochimico in siti di interesse per lo stoccaggio geologico della CO₂;
- Ampliamento e l'esercizio sperimentale della rete di monitoraggio installata presso l'area del bacino minerario del Sulcis;
- L'elaborazione e la valutazione dei dati raccolti nella prospettiva di ricavare utili informazioni circa la capacità di stoccaggio indefinito e la valutazione del rischio associato;

Gli studi condotti negli ultimi 20 anni hanno evidenziato che eventuali fughe di CO₂ da siti di stoccaggio possono avvenire prevalentemente da pozzi o in corrispondenza di faglie [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8].

I rischi di fuga della CO₂ vengono tenuti sotto controllo tramite attenti studi e verifiche preliminari delle strutture preesistenti nell'area, una idonea progettazione e realizzazione dei pozzi di iniezione e attenti monitoraggi dell'aria e del suolo da effettuarsi prima, durante e una volta conclusa la fase di stoccaggio.

La migrazione lungo faglie/fratture è un fenomeno complesso, tuttavia una buona conoscenza delle strutture geologiche consente di gestire i siti di stoccaggio della CO₂ con gli stessi livelli di sicurezza che caratterizzano i giacimenti di idrocarburi che, in modo naturale, per milioni di anni hanno imprigionato il metano o il petrolio.

L'intera attività svolta mira ad individuare le linee guida per la caratterizzazione dei siti candidati, al fine di valutarne la potenzialità di stoccaggio e le condizioni di sicurezza, nel rispetto dei requisiti descritti nel D.Lgs 162/2011.

Introduzione

Alla luce delle problematiche esistenti ed alla presenza di giacimenti di carbone non sfruttabili economicamente all'interno della Concessione mineraria "Monte Sinni" della Carbosulcis S.p.A., negli ultimi anni sono stati effettuati numerosi studi multidisciplinari affidati a diversi enti di ricerca mirati alla verifica delle potenzialità di questo sito per lo stoccaggio geologico della CO₂. Tali studi, iniziati nel 2004, hanno previsto indagini geofisiche, geologiche e geochimiche – prevalentemente concentrate sullo studio della migrazione dei gas del suolo mediante soil gas survey – e condotte dalla Sapienza.

Tali indagini permettono di ottenere un quadro d'insieme delle caratteristiche generali e delle peculiarità dell'area studiata. L'obiettivo finale di questo tipo di indagine è da un lato l'individuazione delle aree in cui sarà più probabile osservare un'eventuale fuga di CO₂ e dove sarà quindi necessario focalizzare l'attenzione nella pianificazione della rete di monitoraggio in continuo; dall'altro ottenere un database dei valori di fondo tipici dell'area e della loro variabilità naturale. La adeguata conoscenza della baseline è infatti importantissima in fase di interpretazione dei dati ottenuti dai sistemi di monitoraggio. Le variabili studiate sono infatti caratterizzate da oscillazioni naturali legate sia alla stagionalità, sia alla periodica variazione d'intensità nella migrazione di gas endogeni. L'approccio geochimico al monitoraggio in continuo si basa sulla possibilità di individuare una fuga sulla base di variazioni di concentrazione di gas nella fase insatura del terreno, nei gas disciolti, nel pH, nell'Eh, e nel chimismo delle acque. A differenza di altri metodi si basa quindi su misure dirette. L'efficacia del sistema è subordinata a diverse condizioni tra cui: la sua sensibilità, la capacità di elaborazione statistica dei dati acquisiti (analisi delle serie temporali), la capacità di individuare con precisione i punti di monitoraggio, la possibilità di moltiplicare il numero di punti di misura attraverso lo sviluppo di sistemi a basso costo. Nell'ambito di questo progetto è stato curato sia l'aspetto legato allo studio della baseline, sia quello relativo alla messa a punto e installazione del sistema di monitoraggio in continuo. Lo studio della baseline è stato condotto mediante campagne di soil gas survey, mentre la parte relativa al monitoraggio è stata sviluppata mettendo a punto un sistema di controllo specifico.

Sulla base dei risultati ottenuti dalla prospezione regionale dei gas del suolo condotta nell'area della concessione mineraria della Carbosulcis nell'ambito della convenzione "The Carbosulcis CO₂-ECBM project" sono state selezionate due zone in cui posizionare le stazioni di monitoraggio in continuo. In particolare, una zona nel settore settentrionale in cui è stato misurato il valore più elevato di concentrazione di elio (5.7 ppm), e una zona nel settore meridionale in cui sono stati rilevati valori di background di CO₂ e CH₄. Entrambe le zone sono localizzate in corrispondenza dell'elemento tettonico che taglia l'area di indagine da nord a sud. In tali aree è stata condotta una prospezione di dettaglio mirata a migliorare la conoscenza dei valori di fondo tipici presenti e di permettere quindi una migliore interpretazione dei dati raccolti durante il monitoraggio.

Tali sistemi di monitoraggio sono stati progettati, costruiti e testati direttamente dal Laboratorio di Chimica dei Fluidi al fine di contenerne i costi, aumentarne la flessibilità e, di conseguenza, potenziarne l'efficacia complessiva.

Come descritto nel precedente rapporto, il completamento dell'installazione della stazione "Sardegna" (precedentemente indicata come SR-10) e la messa in posto degli altri due sistemi di monitoraggio ("Sardegna 1" e "Sardegna 2") è avvenuta a settembre 2011 in quanto è stato possibile ultimare le installazioni solo al termine di un complesso iter burocratico/amministrativo che, tra l'altro, ha costretto la Carbosulcis S.p.A. a richiedere un supplemento di autorizzazioni per l'esecuzione dei lavori di preparazione dei siti selezionati.

Durante questo anno di attività è stato necessario un intervento di manutenzione straordinaria (che ha previsto la sostituzione di molte delle sonde installate) a causa del danneggiamento subito da molte sonde equipaggiate con filtri idrofobici dalla risalita del livello di falda. A questo proposito è opportuno sottolineare che, sebbene le sonde siano potenzialmente in grado di lavorare sia in acqua che nel terreno, al fine di minimizzare i tempi di risposta, le sonde che si presume lavorino costantemente in condizioni

insature vengono equipaggiate con filtri idrofobici e quindi non sono idonee per misure in acqua. Purtroppo le informazioni raccolte prima dell'installazione hanno suggerito la possibilità di utilizzare sonde con filtri idrofobici anche in pozzi in cui, successivamente, è risalita la falda. Le sonde interessate da questo fenomeno sono quindi state danneggiate e hanno richiesto un intervento di sostituzione con nuove sonde equipaggiate con membrane semipermeabili.

Attualmente i sistemi sono tutti in funzione e i dati raccolti forniscono importanti indicazioni per il raffinamento delle conoscenze sulla variabilità naturale delle concentrazioni di anidride carbonica.

Questa fase di monitoraggio del sistema naturale potrà quindi contribuire, in caso di utilizzo del sito per lo stoccaggio geologico della CO₂, a individuare la presenza di fughe distinguendole da eventuali falsi positivi.

Sulla base di quanto emerso durante il monitoraggio, nel corso di quest'anno di progetto sono state effettuate alcune significative modifiche ai sistemi di monitoraggio finalizzate a rendere più stabile la risposta dei sensori nel tempo. Queste modifiche permetteranno acquisire misure esenti da deriva strumentale per un tempo più lungo, che potrà presumibilmente superare i 12 mesi.

Linee Guida

Premessa

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 CO₂ (800 m, in condizioni standard), ma non troppo elevata in modo che la permeabilità e la porosità non risultino troppo basse.
2. Integrità del caprock in modo da evitare possibili fuoriuscite di CO₂.
3. Sufficiente capacità di stoccaggio, tale da poter immagazzinare la quantità di CO₂ rilasciata dalla sorgente di emissione identificata per l'applicazione delle tecnologie CCS.
4. Buone proprietà petrofisiche del reservoir, per assicurare una buona iniettività della CO₂ e quindi che l'applicazione di tale tecnologia possa essere anche economicamente realizzabile.

Le strutture che non soddisfano uno o più dei criteri sopra citati dovrebbero essere escluse. Un potenziale sito di stoccaggio può anche essere ritenuto non idoneo se ci sono conflitti di interesse (per esempio acquiferi profondi con elevata porosità potrebbero anche essere potenzialmente idonei per la produzione di energia geotermica o potrebbero rappresentare riserve strategiche per lo stoccaggio di gas naturale).

Una volta che il/i sito/i più adatto/i vengono selezionati in base ai dati esistenti, devono essere valutate quali informazioni geologiche supplementari sono necessarie per stabilire se il sito è effettivamente adatto per lo stoccaggio di CO₂.

Esistono tre opzioni principali per lo stoccaggio permanente della CO₂ :

- A. **Giacimenti esauriti di gas naturale e petrolio:** Offrono opportunità di stoccaggio della CO₂ e presentano caratteristiche geo-morfologiche ben note.
- B. **Acquiferi Salini:** Offrono un potenziale di stoccaggio della CO₂ di gran lunga superiore in termini di volumi stoccabili rispetto ai giacimenti esauriti ma ne vanno verificate le caratteristiche geomorfologiche.
- C. **Giacimenti profondi di carbone:** Gran parte delle formazioni idonee si trovano a profondità comprese tra 1.000 e 4.000 metri, dove la pressione è sufficientemente elevata per immagazzinare la CO₂ in fase liquida. La CO₂ iniettata nella roccia serbatoio va a riempire gli interstizi liberi al di sotto della roccia di copertura. Con il trascorre del tempo, una parte della CO₂, si discioglie nell'acquifero salino sottostante e in alcuni casi reagisce trasformandosi in minerali (carbonato di calcio e magnesio). Questi ultimi processi si svolgono in tempi molto lunghi, contribuendo a rendere permanente l'intrappolamento.

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 dello specifico sito di stoccaggio. 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 completo di riferimento, su cui impostare il monitoraggio geochimico affinché risulti garantita l'affidabilità e la sicurezza del sistema.

Caratteristiche generali di un sistema di monitoraggio geochimico in un sito di stoccaggio geologico della CO₂

A prescindere dal modello geologico e dalle specifiche caratteristiche di un sito di stoccaggio, da cui dipende l'ampiezza dell'area di monitoraggio e la densità e distribuzione del campionamento e della posizione delle sonde di monitoraggio in continuo, si può comunque formulare una serie di passaggi e indagini che un adeguato sistema di monitoraggio deve avere.

Parametri e Metodologia

La metodologia di campionamento che si propone di utilizzare è di tipo superficiale e discontinuo (Soil Gas Survey) a scala sia regionale (da 1 a 50 campioni/km²) che di dettaglio (da 50 a 400 campioni/km²), per i seguenti parametri: CO₂ % e flusso, CH₄ e HE; superficiale e continuo (Stazioni di Monitoraggio) per: CO₂ %, CH₄ e temperatura; la frequenza di acquisizione dati di tali stazioni non dovrà essere inferiore a 12 al giorno. Per quanto riguarda le acque di falda invece si propone un campionamento discontinuo che prevede la raccolta di campioni da analizzare in laboratorio per il controllo dei seguenti parametri: Alcalinità, PH, DIC, pCO₂, EH, Conducibilità e l'analisi dei gas disciolti (pCO₂, pCH₄).

Piano di Monitoraggio

- FASE I PRE-INIEZIONE

In questa prima fase è di fondamentale importanza la determinazione dei valori del fondo naturale e le loro variazioni (fattori climatici) dei parametri sopraelencati. 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. Si propone pertanto un campionamento dei gas del suolo a scala regionale per l'individuazione di queste anomalie, e un campionamento di dettaglio per la caratterizzazione delle stesse.

- FASE II INIEZIONE

In questa seconda fase si propone l'installazione di stazioni di monitoraggio in continuo in prossimità della testa del pozzo d'iniezione, in zone sensibili come aree popolate o protette, e nei punti critici emersi durante la fase I (aree anomale). Inoltre, per garantire la massima sicurezza del sito, verranno eseguite nuove campagne di Soil Gas Survey a scala regionale da effettuarsi stagionalmente in tutta l'area per la determinazione di eventuali nuove zone anomale.

- 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.

Monitoraggio in continuo

L'ultimo anno di attività del progetto è stato dedicato principalmente alla verifica e alla manutenzione dei sistemi di monitoraggio installati alla fine di agosto 2011. Infatti, come descritto nel precedente report dello scorso settembre, sulla base dei risultati ottenuti attraverso la prospezione dei gas del suolo condotta nei precedenti anni di progetto, è stato possibile da un lato costruire un quadro esaustivo della baseline caratteristica dell'area di studio e dall'altro individuare i siti di monitoraggio più idonei. A questo proposito, è opportuno ricordare che la possibilità di rilevare velocemente una potenziale perdita di CO₂ dal serbatoio profondo è uno degli aspetti più critici legato alle ipotesi di stoccaggio geologico della CO₂ (CCS) prodotta dall'uomo e che la disponibilità di strumenti adeguati per il monitoraggio delle aree selezionate per il CCS potrà giocare un ruolo chiave per il successo di questa tecnologia di mitigazione delle emissioni di gas serra in atmosfera.

L'installazione di agosto 2011, è stata finalizzata al termine di un complesso iter burocratico che ha permesso alla Carbosulcis S.p.A. di completare le opere infrastrutturali necessarie alla messa in posto dei sistemi di monitoraggio (in particolare la realizzazione dei pozzi e la predisposizione delle paline di sostegno delle unità centrali). Tale installazione ha permesso di mettere in funzione circa l'80% dei 18 punti di monitoraggio previsti nelle tre stazioni di monitoraggio.

L'impossibilità di ultimare il 100% dell'installazione è da imputare a due diversi aspetti: 1) contrariamente a quanto riportato dai tecnici del luogo, che segnalavano la potenziale presenza di acqua in soli 2 punti di monitoraggio, il livello di falda è risultato superiore a -3m dal piano campagna in un numero molto maggiore di pozzi impedendo la messa in posto delle sonde preparate con filtri idrofobici in luogo delle membrane semipermeabili; 2) uno dei pozzi realizzati non ha potuto raggiungere la profondità di 5 metri prevista consentendo l'installazione di una sola sonda posizionata a -2.5m dal piano campagna.

Sfortunatamente durante il semestre invernale il problema del livello di falda appena descritto, si è esteso a molti altri punti di misura. Per questo motivo, poco tempo dopo l'installazione dello scorso anno, alcune delle sonde equipaggiate con filtro idrofobico che al momento dell'installazione erano installate nella zona insatura del terreno sono state sommerse dalla falda. Tale episodio ha comportato l'immediato arresto del funzionamento dei sistemi installati.

È stato pertanto necessario pianificare un importante intervento di manutenzione straordinaria, effettuato a maggio 2012, che ha previsto la sostituzione di diverse sonde di misura con nuovi elementi equipaggiati con membrana semipermeabile e quindi idonei al monitoraggio in acqua.

Tutti i sistemi di monitoraggio sono attualmente in funzione e sono in grado di memorizzare i dati nella memoria interna. La trasmissione in tempo reale, invece, è momentaneamente non attiva a causa di una unilaterale variazione delle condizioni tariffarie imposta dal provider dei servizi di rete. Per la soluzione di tale inconveniente sarà necessario un nuovo intervento *in situ* al fine di autenticare le schede SIM sulla pagina web dedicata (operazione purtroppo impossibile se le schede stesse sono inserite in modem e non in telefoni cellulari) e poter quindi procedere alle necessarie modifiche contrattuali.

I dati descritti in questo report sono pertanto parziali (in attesa del download di quelli memorizzati *in situ*) e relativi ad intervalli temporali molto diversi tra loro (in funzione dell'eventuale imprevista presenza di acqua nei pozzi). Tali dati hanno comunque confermato il corretto funzionamento del sistema sia nella zona insatura sia in falda (limitatamente alle sonde equipaggiate con membrana semipermeabile) nonché la buona correlazione tra i risultati raccolti dai due diversi sensori di cui è corredata ogni sonda. Tale correlazione è un'ottima conferma che le variazioni misurate sono reali e non legate ad errori del sistema di misura.

È stato infine possibile osservare che la variabilità naturale delle concentrazioni di CO₂, soprattutto nelle misure relative alla zona insatura del terreno, è piuttosto marcata (ben al di sopra della deviazione standard della popolazione statistica) confermando l'importanza di studiare accuratamente questo aspetto in un'ottica di definizione puntuale della baseline e, di conseguenza, della possibilità di discriminare le anomalie vere e proprie dalle variazioni naturali tipiche delle variabili ambientali.

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 ad 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 12V. Le specifiche tecniche delle sonde sono illustrate in tabella I.

Tabella I. Caratteristiche tecniche dei sensori utilizzati

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

Per la descrizione delle modalità di controllo remoto e gestione del sistema si rimanda al report presentato a settembre 2011.

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 (Figg. 1 e 2).

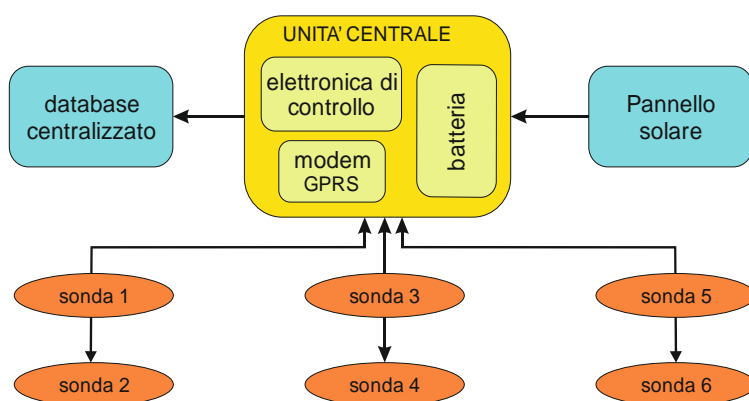


Figura 1. Diagramma a blocchi raffigurante lo schema di funzionamento delle stazioni di monitoraggio

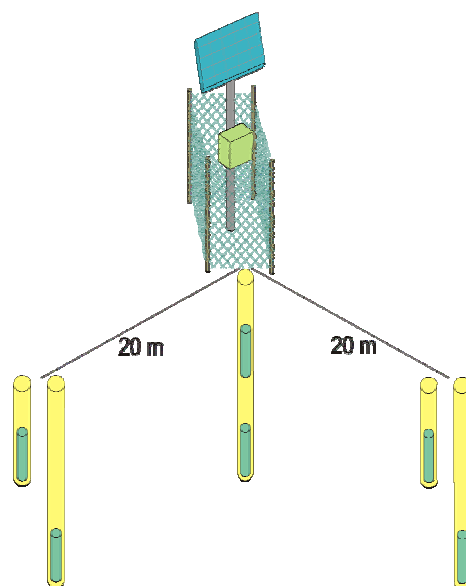


Figura 2. Le 6 sonde collegate ad ogni stazione di monitoraggio sono posizionate ad una distanza di 20 metri l'una dall'altra e a due diverse profondità (3 e 5 metri).

Questa configurazione è stata preferita ad un disegno di campionamento in cui le sei sonde sono ubicate tutte alla stessa profondità in quanto 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 CO₂ proprio del tipo di suolo/roccia presente.

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 CO₂.

Prima installazione

Come descritto nel rapporto relativo alle attività del periodo 2010-2011, l'installazione del sistema è stata finalizzata nel mese di settembre e quindi a ridosso della scadenza annuale del progetto. Purtroppo la raccolta e la trasmissione dei dati si è interrotta prematuramente in quanto, come accennato nei paragrafi precedenti, in molti dei punti di misura la falda ha raggiunto un livello superiore rispetto a quanto comunicato dai tecnici *in situ* sommergendo anche le sonde equipaggiate con filtri idrofobici. Tale episodio ha comportato l'irreversibile danneggiamento di numerose delle sonde installate impedendo la prosecuzione della raccolta di dati. Questa condizione ha reso necessario un intervento di manutenzione straordinaria effettuato a maggio 2012 che ha previsto sia la sostituzione delle sonde danneggiate con nuove sonde equipaggiate con membrane semipermeabili, sia il controllo della calibrazione delle altre sonde.

Manutenzione straordinaria – Maggio 2012

Gli interventi di manutenzione straordinaria che hanno permesso di ripristinare il funzionamento di tutti i sistemi di monitoraggio grazie alla sostituzione delle sonde danneggiate dall'acqua sono stati effettuati nei giorni 28 e 29 maggio 2012.

Gli interventi di manutenzione hanno interessato tutte e tre le stazioni di monitoraggio precedentemente installate: i. Stazione "SARDEGNA" (coordinate 39.1815N e 8.4643E); ii. Stazione "SARDEGNA 1" (coordinate 39.1644N e 8.4627E); iii. Stazione "SARDEGNA 2" (coordinate 39.1368N e 8.4576E).

La figura 3 mostra alcune fasi degli interventi di manutenzione effettuati a maggio.



Figura 3. Intervento di manutenzione (maggio 2012) effetto per ripristinare la completa funzionalità dei sistemi e per verificare la corretta calibrazione delle sonde di misura.

Interventi effettuati nella stazione di monitoraggio SARDEGNA:

- pozzo 0 in corrispondenza del palo di sostegno → controllo sonda S1 e S2 (la sonda S1 con cavo reciso - vedi figura 4 – non è sostituibile);
- pozzo 1 (distanza 20m, direzione SO) → sostituzione sonda S0 (profondità 5m) con sonda S1bis e verifica sonda S3 (profondità 3m);
- pozzo 2 (distanza 20m, direzione NO) → sostituzione sonda S4 (profondità 3m) e S5 (profondità 5m).

Interventi effettuati nella stazione di monitoraggio SARDEGNA1:

- pozzo 0 in corrispondenza del palo di sostegno → sostituzione sonda S2 (profondità 5m – piezometro in corrispondenza del palo di sostegno) e sonda S3 (profondità 3m);
- pozzo 1 (distanza 20m, direzione ONO) → sostituzione sonda S4 (profondità 5m – piezometro in corrispondenza del palo di sostegno) e sonda S5 (profondità 3m);
- pozzo 2 (distanza 20m, direzione NNE) → sostituzione sonda S0 (profondità 2.5m);

Interventi effettuati nella stazione di monitoraggio SARDEGNA2:

- pozzo 0 in corrispondenza del palo di sostegno → sostituzione sonda S4 (profondità 5m – piezometro in corrispondenza del palo di sostegno) e sonda S5 (profondità 3m);
- pozzo 1 (distanza 20m, direzione NO) → sostituzione sonda S2 (profondità 5m – piezometro in corrispondenza del palo di sostegno) e sonda S3 (profondità 3m);
- pozzo 2 (distanza 20m, direzione N) → sostituzione sonda S0 (profondità 5m) e sonda S1 (profondità 3m);

L'ostruzione del pozzo 2 della stazione Sardegna 1 a 2.5 metri di profondità ha reso impossibile posizionare una delle 18 sonde previste. I tre sistemi di monitoraggio sono quindi in grado di misurare le concentrazioni di anidride carbonica da 17 diversi punti.

Sebbene il progetto sia in fase di chiusura e non sarebbero previsti ulteriori interventi di manutenzione/verifica dei sistemi installati, alla luce di quanto accaduto nella prima installazione e della conseguente necessità di sostituire molte delle sonde (con conseguente impossibilità di valutare compiutamente i dati raccolti nel periodo di monitoraggio), indipendentemente dalla stipula di nuovi accordi, si prevede di proseguire il monitoraggio per almeno 6 mesi con almeno un nuovo intervento di manutenzione delle stazioni di misura (presumibilmente entro novembre). I dati raccolti in questa fase, unitamente con quelli già acquisiti, saranno discussi in un report integrativo previsto per la primavera 2013.

Elaborazione dati

I risultati ottenuti mostrano che, escludendo il danneggiamento di molte delle sonde messe in funzione durante la prima installazione dovuto alle informazioni inesatte sul livello di falda durante il semestre autunno-invernale, i sistemi di monitoraggio sviluppati funzionano correttamente sia per quanto riguarda la raccolta dati che per quanto riguarda le procedure di upload automatico sul server centrale.

Relativamente al controllo remoto e alla disponibilità dei dati raccolti in tempo reale bisogna però sottolineare che la nuova politica tariffaria recentemente adottata dai maggiori provider di servizi di telefonia mobile ha parzialmente ostacolato le procedure di upload. In particolare, nonostante le numerose ricerche sia via web sia direttamente contattando i providers, non è stato possibile disattivare svantaggiose opzioni relative al traffico dati che hanno, di fatto, reso impossibile mantenere attivo il trasferimento dati con costi compatibili con le risorse del progetto. Tale inconveniente sarà risolto durante il prossimo intervento di manutenzione nel quale sarà possibile finalizzare la registrazione delle schede telefoniche delle tre stazioni e attivare opzioni flat che permetteranno di uniformare e livellare i costi di trasmissione. Per questa ragione buona parte dei dati raccolti dalle tre stazioni, seppur memorizzati dalle centraline *in situ*, non sono attualmente disponibili e, di conseguenza, in questo report saranno commentati, a titolo di esempio, solo alcuni dei dati raccolti e regolarmente trasmessi. La discussione dei dati ancora non disponibili sul server, unitamente alle nuove acquisizioni relative ai prossimi mesi, saranno parte integrante del rapporto integrativo previsto per la prossima primavera.

Stazione “SARDEGNA”

La stazione Sardegna ha permesso la costruzione del database più corposo tra le tre complessivamente installate. Questo miglior risultato dipende da fatto che la totalità dei pozzi in cui sono posizionate le sonde non è mai stata interessata da presenza d'acqua. Per questo motivo non si sono riscontrati danneggiamenti alle sonde (tutte equipaggiate con filtro idrofobico). L'intervento di manutenzione straordinaria effettuato a maggio ha pertanto interessato solo la parte relativa alla ri-calibrazione delle sonde stesse.

A questo proposito è interessante osservare come la disponibilità di serie temporali lunghe abbia evidenziato la necessità di apportare alcune modifiche nel setup della stazioni e nell'alimentazione dei sensori. Come si osserva dalla figura 4, in cui sono riportati i risultati raccolti da 2 differenti sensori di una stessa sonda (Sonda 0 installata in P1 a 5 metri di profondità), i primi mesi di monitoraggio sono caratterizzati da risposte molto simili nei due sensori, mentre le misure relative ai mesi finali presentano scostamenti sempre più marcati fino a raggiungere differenze molto evidenti. Si osserva inoltre che i valori di CO₂ misurati presentano un notevole variabilità intorno al loro valore medio confermando l'importanza di acquisire un robusto database finalizzato a comprendere a pieno i valori tipici di CO₂ che caratterizzano il sito di studio (baseline). Solo in questo modo sarà infatti possibile, in caso di uso delle stazioni di monitoraggio in siti di stoccaggio, discriminare concentrazioni potenzialmente indicatrici di microfughe dal serbatoio da semplici variazioni naturali. Dal grafico si osserva infine che le concentrazioni misurate sono più alte (mediamente pari a circa 1.6%) nel periodo più caldo, in cui l'attività biologica è maggiore e più basse (mediamente intorno allo 0.75%, nonché più variabili) nel periodo più freddo, in cui l'attività biologica è minore. Tale comportamento sembra confermare l'origine superficiale della CO₂ misurata.

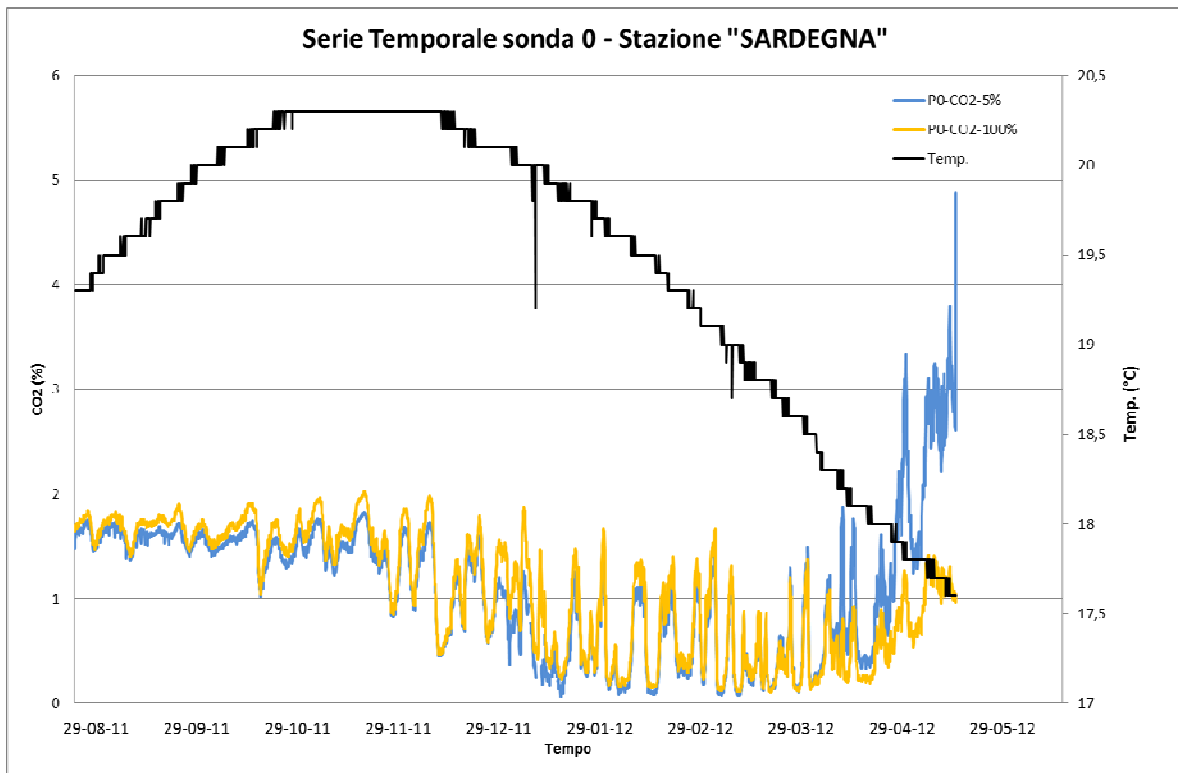


Figura 4. Concentrazione di anidride carbonica e temperatura misurate nell’arco di circa 8 mesi dalla sonda 0 installata nel pozzo 0 della stazione di monitoraggio “Sardegna”. Si osserva che, sebbene i valori siano mediamente pari a 1.6% fino a dicembre per poi scendere ad un valore medio di circa 0.75% nei mesi successivi, le misure presentano una notevole variabilità attorno a questi valori.

La risposta inizialmente molto simile tra i due sensori e successivamente meno correlata è confermata anche dal grafico a dispersione di figura 5.

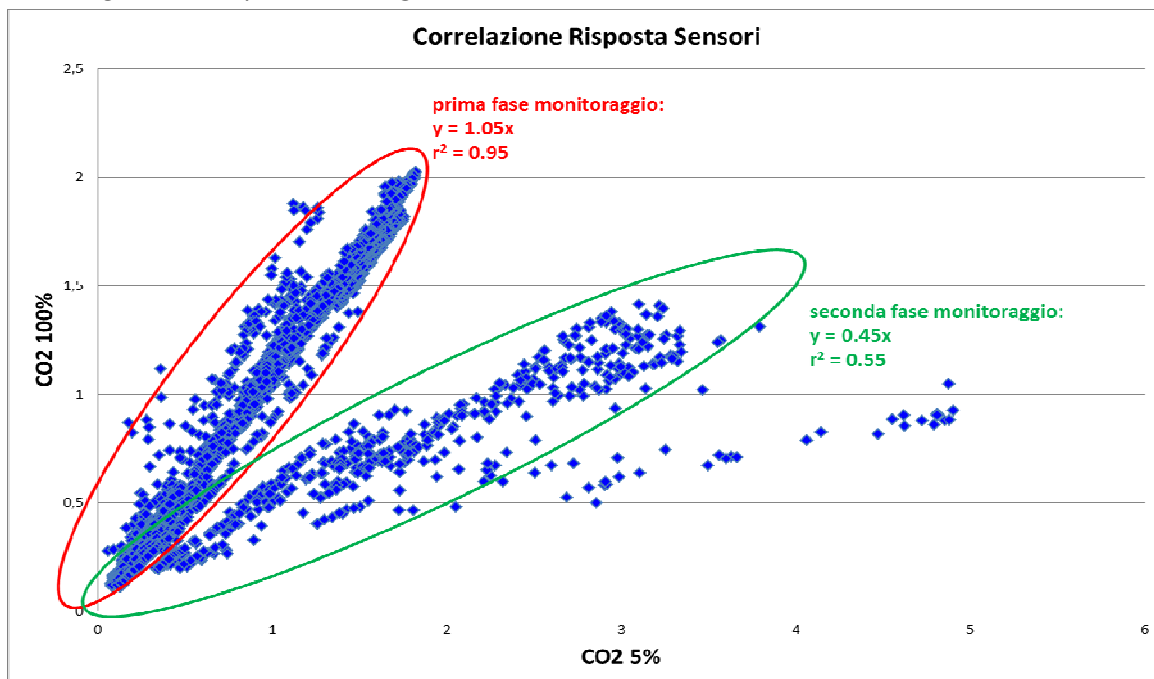


Figura 5. Grafico a dispersione che mette in relazione la concentrazione di CO₂ misurata dai due diversi sensori installati nella sonda 0. L’ottima correlazione iniziale è confermata dalla prima famiglia di dati caratterizzata da una pendenza della retta di correlazione pari a 1 e da un r^2 superiore a 0.95 (punti evidenziati dall’ellisse rossa). Nel restante periodo di monitoraggio si osserva un dimezzamento sia dell’ r^2 sia del valore della pendenza (punti evidenziati dall’ellisse verde) a testimonianza di una minore affidabilità e riproducibilità delle misure effettuate.

Dalla figura si osserva che la risposta dei sensori è abbastanza omogenea fino a marzo, suggerendo che per più di 6 mesi la deriva strumentale può essere considerata trascurabile, per poi differenziarsi rapidamente negli ultimi 2 mesi di misure. Tale grafico, infatti, mostra almeno due popolazioni ben distinguibili: la prima, relativa ai primi mesi di misura, caratterizzata da una pendenza della retta di regressione prossima a 1 e da un r^2 pari a 0.95; la seconda, relativa alle ultime fasi di monitoraggio, caratterizzata da una pendenza pari a circa 0.45 e da un r^2 pari a circa 0.5.

Sulla base di questi risultati sono state apportate due modifiche fondamentali alle stazioni di monitoraggio. La prima prevede un abbassamento della tensione di alimentazione della lampada del sensore al fine di aumentarne la stabilità sul lungo periodo; la seconda prevede un tempo di warm-up abbreviato (ma sufficiente a effettuare misure non affette da errori) con conseguente ulteriore prolungamento della stabilità di risposta dei sensori. Si prevede che queste modifiche possano allungare gli intervalli di manutenzione fino ad almeno 12-14 mesi.

La figura 6 mostra i risultati raccolti dalle sonde ubicate nel pozzo 1 della stazione Sardegna dopo l'intervento di ri-calibrazione dello scorso maggio. Si osserva come le concentrazioni misurate siano superiori nella sonda più profonda, meno affetta dall'influenza dell'atmosfera e inferiori in quella più superficiale. Tali risultati confermano quelli presentati nel rapporto dello scorso settembre relativo alle prime 3 settimane di monitoraggio.

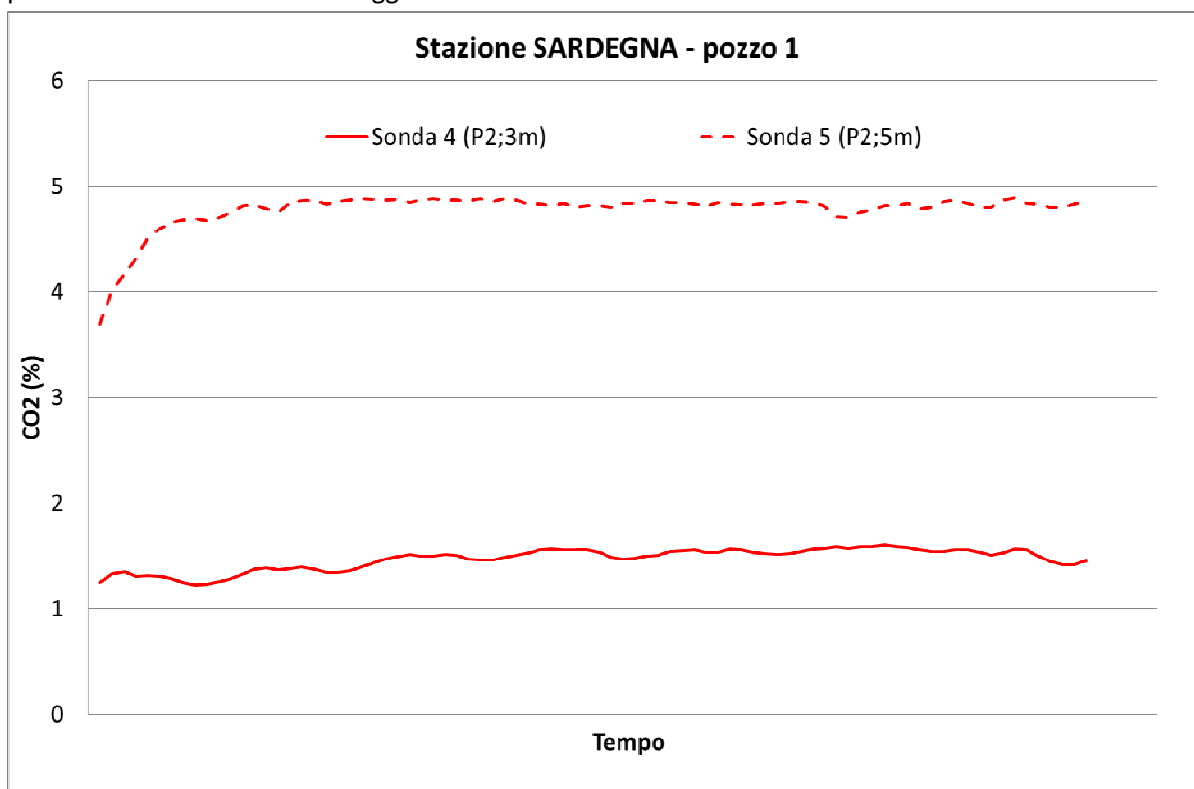


Figura 6. Le sonde installate nel pozzo 1 della stazione Sardegna, analogamente a quanto commentato per il primo periodo di acquisizione nel pozzo 0 della stessa stazione (vd report 2011), mostra concentrazioni maggiori nel punto di misura ubicato a 5 metri rispetto a quelle misurate nel punto di misura ubicato a 3 metri di profondità.

Stazione "SARDEGNA1"

Nell'esempio riportato in figura 7, relativo alla misure effettuate da due delle sonde installate dopo l'intervento di manutenzione di maggio, si osserva che la sonda posizionata nel pozzo da 2.5 metri (senza presenza di acqua) ha da subito misurato concentrazioni molto superiori rispetto a quelle attese. Questo ha

comportato dapprima la registrazione di valori molto sovrastimati (fino al 45%) e, successivamente, l'interruzione della raccolta dati. Tale condizione è legata al fatto che, sulla base delle informazioni raccolte prima dell'installazione, tutte le sonde sono state inizialmente calibrate con uno SPAN (valore a fondo scala) pari al 10%. Essendo state misurate concentrazioni molto superiori a questo valore, la curva di calibrazione costruita non si è rilevata adeguata al monitoraggio del pozzo 2 generando risultati non attendibili. L'altra curva presente nel grafico si riferisce alla concentrazione di CO₂ disciolta misurata in fondo al pozzo 0 (caratterizzato da un livello di falda invernale di circa 2 metri). I valori indicati devono essere quindi letti come pressione parziale di CO₂. Le concentrazioni misurate sono molto più costanti di quelle raccolte nella zona insatura del terreno permettendo una più facile definizione della baseline. È comunque opportuno sottolineare che questa condizione non si tradurrà automaticamente in una maggiore facilità di discriminazione tra anomalie reali e variabilità naturale. È infatti presumibile che i valori di CO₂ disciolti siano soggetti a minori oscillazioni anche in caso di fughe di CO₂.

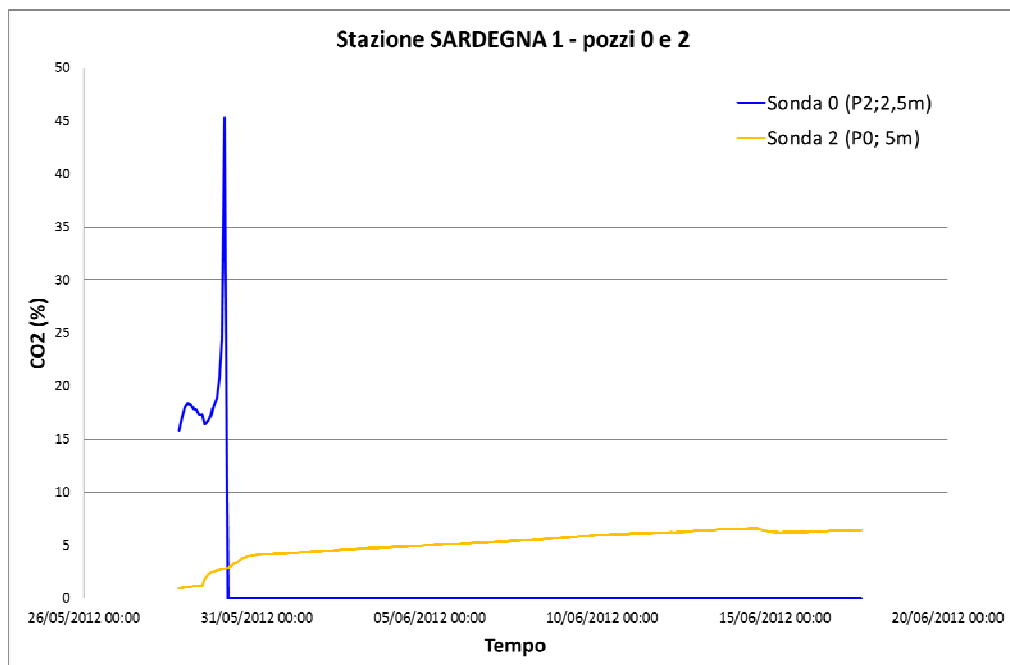


Figura 7. La sonda 0, ubicata nella zona insatura del terreno, ha immediatamente registrato valori molto superiori al fondo scala (10%) utilizzato per la curva di calibrazione del sensore. I risultati misurati sono risultati subito "inconsistenti" e sovrastimati fino a oltrepassare il range di misura consentito dalla curva utilizzata. Al contrario la sonda 2 posizionata in acqua, ha correttamente registrato i valori di pCO₂.

Stazione "SARDEGNA2"

Entrambe le sonde riportate nell'esempio dei dati raccolti dalla stazione Sardegna2 sono ubicate in acqua, in particolare nel pozzo 0 alle due profondità standard di 3 e 5 metri. Le curve hanno un andamento molto simile, confermando il corretto funzionamento delle due sonde (Figura 8). Si osserva inoltre che, al contrario di quanto visto per le misure della zona insatura relativa alla stazione Sardegna, in questo caso la sonda più profonda presenta la pressione parziale di CO₂ maggiore. Anche in questo caso le concentrazioni misurate sono molto più costanti di quelle raccolte nella zona insatura permettendo una più facile definizione della baseline.

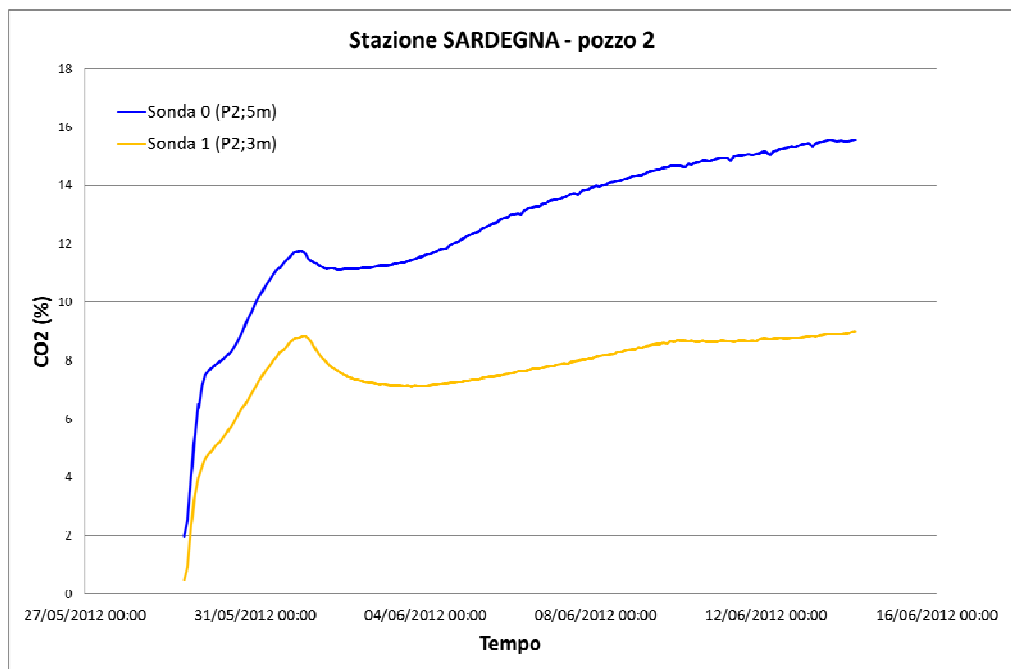


Figura 8. PCO₂ misurata in due delle sonde sommerse della stazione Sardegna 2.

Conclusioni

Nonostante il danneggiamento di alcune sonde inizialmente equipaggiate con filtri idrofobici e inaspettatamente sommerse dall'innalzamento del livello di falda e l'imprevista impossibilità di trasferimento dati legata all'aumento dei costi di trasmissione imposto dai provider telefonici, i sistemi sviluppati hanno dimostrato di essere idonei al monitoraggio delle aree di stoccaggio geologico della CO₂ sia in termini di sensibilità sia in termini di rapporto costo-risultati.

In particolare la grande mole di dati raccolta dalla stazione "Sardegna" ha dimostrato: i. la capacità dei sistemi di acquisire dati per lunghi periodi; ii. la notevole variabilità naturale delle concentrazioni di anidride carbonica; iii. la necessità di apportare piccoli accorgimenti finalizzati ad aumentare il periodo di monitoraggio esente da deriva strumentale.

Le misure effettuate dalle sonde sommerse dopo l'intervento di manutenzione straordinaria hanno inoltre evidenziato che: i. la variabilità naturale delle concentrazioni misurate è molto minore nel monitoraggio della CO₂ disciolta; ii. 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 che saranno effettuate nei prossimi mesi, 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.

Riferimenti bibliografici

1. Annunziatellis A., Ciotoli G., Lombardi S. and Nolasco F. (2003). Short- and long-term gas hazard: the release of toxic gases in the Alban Hills volcanic area (central Italy): *Journal of Geochemical Exploration*, v. 77, p. 93-108.
2. Baines S. J. and Worden R. H. (2004). The long-term fate of CO₂ in the subsurface: natural analogues for CO₂ storage, in Baines, S. J. and Worden, R. H., eds., *Geological Storage of Carbon Dioxide*, Volume Special Publication, 233: London, The Geological Society of London, p. 59-86.
3. Beaubien S. E., Ciotoli G. and Lombardi S. (2003). Carbon dioxide and radon gas hazard in the Alban Hills area (central Italy): *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 123, p. 63-80.
4. Beaubien S. E., Lombardi S., Ciotoli G., Annunziatellis A., Hatziyannis G., Metaxas A. and Pearce J. M. (2005). Potential hazards of CO₂ leakage in storage systems - learning from natural systems, *Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*. vol.1: Peer-Reviewed Papers and Plenary Presentations. Rubin, E.S., Keith, D.W, and Gilboy, C.F. (eds.): Oxford, UK, Elsevier, p. 551-560.
5. Holloway S., Pearce J. M., Hards V. L., Ohsumi T. and Gale J. (2007). Natural emissions of CO₂ from the geosphere and their bearing on the geological storage of carbon dioxide: *Energy*, v. 32, p. 1194-1201.
6. Lewicki J. L., Birkholzer J. and Tsang C. F. (2007). Natural and industrial analogues for leakage of CO₂ from storage reservoirs: identification of features, events, and processes and lessons learned: *Environ. Geol.*, v. 52, p. 457-467.
7. Pearce J. M. (2006). What can we learn from natural analogues?, in Lombardi, S., Altunina, L. K. and Beaubien, S. E., eds., *Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide*, Springer, p. 129-140.
8. Pearce J. M. (2004). Natural analogues for the geological storage of CO₂: British Geological Survey, Final Report of the Nascent project, pages: 122.

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.