



PROGETTO RAVENNA CCS

RELAZIONE SUI RISULTATI
DELLA FASE 1



PROGETTO RAVENNA CCS

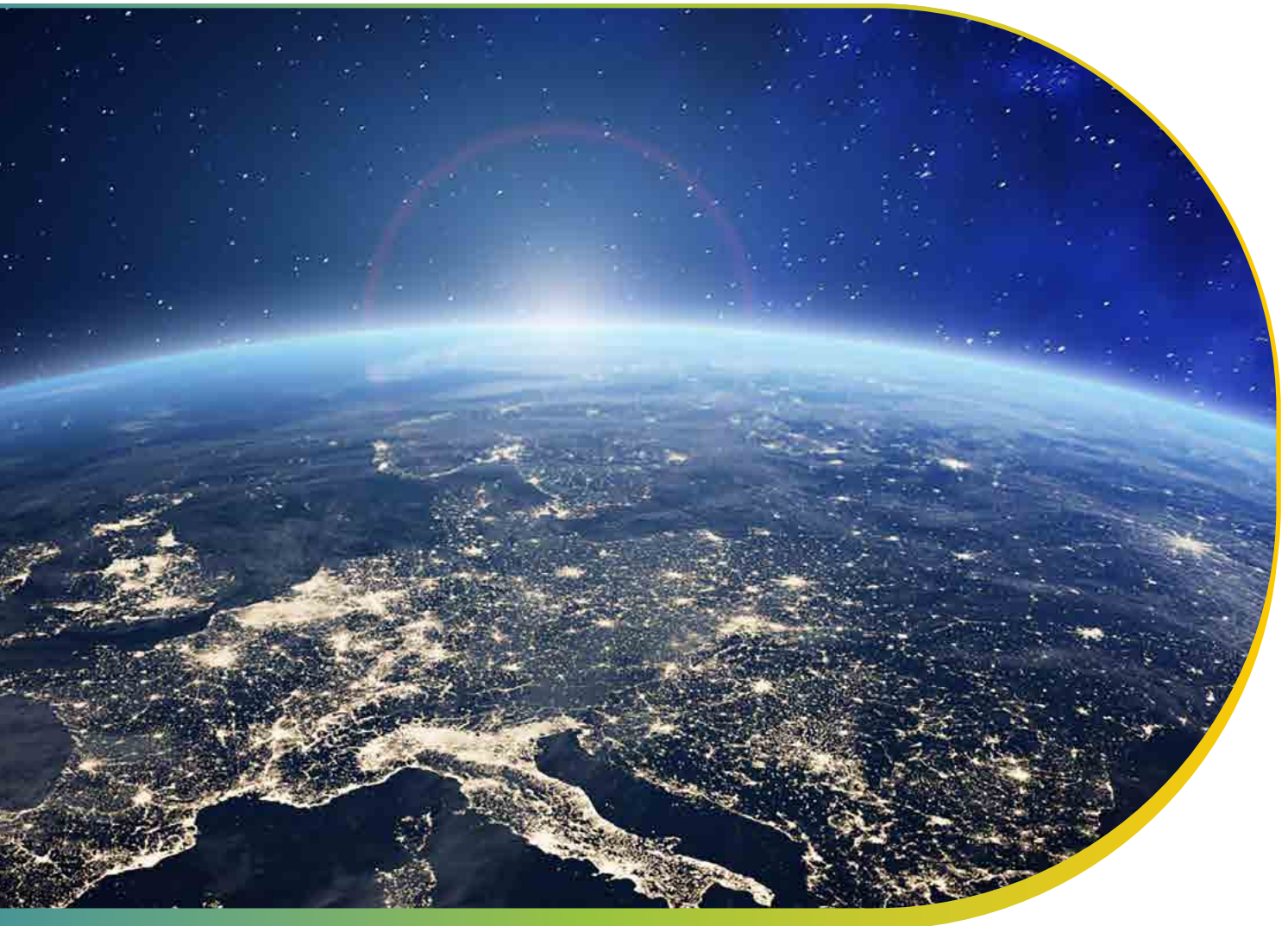
RELAZIONE SUI RISULTATI DELLA FASE 1

Sommario

1.	Cosa è la CCS e il suo ruolo nella decarbonizzazione industriale	4
2.	Il progetto Ravenna CCS.....	6
3.	Breve descrizione tecnica	8
4.	Motivazioni ed obiettivi della Fase 1.....	13
5.	Principali risultati della Fase 1.....	15
6.	Prestazioni dell'impianto di cattura e compressione	16
7.	Prestazioni dell'infrastruttura di trasporto della CO ₂	21
8.	Monitoraggio del giacimento.....	23
9.	Monitoraggio del sottosuolo e dell'area	27
10.	Monitoraggio ambientale	32
11.	Conclusioni	38



1. Cosa è la CCS e il suo ruolo nella decarbonizzazione industriale



La cattura e stoccaggio dell'anidride carbonica (Carbon Capture and Storage, CCS), consiste nella cattura della CO₂ emessa da impianti industriali e nel suo stoccaggio permanente e sicuro nel sottosuolo, al fine di mitigare l'aumento della concentrazione di anidride carbonica in atmosfera, gas a effetto serra il cui accumulo contribuisce al riscaldamento globale. La CCS – assieme ad altre soluzioni – contribuisce quindi ai percorsi di decarbonizzazione industriale, aiutando i sistemi produttivi a diventare più sostenibili. In particolare, la CCS riveste un ruolo importante nei settori industriali difficili da decarbonizzare (in inglese "hard-to-abate"), cioè quelle industrie energivore in cui, sia per gli elevati consumi di energia sia per le caratteristiche intrinseche dei cicli produttivi, parte delle emissioni di CO₂ può risultare difficilmente eliminabile. In questi contesti, la cattura e lo stoccaggio della CO₂ rappresentano una delle principali opzioni disponibili, prevenendone il rilascio in atmosfera.

Esempi di industrie "hard-to-abate" sono quelle del settore siderurgico, i cementifici, le cartiere e la chimica. Come detto, la difficoltà di ridurre le emissioni per questi settori produttivi è legata alla tipologia di processo, ed in particolare alle trasformazioni chimico-fisiche che in questo avvengono. L'esempio più chiaro è quello della trasformazione del calcare in calce (calcinazione), processo imprescindibile per la produzione del cemento, che libera grandi quantità di anidride carbonica dal minerale stesso, ed è responsabile di circa due terzi delle emissioni dei cementifici.

Uno studio del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE, 2025)¹ evidenzia come la CCS rappresenti una delle soluzioni più efficienti in termini di costo per tonnellata di CO₂ evitata, subito dopo l'efficienza energetica e l'elettrificazione da fonti rinnovabili, che risultano, però, di limitata applicabilità nei settori "hard-to-abate" pro-

¹ Studio CCUS. Analisi degli aspetti tecnici, economici e normativi funzionali allo sviluppo della filiera CCUS - MASE 2025.

prio per la presenza di emissioni legate al processo, rendendo la CCS un'opzione strategica che il Sesto Rapporto di Valutazione del Gruppo Intergovernativo sul Cambiamento Climatico dell'ONU (IPCC) ha definito cruciale per la piena decarbonizzazione delle attività industriali come il cemento e la chimica².

Proprio per questi motivi la CCS sta suscitando sempre più interesse a livello mondiale. Tra il 2024 e 2025 si è assistito ad una forte crescita nel numero di progetti e nella di capacità di cattura, cresciuta da 416 milioni di tonnellate di CO₂ all'anno (MTPA) a 513 MTPA³. Attualmente, nel mondo, sono 77 i progetti già in esercizio e 47 quelli in costruzione, ma il dato più interessante è costituito dagli oltre 600 progetti in fase di sviluppo³.

Il processo CCS si svolge in fasi: la prima fase vede la cattura dell'anidride carbonica intercettata direttamente dai fumi in uscita dai camini degli impianti industriali, evitandone così l'immissione in atmosfera. La CO₂ viene separata dagli altri gas con cui è mescolata attraverso tecnologie consolidate e disponibili sul mercato da decenni, come ad esempio la tecnologia amminica. Una volta catturata, la CO₂ viene compressa per essere trasportata attraverso condotte, o anche via treno, nave o su strada, ed infine viene immagazzinata in formazioni geologiche sotterranee idonee, rimanendovi intrappolata in modo permanente. Studi recenti⁴ indicano come la probabilità che una parte della CO₂ possa essere reimpressa in atmosfera attraverso perdite dal giacimento in un arco temporale di migliaia o decine di migliaia di anni sia trascurabile.

Le formazioni geologiche vengono selezionate sulla base di rigorose indagini geologiche e tecniche, avvalendosi anche della potenza di calcolo dei moderni supercalcolatori, in modo da garantire uno stoccaggio sicuro e permanente. Nella selezione dei siti di stoccaggio una soluzione particolarmente vantaggiosa è offerta dal riutilizzo dei giacimenti di gas esauriti in quanto riguardano formazioni geologiche ben conosciute, perché studiate per l'estrazione del gas naturale, per le quali è pertanto possibile prevedere con elevata accuratezza la diffusione dell'anidride carbonica all'interno delle strutture. Sono, inoltre, formazioni che in passato hanno già contenuto grandi quantità di gas naturale per milioni di anni e che quindi garantiscono elevata affidabilità per il confinamento permanente della CO₂.

Inoltre, la CCS sfrutta le esperienze maturate e le conoscenze acquisite con l'attività di stoccaggio di gas naturale nel sottosuolo: attività che in Italia avviene fin dal 1964 per garantire la disponibilità di metano lungo tutto l'arco dell'anno, contribuendo a garantire la sicurezza energetica del Paese, bilanciando la domanda e l'offerta stagionale, fornendo stabilità alla rete e rendendo i prezzi più stabili per l'utente finale.

Ogni fase del progetto di stoccaggio è oggetto di un accurato monitoraggio, attraverso una capillare e avanzata rete di sensori. Nel caso specifico del progetto Ravenna CCS, ai sensori già in funzione nel territorio ravennate a servizio delle precedenti attività estrattive di Eni se ne sono aggiunti altri di nuova installazione.

Per concludere, il processo CCS è sicuro e maturo perché si basa su tecnologie consolidate e disponibili da tempo sul mercato e valorizza esperienze e competenze sviluppate nel corso degli ultimi decenni in ambiti affini, supportate da sistemi di monitoraggio e controllo dedicati.



2 "CCS is an option to reduce emissions from large-scale fossil-based energy and industry sources, provided geological storage is available. When CO₂ is captured directly from the atmosphere (DACCS), or from biomass (BECCS), CCS provides the storage component of these CDR methods. CO₂ capture and subsurface injection is a mature technology for gas processing and enhanced oil recovery. In contrast to the oil and gas sector, CCS is less mature in the power sector, as well as in cement and chemicals production, where it is a critical mitigation option. The technical geological CO₂ storage capacity is estimated to be on the order of 1000 GtCO₂, which is more than the CO₂ storage requirements through 2100 to limit global warming to 1.5°C, although the regional availability of geological storage could be a limiting factor. If the geological storage site is appropriately selected and managed, it is estimated that the CO₂ can be permanently isolated from the atmosphere."

Climate Change 2022 Summary for Policy Makers - Mitigation of Climate Change - IPCC 2022.

3 Global Status of CCS 2025 - GCCSI 2025.

4 Reviewing the implications of unlikely but potential CO₂ migration to the surface or shallow subsurface - IEAGHG 2025.

2. Il progetto Ravenna CCS



Figura 1: Vista aerea dell'impianto di Casalborsetti.
L'impianto di cattura si trova in corrispondenza del riquadro giallo

Il progetto Ravenna CCS è il primo progetto industriale di trasporto e stoccaggio di CO₂ in Italia, realizzato da una joint venture tra Eni e Snam per offrire all'industria italiana ed europea una soluzione competitiva ed immediatamente applicabile per la decarbonizzazione delle attività produttive. La joint venture unisce competenze ed esperienze decennali complementari: da un lato la conoscenza e l'esperienza operativa di gestione dei giacimenti di Eni, dall'altro quella sul trasporto e stoccaggio del gas naturale di Snam. Il progetto prevede lo stoccaggio geologico permanente dell'anidride carbonica nei giacimenti di gas esauriti di Porto Corsini Mare Ovest (PCMw) e Porto Garibaldi-Agostino (PGA), al largo della costa ravennate. Lo stoccaggio avrà scopi esclusivamente ambientali di decarbonizzazione, ed i giacimenti esauriti interessati avranno cessato completamente la produzione di gas naturale prima dell'avvio dello stoccaggio di CO₂. L'anidride carbonica, proveniente da industrie italiane ed europee, verrà trasportata tramite tubazioni interrate fino alla stazione di pompaggio di Casalborsetti, nel comune di Ravenna, oppure via nave fino al porto di Ravenna e da lì tramite tubazioni a Casalborsetti.

Il progetto Ravenna CCS è articolato in fasi. La Fase 1, avviata ad agosto 2024, si è conclusa con successo ad agosto 2025. Questa fase ha avuto lo scopo di dimostrare su piccola scala industriale l'applicabilità del processo CCS, la sua sicurezza e la possibilità di monitorare efficacemente gli impianti e l'ambiente interessati e calibrare gli sviluppi successivi su larga scala. Trattandosi del primo progetto CCS operativo in Italia, è stato necessario realizzare tutte le fasi del processo tecnologico a partire dalla cattura di CO₂. Non essendo presenti impianti di cattura di anidride carbonica industriale né nell'area del ravennate, né in generale su tutto il territorio nazionale, si è deciso di installare un impianto per la cattura delle emissioni di CO₂ di uno dei due turbocompressori presenti nella Centrale Eni di trattamento del gas naturale di Casalborsetti, in modo da fornire una quantità di CO₂ adeguata allo scopo del progetto fase 1. Fin dall'inizio, l'impiego di tale impianto di cattura è stato concepito come una soluzione funzionale e temporanea, coerente con il ruolo dimostrativo del progetto e con l'evoluzione pianificata della Centrale, che prevedeva l'implementazione di interventi di efficientamento energetico in parallelo ad altre azioni di decarbonizzazione. L'esperienza maturata con l'impianto di cattura di

Casalborsetti ha comunque avuto una rilevanza tecnica significativa, avendo dimostrato elevate efficienze di cattura anche in presenza di concentrazioni di CO₂ nei fumi particolarmente basse.

Nel 2025 il progetto Ravenna CCS ha visto l'avvio dell'iter autorizzativo della Fase 2 che prevede, a pieno regime, lo stoccaggio entro il 2030 fino a 4 milioni di tonnellate di CO₂ all'anno per contribuire alla decarbonizzazione delle industrie e dei settori hard-to-abate italiani ed europei. In questa fase verranno ampliate le infrastrutture di trasporto della CO₂ via gasdotti e verrà realizzato il polo logistico al porto di Ravenna in grado di ricevere CO₂ liquida via nave, treno o camion.

Dal 2030 in poi, l'elevato potenziale di stoccaggio dei giacimenti esauriti dell'Adriatico, stimato in oltre 500 milioni di tonnellate totali, potrà permettere ulteriori espansioni del progetto fino ad arrivare a tassi di iniezione stimati in 16 milioni di tonnellate all'anno, in base alla richiesta proveniente dal mercato.

Oltre a contribuire al raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione italiani ed europei, il progetto Ravenna CCS potrà generare significativi benefici economici per il distretto industriale ravennate e, più in generale, per il sistema produttivo italiano. La possibilità di catturare le emissioni industriali potrà favorire lo sviluppo di una filiera di prodotti e servizi a ridotte emissioni di CO₂ con benefici attesi su economia e occupazione⁵. Un altro aspetto importante sarà la riduzione del rischio di delocalizzazione delle imprese verso Paesi extra UE con standard ambientali più permissivi. Un fenomeno, noto come "carbon leakage" che può incidere negativamente sulla competitività delle attività economiche dell'eurozona e sul conseguimento degli impegni di riduzione delle emissioni di gas serra a livello mondiale. Inoltre, la presenza nell'area di Ravenna di una infrastruttura di trasporto e stoccaggio delle emissioni di CO₂ potrà contribuire ad accrescere l'attrattività del polo ravennate verso soggetti nazionali e internazionali interessati ad avviare nuove iniziative industriali a basse emissioni.

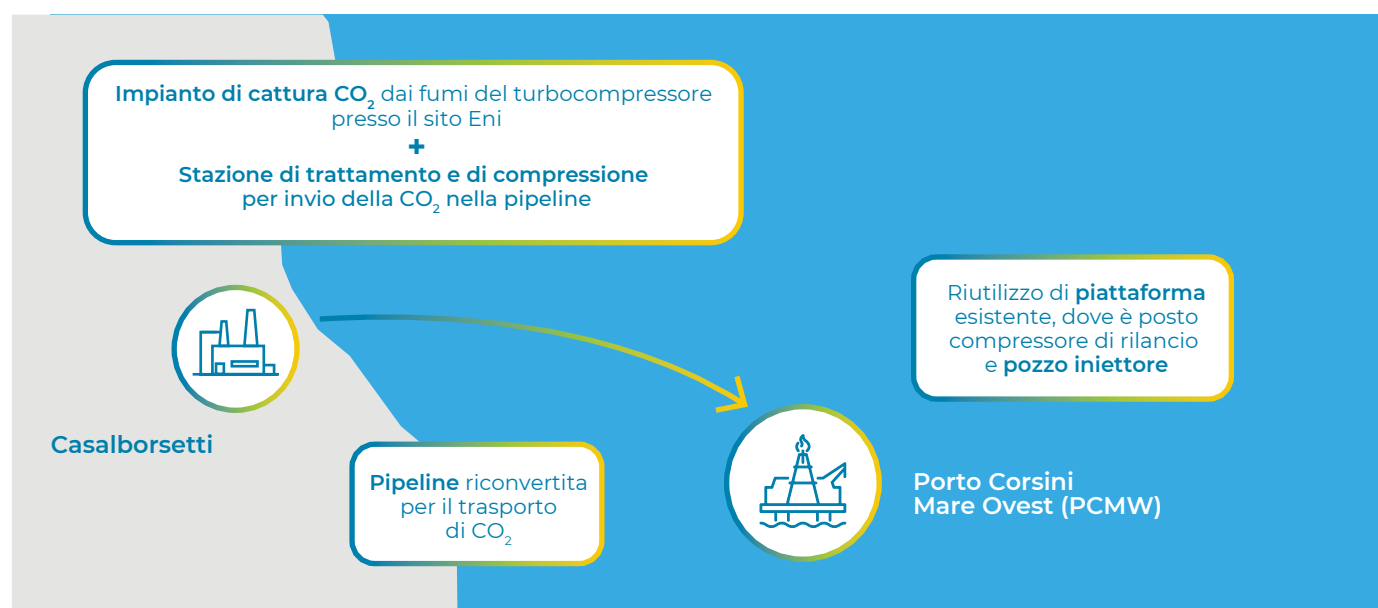


3. Breve descrizione tecnica



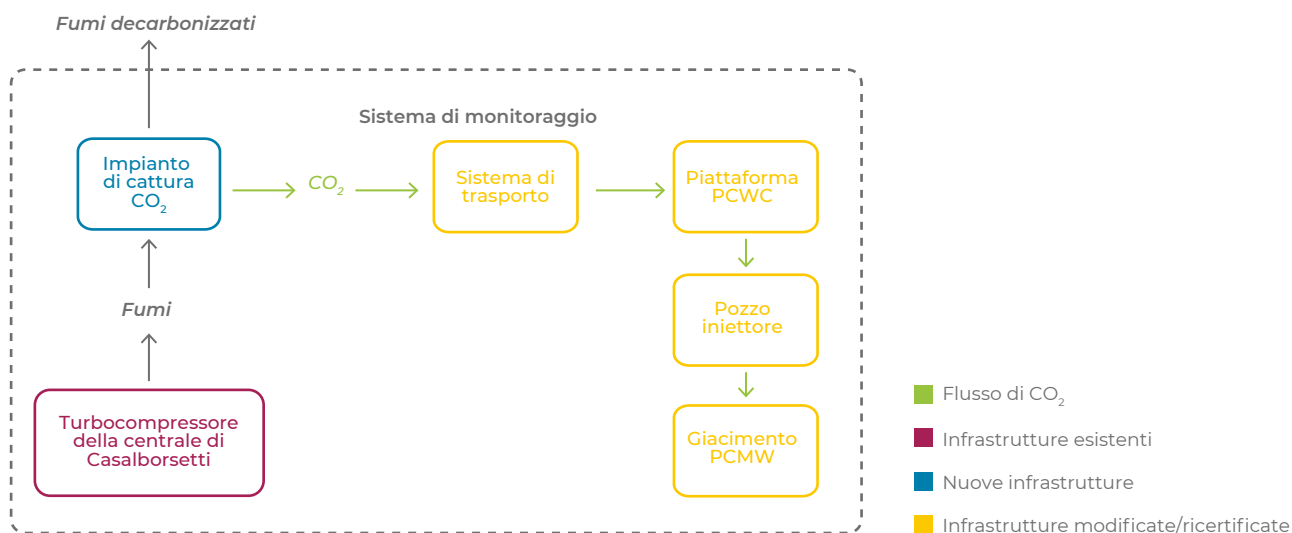
La Fase 1 del progetto Ravenna CCS ha previsto la realizzazione di nuove infrastrutture accanto al recupero e riutilizzo di infrastrutture già esistenti come rappresentato nelle figure 1 e 2 riportate di seguito. Parte delle infrastrutture di Fase 1 verranno riutilizzate anche nella Fase 2.

FIGURA 2: SCHEMA DESCRITTIVO DELLE FACILITIES DEL PROGETTO RAVENNA CCS FASE 1



Nei paragrafi seguenti viene riportata una breve descrizione degli impianti e delle infrastrutture principali che compongono il processo tecnologico di Ravenna CCS Fase 1.

FIGURA 3: SCHEMA RIASSUNTIVO DELLE INFRASTRUTTURE DI RAVENNA CCS FASE 1



IMPIANTO DI CATTURA DI CASALBORSETTI

L'impianto cattura CO₂ dai fumi di uno dei due turbocompressori operativi della centrale, ed è basato su tecnologia ad ammine di Mitsubishi Heavy Industries (MHI). L'impianto è stato concepito fin dall'inizio come una soluzione funzionale e temporanea, coerente con il ruolo dimostrativo del progetto, e funzionale a fornire fino a 25.000 tonnellate l'anno di anidride carbonica da trasportare e stoccare. In parallelo, la Centrale di Compressione di Casalborsetti sta già implementando delle misure di riduzione delle emissioni basate sulla sostituzione dei turbocompressori con macchine più efficienti.

La tecnologia amminica è nota da decenni, e si basa sul passaggio dei fumi all'interno di una colonna dove le ammine in soluzione acquosa catturano chimicamente le molecole di CO₂ legandole a sé, lasciando passare il resto dei fumi che vengono normalmente immessi in atmosfera all'uscita dalla colonna. La soluzione di ammine viene poi mandata in una seconda colonna dove, riscaldata, rilascia CO₂ quasi pura e può tornare nella prima colonna per riprendere il ciclo. La CO₂ così catturata viene compressa da un compressore volumetrico per essere ulteriormente purificata per eliminare tracce di acqua, ossigeno ed altre impurezze, ed essere poi inviata al giacimento.

L'impianto di cattura di Casalborsetti non genera emissioni operative di CO₂ (Scope 1 e 2) perché secondo una logica di massima efficienza genera l'energia termica necessaria al proprio funzionamento recuperando il calore residuo presente nei fumi stessi. L'energia



Figura 4: L'impianto di cattura installato a Casalborsetti

elettrica, invece, proviene interamente da fonti rinnovabili. In questo modo, le operazioni di cattura e compressione non producono nuova anidride carbonica, ma servono esclusivamente ad intercettare e gestire le emissioni già esistenti.

SISTEMA DI TRASPORTO DELLA CO₂

L'anidride carbonica catturata e compressa viene successivamente portata a specifica e trasportata in fase gassosa dalla centrale di Casalborgonetti fino alla piattaforma di iniezione (PCWC).

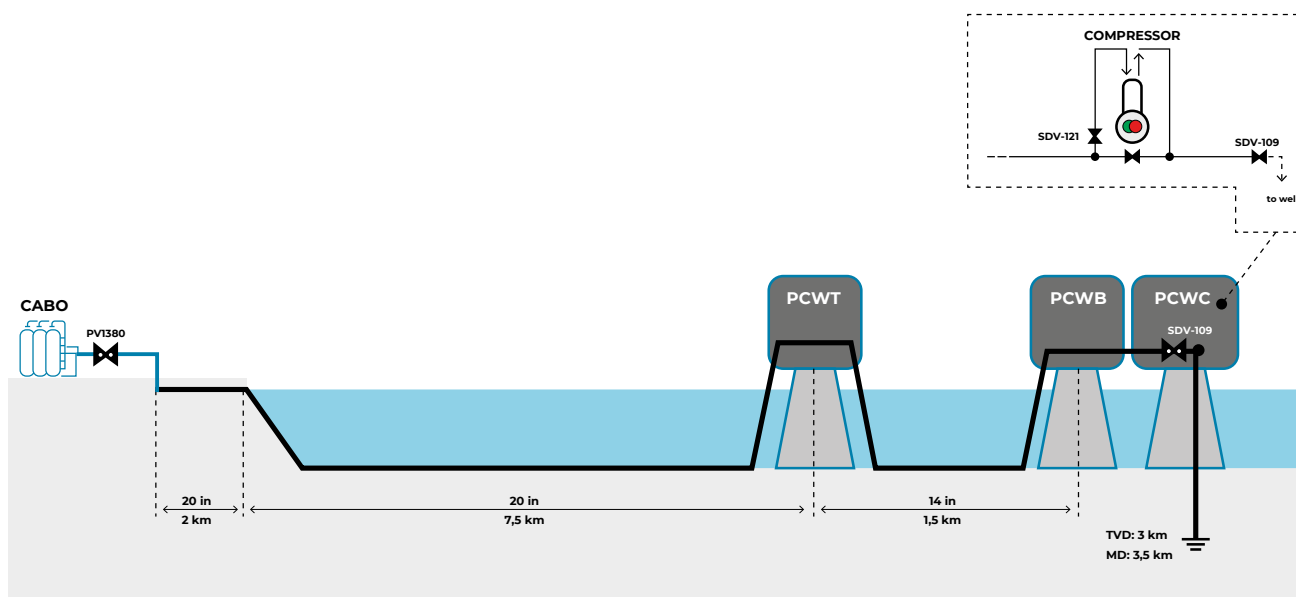
A tale scopo, il sistema di trasporto è costituito da diversi elementi (Figura 5). Dall'impianto di Casalborgonetti, la CO₂ è iniettata in una condotta preesistente di diametro 20 pollici (circa 50 cm) riconvertita a trasporto CO₂ lunga circa 10 km fino alla piattaforma di transito PWCT. Questa linea è costituita da un tratto iniziale a terra di circa 2 km, mentre i restanti 8 km circa sono *offshore*. Dalla piattaforma PWCT, attraverso tubazioni appositamente progettate, la CO₂ viene

direzionata in una seconda condotta di 1,5 km e 14 pollici di diametro (circa 35 cm), anch'essa riconvertita a trasporto di CO₂ sino al complesso di piattaforme PCWB-C.

L'utilizzo di condotte esistenti riqualificate a trasporto CO₂ ha permesso di limitare l'impatto sull'ambiente ed il territorio e di ridurre i costi e tempi del progetto.

Al fine di garantire il trasporto di CO₂ in fase gassosa per l'intera vita utile del progetto di Fase 1, è stato predisposto sulla piattaforma PCWC un sistema di compressione che ha consentito nei mesi invernali di poter operare il sistema di trasporto in condizioni di pressione ridotta per evitare rischi di condensazione in linea della CO₂. A tale scopo, la presenza della strumentazione dislocata in molteplici punti del sistema di trasporto ha consentito di monitorare accuratamente l'evoluzione delle condizioni operative nel tempo e garantire l'aderenza del rispetto di trasporto di CO₂ in fase gassosa.

FIGURA 5: SCHEMA DELLE INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO DELLA CO₂



PIATTAFORMA E POZZI DI INIEZIONE E MONITORAGGIO

La piattaforma PCWC ospita le apparecchiature necessarie alla ricezione ed invio della CO₂ nel pozzo iniettore. Per essere adeguata alla nuova funzione di supporto all'iniezione e stoccaggio di CO₂, è stato necessario apportare alla piattaforma alcune modifiche minori, tra le quali l'installazione di un compressore di rilancio utilizzato nel periodo invernale. Come pozzo iniettore è stato utilizzato il pozzo PCMW 30 Dir B, un "sidetrack" di un pozzo esistente. Si parla di sidetrack

quando si chiude minerariamente la parte più profonda di un pozzo (quella a contatto con il giacimento) e se ne realizza una nuova a partire dalla parte meno profonda preesistente. In questo modo i materiali a contatto con il giacimento e la CO₂ sono nuovi e adeguati alla nuova funzione, ma le operazioni di nuove trivellazioni sono ridotte al minimo, con conseguente riduzione delle attività necessarie alla realizzazione del progetto e dei relativi impatti, oltre che dei costi. I pozzi esistenti PCMW 09 Dir e PCMW 20 Dir sono stati utilizzati per il monitoraggio del giacimento.



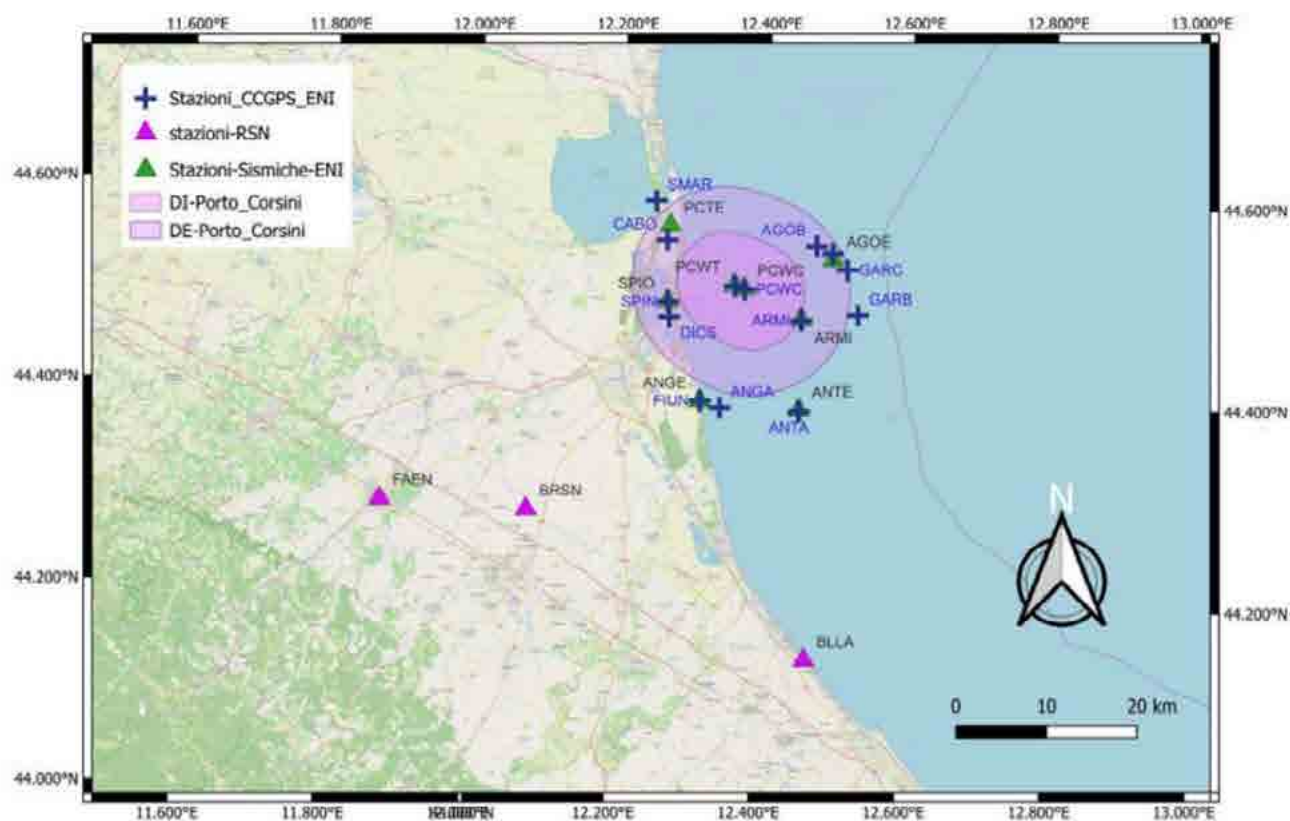
Figura 6: Piattaforma PCWC

SISTEMA DI MONITORAGGIO

La Direttiva europea 2009/31/CE per lo stoccaggio dell'anidride carbonica prevede la predisposizione di un adeguato sistema di monitoraggio delle aree interessate allo stoccaggio della CO₂, al fine di confermare la sicurezza e la permanenza dello stoccaggio geologico della CO₂. Anche se non richiesto dalla normativa vigente in Italia alla data della sua autorizzazione in virtù della taglia ridotta in termini di quantitativi di CO₂ iniettati, il progetto Ravenna CCS Fase 1 ha comunque implementato un articolato sistema di monitoraggio del giacimento, del sottosuolo e dell'ambiente marino nella zona interessata dal progetto. I sistemi di monitoraggio, in parte di nuova

realizzazione ed in parte già utilizzati durante la precedente attività estrattiva, hanno confermato la sicurezza dello stoccaggio e le assunzioni fatte negli studi e modelli precedenti. I risultati raccolti sono stati utili per confermare la validità delle tecniche applicate, oltre che per lo sviluppo della Fase 2. I dati per il monitoraggio del sottosuolo sono stati condivisi con INGV che, in qualità di Struttura Preposta al Monitoraggio nominata dal Ministero e di concerto con gli altri enti coinvolti, ha effettuato delle analisi indipendenti⁶ a garanzia di un ulteriore livello di controllo e trasparenza. La Figura 7 riporta la mappa dei sistemi di monitoraggio del sottosuolo applicati per il progetto Ravenna CCS Fase 1.

6 Monitoraggio del Programma Sperimentale di stoccaggio geologico di CO₂ "Ravenna CCS fase 1" - INGV 2025.

FIGURA 7: MAPPA DEI SISTEMI DI MONITORAGGIO MICROSISMICO E DELLE DEFORMAZIONI DEL SUOLO TRAMITE GPS

Il piano di monitoraggio del sottosuolo è organizzato secondo due aree concentriche in accordo alle norme di riferimento. La prima area, chiamata Dominio Interno (DI), rappresenta la zona di controllo più ravvicinata: comprende un raggio di 5 km attorno all'area di interesse minerario e si estende fino a 8 km di profondità sotto il livello del mare. È la zona monitorata con maggiore intensità. La seconda area, chiamata Dominio Esteso (DE), costituisce una fascia di sorveglianza più ampia che circonda il Dominio Interno: si estende per ulteriori 5 km verso l'esterno e raggiunge una profondità di 13 km sotto il livello del mare. Serve a intercettare eventuali effetti che si dovessero propagare al di là della zona centrale. Questa struttura a due livelli consente di avere un quadro completo della situazione, distinguendo tra ciò che accade nell'immediato intorno dell'area di progetto e ciò che avviene in un contesto territoriale più ampio. RSN = Rete sismica nazionale.

4. Motivazioni ed obiettivi della Fase 1



Figura 8: Evento divulgativo "Project Network 2025" organizzato a Bologna a giugno 2025 in collaborazione con l'associazione ZEP (oggi Carbon Management Europe). Il progetto Ravenna CCS ha condiviso con esponenti del mondo industriale e delle istituzioni locali, nazionali ed europee e con rappresentanti internazionali del mercato della CCS le esperienze acquisite nello sviluppo e nell'esercizio della Fase 1

La CCS è un processo maturo e sicuro, ma il suo impiego a fini ambientali – dunque come soluzione di decarbonizzazione delle attività industriali – è relativamente recente: prima del 2020 i progetti operativi a livello mondiale ammontavano a meno di 30⁷. Negli ultimi anni, grazie alla maggiore sensibilità alle questioni climatiche e agli impegni di decarbonizzazione presi da diversi Paesi e organizzazioni sovranazionali, sono aumentate le iniziative e gli investimenti in tecnologie di transizione come l'eolico o il fotovoltaico, l'elettrificazione dei consumi, i biocarburanti ed altro. Anche il numero di progetti di CCS, in virtù della loro efficacia per la decarbonizzazione dell'industria, è aumentato molto rapidamente passando da 77 progetti operativi nel 2025 agli oltre 600 in via di sviluppo⁸.

Nonostante questo segnale decisamente positivo, il mercato della CCS si trova ancora in uno stadio di sviluppo iniziale, con un numero di operatori limitato, una conoscenza da parte degli operatori industriali delle opportunità di decarbonizzazione offerte della CCS disomogenea, così come non uniforme è la velocità con cui diversi Paesi stanno implementando questa soluzione. In Italia, Ravenna CCS Fase 1 è stato il primo progetto di questo tipo di taglia industriale.

Come accaduto per tante altre tecnologie, dai pannelli solari alla mobilità elettrica, lo sviluppo di un nuovo mercato deve essere da una parte abilitato da un adeguato quadro normativo, dall'altra stimolato tramite iniziative pilota che favoriscano la conoscenza della tecnologia presso i suoi utilizzatori finali. Ed è esattamente questa la funzione che ha svolto, con risultati ampiamente positivi, il progetto Ravenna CCS Fase 1.

Il progetto Ravenna CCS Fase 1 è stato approvato dal Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) nel gennaio 2023, con una durata massima di 3 anni inclusivi di costruzione ed esercizio. L'infrastruttura è stata completata in 18 mesi circa ed è entrata in esercizio ad agosto 2024, terminando le operazioni di iniezione un anno dopo, a fine agosto 2025, in prossimità del termine dell'autorizzazione. Anche dopo la conclusione dell'iniezione il progetto prosegue con le attività di monitoraggio previste, finalizzate a verificare nel tempo il comportamento della CO₂ stoccata e la piena sicurezza e integrità del sito. Per tutto questo periodo, ed ancora oggi, l'infrastruttura del progetto Ravenna CCS Fase 1 ha fatto da catalizzatore per gli importanti passi avanti verso l'applicazione della CCS in Italia.

7 Fonte: Global Status of CCS 2020 - GCCSI.

8 Fonte: Global Status of CCS 2020 - GCCSI.

Tra questi ricordiamo:

- l'inclusione della CCS nel Piano Nazionale Energia e Clima (PNIEC) italiano del 2024;
- il decreto-legge 181/2023 che aggiorna la normativa nazionale sullo stoccaggio di biossido di carbonio ed introduce la necessità di studiare e finalizzare la regolamentazione dell'intera filiera;
- lo studio CCS del MASE, pubblicato ad agosto 2025, che introduce:
 - il quadro normativo sul tema CCS ed il suo orientamento di evoluzione;
 - l'analisi dei costi e dei meccanismi di incentivo;
 - l'analisi della domanda di decarbonizzazione del tessuto industriale italiano, in particolare dei settori *hard-to-abate* (cemento e calce, raffinazione, chimica, idrogeno blu, DRI (acciaio) e acciaio secondario, vetro, ceramica), termoelettrico e Waste to energy. Viene dato risalto anche al tema dell'aggregazione (clustering) di più emettitori;
- l'assegnazione a 3 realtà industriali italiane di fondi europei dell'Innovation Fund per realizzare altrettanti impianti di cattura della CO₂ per decarbonizzare le loro attività produttive tramite trasporto e stoccaggio delle emissioni presso il futuro sito di stoccaggio di Ravenna CCS Fase 2;
- la visita di centinaia di visitatori nazionali ed internazionali al sito di Casalborgretti, tra cui rappresentanti dell'industria, autorità locali, nazionali ed europee, università e centri di ricerca, organizzazioni sindacali ecc.

Accanto ai risultati non tecnici appena menzionati, l'infrastruttura di Ravenna CCS Fase 1 è stata utilizzata anche per raggiungere obiettivi strettamente tecnici, quali:

- a. dimostrare la possibilità di trasportare l'anidride carbonica dalla centrale di Casalborgretti ed iniettarla nel giacimento Porto Corsini Mare Ovest, confermando l'accuratezza dei modelli previsionali di trasporto e di quelli di giacimento;
- b. valutare sul campo le prestazioni di un impianto di cattura dell'anidride carbonica applicato ad un turbocompressore del gas naturale quale quello della centrale di Casalborgretti, applicazione molto sfidante in ragione della bassa concentrazione di CO₂ (~2,5%) contenuta nei fumi di scarico;
- c. validare le tecniche di monitoraggio del sottosuolo ed ambientale.
- d. Confermare, attraverso l'applicazione delle tecniche di monitoraggio, lo stoccaggio sicuro della CO₂ nel giacimento;
- e. in generale, raccogliere ogni dato tecnico utile all'ottimizzazione della futura Fase 2.

Si sottolinea che quanto sopra è stato condotto in piena conformità con le normative vigenti, in collaborazione con le autorità preposte al controllo dell'attuazione del piano di monitoraggio come l'**Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale (ISPRA)** e l'**Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)**. Inoltre, sono state coinvolte le più autorevoli realtà nazionali ed internazionali quali l'**Università di Bologna**, la **Sapienza di Roma**, il **Politecnico di Torino**, specialisti del **Massachusetts Institute of Technology (MIT)** per l'ottimizzazione dei modelli geologici e di giacimento ed il **Centro Nazionale delle Ricerche (CNR)** per le campagne di monitoraggio ambientale.



Figura 9: Evento divulgativo presso il centro visitatori del progetto Ravenna CCS (sinistra). Ospiti in visita all'impianto di cattura (destra)

5. Principali risultati della Fase 1



La Fase 1 del progetto Ravenna CCS ha visto la conclusione con esito positivo della fase iniettiva a fine agosto 2025, dopo 13 mesi di operazioni e con il pieno conseguimento degli obiettivi previsti, come attestato dalla documentazione trasmessa agli enti e dal parere favorevole del Comitato CCS; le attività di monitoraggio “post-operam” sono tuttora in corso.

In particolare, nelle conclusioni del parere del Comitato CCS si riporta che:

- “le attività di iniezione e stoccaggio, cattura e trasporto hanno consentito di acquisire dati tecnici ed esperienze operative che costituiscono una base informativa a supporto dello sviluppo della fase industriale del progetto”;

- “sono stati implementati e gestiti adeguatamente dei sistemi avanzati di monitoraggio, per le diverse fasi del programma sperimentale (ante-operam, in opera e post-operam) negli ambiti: ambientale, microsismico e delle deformazioni del suolo. I risultati rilevati e documentati dall'operatore, anche mediante il supporto di enti preposti ai monitoraggi, non evidenziano anomalie o criticità per quanto concerne fuoriuscite significative di CO₂, fenomeni microsismici o di deformazione topografica riconducibili alle attività di stoccaggio condotte”.

Quanto sopra si aggiunge ai risultati positivi di natura non tecnica già elencati nel capitolo 4. Nel prosieguo del documento verranno illustrate le singole componenti del progetto ed i relativi risultati.

6. Prestazioni dell'impianto di cattura e compressione

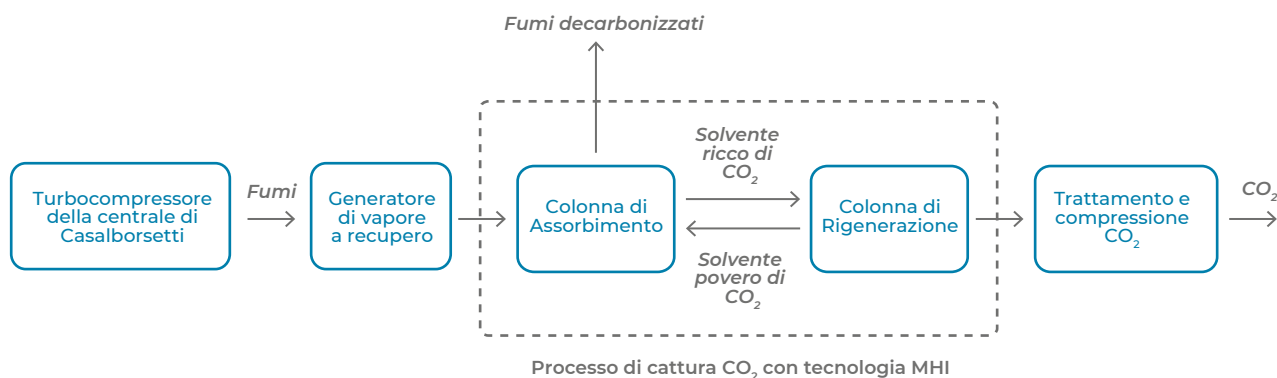


L'anidride carbonica utilizzata dal progetto è catturata dai gas di scarico della turbina TK-04, che aziona uno dei due turbocompressori PGT-5 della centrale di compressione gas, collocata nel comune di Casalborsetti, pochi chilometri a nord di Ravenna. La Centrale riceve e purifica il gas naturale estratto dai campi produttivi offshore al largo della costa ravennate, immettendolo poi nella rete di trasporto nazionale gestita da Snam. A questo fine il gas naturale deve essere compresso fino alla pressione della rete di trasporto, e questo avviene appunto attraverso i turbocompressori della centrale, azionati da turbine alimentate a me-

tano che, per combustione del metano, producono emissioni di CO_2 . Il contenuto di CO_2 nei gas di scarico delle turbine è di circa il 2,5% a pressione atmosferica, rappresentando quindi una delle condizioni più sfidanti per le tecnologie di cattura, che operano tanto meglio quanto le concentrazioni sono più elevate. La tecnologia utilizzata nella Centrale di Casalborsetti è basata su un solvente ad ammine brevettato da Mitsubishi Heavy Industries (MHI).

Lo schema a blocchi dell'impianto è riportato nella figura qui sotto.

FIGURA 10: SCHEMA A BLOCCHI DELL'IMPIANTO DI CATTURA CO_2



Una particolarità dell'impianto di cattura di Ravenna CCS Fase 1 è quella di essere dotato di un generatore di vapore a recupero, che genera tutto il vapore necessario al funzionamento dell'impianto di cattura stesso dal calore residuo nei fumi del turbocompressore, che escono dallo stesso ancora molto caldi ($\sim 500^{\circ}\text{C}$). In questo modo il consumo energetico netto dell'impianto di cattura è pressoché nullo, aumentando allo stesso tempo l'efficienza dell'operazione di cattura. Se poi si considera che il 100% dell'energia elettrica utilizzata dall'impianto di cattura proviene da fonti rinnovabili certificate risulta che l'impianto di cattura di Casalborsetti non determina alcuna produzione aggiuntiva di CO_2 diretta o dovuta all'acquisto di energia (definite tecnicamente emissioni di scopo 1 e 2).

DETTAGLIO DEL PROCESSO DI CATTURA

I gas di scarico della turbina TK-04, dopo essere passati attraverso il generatore di vapore a recupero dal quale escono circa a 200°C , vengono convogliati in una torre cilindrica di raffreddamento, dove a contatto con acqua la temperatura scende ulteriormente a 35°C per migliorare l'efficienza di assorbimento della CO_2 . Dopo il raffreddamento, i fumi vengono inviati alla base della colonna di assorbimento. Risalendola verso l'alto incontrano il solvente amminico che scende verso il basso: è in questa fase che oltre il 90% in volume della CO_2 presente nei gas di scarico viene assorbita dal solvente.

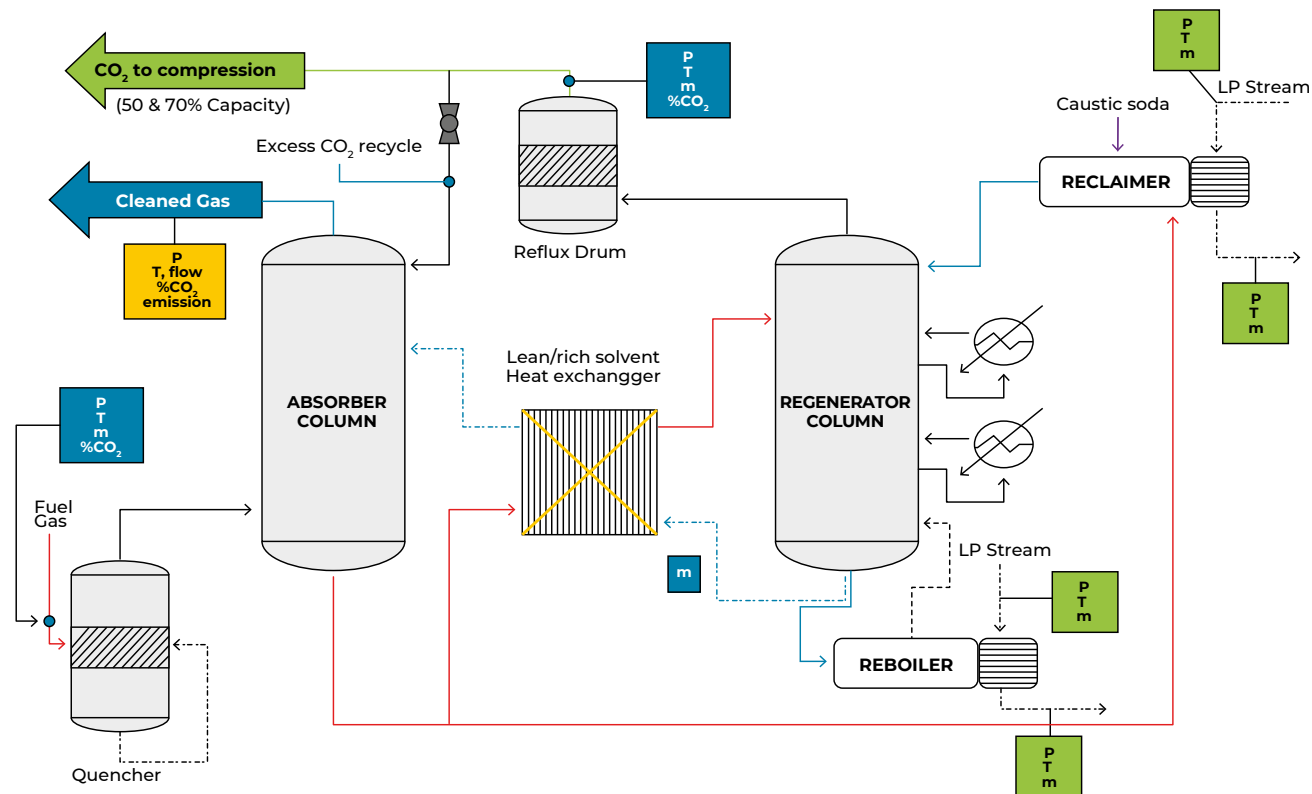
Figura 11: Impianto di cattura di Casalborsetti



I gas di scarico passano attraverso una sezione di lavaggio per evitare il trascinamento di ammina e per essere ulteriormente raffreddati, e così privati della maggior parte dell'anidride carbonica vengono scaricati in atmosfera dalla sommità della colonna, dove sono installati sistemi di monitoraggio continuo delle emissioni per controllare la composizione dei gas di scarico emessi.

Dal fondo della colonna assorbitrice il solvente ricco di CO_2 viene inviato alla colonna di rigenerazione, dove viene riscaldato dal va-

pore prodotto in precedenza dalla caldaia a recupero e dove rilascia la CO_2 assorbita. Il solvente così "rigenerato" viene re-inviato nella colonna assorbitrice per essere riutilizzato nel processo. La CO_2 recuperata viene invece inviata al sistema di compressione e condizionamento. L'impianto è poi dotato di una serie di scambiatori di calore intermedi per migliorarne l'efficienza energetica e di un sistema per ridurre il consumo di ammina, che periodicamente deve essere parzialmente reintegrata per sostituire quella degradata.

FIGURA 12: SCHEMA DI FUNZIONAMENTO DELL'IMPIANTO DI CATTURA DELLA CO₂

I box verdi e blu indicano sensori per il rilevamento di alcuni parametri del flusso, fra cui la pressione (P), la temperatura (T), la portata in massa (m) e la percentuale di CO₂ (%CO₂).

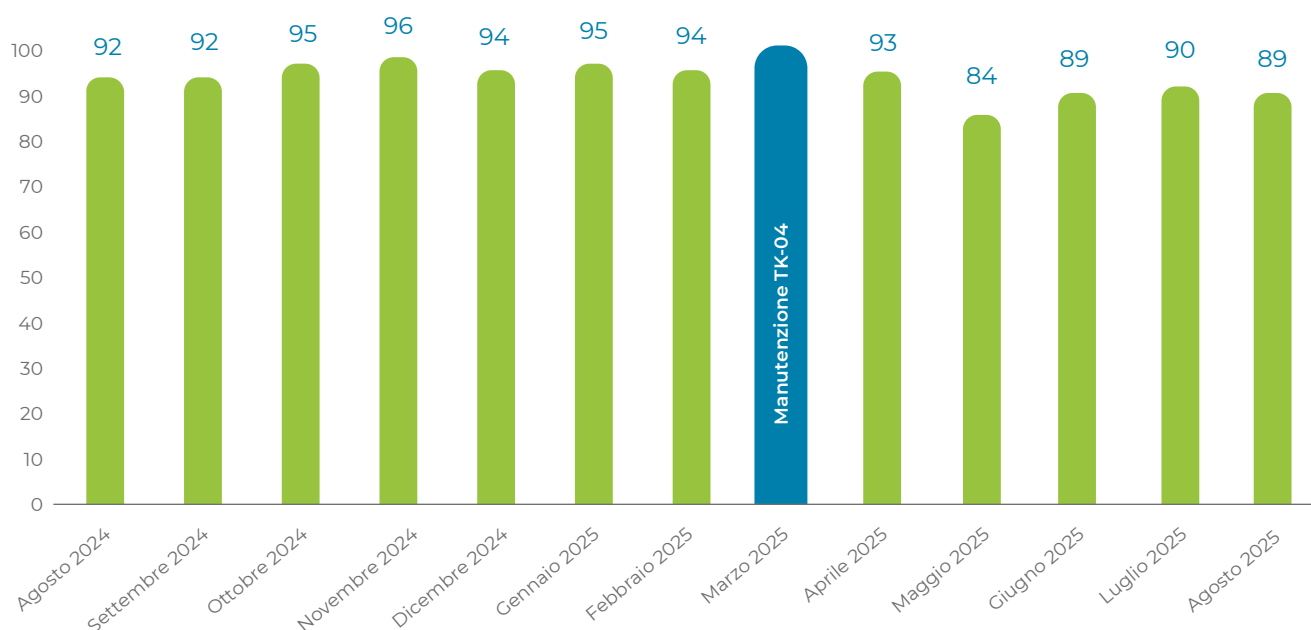
EFFICIENZA DI CATTURA

L'efficienza di cattura misura la capacità di un impianto di rimuovere l'anidride carbonica dai gas di scarico che vi sono convogliati, ed è espressa come rapporto tra la CO₂ catturata e quella originariamente presente nei fumi. Il valore normalmente considerato di riferimento è il 90%, che significa che il 90% della CO₂ originariamente presente nei fumi viene intercettato dal sistema mentre il 10% rimane negli stessi e viene emesso in atmosfera. Come già accennato il processo di cattura risulta tanto più semplice quanto la concentrazione di CO₂ nei fumi di scarico è elevata. Per fare un esempio concreto, è più facile catturare la CO₂ con efficienza del 90% dai fumi di un cementificio (concentrazione di CO₂ iniziale superiore al 15%), che catturarla con la stessa efficienza del 90% dai fumi di una centrale a gas (concentrazione di CO₂ iniziale inferiore al 5%). Per questo motivo l'impianto di cattura di Ravenna CCS Fase 1 è risultato all'avanguardia, in quanto si è dimostrato in grado di catturare l'anidride carbonica con un'efficienza anche molto superiore al 90% per gran parte del periodo operativo partendo da una concentrazione particolarmente diluita di circa il 2,5%. Il grafico qui sotto riporta l'efficienza media mensile lungo tutto il periodo operativo.

Si può notare che l'efficienza di cattura ha toccato **punte del 96%** e si è mantenuta stabilmente al di sopra del 90% fino a febbraio 2025.

L'efficienza media durante tutto l'anno di operazioni è stata pari al 91,9%. A marzo 2025 l'impianto è stato fermato per consentire la manutenzione programmata e obbligatoria del turbocompressore della centrale di Casalborsetti. Alla ripresa delle operazioni la turbina TK-04 ha presentato, proprio grazie agli interventi di manutenzione, una maggiore efficienza di combustione ed una minore percentuale di anidride carbonica nei gas di scarico, che quindi è ulteriormente scesa rispetto al valore già molto basso di 2,5%, attestandosi attorno al 2,3÷2,4%.

Questo calo di concentrazione di CO₂ nei fumi di combustione in ingresso ha richiesto di variare i parametri di esercizio dell'impianto, che infatti ha mantenuto una efficienza del 93% anche nel mese di aprile 2025. Allo stesso tempo, però, il nuovo regime di funzionamento ha portato ad una degradazione più rapida del solvente, comportando un calo di efficienza nel mese di maggio, corretto attraverso un reintegro di ammina vergine e successivamente con una sostituzione straordinaria dell'ammina esausta. Questa attività

FIGURA 13: ANDAMENTO DELL'EFFICIENZA DI CATTURA DELLA CO₂ DA PARTE DELL'IMPIANTO DI CASALBORSETTI (%)

Nel mese di marzo 2025 il turbocompressore TK-04 della centrale è rimasto fermo per manutenzione programmata.

ha permesso di ritornare ad un livello di efficienza intorno al 90% negli ultimi mesi di esercizio.

COMPRESSIONE E PURIFICAZIONE

L'anidride carbonica in uscita dalle colonne dell'impianto di cattura deve essere purificata e compressa per poter essere inviata alle condotte. Questo avveniva grazie ad un compressore volumetrico multistadio che nei mesi precedenti a novembre 2024 ed in quelli successivi ad aprile 2025 comprimeva i gas fino a circa 50 bar. Nel periodo invernale, per evitare il rischio di condensazione di CO₂ liquida all'interno della condotta sottomarina, il gas veniva compresso a terra fino a 30 bar ed un piccolo compressore di iniezione installato sulla piattaforma offshore forniva una compressione aggiuntiva per arrivare ai 50 bar prima dell'ingresso in pozzo. La condotta veniva così operata nelle condizioni di pressione e temperatura nelle quali la CO₂ si trova sempre in fase gassosa. Dopo la compressione a terra, e in parte contestualmente alla stessa, dal flusso di anidride carbonica veniva ridotto il contenuto di ossigeno al di sotto di 10 ppm (parti per milione) e quello di acqua sotto a 50 ppm, in conformità ai limiti definiti per

l'invio alle condotte per prevenire potenziali fenomeni corrosivi.

Le impurità nel flusso di CO₂ inviato al giacimento sono state costantemente misurate sia dagli analizzatori in continuo installati all'uscita dell'impianto di cattura che con dei campionamenti periodici ed analisi in laboratori specializzati, e **sono risultate sempre ampiamente al di sotto dei limiti previsti dalla specifica per il trasporto. La purezza della CO₂** è progressivamente aumentata nel corso delle operazioni, risultando **sempre superiore al 99% in volume.**

DISPONIBILITÀ DI IMPIANTO

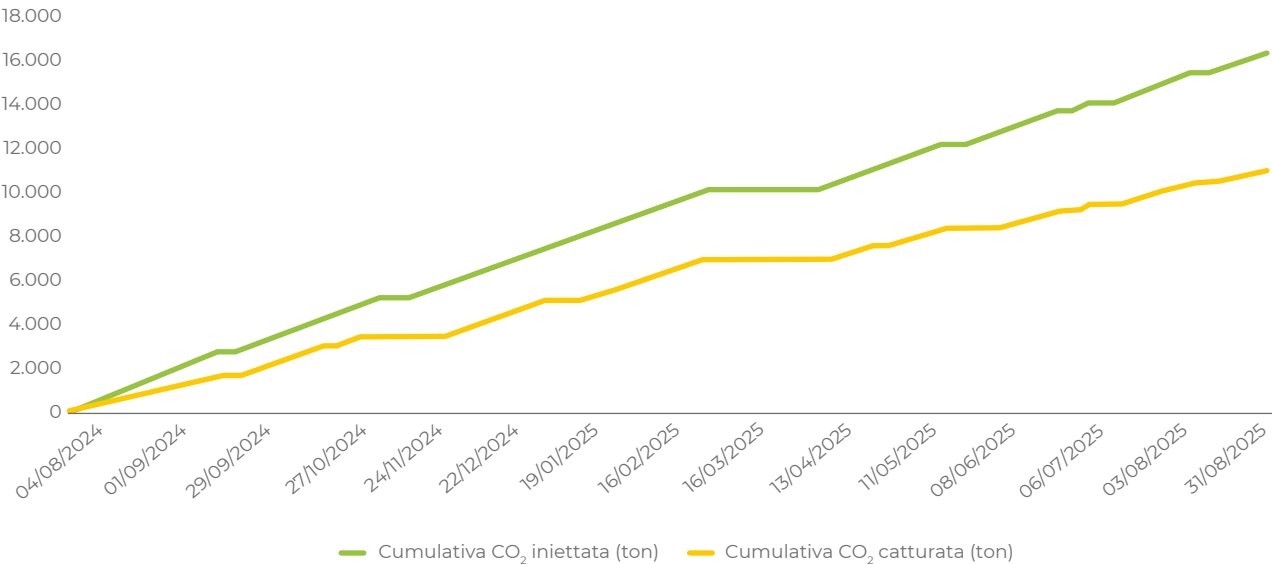
L'impianto di cattura e compressione di Ravenna CCS Fase 1 ha operato con successo da agosto 2024 ad agosto 2025. Durante l'arco temporale di esercizio, **l'impianto ha fornito l'anidride carbonica necessaria a conseguire tutti gli obiettivi della Fase 1**, operando con continuità al netto di alcune fermate programmate per manutenzione e per lavori presso la centrale di Casalborsetti, e di alcuni eventi minori non programmati non riconducibili a problematiche legate all'iniezione, allo stoccaggio o a perdite di CO₂.

VOLUMI CATTURATI ED INIETTATI

Nel grafico sottostante è rappresentato l'andamento delle portate

cumulative di CO₂ catturata nell'impianto a terra e di quella iniettata nel pozzo lungo tutto l'arco del periodo di funzionamento.

FIGURA 14: ANDAMENTO DELLE PORTATE DI CO₂ NEL PERIODO DI ATTIVITÀ DI RAVENNA CCS FASE 1



Durante i mesi di esercizio l'impianto di cattura ha separato 16.139 tonnellate di anidride carbonica. Di queste, circa 11.000 sono state iniettate nel pozzo PCMW 30 Dir B. La portata catturata è superiore a quella iniettata in giacimento principalmente per tre motivi:

- 1. durante alcuni degli eventi di fermata che si sono verificati durante l'anno (vedere paragrafo precedente), laddove possibile, l'impianto di cattura è stato mantenuto in funzione per massimizzare la quantità di dati raccolti. In questi periodi tutta la CO₂ separata dai fumi veniva re-immessa in atmosfera;
- 2. data la natura temporanea della Fase 1 del progetto Ravenna CCS, il compressore volumetrico multistadio installato nella centrale di Casalborsetti e quello di iniezione installato sulla piattaforma PCWC non sono dotati di variatore continuo di velocità (Variable Speed Drive) ma possono modificare le loro velocità e quindi le loro portate solo di quantità prestabilite (ad es. 50/75/100% della portata massima). Tale configurazione risulta coerente con le finalità della fase progettuale in oggetto e conforme alle scelte ingegneristiche operate secondo criteri di ragionevolezza tecnica, proporzionalità e sicurezza. Poiché un compressore volumetrico non può lavorare a portate superiori a quelle effettivamente disponibili (si creerebbero, infatti, delle condizioni che danneggerebbero sia la macchina che i tubi) la portata del compressore era regolata sul primo valore fisso disponibile inferiore alla portata di anidride carbonica catturata dall'impianto. La quantità di CO₂ catturata dall'impianto ed eccedente quella trattata dal compressore veniva re-inviata al camino ed emessa in atmosfera;

- 3. la condotta tra Casalborsetti e la piattaforma PCWC contiene circa 400 tonnellate di CO₂, che al termine delle operazioni di iniezione erano quindi state catturate dall'impianto ma non erano ancora entrate nel pozzo.

Le circa 11.000 tonnellate di anidride carbonica complessivamente iniettate risultano pienamente coerenti con gli obiettivi della Fase 1 del progetto, concepita con finalità dimostrative e di validazione operativa dell'intera catena CCS.

La Fase 2 si inserisce in una scala e in un contesto operativo differenti, con una configurazione impiantistica dedicata al servizio di più emettitori industriali. In tale assetto, la stazione di compressione sarà dotata di più treni di compressione equipaggiati con Variable Speed Drive, al fine di garantire la necessaria flessibilità operativa nella gestione delle portate conferite alla rete di raccolta. Di conseguenza, nella Fase 2 si prevede che tutta la CO₂ conferita dagli emettitori industriali verrà iniettata.

Si precisa infine che la Fase 1 non aveva come obiettivo la decarbonizzazione della centrale di Casalborsetti, già interessata da un autonomo e significativo percorso di efficientamento energetico, che prevede la sostituzione dei turbocompressori PGT-5 con macchine di nuova generazione, più compatte e caratterizzate da livelli di efficienza sensibilmente superiori.

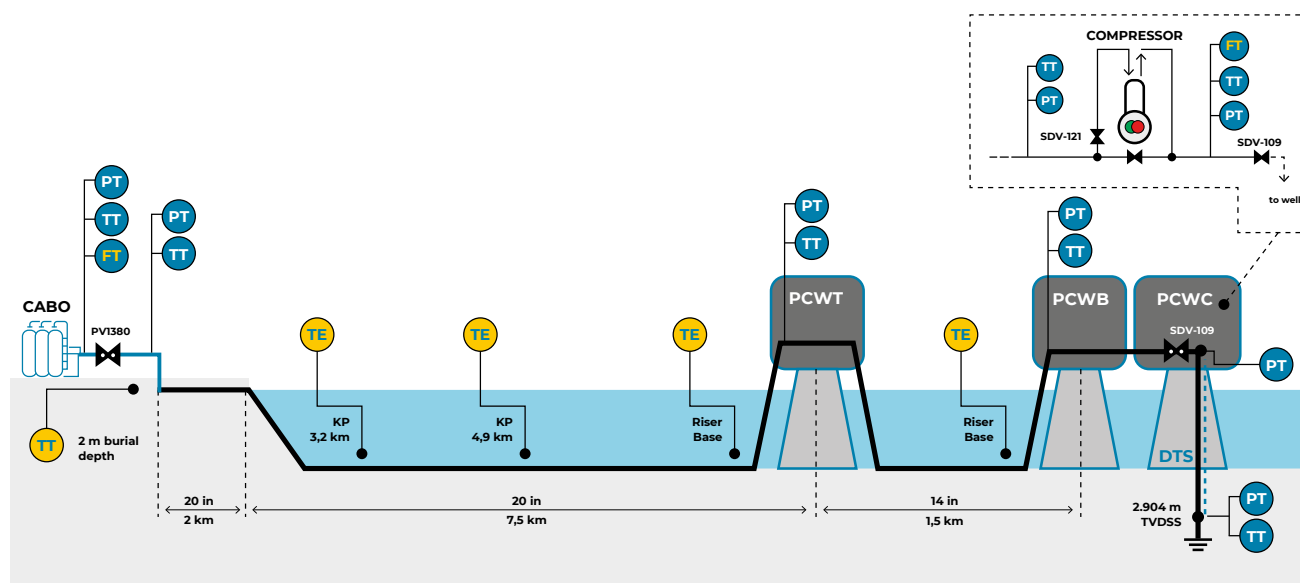
7. Prestazioni dell'infrastruttura di trasporto della CO₂



Come già descritto nella sezione 3, la corrente di CO₂ catturata, compressa e portata a specifica viene trasportata all'interno di un sistema di tubazioni riconvertite lungo circa 11 km, che viaggia sul fondale del Mare Adriatico ad una profondità di circa 14 m fino a raggiungere la piattaforma di iniezione PCWC. Qui l'anidride

carbonica entra nel pozzo iniettore all'interno del tubino di iniezione di diametro nominale 3,5 pollici (circa 90 mm), raggiungendo il livello di iniezione del giacimento collocato ad una profondità di circa 3 km. Lo schema dell'infrastruttura di trasporto è riportato in Figura 15.

FIGURA 15: SCHEMA DELL'INFRASTRUTTURA DI TRASPORTO DELLA CO₂ DA CASALBORSETTI ALLA PIATTAFORMA PCWC E AL POZZO INIETTORE



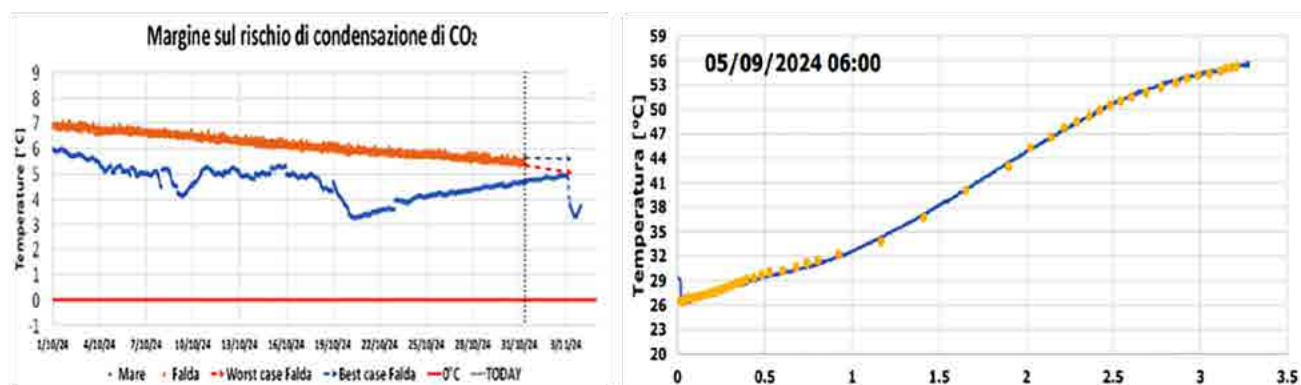
Le condotte principali (20 pollici e 14 pollici) sono state ricertificata per il trasporto di CO₂ previa la garanzia che il trasporto di CO₂ avvenisse allo stato fisico gassoso. Poiché la pressione di ingresso nel pozzo sulla piattaforma PCWC è stata di circa 50 bar, nei mesi più freddi dell'anno si sarebbero verificate all'interno della tubazione di trasporto le condizioni di pressione e temperatura tali da avere condensazione di CO₂ liquida in linea. Per questo motivo è stato predisposto un secondo compressore sulla piattaforma PCWC, in modo da poter disaccoppiare nei mesi invernali la pressione operativa del sistema di trasporto (regolata a 30 bar per evitare CO₂ liquida in linea) dalla pressione di iniezione a testa pozzo (riportata a 50 bar dal compressore offshore). L'avviamento di questa modalità operativa è stato contestuale rispetto all'atteso calo termico, entrando in esercizio il 2 dicembre 2024 ed operando fino all'innalzamento della temperatura ambiente, avvenuto nel mese di aprile 2025.

L'intero sistema di trasporto e iniezione è stato dotato di un elevato numero di misuratori di portata, temperatura e pressione, distribuiti dall'uscita dell'impianto di cattura e compressione a Casalborsetti fino al fondo del pozzo PCMW 30 Dir B. Inoltre, l'intera condotta è

monitorata tramite la tecnologia vibro-acustica Eni e-vpms®, che è in grado di identificare in tempo reale eventuali perdite dalle condotte. Il tubino di iniezione è dotato di un sistema di rilevamento della temperatura distribuita a fibra ottica (DTS), fissata sul tubo stesso, che fornisce misurazioni della temperatura distribuita fino fondo pozzo.

Unitamente alle misure di processo (portate, temperature e pressioni), sono stati predisposti campionamenti periodici di CO₂. Tale campagna di misura aveva il duplice scopo sia di misurare la composizione di tutte le impurità presenti all'interno della CO₂ per verificare l'effettiva aderenza alla specifica prevista, sia di analizzare in laboratorio il comportamento fisico della CO₂ atteso all'interno del sistema di trasporto per valutare la possibile condensazione di prodotti di reazione dovute all'interazione tra impurità. Questo secondo obiettivo è stato reso possibile grazie all'utilizzo di specifica strumentazione di laboratorio Eni ed alle competenze maturate negli anni in ambito Oil&Gas e rese applicabili anche in contesti meno convenzionali come il trasporto di CO₂. I risultati della campagna di monitoraggio della composizione hanno confermato sia l'aderenza alle specifiche di trasporto, sia l'affidabilità dei modelli previsionali adottati in fase di design.

FIGURA 16: MONITORAGGIO DEI PARAMETRI DELLA CO₂ NELL'INFRASTRUTTURA DI TRASPORTO



A sinistra, l'andamento nel tempo della temperatura minima della CO₂ nella condotta a terra (arancione) e a mare (blu). La distanza dalla riga rossa orizzontale a 0°C indica il margine di sicurezza verso la condensazione di CO₂ nella linea, che a fine ottobre era ancora 4-5°C ma si stava riducendo progressivamente, richiedendo quindi di avviare la compressione offshore. A destra, il confronto tra la temperatura misurata lungo il pozzo e la previsione dei modelli di calcolo (in blu la predizione del modello, in giallo i dati osservati)

Complessivamente, nel periodo di operazione **il sistema di trasporto ed iniezione ha operato senza manifestare alcun comportamento anomalo** rispetto alle previsioni. Oltre ai test composizionali già citati, le misurazioni effettuate unite ai modelli analitici e previsionali del comportamento della CO₂ all'interno delle tubazioni ed al monitoraggio della temperatura ambientale, hanno permesso di raggiungere le seguenti conclusioni:

- le pipelines hanno sempre trasportato CO₂ in fase gassosa, come da certificato di riuso, e qualunque rischio di condensazione in pipeline è stato evitato;

- la modalità di operativa di trasporto (ovvero con o senza compressore offshore) è stata modulata nei momenti opportuni, mantenendo sufficienti margini di sicurezza rispetto al rischio di condensazione grazie al costante monitoraggio dei parametri di trasporto;
- i modelli di calcolo predittivi utilizzati si sono dimostrati attendibili non solo nella stima delle performance in condizioni di normale esercizio, ma anche nella descrizione della fisica del sistema in condizioni transitorie, anche lungo il tubino grazie alla tecnica DTS;
- i modelli e gli strumenti utilizzati per la Fase 1 si ritengono idonei anche per la Fase 2.

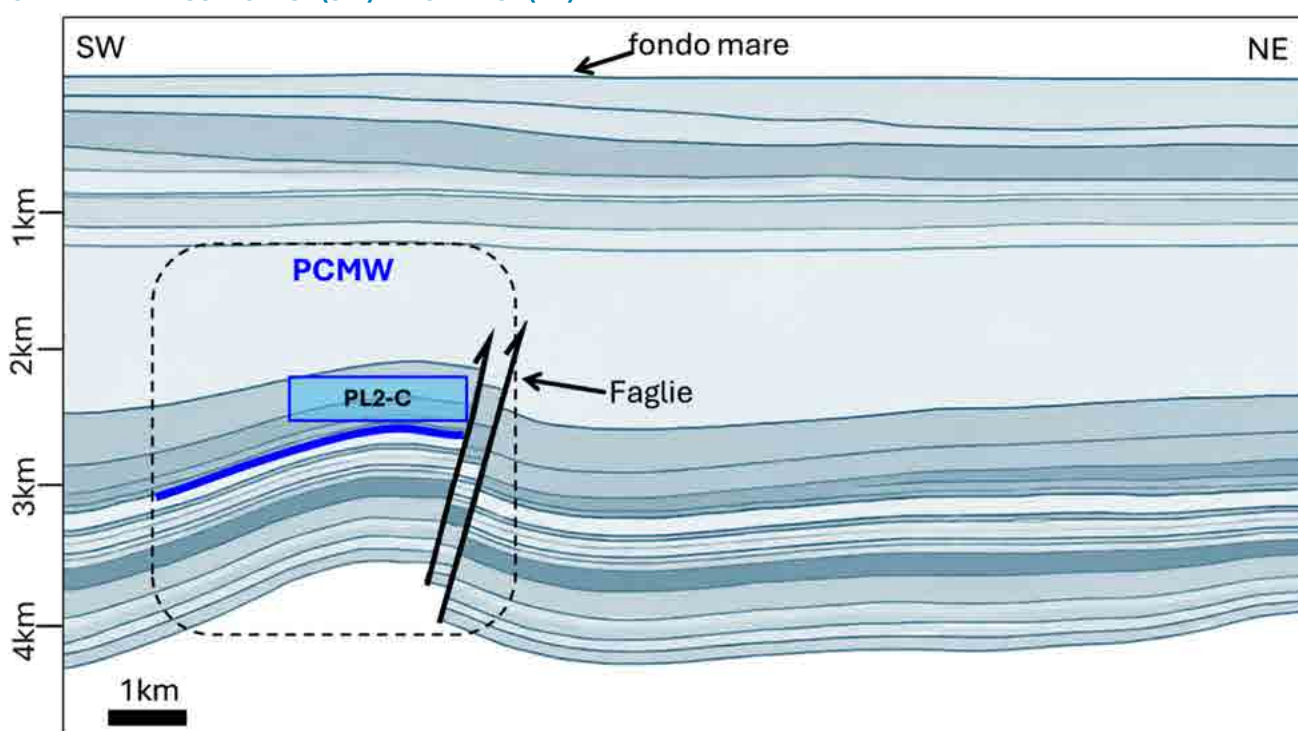
8. Monitoraggio del giacimento

CARATTERISTICHE DEL SITO DI STOCCAGGIO

Lo stoccaggio è avvenuto nel livello geologico PL2 C, selezionato tra tutti i livelli che costituiscono il giacimento esaurito di PCMW come il migliore per l'iniezione di CO₂ grazie ad una combinazione di caratteristiche petrofisiche, stratigrafiche, strutturali e fluidodinamiche. Dal punto di vista strutturale, il giacimento è caratterizzato da una geometria anticlinale asimmetrica, cioè una piega del

sottosuolo a geometria convessa verso l'alto, paragonabile a una cupola allungata. Questo tipo di configurazione rappresenta uno dei principali meccanismi naturali di intrappolamento degli idrocarburi. Nel caso specifico, la struttura risulta sepolta sotto una spessa coltre di sedimenti non deformati e risulta delimitata da faglie inattive, che contribuiscono a garantire l'isolamento laterale del sistema.

FIGURA 17: SEZIONE GEOLOGICA SCHEMATICA LUNGO IL GIACIMENTO DI PORTO CORSINI MARE OVEST (PCMW), ORIENTATA DA SUD-OVEST (SW) A NORD-EST (NE)



Sezione geologica schematica lungo il giacimento di Porto Corsini Mare Ovest (PCMW), orientata da sud-ovest (SW) a nord-est (NE), che illustra in modo semplificato ma fedele l'assetto stratigrafico e strutturale del sottosuolo fino al fondale marino. Le diverse tonalità di grigio rappresentano diversi pacchetti stratigrafici nel sottosuolo. Il livello PL2-C, evidenziato in blu nell'intorno del giacimento di PCMW, rappresenta il serbatoio a gas depletato attualmente utilizzato per lo stoccaggio di CO₂ nel progetto Ravenna CCS Fase 1. Questo livello è confinato da successioni sedimentarie sovrastanti a bassa permeabilità: queste ultime agiscono da barriera naturale alla migrazione dei fluidi. La geometria del giacimento è controllata da faglie inattive, visibili nella parte centrale della sezione, che delimitano il compartimento strutturale di PCMW (area tratteggiata). La distribuzione e l'inclinazione degli strati riflettono l'evoluzione geologica del bacino e contribuiscono a definire la capacità di confinamento e stoccaggio del sito.

L'origine di questa geometria è legata all'evoluzione tettonica dell'Appennino settentrionale: durante le fasi compressive che hanno interessato l'area adriatica negli ultimi milioni di anni (tra circa 7 milioni fino a circa 1 milione di anni fa), la successione sedimentaria è stata deformata da spinte prevalentemente dirette verso nord-est. Questo processo ha generato numerose trappole strutturali analoghe, molte delle quali hanno dato origine ai giacimenti successivamente sfruttati per la produzione di gas naturale.

Uno degli aspetti chiave che rendono il giacimento di PCMW idoneo allo stoccaggio di anidride carbonica è la sua architettura stratigrafica. Esso è infatti costituito da numerosi livelli di rocce arenacee porose e permeabili alternati a livelli argillosi a bassa permeabilità, che agiscono quindi da copertura (in inglese "cap rock").

Questa configurazione multilivello consente un efficace intrappolamento di fluidi: al di sopra del livello di iniezione selezionato

si trovano numerosi altri livelli impermeabili, i quali agiscono da barriera ed evitano la fuoriuscita della CO_2 . Inoltre, nel corso della sua storia geologica, il giacimento ha consentito l'accumulo di gas naturale in molti di questi livelli serbatoi, dimostrando l'ottima tenuta della roccia di copertura. La comprovata integrità del sistema rappresenta un elemento fondamentale nella valutazione della sicurezza per lo stoccaggio permanente della CO_2 , che è stata ulteriormente confermata dalle accurate analisi geologiche, geomeccaniche e geochemiche effettuate, come previsto dal rigoroso processo di selezione.

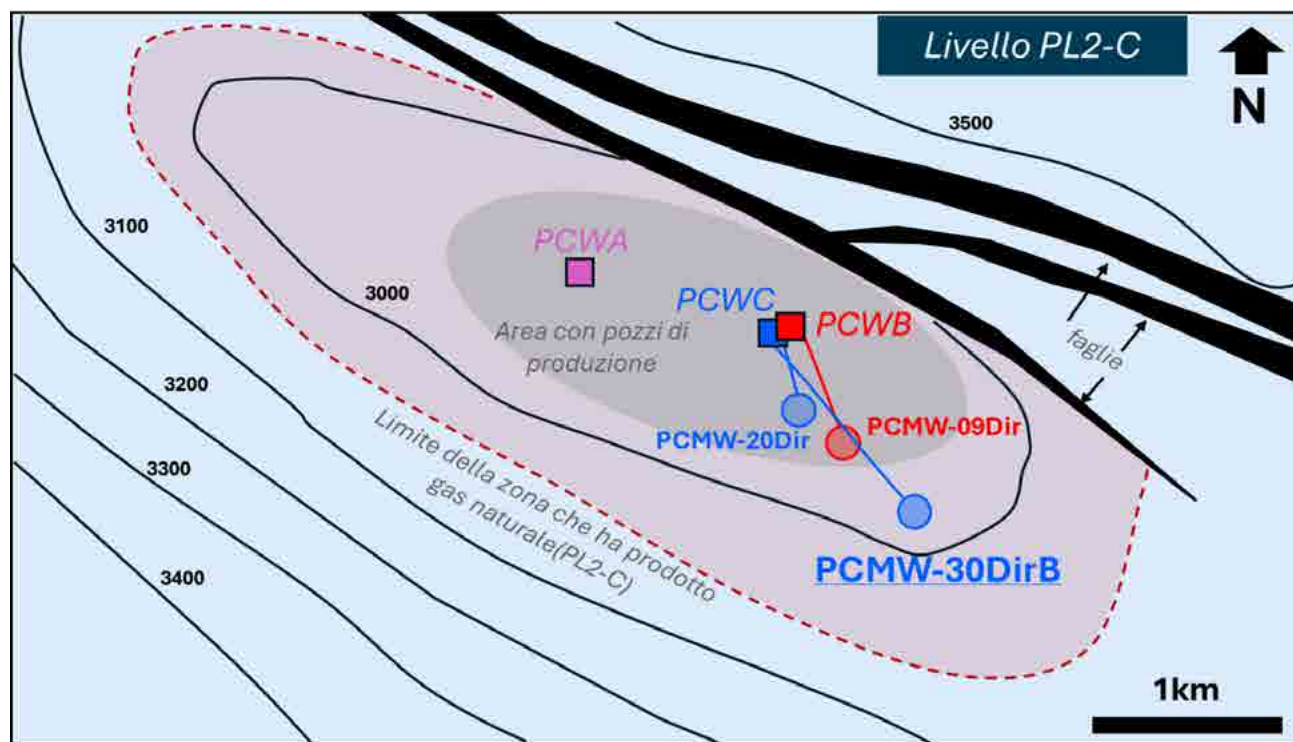
Il giacimento PCMW fa parte dell'insieme di giacimenti dell'Adriatico sfruttati da decenni per la produzione di gas naturale. Questo ha comportato il raggiungimento di condizioni cosiddette "depletate", ovvero con una pressione all'interno dei pori della roccia inferiore a quella originaria. Dal punto di vista operativo, l'utilizzo di un giacimento già sfruttato offre ulteriori vantaggi: la geometria del

serbatoio, le proprietà delle rocce ed il comportamento del sistema sono infatti già ben caratterizzati da dati acquisiti durante la fase produttiva.

L'iniezione è stata effettuata a circa 3.000 metri di profondità, a temperature intorno ai 55°C . Al di sopra del punto di iniezione è presente una copertura argillosa che assicura un efficace isolamento idraulico del serbatoio. Prima dell'inizio della produzione, la pressione era dell'ordine di circa 335 bar ma oggi si attesta tra 110 e 160 bar. Questa riduzione di pressione causata dalla produzione di gas naturale implica la disponibilità di volume poroso accessibile, che può essere nuovamente occupato dalla CO_2 iniettata.

Nei programmi di stoccaggio geologico dell'anidride carbonica, la pressione rappresenta uno dei parametri cruciali per assicurare un'iniezione efficace, sicura e ben controllata, senza compromettere l'integrità meccanica del serbatoio e della copertura. In questo

FIGURA 18: MAPPA SEMPLIFICATA DEL GIACIMENTO A GAS ESAURITO DI PORTO CORSINI MARE OVEST (PCMW)



Mappa semplificata del giacimento a gas esaurito di Porto Corsini Mare Ovest (PCMW), con dettaglio sul livello geologico PL2-C, attualmente utilizzato per l'iniezione di CO_2 nel progetto Ravenna CCS (Fase 1). L'iniezione avviene tramite il pozzo PCMW 30 Dir B, localizzato nella porzione sud-orientale dell'area, mentre i pozzi PCMW 09 Dir e PCMW 20 Dir sono dedicati al monitoraggio del sito. I quadrati colorati rappresentano le piattaforme offshore da cui sono stati perforati i pozzi utilizzati in passato per la produzione di gas naturale, all'interno dell'area del giacimento evidenziata dall'ellisse grigia. L'estensione originaria del gas nel livello PL2-C è indicata in rosso semitrasparente (contorno tratteggiato): si tratta di un livello ormai completamente depletato e non più in produzione. Le linee nere sottili descrivono la geometria e la profondità del livello nel sottosuolo, mentre i poligoni neri indicano la proiezione delle faglie inattive che delimitano il giacimento verso nord-est.

contesto, il giacimento PCMW offre un ampio margine operativo, dal momento che la pressione raggiunta durante l'iniezione è significativamente inferiore a quella originale, che il giacimento ha già dimostrato, in condizioni naturali, di poter sostenere.

Le attuali pressioni e temperature di giacimento sono inoltre tali da mantenere naturalmente la CO₂ in stato supercritico⁹, ovvero condizioni intermedie tra quelle di un liquido e di un gas ideali per uno stoccaggio efficiente: elevata densità, simile a quella di un liquido, bassa viscosità, tipica dei gas, che facilita l'iniezione e la distribuzione nel mezzo poroso.

POZZO DI INIEZIONE, OPERAZIONI E ACQUISIZIONE DATI

L'iniezione è avvenuta tramite il pozzo Porto Corsini Mare Ovest 30 Dir B (PCMW 30 Dir B), sidetrack perforato appositamente per raggiungere il livello PL2-C, oggetto dell'iniezione di CO₂. Durante la perforazione del pozzo sono state raccolte tutte le informazioni necessarie alla descrizione delle caratteristiche delle rocce attraversate. Inoltre, oltre alla registrazione di misurazioni in pozzo specifiche per verificare la tenuta delle rocce di copertura e la sicurezza del pozzo stesso, sono state prelevate diverse carote (campioni di roccia) per analisi di laboratorio finalizzate a caratterizzare sia la roccia serbatoio sia quella di copertura, responsabile del confinamento permanente della CO₂ nel sottosuolo. Sono stati inoltre raccolti campioni dei fluidi presenti nel giacimento, utili al monitoraggio delle operazioni ed ulteriori informazioni sul comportamento meccanico degli strati rocciosi, fondamentali per garantire la sicurezza in tutte le fasi operative.

Le attività di acquisizione hanno anche permesso di elaborare una descrizione accurata del giacimento, della roccia serbatoio e della roccia di copertura, che agisce come una barriera naturale garantendo il confinamento permanente della CO₂.

Il pozzo PCMW 30Dir B si definisce "sidetrack", cioè perforato a partire da una porzione di un pozzo esistente, precedentemente chiuso e messo in sicurezza con materiali resistenti alla CO₂. Una volta completata la perforazione e verificata la sicurezza ed efficienza del pozzo stesso, il pozzo è stato attrezzato con materiali idonei resistenti all'anidride carbonica e sistemi di monitoraggio continuo, tra cui sensori elettrici per la misurazione di pressione e temperatura e un cavo in fibra ottica per verificare l'integrità dello stesso durante e dopo l'iniezione.

Il pozzo è stato perforato tra gennaio e aprile 2024.

MONITORAGGIO DEL POZZO INIETTORE

Il pozzo iniettore PCMW 30Dir B (Figura 18) è stato equipaggiato in modo tale da permettere il monitoraggio in continuo di pressione e temperatura durante l'iniezione e dopo la stessa mediante sensori elettrici e cavo di fibra ottica. L'analisi di questi dati è stata integra-

ta con acquisizioni periodiche specifiche che hanno permesso di ottenere una descrizione accurata del comportamento del pozzo e della zona di giacimento limitrofa ad esso (mediante acquisizioni dedicate denominate "log", ossia registrazioni complete di come cambia la grandezza misurata lungo la traiettoria del pozzo). Tali logs sono stati ripetuti nel tempo per descrivere accuratamente le variazioni dei fenomeni relativi al processo iniettivo.

L'integrazione di tutti questi dati ha permesso di confermare l'efficacia e la sicurezza dell'iniezione, nonché l'integrità del pozzo iniettore e della roccia di copertura, ossia l'assenza di CO₂ al di fuori del livello geologico identificato per lo stoccaggio. I dati raccolti hanno permesso di verificare la conformità delle previsioni del modello di giacimento con i risultati ottenuti, confermando la predittività e la robustezza del modello stesso.

POZZI DI MONITORAGGIO DEDICATI (PCMW 09 DIR E PCMW 20 DIR)

Oltre al pozzo di iniezione PCMW 30 Dir B, sono stati selezionati due pozzi esistenti da destinare a monitoraggio nella Fase 1 del progetto Ravenna CCS. Tali pozzi, in linea con gli obiettivi del piano di monitoraggio all'interno della direttiva europea sui progetti CCS, sono utilizzati per l'acquisizione di dati di sottosuolo finalizzati alla verifica del contenimento della CO₂ nel sito di stoccaggio, garantito dalla roccia di copertura, e alla calibrazione dei modelli predittivi di migrazione del fluido all'interno del giacimento (verifica della conformità).

Nel dettaglio, il primo pozzo di monitoraggio (PCMW 09 Dir) è stato utilizzato per acquisire dati diretti sul comportamento della CO₂ nel sottosuolo e sulla risposta del giacimento durante l'iniezione. Sono state raccolte misure di pressione e temperatura ripetute nel tempo, campioni di fluidi del giacimento presenti in pozzo, e log di saturazione (ossia log che permettono di identificare il tipo di fluido presente nell'area intorno al pozzo interessato).

Le misure acquisite hanno evidenziato l'assenza di aumento della pressione nell'area, indice del mancato arrivo del flusso di anidride carbonica al pozzo. Tale evidenza risulta coerente e ulteriormente supportata dai risultati delle analisi integrate di laboratorio sui fluidi di giacimento campionati in pozzo, che non mostrano la presenza di CO₂. Questi risultati sono in linea con i modelli previsionali tridimensionali del giacimento in grado di descrivere il movimento della CO₂ nel sottosuolo e l'eventuale aumento di pressione dovuto alla sua iniezione, verificando la robustezza dei modelli stessi.

I log hanno anche confermato l'assenza di CO₂ nella successione sedimentaria al di sopra del livello PL2-C e quindi la sicurezza dello stoccaggio unitamente alla capacità di contenimento della roccia di copertura.

Il secondo pozzo di monitoraggio (PCMW 20 Dir) verrà invece utilizzato nel corso del 2026 per acquisire log di saturazione (in analogia

9 L'anidride carbonica si trova in fase supercritica (o densa) quando supera contemporaneamente la temperatura di 31,1°C e la pressione di 73,8 bar.

al pozzo PCMW 09 Dir) che permetteranno, a valle di confronto con log analoghi acquisiti prima dell'avvio dell'iniezione, di acquisire ulteriori dati per confermare la predittività e robustezza dei modelli previsionali.

PERFORMANCE DI INIEZIONE DEL POZZO INIETTORE

Durante la Fase 1 sono state iniettate circa 11.000 tonnellate di CO₂, con portate comprese tra 35 e 50 tonnellate/giorno, per una durata complessiva del periodo di iniezione di circa 13 mesi. I dati raccolti durante il periodo di iniezione hanno permesso di effettuare una valutazione positiva degli scopi del progetto. In particolare:

1. Durante l'iniezione, la pressione a fondo pozzo è sempre rimasta costantemente al di sotto del limite di sicurezza di 240 bar definito dalle autorità, mantenendosi stabile e senza aumenti significativi. Questo indica che la formazione geologica ha assorbito la CO₂ come previsto dai modelli, senza opporre resistenza. Anche la temperatura è rimasta costante. Questi risultati confermano la sicurezza ed efficienza dell'iniezione. Le misure effettuate nel pozzo di monitoraggio mostrano che non ci sono state variazioni di pressione nella zona, in linea con le previsioni effettuate prima di iniziare il processo di iniezione e coerentemente alle attese.
2. Analizzando i dati di pressione rilevati durante l'esecuzione del progetto è stata effettuata la valutazione dell'iniettività (ossia la capacità del pozzo di assorbire la CO₂ iniettata), della permeabilità (ossia la capacità della roccia serbatoio, target dell'iniezione,

di lasciarsi attraversare dalla CO₂) e dell'eventuale deterioramento dovuto all'iniezione della capacità del pozzo di veicolare la CO₂ nel giacimento.

I risultati sono positivi: le analisi hanno permesso di confermare le principali proprietà del giacimento (già valutate mediante l'osservazione dei decenni di storia produttiva del campo) e le prestazioni del pozzo, che risultano in linea con le attese e adatte a garantire l'iniezione programmata.

Inoltre, come previsto, non sono state osservate perdite di performance del pozzo nel tempo, che ha sempre mantenuto elevata la sua capacità di iniettare l'anidride carbonica.

3. Il monitoraggio dell'integrità del pozzo è stato effettuato in continuo tramite il cavo a fibra ottica in grado di rilevare la temperatura lungo il pozzo nel tempo e le sue variazioni.

I dati raccolti non mostrano anomalie e confermano la sicurezza del sito e il corretto contenimento della CO₂. La temperatura è stata controllata in tutte le fasi (prima, durante e dopo l'iniezione), mostrando sempre valori coerenti con le operazioni svolte. L'assenza di variazioni anomale indica che non ci sono state perdite e conferma la sicurezza dell'iniezione.

In conclusione, si evidenzia che tutti gli elementi valutati hanno dato risultanze positive confermando il successo della Fase 1 del progetto, evidenziando quindi l'operatività del processo iniettivo nei limiti definiti, la possibilità di applicare un adeguato monitoraggio e le ottime performance del pozzo iniettore PCMW 30 Dir B.



9. Monitoraggio del sottosuolo e dell'area



Da molti anni l'area di Ravenna, sia a terra che a mare, è interessata da sistemi continui di monitoraggio legati alla presenza di attività industriali ed al suo ruolo di hub energetico. I controlli riguardano in particolare le deformazioni del suolo, la microsismicità ed il monitoraggio ambientale. Attraverso reti di sensori a terra e a mare esistenti e di nuova installazione, si raccolgono dati utili a verificare nel tempo la sicurezza delle attività e lo stato dell'ambiente, garantendo un controllo costante nell'area.

MICROSISMICITÀ

In molte aree è presente una naturale attività microsismica legata ai normali assestamenti del sottosuolo. Questi fenomeni di energia solitamente molto ridotta, nella maggior parte dei casi non percepibili dalla popolazione ma sono rilevabili solo attraverso strumenti appositi.

Il monitoraggio microsismico rappresenta uno strumento fondamentale per controllare in tempo reale l'attività naturale microsismica del sottosuolo, evidenziandone eventuali variazioni. Un'analisi di dettaglio, sia temporale che spaziale, permette di distinguere tra eventi naturali e sismicità indotta da attività antropiche, offrendo supporto alla gestione delle attività.

Per avere una conoscenza più completa dell'area e un approccio proattivo all'analisi, anche se non espressamente richiesto dalla normativa vigente alla data dell'autorizzazione per il progetto Ravenna CCS Fase 1, in virtù della piccola taglia, è stato predisposto un piano di monitoraggio della microsismicità con l'intento di dimostrare la sicurezza dello stoccaggio di CO₂.

La principale sfida del monitoraggio microsismico per il progetto Ravenna CCS era legata alla natura interamente offshore del sito di stoccaggio e all'assenza di una rete di rilevazione preesistente. L'area da monitorare presentava quindi limitazioni di accessibilità, sia nella parte a mare per ovvi motivi che in quella a terra coincidente con la città di Ravenna e la sua area portuale e con il delta del Po con terreni saturi d'acqua.

È stata quindi realizzata una rete microsismica dedicata composta da 8 stazioni, di cui 5 offshore e 3 onshore (Figura 12). Il sistema ha iniziato a operare già a fine gennaio 2022 con l'attivazione delle prime due stazioni a terra; da dicembre dello stesso anno, con l'aggiunta della terza stazione onshore, è stato possibile avviare il monitoraggio continuo e la localizzazione di eventuali eventi sismici. A marzo 2023 la rete è stata completata con l'installazione delle

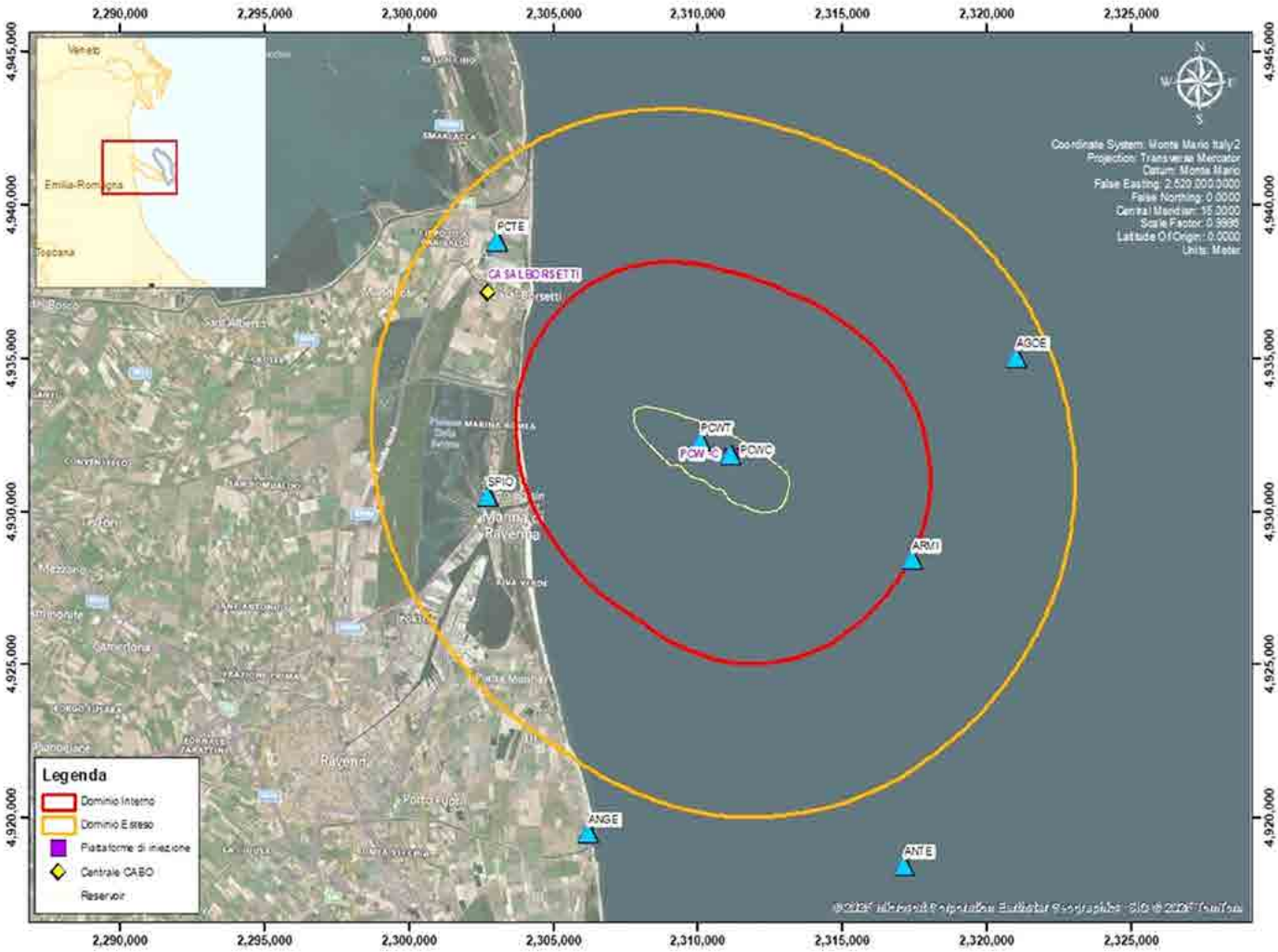
stazioni offshore, diventando pienamente operativa oltre un anno prima dell'avvio dell'iniezione di CO₂, garantendo così un'adeguata acquisizione di dati di baseline.

La progettazione della rete, inclusa la scelta dei sensori, il posizionamento e le modalità installative, è stata sviluppata in conformità al documento "Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche" (ILG), emanato dal Ministero dello Sviluppo Economico il 24 novembre 2014. Il decreto ministeriale di autorizzazione della Fase 1 ha inoltre prescritto esplicita-

mente l'adozione di tali linee guida per la predisposizione del sistema di monitoraggio.

I dati continui di ogni singola stazione sono inviati in tempo reale agli uffici Eni a San Donato Milanese e in parallelo al centro di Monitoraggio dell'INGV che provvede alla loro elaborazione in qualità di Struttura Preposta al Monitoraggio (SPM), identificata dagli Enti competenti secondo quanto previsto dagli ILG. I dati sono elaborati in modo automatico e viene poi eseguita la revisione manuale da parte di un sismologo che provvede a confermare e rielaborare solo i segnali riconosciuti come possibili eventi sismici.

FIGURA 19: MAPPA CON LE STAZIONI SISMOLOGICHE DELLA RETE DI PORTO CORSINI



Il monitoraggio ha coperto il triennio 2022-2025, includendo sia la fase pre-iniettiva sia quella operativa di iniezione della CO₂. L'analisi dei dati è stata condotta in modo indipendente anche dalla Struttu-

ra Preposta al Monitoraggio (SPM - INGV), a garanzia di un ulteriore livello di controllo e trasparenza.

Nel periodo considerato sono stati registrati **20 eventi sismici naturali locali**¹⁰, con magnitudo comprese tra -0,3 e 2,5, valori coerenti con la naturale attività microsismica dell'area.

I risultati del monitoraggio nel **periodo precedente all'iniezione** confermano che **l'area identificata per l'attività di stoccaggio è un'area a bassa sismicità**; infatti, l'area del comune di Ravenna è classificata come zona sismica 3 (D.G.R.E-R n. 1164/2018).

I risultati del monitoraggio **durante il periodo di iniezione** indicano che **non vi è stato nessun aumento della sismicità** rispetto al periodo pre-iniezione. L'analisi di dettaglio, sia temporale che spaziale, ha rilevato che gli eventi registrati rientrano nella **normale attività microsismica dell'area e non sono quindi riconducibili allo stoccaggio di CO₂**.

Le attività di monitoraggio proseguiranno fino ad agosto 2026, un anno dopo il termine dell'iniezione. La Fase 2 del progetto Ravenna CCS sarà oggetto di un nuovo monitoraggio microsismico, per la cui definizione verranno sfruttate anche le evidenze e l'esperienza acquisite con la Fase 1.

DEFORMAZIONI DEL SUOLO

Il monitoraggio delle deformazioni del suolo è un'altra attività fondamentale quando si svolgono operazioni che possono influenzare il sottosuolo, come ad esempio l'estrazione o lo stoccaggio di fluidi. In questi casi, infatti, il terreno può subire piccoli movimenti: abbassamenti (subsidenza) o sollevamenti. Questi fenomeni sono generalmente molto lenti e difficili da percepire a occhio nudo, ma è importante controllarli per garantire sicurezza, sostenibilità delle attività e protezione del territorio.

L'obiettivo principale del monitoraggio è quindi misurare nel tempo come si muove il terreno, individuare eventuali variazioni anomale e comprenderne le cause. Per farlo si utilizzano più tecnologie insieme, ciascuna con caratteristiche complementari. Nel caso in esame, le principali tecniche impiegate sono:

- GNSS in continuo (stazioni GPS permanenti);
- Interferometria satellitare (InSAR);
- livellazione geometrica di alta precisione.

L'uso combinato di queste metodologie permette di avere una visione completa e affidabile dei fenomeni, sia su larga scala sia a livello locale.

GNSS in continuo: monitoraggio costante e puntuale

Le stazioni GNSS (Global Navigation Satellite System) sono strumenti installati in punti specifici del territorio che registrano continuamente la loro posizione grazie ai satelliti. Ogni stazione è in grado di misurare con grande precisione la propria quota e la propria posizione nel tempo, producendo delle serie storiche, cioè

sequenze di dati che mostrano come la posizione cambia giorno dopo giorno.

Questo tipo di monitoraggio ha alcune caratteristiche particolarmente importanti:

- è continuo, quindi consente di osservare l'evoluzione nel tempo;
- è molto preciso, con sensibilità di pochi millimetri;
- fornisce informazioni tridimensionali (movimenti verticali e orizzontali).

Ad esempio, dall'analisi delle serie storiche è possibile ricavare la velocità media di movimento del terreno (ad esempio millimetri all'anno), parametro fondamentale per capire se il comportamento osservato è stabile o in evoluzione.

Il limite principale di questa tecnica è che le misure sono puntuali: riguardano solo le posizioni delle stazioni installate. Per questo motivo è necessario affiancarle ad altre metodologie che permettono di osservare aree più estese.

InSAR: osservazione del territorio dallo spazio

L'InSAR (Interferometria SAR da satellite) è una tecnologia di telerilevamento che utilizza immagini radar acquisite da satelliti in orbita per studiare gli spostamenti superficiali del suolo.

Il principio di funzionamento si basa sul confronto tra immagini satellitari acquisite in momenti diversi, consentendo di stimare con elevata precisione gli spostamenti superficiali avvenuti nel tempo.

Questa tecnica offre grandi vantaggi:

- copre aree molto ampie (decine o centinaia di chilometri quadrati);
- consente di ricostruire lo spostamento del terreno con precisione millimetrica;
- permette di analizzare anche periodi lunghi (anni o decenni), utilizzando archivi di immagini satellitari.

Le prestazioni migliori si ottengono in corrispondenza di elementi stabili nel tempo e ben riflettenti per il segnale radar, come edifici, infrastrutture o manufatti.

Livellazione: massima precisione sui punti di controllo

La livellazione geometrica è una tecnica tradizionale, ma ancora oggi molto importante. Consiste nel misurare con strumenti ottici/digitali la differenza di quota tra punti lungo una rete di capisaldi distribuiti sul territorio.

Questa metodologia ha alcune caratteristiche distintive:

- offre elevatissima precisione verticale;
- è particolarmente affidabile per confronti tra misure ripetute nel tempo;
- permette di costruire una base di riferimento molto solida.

¹⁰ Per eventi locali si intendono quelli localizzati all'interno della rete di monitoraggio o a una distanza non superiore a 10 km dalla stazione più vicina.

Le misure vengono effettuate in campagne periodiche, ad esempio a cadenza pluriennale. Ripetendo nel tempo le stesse misure sugli stessi punti, è possibile calcolare la velocità di abbassamento o sollevamento del terreno.

Il limite è che la livellazione richiede attività sul campo e quindi copre aree più limitate rispetto al satellite. Tuttavia, proprio per la sua precisione, è fondamentale per validare e integrare gli altri dati.

Informazioni derivanti dal monitoraggio delle deformazioni del suolo

Il risultato finale del monitoraggio delle deformazioni del suolo consiste nell'interpretazione dei fenomeni osservati, consentendo di verificare che i movimenti siano coerenti con le aspettative, individuare

eventuali anomalie e fornire elementi oggettivi per decisioni operative e di sicurezza.

Risultati per Ravenna CCS Fase 1

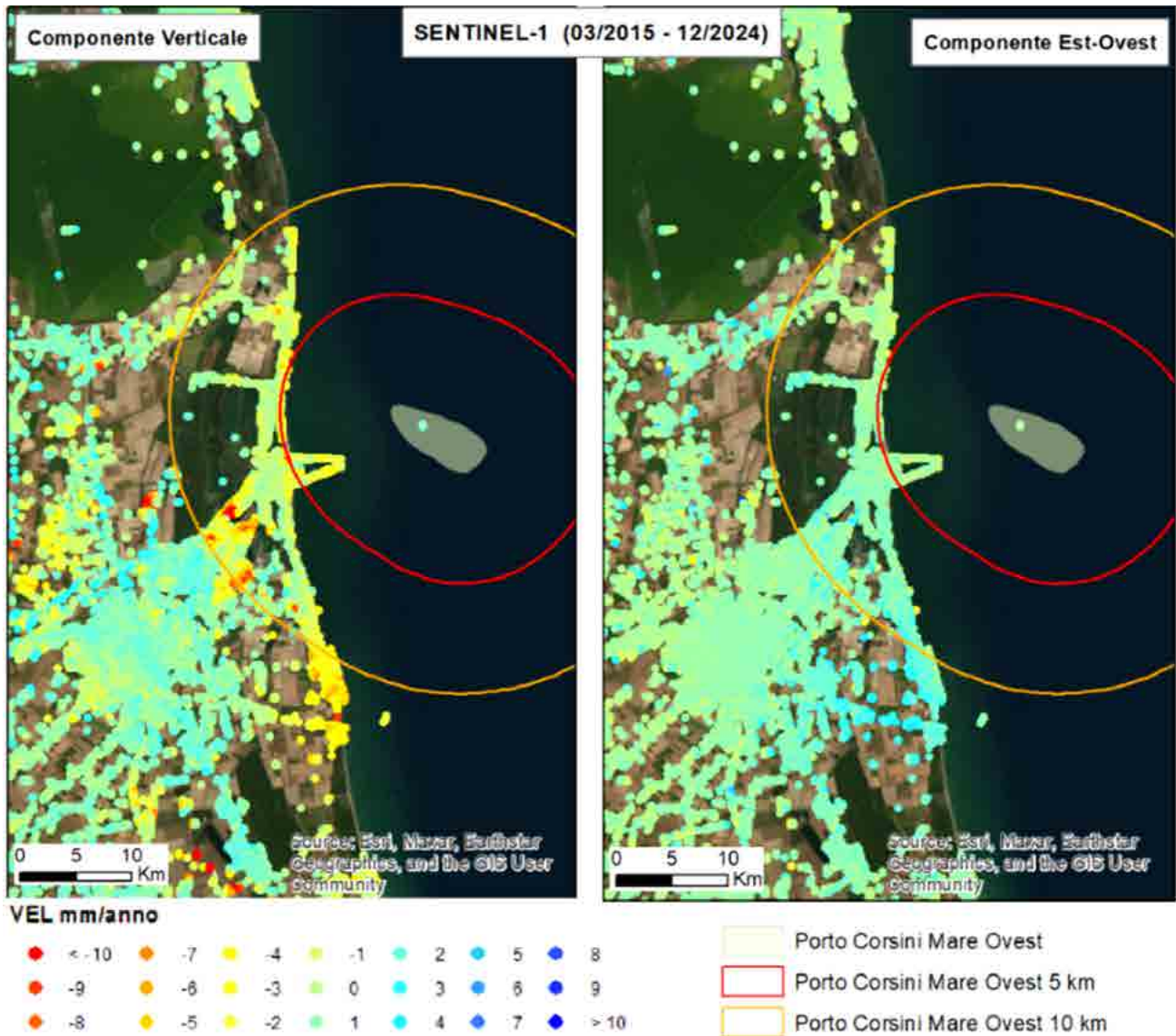
Il monitoraggio delle deformazioni del suolo nel Progetto CCS Fase 1 ha visto l'analisi di dati provenienti da una rete GNSS in continuo costituita da 14 stazioni (9 installate su piattaforme offshore e 5 installate a terra), interferometria satellitare InSAR sull'area di interesse e livellazione di alta precisione su una rete lunga circa 250 km.

I risultati principali evidenziano **deformazioni del suolo coerenti con la dinamica naturale** dell'area con **assenza di variazioni attribuibili all'iniezione di CO₂ nel sottosuolo**.

**FIGURA 20: POSIZIONE DELLE STAZIONI GNSS IN CONTINUO NELL'AREA DEL PROGETTO (a sinistra)
POSIZIONE DEI CAPOSALDI FACENTI PARTE DELLA RETE DI LIVELLAZIONE DI ALTA PRECISIONE (a destra)**



FIGURA 21: MAPPA OTTENUTA DAI DATI SATELLITARI INSAR NELL'AREA DI INTERESSE



10. Monitoraggio ambientale



Il Piano di Monitoraggio Ambientale (PMA) di Ravenna CCS Fase 1 ha consentito di indagare tutte le matrici ambientali (aria, acqua, suolo e biota marino, ovvero la popolazione animale, vegetale e dei microorganismi locali) sia a terra che a mare. Le attività del monitoraggio hanno lo scopo di analizzare le principali caratteristiche chimico-fisiche e biogeochimiche dell'ambiente e valutarne eventuali evoluzioni nel tempo, al fine di assicurare il corretto svolgimento delle attività di iniezione della CO₂.

Il monitoraggio ambientale sulla terraferma ha come obiettivo principale la misura accurata dei valori delle emissioni rilasciate in atmosfera sia in maniera continuativa che periodica (misure, queste, in parte già condotte nell'ambito del normale esercizio della Centrale gas di Casalborgorsetti). Al fine di garantire il controllo di tutti i parametri previsti in ambito autorizzativo del Progetto, su tutta la filiera, sono stati introdotti degli ulteriori misuratori di portata e composizione della CO₂ iniettata. Inoltre, specificatamente all'impianto di cattura è stato implementato un controllo dei parametri maggiormente significativi in maniera continuativa anche attraverso un Sistema di Monitoraggio delle Emissioni in

continuo (SME). Questo sistema di controllo è stato installato in cima alla colonna (nuovo punto di emissione - Camino CCS) dalla quale vengono rilasciati in atmosfera i fumi privati della maggior parte della CO₂, che durante l'operatività dell'impianto ha sostituito il camino dal quale vengono normalmente emessi i fumi del turbocompressore TK-04.

Il monitoraggio ambientale a mare avviene attraverso la combinazione di studi multidisciplinari che includono:

- l'analisi geofisica del fondale e della colonna d'acqua;
- campagne di misura acustiche per il monitoraggio e la quantificazione del fenomeno della risalita di bolle dal fondale, fenomeno che naturalmente già si verifica nel Mar Adriatico a causa della decomposizione di materia organica sul fondo;
- analisi chimiche e biologiche della colonna d'acqua, dei sedimenti e del biota;
- la modellazione e la valutazione del rischio ambientale.

Per la redazione del Piano di Monitoraggio Ambientale Marino e la sua conduzione ci si è avvalsi della collaborazione e delle competen-

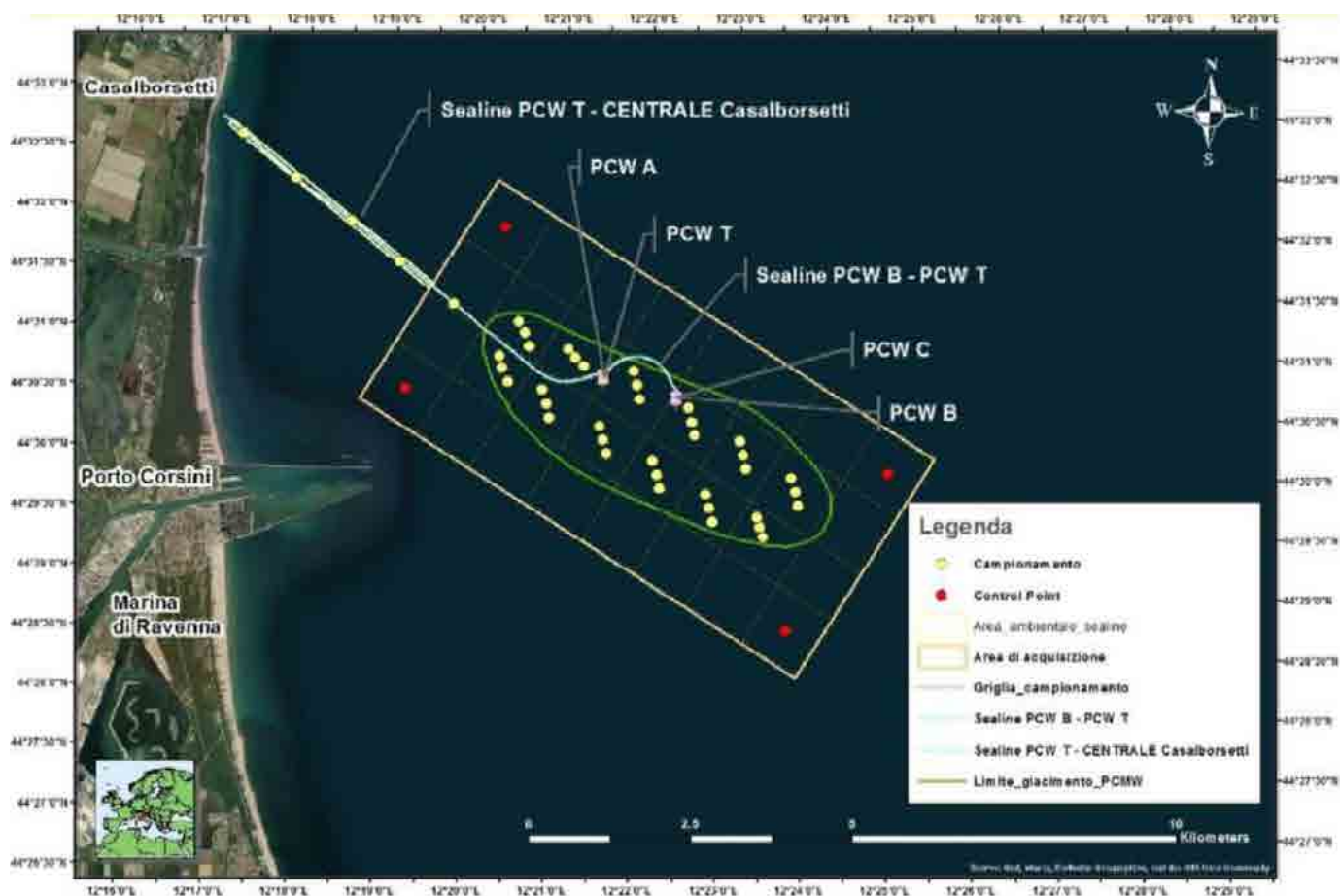
ze specialistiche di diversi dipartimenti tecnico-scientifici interuniversitari e del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR).

Il Piano di Monitoraggio Ambientale Marino è stato sviluppato in modo da coprire tutti i periodi della Fase 1 del Progetto Ravenna CCS (prima, durante e dopo le operazioni di iniezione), ed è stato definito temporalmente in modo da rilevare le naturali variazioni stagionali dei parametri monitorati. L'area oggetto del monitoraggio non è limitata a quella del giacimento ma si estende al di

fuori del perimetro di stoccaggio e include tutto il percorso della condotta di trasporto della CO_2 . In totale a oggi sono state già condotte 49 campagne di misurazione (periodo 2023-2025) ed è previsto il prosieguo delle attività di monitoraggio post iniezione fino ad agosto 2026.

La Fase 2 del progetto Ravenna CCS sarà oggetto di un piano di monitoraggio specifico, per la cui definizione verranno sfruttate le evidenze e l'esperienza acquisite con la Fase 1.

FIGURA 22: SCHEMA RAPPRESENTATIVO DEI PUNTI DI CAMPIONAMENTO OFFSHORE



Le fasi di campionamento avvengono con frequenze periodiche suddividendo l'area in maglie all'interno delle quali sono state individuate le stazioni oggetto del prelievo dei campioni. Lo schema riportato in Figura 15 è stato realizzato al fine di controllare i parametri chimico-fisici nella colonna d'acqua, nei sedimenti e del biota marino, con particolare attenzione alle aree dove sono presenti pozzi preesistenti già chiusi minerariamente. L'approccio sistemico consente da un lato una correlazione diretta tra i diversi parametri e dall'altro ne analizza la variabilità nei diversi periodi dell'anno.

In più, oltre ai campionamenti periodici, è stata installata una stazione di monitoraggio fissa denominata "Lander CCS" progettata con lo scopo di analizzare i principali parametri meteorologici, acustici e chimico-fisici della colonna d'acqua in maniera continuativa al fine di verificare quali sono le eventuali fluttuazioni periodiche dei dati acquisiti. Questa strumentazione è stata posizionata nei pressi del punto di collegamento tra la condotta di trasporto della CO_2 e la piattaforma, vicino al pozzo di iniezione.

FIGURA 23: LANDER CCS UTILIZZATO PER IL MONITORAGGIO IN CONTINUO A FONDO MARE



RISULTATI DEL MONITORAGGIO DELLA FASE 1

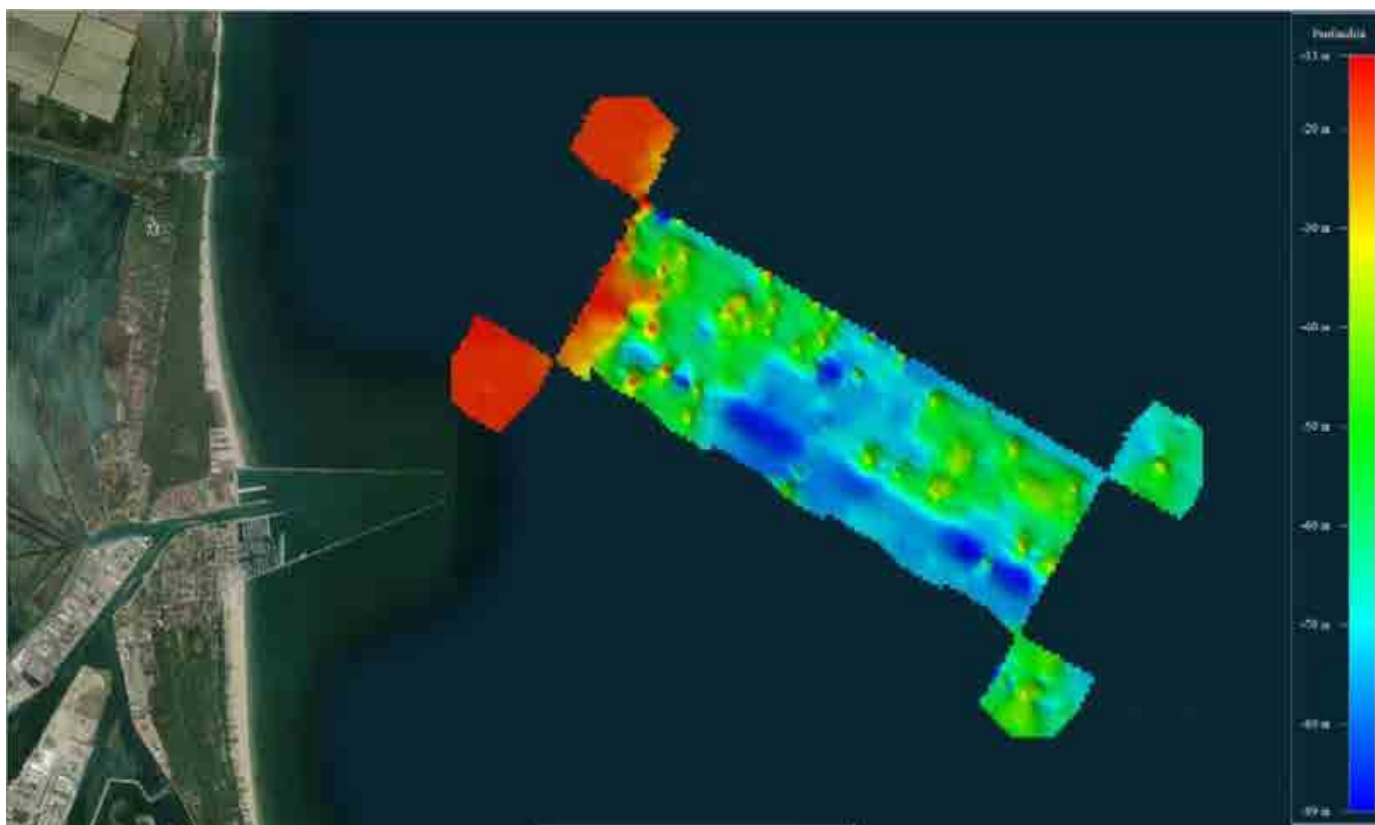
Indagini geofisiche ed acustiche sulla colonna d'acqua e del fondale marino

Su tutta l'area offshore interessata dal progetto sono state eseguite delle acquisizioni periodiche con una strumentazione geofisica ed acustica capace di ricostruire la morfologia del fondale e di captare in colonna d'acqua i segnali delle emissioni gassose di bassa entità che naturalmente vengono liberate dal sedimento superficiale. Si tratta di un fenomeno naturale legato alla decomposizione della materia organica depositata sul fondale, in parte anche trasportata dai fiumi. Prima di essere rilasciato dal sedi-

mento verso la colonna d'acqua, questo gas si accumula nei pori dei primi metri di sedimento superficiale (Figura 24). Queste emissioni biogeniche, per loro natura variabili stagionalmente e spazialmente, sono state monitorate periodicamente per identificare un eventuale incremento delle stesse dovuto ad una fuoriuscita di fluidi dal giacimento di PCMW.

L'analisi dei dati acquisiti mediante strumentazione acustica sulla geomorfologia del fondale oggetto di monitoraggio porta a concludere che non vi sono e non vi sono state alterazioni derivanti dalle operazioni di iniezione di CO₂ e che le metodologie di controllo impiegate rappresentano un efficace dispositivo di monitoraggio.

FIGURA 24: RAPPRESENTAZIONE DELLA MORFOLOGIA DELLA SUPERFICIE SUPERIORE DELLE ZONE DI ACCUMULO DI GAS BIOGENICO PRESENTI NEI SEDIMENTI DEL FONDALE MARINO



La scala cromatica indica la profondità alla quale si trova la parte sommitale degli accumuli di gas biogenico.

Indagini chimico-fisico e biogeochimiche della colonna d'acqua e dei sedimenti

Dai risultati delle analisi chimico fisiche condotte sulle acque e sui sedimenti non si sono riscontrate variazioni sostanziali se non quelle dovute alla ciclicità stagionale e alla variabilità

dei regimi fluviali, la cui foce è localizzata nell'area costiera in prossimità di quella del Progetto. I risultati ottenuti consentono, peraltro, di attestare la capacità delle tecniche di monitoraggio nel rilevare le variazioni locali dei parametri osservati.

FIGURA 25: OPERAZIONI DI CAMPIONAMENTO DELLA COLONNA D'ACQUA (per gentile concessione del CNR)

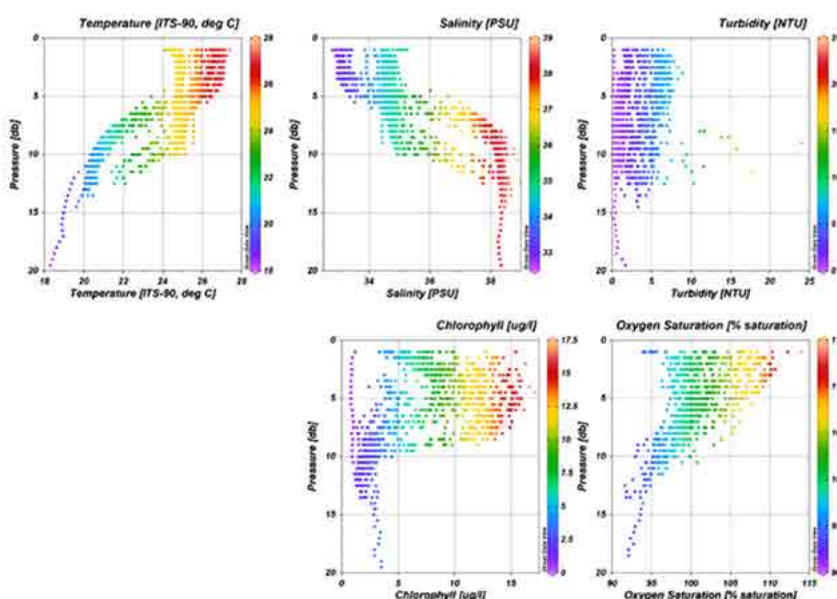


FIGURA 26: OPERAZIONI DI CAMPIONAMENTO DI ACQUE MEDIANTE RETINO BONGO E SEDIMENTI ATTRAVERSO L'UTILIZZO DI BOX-CORER E CAROTIERE A GRAVITÀ SW104 TUBO CORTO



Indagini sul biota marino

Per quanto riguarda lo stato del biota, non vi sono variazioni sostanziali se non quelle dovute alla ciclicità stagionale e alle dinamiche di adattamento di microflora e microfauna nonché della fauna ittica che mantiene una struttura complessivamente coerente con le dinamiche tipiche degli ambienti costieri adriatici. Il rapporto conclusivo sulla valutazione del rischio ambientale analizza quanto emerso dalle indagini sul biota effettuate prima e durante l'attività di iniezione della CO₂, e riporta quanto segue:

“Nell'analisi complessiva va tenuto conto del fatto che tutta l'area oggetto di indagine si trova in una zona costiera, caratterizzata da forti variazioni delle condizioni ambientali, influenzate sia da impatti di origine antropica (es: traffico marittimo) che da fenomeni naturali (es: bassa profondità, input fluviali, mareggiate ecc.). Nel complesso le variazioni delle metriche considerate nelle analisi durante il periodo in operam rientrano nella dinamica naturale stagionale dei popolamenti ittici costieri e non riconducibile all'attività di iniezione di CO₂”.

FIGURA 27: OPERAZIONI DI LANCIO DELLA CAMERA BENTICA E DI CARATTERIZZAZIONE DELLA COMUNITÀ BENTONICA (per gentile concessione del CNR)



Valutazione del rischio ambientale e dell'efficacia del monitoraggio

Tutto quanto analizzato porta a concludere che i monitoraggi effettuati sono efficaci per valutare l'impronta ambientale delle operazioni di iniezione e stoccaggio. I monitoraggi non evidenziano fuoriuscite di CO₂, né significative alterazioni alle comunità biologiche e le variazioni osservate sono riconducibili a processi naturali o attività antropiche locali note, diverse dall'iniezione di CO₂. Il report conclusivo della valutazione del rischio ambientale, analizzando i risultati di tutte le campagne di monitoraggio ambientale marino effettuate nel periodo pre-

cedente ed in quello concomitante con l'iniezione di CO₂ conclude quanto segue:

“In conclusione, lo studio dei monitoraggi condotti e la rielaborazione e confronto dei relativi risultati hanno pienamente dimostrato l'efficacia delle metodologie di campionamento, dell'approccio strumentale e delle tempistiche. Tutto ciò porta a concludere che i monitoraggi effettuati sono efficaci per valutare l'impronta ambientale delle operazioni di iniezione e stoccaggio [...] e che tale impronta è, al momento, trascurabile se non inesistente”.

11. Conclusioni



Il progetto Ravenna CCS è il primo progetto industriale di CCS italiano, realizzato da una joint venture paritetica tra Eni e Snam per offrire all'industria italiana ed europea una soluzione competitiva ed immediatamente applicabile per la decarbonizzazione delle attività produttive. Il progetto prevede lo stoccaggio geologico permanente dell'anidride carbonica nei giacimenti di gas esauriti di Porto Corsini Mare Ovest (PCMW) e Porto Garibaldi-Agostino (PGA), al largo della costa Ravennate. L'anidride carbonica stoccata proverrà principalmente da emettitori industriali terzi, italiani ed europei, lo stoccaggio avrà esclusivamente scopo di mitigazione delle emissioni e non sarà connesso ad alcuna attività produttiva di gas.

La Fase 1 del progetto è stata avviata ad agosto 2024 e l'iniezione di CO₂ è terminata ad agosto 2025 avendo conseguito tutti gli obiettivi prefissi. Questa fase ha avuto lo scopo di dimostrare su piccola scala industriale, tramite l'acquisizione di dati e di esperienze operative, l'applicabilità del processo CCS, la sua sicurezza e la possibilità di monitorare efficacemente gli impianti e l'ambiente interessati. Il progetto Ravenna CCS Fase 1 è stato anche determinante nel promuovere la conoscenza di questo processo presso i futuri utilizzatori, fattore fondamentale per lo sviluppo di un nuovo mercato dedicato alla decarbonizzazione delle attività industriali.

Scendendo nel dettaglio delle varie infrastrutture coinvolte per la Fase 1, è possibile ricapitolare i **principali risultati ottenuti**.

Oltre 16.000 tonnellate di anidride carbonica sono state catturate dai fumi di uno dei turbocompressori della centrale di trattamento del gas naturale di Casalborsetti. Nonostante la bassa percentuale di CO₂ nei fumi (2,3-2,5%) rendesse le condizioni di cattura particolarmente sfidanti, le performance dell'impianto sono state ottime: **l'efficienza media di cattura si è attestata al 91,9%, con punte del 96%**. Le impurità nel flusso di CO₂ sono risultate sempre ampiamente al di sotto dei limiti previsti dalla specifica per il trasporto, con una **purezza** che è risultata sempre **superiore al 99%** in volume. L'impianto ha operato con continuità, al netto di alcune fermate per manutenzioni programmate, per consentire lavori sulla centrale e per altre esigenze non riconducibili a problematiche legate all'iniezione, allo stoccaggio o a perdite di CO₂.

Il trasporto della CO₂ da Casalborsetti al pozzo di iniezione tramite una pipeline riconvertita lunga circa 11 km è avvenuto regolarmente, rispettando le condizioni previste. I modelli di calcolo applicati si sono confermati in grado di prevedere in modo accurato il comportamento del gas trasportato e di prevedere l'approssimarsi nella

stagione invernale delle condizioni di pressione e temperatura che avrebbero portato a fenomeni di condensazione di CO₂ in linea, attuando per tempo le opportune strategie operative previste in fase di progettazione.

Lo stoccaggio è avvenuto con successo nel giacimento esaurito di Porto Corsini Mare Ovest (livello PL2-C), selezionato a valle di studi sulle caratteristiche geologiche, strutturali e fluidodinamiche. Infatti, il monitoraggio continuo del giacimento tramite sensori elettrici di pressione e temperatura, unitamente al cavo di fibra ottica installato lungo tutto il pozzo, ed integrato con i risultati di acquisizioni periodiche in pozzo (log di pozzo), ha permesso di **confermare l'efficacia e la sicurezza dell'iniezione e l'integrità del pozzo iniettore e della roccia di copertura, confermata anche dall'ampio margine tra la pressione di iniezione ed il limite massimo di pressione definito dalle autorità (240 bar)**. I dati raccolti in campo hanno permesso di validare l'accuratezza dei modelli previsionali di giacimento. Il progetto Ravenna CCS Fase 1 è stato, ed è tutt'ora, oggetto di un'accurata **attività di monitoraggio ambientale, del sottosuolo e del giacimento**, sia durante la fase operativa che in quelle precedenti e successive, al fine di dimostrare la sicurezza delle operazioni di stoccaggio di CO₂. Le attività si sono svolte in collaborazione con gli enti preposti quali l'Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale (ISPRA) e l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e avvalendosi del supporto e delle competenze del Centro Nazionale Ricerche (CNR) e di altri dipartimenti tecnico-scientifici universitari. Le attività **hanno permesso di verificare il corretto svolgimento delle operazioni, il contenimento della CO₂ all'interno del**

giacimento. Allo stesso tempo non è stato rilevato nessun impatto delle operazioni di iniezione sull'ambiente. Le attività di monitoraggio proseguiranno fino ad agosto 2026.

Il sottosuolo è stato monitorato attraverso una **rete microsismica** composta di 8 stazioni, che **ha confermato che l'area dello stoccaggio è un'area a bassa sismicità**, e che **le attività di iniezione non hanno prodotto alcun incremento della microsismicità** rispetto al periodo pre-iniezione. Gli eventi registrati dai sensori rientrano nella normale attività microsismica dell'area (generalmente inferiore alla soglia avvertibile) e non sono quindi riconducibili allo stoccaggio di CO₂.

Anche dal punto di vista dell'**analisi delle deformazioni del suolo**, la combinazione di dati della rete GNSS (14 stazioni), dell'interferometria satellitare InSAR e della rete di livellazione ad alta precisione lunga circa 250 km ha evidenziato **un comportamento del suolo coerente con la dinamica naturale dell'area, senza variazioni attribuibili all'iniezione di CO₂ nel giacimento**.

Infine, il **piano di monitoraggio dell'ambiente marino** ha combinato tecniche diverse di analisi geofisica del fondale e della colonna d'acqua, campagne di misura acustiche, analisi chimiche e biologiche dell'acqua, dei sedimenti e del biota marino. **Le attività effettuate nell'ambito della Fase 1 hanno dimostrato** la validità delle tecniche di monitoraggio impiegate e **non hanno evidenziato impatti sull'ambiente marino attribuibili alle operazioni di iniezione di CO₂**.

