

Sequestro e cattura del CO₂ (CCS) Stato e prospettive

Relazione tecnico-scientifica
redatta nell'interesse di Greenpeace Onlus, Recommon APS et al.

presso

Tribunale di Roma, sez. II Civile
G.I. dott. Corrado Cartoni - R.G. N. 26468/2023

NICOLA ARMAROLI

Dirigente di Ricerca, Istituto per la Sintesi Organica e la Fotoreattività,
Consiglio Nazionale delle Ricerche

Accademia Nazionale delle Scienze, detta dei 40

Bologna, 30 Dicembre 2023



Emissioni globali di CO₂ e concentrazione atmosferica

La civiltà umana consuma attualmente oltre 15 miliardi di tonnellate di combustibili fossili l'anno per usi energetici (petrolio, carbone, gas), che comportano l'immissione in atmosfera di oltre 36 miliardi di tonnellate di biossido di carbonio (o anidride carbonica) CO₂ [1]. Questi due numeri forniscono un primo elemento importante, che sfugge tipicamente alla sensibilità delle persone: la quantità in peso di CO₂ immessa in atmosfera è – mediamente – più del doppio della quantità di combustibili che vengono estratti dal sottosuolo e bruciati. In pratica, miliardi di tonnellate di carbonio – relegato nelle viscere della terra per milioni di anni sotto forma di petrolio, carbone e gas – si legano all'ossigeno dell'aria mediante processi di combustione e, in frazioni di secondo, vengono immessi in atmosfera sotto forma di un gas totalmente impercettibile alla sensibilità umana come il CO₂, aumentando drasticamente il loro peso originario. Bruciando ad esempio un litro di benzina nel motore di un'auto, 780 g di liquido scuro, infiammabile e di odore pungente si trasformano in 2,3 kg di CO₂, una sostanza con caratteristiche opposte: gassosa, incolore, inodore, inerte [2].

La caratteristica principale del CO₂ è la sua enorme stabilità: una volta immesso in atmosfera vi resta per secoli. D'altro canto però l'atmosfera si rimescola completamente in circa un anno e il risultato è che la concentrazione di CO₂ è uniforme su tutto il pianeta. La misura sistematica della concentrazione di CO₂ in atmosfera è cominciata nel 1958. Da allora, essa è passata da 315 a 420 ppm (parti per milione): un aumento del 33% [3]. Gli studi di paleoclimatologia indicano che 420 ppm è il valore atmosferico più alto da almeno 3 milioni di anni [4]. In pratica, stiamo realizzando il più grande esperimento fuori controllo della storia dell'umanità [5].

Perché l'aumento di CO₂ in atmosfera è un problema: l'effetto serra di origine antropica

La temperatura media terrestre è circa 15 °C, mentre la temperatura sulla superficie lunare può oscillare tra + 120 e -130 °C. Perché questa differenza? La Terra è avvolta da una sorta di capsula che contiene diversi gas, l'atmosfera, che agisce come una coperta termica. Quando i raggi del Sole colpiscono la superficie terrestre sono in parte "rimbalzati" di nuovo verso lo spazio sotto forma di luce infrarossa, invisibile ai nostri occhi, che è sostanzialmente calore. Diversi gas contenuti nell'atmosfera sono capaci di assorbire questo calore, cosicché, invece di perdersi nello spazio, esso viene trattenuto all'interno della biosfera e la riscalda. In pratica questi gas si comportano come i vetri di una serra, e il loro effetto viene definito appunto *effetto serra* [5]. L'effetto serra naturale è un fattore chiave per garantire la vita sulla Terra: senza di esso la temperatura media sarebbe di -18 °C. I principali gas serra presenti nell'atmosfera terrestre sono vapore acqueo (H₂O), biossido di carbonio (CO₂) e metano (CH₄).

La combustione di petrolio carbone e gas parrebbe un processo perfetto: otteniamo tanta energia e produciamo una sostanza invisibile, inerte e addirittura commestibile per le piante. Purtroppo però il sistema Terra è in grado di "digerire" (principalmente attraverso la fotosintesi nei vegetali) solo circa la metà del CO₂ che produciamo, il resto si accumula in atmosfera generando un effetto serra aggiuntivo di origine – appunto – antropica [6]. Questo accumulo di CO₂ in atmosfera è di gran lunga la principale causa del riscaldamento della biosfera che, negli ultimi decenni, ha subito una brusca accelerazione.

L'aumento medio globale di temperatura indotto principalmente dall'uso dei combustibili fossili (ovvero trasferimento di carbonio dal sottosuolo terrestre all'atmosfera, sotto forma di CO₂) è stimato in 1,1 °C. Questo valore è già oggi significativamente più alto in alcuni *hotspot* tra i quali spicca la regione mediterranea [7]. In Italia, l'aumento medio delle temperature rispetto al periodo preindustriale è, già oggi, di quasi 2 gradi.

Accordi internazionali

A partire dal 1992 (Earth Summit di Rio de Janeiro, promosso dalle Nazioni Unite) la comunità internazionale ha riconosciuto la necessità di porre un freno alle emissioni di gas serra, ma solo nell'ultimo decennio si sono conseguiti risultati diplomatici significativi. In particolare, nel 2015 a Parigi tutti i paesi aderenti alla Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC) hanno riconosciuto la necessità di mantenere l'aumento di temperatura indotto dalle attività umane inferiore ai 2 °C [8]. Nel 2023, lo stesso consesso, nella conferenza annuale tenutasi a Dubai, ha per la prima volta ufficialmente riconosciuto la necessità di avviare una transizione progressiva per abbandonare i combustibili fossili, aprendo definitivamente la strada a un nuovo modello energetico. Questo processo è urgente e necessario per limitare i danni del cambiamento climatico, che comporta un generale aumento degli eventi climatici estremi come ondate di calore, siccità, inondazioni e uragani. A questo si aggiunge un progressivo scioglimento dei ghiacci che causa innalzamento dei mari e può comportare, in prospettiva, il trasferimento forzato di oltre 2 miliardi di persone che attualmente vivono nelle zone costiere. Uno scenario da incubo in termini di gestione di rifugiati, in questo caso di tipo climatico.

A questo proposito è utile infine sottolineare che il cambiamento climatico non è una minaccia per il pianeta Terra, che troverà un suo equilibrio a temperature più alte, come fatto in epoche precedenti. Il cambiamento climatico è una minaccia per la civiltà umana, così come l'abbiamo modellata negli ultimi 200 anni, su un pianeta oggi abitato da 8,1 miliardi di persone.

In questo contesto, il cambiamento climatico crea anche un enorme problema di giustizia sociale a livello planetario. I principali emettitori di gas climalteranti sono infatti i cittadini più ricchi, che hanno i mezzi economici, tecnici e culturali per difendersi. D'altro canto però gli effetti di questo processo colpiscono principalmente i cittadini più poveri e indifesi, che meno contribuiscono alle emissioni di gas serra. Da qui un'ulteriore spinta ad agire con celerità per ridurre le emissioni di CO₂ [2,8].

Cattura e sequestro del carbonio (CCS) e sue varianti (CCU, CCUS)

Per tentare di ridurre delle emissioni di CO₂, l'approccio più studiato punta sui grandi emettitori, come ad esempio centrali termoelettriche a carbone o a gas, cementifici, acciaierie, distretti industriali, impianti petrolchimici. In questo contesto, l'idea più comune (anche se non l'unica, si rimanda altrove per approfondimenti a riguardo [9]) è quella di intercettare i reflui della combustione ai camini, separando il CO₂ dagli altri effluenti (in particolare vapore acqueo, ossidi di azoto e di zolfo) [9]. Una volta separato, il CO₂ viene iniettato nel sottosuolo in profondità, al fine di

confinarlo a tempo indefinito lontano dall'atmosfera, così da non contribuire al riscaldamento globale. I depositi sotterranei presi in considerazione – sia su terra (*onshore*) che in mare (*offshore*) – includono acquiferi salini, giacimenti di petrolio o gas esauriti, giacimenti di carbone non estraibili. Esistono varie stime sulla capacità potenziale di stoccaggio geologico del CO₂ a livello globale; l'Agenzia Internazionale per l'Energia le attesta tra 8000 e 55000 Gton (miliardi di tonnellate). Sulla carta, è un intervallo più che sufficiente per garantire lo stoccaggio ritenuto necessario per la decarbonizzazione del sistema energetico nel periodo 2020-2070 (220 Gton) [10].

L'idea di puntare esclusivamente sui grandi emettitori è dettata da ragioni pratiche. È difficile che si possa implementare il sequestro del CO₂ su miliardi di mezzi di trasporto che si muovono per terra, mare e aria o su miliardi di edifici dotati di piccoli emettitori, come le caldaie domestiche. La decarbonizzazione in questi ambiti è possibile solo attraverso il cambio radicale della tecnologia, primariamente attraverso la elettrificazione dei consumi finali [11]. D'altro canto però, alcune migliaia di grandi emettitori sono responsabili di quote significative di emissioni a livello globale (30-40%) [12]. Quindi, agire in modo massiccio su questo numero relativamente limitato di impianti potrebbe avere, in linea di principio, un impatto non trascurabile sull'abbattimento del CO₂. Al tempo stesso, il CCS risulta molto attraente per le aziende emettitrici, poiché permette di mantenere gli impianti sostanzialmente inalterati, realizzando sistemi *ad hoc* di cattura e sequestro sul parco industriale esistente (*retrofitting*).

Viene talvolta proposta anche una variante "avanzata" del CCS, il cosiddetto CCU (*Carbon Capture and Utilization*) che mira a convertire il CO₂ catturato in materiali utili per il settore delle costruzioni (es. carbonati, cemento) o per la produzione di bevande gassate; stiamo parlando di piccolissime applicazioni di nicchia, rispetto alle quantità enormi di CO₂ oggi prodotte. Spesso si trova anche l'acronimo combinato CCUS (*Carbon Capture Utiliation and Storage*) che fa riferimento essenzialmente all'iniezione forzata del CO₂ nel sottosuolo per ravvivare la produzione petrolifera in giacimenti in fase di esaurimento che hanno perso la pressione di uscita originaria (*Enhanced Oil Recovery*, EOR) [9]. Il CO₂, utilizzato in questo modo, non rimane integralmente confinato nel sottosuolo: una parte si mescola al petrolio, fluidificandolo, e torna in superficie.

I tre acronimi CCS/CCU/CCUS vengono talvolta usati in modo intercambiabile, creando confusione e ambiguità e dando l'impressione, con i termini CCU e CCUS, che l'uso massiccio del CO₂ come materia prima sia una prospettiva industriale a portata di mano. Siamo purtroppo lontanissimi da questo obiettivo ed è importante rimarcare che è alquanto improbabile che il CO₂ potrà mai sostituire, anche solo in parte, i combustibili fossili come fonte di carbonio per il settore industriale. È stato necessario oltre un secolo per creare un mercato annuale da 15 miliardi di tonnellate di combustibili fossili, materie prime ad alto contenuto energetico ed estremamente versatili con cui produciamo una varietà di materiali tra cui polimeri, tessuti, solventi, fertilizzanti e farmaci. Risulta assai improbabile che riusciremo, nel quarto di secolo che ci separa dal 2050, a realizzare un mercato da 36 miliardi (più che doppio!) di una molecola gassosa, inerte, difficilissima da processare e convertire e, di fatto, sostanzialmente inutile come il CO₂.

In pratica, l'opzione "CO₂ come materia prima" è, e resterà a lungo, irrilevante. Resta l'opzione "CO₂ come rifiuto", da confinare lontano dall'atmosfera. Il CCS, appunto. Una tecnologia molto

affascinante sulla carta, che però nel mondo reale si è rivelata quasi sempre un fallimento. Vediamo perché.

I problemi del CCS

Ubicazione degli impianti e trasporto. La realizzazione del CCS su impianti industriali esistenti è un potenziale vantaggio, che però comporta a sua volta un problema: è assai improbabile che il sito in questione sia collocato su una struttura geologica in grado garantire lo stoccaggio del CO₂. Tipicamente, occorre quindi un'infrastruttura di trasporto (gasdotti, navi, autobotti) che trasporti il CO₂ a un sito geologicamente idoneo. Si stima che circa il 70% dei grandi impianti industriali passibili di CCS si trovi entro 100 km da un potenziale sito di stoccaggio [10]. In altre parole, l'infrastruttura di trasporto deve coprire distanze di almeno decine di chilometri e questo comporta un costo di realizzazione e manutenzione. Va poi sottolineato che la realizzazione di queste infrastrutture può incontrare serie difficoltà, di vario tipo. In Ottobre 2023, un progetto di gasdotto CO₂ da 3 miliardi di dollari, lungo oltre 2000 km, che doveva trasportare 15 Mton CO₂/anno è stato cancellato negli Stati Uniti per ragioni di sicurezza e opposizione sociale [13].

Separazione. La separazione del CO₂ dagli altri effluenti alle ciminiere di un impianto industriale può essere fatta in diversi modi: adsorbimento su solidi, uso di membrane, impiego di solventi organici, tipicamente ammine [14]. Quest'ultimo è il processo più diffuso, ma le ammine sono molecole ad elevata tossicità e debbono essere impiegate secondo standard ambientali molto stringenti, specie in siti prossimi ai centri urbani, come quelli che si propongono in Italia. I processi di separazione non sono standardizzati, poiché dipendono dalla concentrazione dello stesso CO₂ e dalla temperatura del flusso in uscita dell'impianto in esame [15]. In breve, la separazione è un processo complesso, altamente energivoro ed economicamente oneroso [16].

Costo energetico. Non solo la separazione del CO₂, ma ogni singolo stadio del processo CCS richiede molta energia termica e/o elettrica. Per ragioni di efficienza, il CO₂ viene preferibilmente trasportato in forma liquida e questo richiede basse temperature ed elevate pressioni. Il tragitto dal sito di cattura a quello di stoccaggio è un ulteriore fattore di consumo energetico. Infine, giunto a destinazione, è evidente che l'iniezione di CO₂ nel sottosuolo – tipicamente a una profondità tra i 1000 e i 3000 metri – ha un costo energetico rilevante. Non è possibile dare un valore univoco del consumo energetico del CCS, poiché dipende da numerosi fattori specifici del caso. Si può indicativamente stimare che una quota tra il 30 e il 60% dell'energia prodotta da una centrale termoelettrica a gas o a carbone debba essere impiegata per il solo processo di separazione del CO₂ mediante ammine, che richiede 2-4 GJ/ton [17,18].

Costo economico. Questo dato di consumo energetico (e relativo costo economico) pone la vera, grande domanda sul CCS, sui cui troppo spesso si sorvola. Come può affermarsi su larga scala un'attività industriale che consuma quote ingenti del proprio output solo per separare un rifiuto? La domanda è ancora più stringente se si considerano gli ulteriori costi economici associati al fatto che gli impianti non sono standardizzabili (un fattore chiave per l'abbattimento dei costi nei processi industriali), al trasporto e all'iniezione nel sottosuolo [19] e al costo operativo dell'impianto. Sono

state proposte varie stime sul costo del CCS, tutte caratterizzate da una forbice molto ampia a causa dei numerosi fattori, specifici per ogni caso, che possono influire sul valore finale. Alcune stime recenti indicano un intervallo di 75-250 € per il costo del sequestro di una tonnellata di CO₂ in Europa [20]. Si tratta di un valore medio nettamente superiore al valore “di borsa” del CO₂ sul mercato ETS, attualmente a circa 80 €/ton [21].

Rischi di rilascio. Un fattore da non sottovalutare, quando si prende in esame un progetto CCS, è che la cattura del CO₂ nel sottosuolo rientra nel campo dei processi geologici, che tipicamente avvengono su una scala dei tempi enormemente più lunga di quella umana. È quindi impossibile determinare, oggi, il rischio di fuga del CO₂ dai depositi CCS attraverso le strutture geologiche esistenti o a seguito di eventi catastrofici naturali come terremoti, che possono avvenire anche in un lontano futuro [12,22]. Sono state individuate almeno sette potenziali vie di fuga, sia nei mari che direttamente in atmosfera, e dovrà essere comunque attuato un monitoraggio costante e protratto per tempi lunghissimi [12]. Eventuali rilasci improvvisi avrebbero effetti catastrofici immediati nelle vicinanze dei siti di stoccaggio: il CO₂ è intrinsecamente non tossico, ma a una concentrazione del 4% nell'atmosfera diventa asfissiante. Anche perdite minime ma costanti (ben al di sotto dell'1% all'anno) renderebbero inutile un progetto CCS. Infatti, un ritardo nel rilascio del carbonio di decenni o di qualche secolo non influirebbe in modo sostanziale sulle tendenze di riscaldamento in corso, visti i lunghi tempi di permanenza del CO₂ in atmosfera. Alcuni studi suggeriscono un certo ottimismo sulla “tenuta” dei siti di stoccaggio, ma rilevano che il comportamento a lungo termine di enormi quantità del CO₂ iniettate nel sottosuolo resta caratterizzato da una notevole incertezza [23].

Sismicità indotta. L'iniezione massiccia nel sottosuolo ad alta pressione di CO₂ (che assume in queste condizioni lo stato liquido) rappresenta un tipo di interferenza con la litosfera senza precedenti, con potenziali effetti collaterali come la possibilità di innescare terremoti [12]. Vista la limitatissima esperienza, poco sappiamo sul destino a lungo termine di grandi quantità di CO₂ immesse in un sito di stoccaggio geologico. Va però sottolineato che terremoti correlati alla iniezione di CO₂ nel sottosuolo sono avvenuti in diversi siti negli Stati Uniti, in Algeria, in Canada e nel Mare del Nord [24], con una magnitudo anche superiore a 5. Questa esperienza pregressa e ben documentata deve essere oggetto di grandissima attenzione da parte dei Ministeri competenti e della autorità pubbliche in fase di rilascio delle autorizzazioni in Italia. A cominciare dal progetto ENI-SNAM a Ravenna, visto che la costa ravennate e la Romagna sono zone sismicamente attive con un pregresso rilevante di eventi tellurici, anche recenti.

I risultati del CCS, una breve rassegna

Oltre il 70% del CO₂ sequestrato globalmente negli ultimi anni è stato impiegato in attività di *enhanced oil recovery*. Nel corso di oltre 50 anni di attività sono stati iniettati circa 300 milioni di tonnellate di CO₂, l'80-90% è stato utilizzato per EOR [25]. Può essere esagerato affermare che il CCS ha aumentato le emissioni, come qualcuno fa, ma certamente si può affermare che ha contribuito in modo irrilevante ad alleviare i nefasti effetti del CO₂ in atmosfera. Fino ad oggi il CCS

è stato essenzialmente un ottimo strumento nelle mani delle industrie *oil&gas* per rivitalizzare i profitti da vecchi giacimenti di petrolio in forte declino produttivo.

CCS in impianti di estrazione del gas naturale. Per decenni, la cattura del CO₂ è avvenuta quasi esclusivamente nella produzione del gas naturale. In alcuni giacimenti, il metano esce infatti fortemente mescolato con il CO₂, che deve essere appunto separato per rendere il primo commerciabile. A quel punto, il CO₂ separato è vendibile sul mercato, essenzialmente per attività di EOR. A questo riguardo è significativo il caso di Shutcreek in Wyoming (USA), il più grande impianto CCS al mondo, dove il CO₂ è ottenuto appunto da separazione dal gas naturale. Il 47% del CO₂ così ottenuto è stata venduto per effettuare EOR, il 50% è stato liberato in atmosfera per assenza di condizioni di mercato e solo il 3% è stato sequestrato nel sottosuolo [25].

Un altro caso di fallimento a catena degli obiettivi di stoccaggio è l'impianto CCS Gorgon in Australia, dove una lunga serie di problemi tecnici hanno reso la fase di sequestro del carbonio molto più complessa e costosa di quanto inizialmente stimato. Questa vicenda mostra anche come un valido progetto sulla carta può diventare un problema quasi insolubile quando si passa al mondo reale dove la conoscenza del sottosuolo è inevitabilmente limitata. Il destino del progetto Gorgon è ora legato alla volontà dell'operatore di investire altri miliardi per raggiungere l'iniziale obiettivo di stoccaggio e rendere l'estrazione del gas naturale meno impattante, come era stato inizialmente prescritto.

CCS su centrali termoelettriche a carbone o gas naturale. Non vi è molto da dire su questi progetti, su cui si lavora da circa 30 anni con un tasso di insuccesso superiore al 90% [25]. Significativo in questo ambito è il recente fallimento del progetto Petra Nova, in Texas, che ricorda quello dei progetti di cosiddetto carbone pulito (*Clean Coal*) che l'Amministrazione Bush varò un ventennio fa negli Stati Uniti nell'ambito del progetto FutureGen [9], anch'essi falliti. Il principale problema sono i costi proibitivi delle operazioni, con gli impianti di produzione elettrica che impiegano quote significative dell'energia e dei ricavi economici per il processo di separazione del CO₂. Questo risulta particolarmente oneroso nel caso degli effluenti dalle centrali termoelettriche, che sono 3-4 volte più diluiti che delle miscele CO₂/metano in uscita dai giacimenti di gas, prima illustrati. Nelle centrali a gas la concentrazione di CO₂ alle ciminiere è ulteriormente ridotta (4-5%, meno della metà rispetto alle centrali a carbone) per cui le operazioni sono ancora più complesse e costose [16]. È un fattore di cui tenere conto dal momento che, nel progetto CCS di Ravenna, possono rientrare le centrali turbogas di Ravenna e Porto Corsini e, in prospettiva, di Ferrara. Il polo industriale ferrarese, inoltre, è distante oltre 80 km dai pozzi di stoccaggio in Adriatico e questo comporterebbe un ulteriore aggravio dei costi delle operazioni. La sostenibilità economica di questi progetti CCS in Emilia-Romagna richiede valutazioni particolarmente attente di sostenibilità tecnica e ambientale, dato che sono in gioco quote rilevanti di finanziamenti pubblici.

CCS su settori hard-to abate. La scarsa informazione tecnica pubblicamente disponibile al momento, suggerisce che il progetto CCS "CALLISTO" di Ravenna mira a coinvolgere industrie *hard-to-abate* (cioè difficili da decarbonizzare per mancanza di tecnologie alternative) nei poli industriali di Ravenna e Ferrara, in modo da abbattere le loro emissioni di CO₂. Al momento si citano lettere di intenti, ma non è chiaro quali tipi di industrie verrebbero coinvolte [26,27]. A livello internazionale, esistono pochissimi esempi di CCS impiegato a valle di industrie *hard-to-abate*. I progetti

coinvolgono aziende che producono gas di sintesi, idrogeno, bioetanolo, cemento e (in un unico caso) acciaio [25]. Gli impianti sono quasi tutti localizzati negli Stati Uniti e godono di generosi sussidi federali e statali, che sono vitali per tenere operativi gli impianti. Praticamente nessuno di essi è stato in grado di mantenere le promesse di progetto in quanto a emissioni evitate, cioè tenendo conto anche dell'aumento delle emissioni connesso al funzionamento e al consumo energetico delle operazioni CCS [25]. I pochi dati a disposizione non consentono di trarre conclusioni ottimistiche in merito alla possibilità di realizzare operazioni CCS su larga scala nel bacino di Ravenna, non solo per la limitata esperienza tecnica nel settore in Italia, ma soprattutto perché è difficile immaginare un supporto finanziario pubblico come quello in vigore negli Stati Uniti da oltre due decenni.

I casi citati ad esempio: Sleipner e Snøvit (Mare del Nord, Norvegia)

Spesso nel dibattito sul CCS si citano gli impianti Sleipner e Snøvit in Norvegia, che sono tra i pochi, se non gli unici, a poter vantare risultati abbastanza in linea rispetto alle aspettative di progetto [28]. Si tratta di impianti dove il CO₂ viene separato da gas naturale estratto in giacimenti offshore del Mare del Nord. È opportuno però sottolineare che anche questi due impianti hanno dovuto affrontare, nel corso del tempo, diversi e talvolta severi imprevisti tecnici di origine geologica (migrazione di CO₂ nel sottosuolo in modi imprevisti [28], indizi di sismicità indotta [24]), che hanno richiesto sostanziali impegni aggiuntivi dal punto di vista tecnico e finanziario. Il punto chiave della buona riuscita dei progetti è che la Norvegia si è dotata da oltre 20 anni di una legislazione avanzatissima in termini di sicurezza, controlli e tassazione del carbonio. Tutto questo, da un lato garantisce la sostenibilità economica delle operazioni CCS nel lungo termine, dall'altro certifica un impegno tecnico di altissimo livello, che sarà mantenuto per decenni, una volta che i giacimenti di stoccaggio saranno saturati. In pratica, questi due pozzi (di due soli pozzi si tratta) sono probabilmente i più studiati al mondo.

In sostanza, Sleipner e Snøvit non possono rappresentare una generale garanzia di affidabilità o successo a della tecnologia CCS a livello globale. Piuttosto, essi dimostrano che ogni progetto presenta sfide tecniche uniche che richiedono risposte immediate e all'altezza, anche quando il monitoraggio delle operazioni è al massimo livello della tecnologia disponibile, come in questo caso. Oggi vi sono progetti sulla carta 10-20 volte più grandi in termini di capacità rispetto a Sleipner e Snøvit e che prevedono molti pozzi attigui. Spesso questi progetti riguardano Paesi dove è davvero difficile immaginare livelli di monitoraggio e finanziamento pari a quelli messo in campo dalla Norvegia. Stiamo parlando di un caso sostanzialmente unico al mondo di una nazione dotata al contempo di vaste risorse economiche e tecniche, oltre che di una legislazione ambientale severissima e molto avanzata, con rigorosi sistemi di controllo.

Insomma, estrapolare Sleipner e Snøvit al resto del mondo è un'operazione piuttosto azzardata. I fallimenti di decine di progetti CCS in tutto il mondo sono lì a testimoniare.

L'altro approccio per la eliminazione del CO₂: Carbon Dioxide Removal (CDR)

In questo breve documento, posso solo accennare al fatto che il CCS è uno degli approcci "tecnologici" finalizzati alla riduzione dell'impatto del CO₂ sulla stabilità climatica. L'altro è quello che

mira a smaltire il CO₂ fossile già accumulato in atmosfera con una serie di tecnologie cosiddette di rimozione (CDR, *Carbon Dioxide Removal*), che sono in una fase di sviluppo ancora più arretrato rispetto al CCS [29]. Oggi le tecnologie CDR sono a un livello letteralmente pionieristico e la loro possibilità di successo a livello industriale è, al più, molto lontana nel tempo.

Semplificando, potremmo dire che il CCS è un'approccio *preventivo*, che mira cioè ad impedire il rilascio di CO₂ appena prodotta, estraendola da flussi ad elevata concentrazione. Il CDR è invece un approccio *a posteriori*, che mira cioè ad estrarre il CO₂ già emesso e quindi presente nell'aria a bassissime concentrazioni: 420 ppm, come illustrato in precedenza. Tra le tecniche CDR possiamo citare la DAC (*Direct Air Capture*), la fertilizzazione degli oceani, la mineralizzazione del CO₂ sui terreni e nei mari.

Considerazioni conclusive

La cattura e lo stoccaggio del CO₂ (CCS) non costituiscono un'opzione significativa per la decarbonizzazione del sistema industriale italiano dal punto di vista tecnico, economico e di responsabilità verso le future generazioni.

Dopo oltre 50 anni e l'investimento di decine di miliardi a livello globale – spesso di provenienza pubblica – il CCS risulta un sostanziale fallimento industriale: oggi la quota di CO₂ sequestrata in depositi geologici è pari a circa 45 milioni di tonnellate l'anno [30], corrispondenti allo 0,12% delle emissioni annuali globali [31]. Senza contare che la maggior parte di questo CO₂ è iniettato nel sottosuolo per stimolare la produzione di petrolio in giacimenti prossimi all'esaurimento (*enhanced oil recovery*, EOR), petrolio che verrà poi bruciato generando a sua volta CO₂ che non verrà mai catturato. Un numero elevato di progetti CCS sono stati abbandonati in tutto il mondo per insostenibilità economica o problemi tecnici [25]. Tra questi, è utile ricordare per l'Italia il progetto di stoccaggio di CO₂ a Cortemaggiore iniziato nel 2011, su cui è sceso il silenzio e appare difficile trovare informazioni sull'esito – presumibilmente fallimentare – delle operazioni [32].

La realizzazione di un impianto CCS in una zona sismicamente attiva come quella al largo di Ravenna richiede approfonditi studi geologici che possano certificare in modo inequivocabile l'idoneità dei siti, anche nel lungo termine, scongiurando la possibilità di sismicità innescata o indotta o di rilascio in atmosfera. Trattandosi di depositi geologici permanenti a tempo indefinito, occorre inoltre stabilire, in maniera chiara, la gestione della catena di responsabilità per il monitoraggio della loro tenuta e la relativa certificazione nel corso del tempo – stiamo parlando della scala dei secoli – ai fini di giustizia intergenerazionale.

Va inoltre sottolineato che il sequestro del CO₂ non mitigherebbe i problemi di inquinamento dell'aria delle zone interessate, dal momento che le combustioni dei siti industriali passibili di CCS procederebbero come prima. In sostanza, il CCS è completamente orfano di uno dei vantaggi aggiuntivi del processo di decarbonizzazione: la lotta all'inquinamento. Per sottolineare la non trascurabilità della questione, è utile ricordare che ogni anno in Italia vi sono oltre 60 mila morti premature per inquinamento atmosferico [33].

Al di là delle questioni economiche e tecniche, largamente a sfavore del CCS, un progetto in Adriatico settentrionale risulta di fatto irrilevante in termini abbattimento delle emissioni di CO₂ a livello

nazionale. Prendendo per valida la capacità del sito di stoccaggio di Ravenna dichiarata dai proponenti (“fino a 16 Mton/anno” dopo il 2030, per una capacità complessiva di “oltre 500 Mton” [26])*, stiamo parlando di un impianto che, ai livelli di emissione di CO₂ nazionali italiani attuali (337 Mton/anno [34]), sarebbe in grado di sequestrare meno del 5% del CO₂ immesso in atmosfera nel nostro Paese. Per farsi un’idea se questa percentuale, ancorché modesta, possa essere plausibile si consideri quanto segue.

- a) Un sequestro di 16Mton/anno a Ravenna implicherebbe il raggiungimento, in meno di un decennio, di una quota pari al 40% del CO₂ oggi stoccato annualmente nel sottosuolo *in tutto il mondo*, dopo oltre 50 anni di sperimentazioni e attività.
- b) 16 Mton/anno è pari al 73% all’interno ammontare di CO₂ stoccato nel corso di 26 anni (22 Mton, 1996-2022) negli impianti norvegesi di Sleipner e Snøvit [28], oggi tra i maggiori al mondo e certamente tra i più collaudati, che utilizzano pozzi di gas esauriti, come proposto a Ravenna.

Allo stato attuale di sviluppo del CCS, possiamo definire quantomeno ottimistico il quadro delineato dai proponenti, in assenza di significativi sviluppi tecnologici, che la comunità scientifica internazionale non vede all’orizzonte.

Per avere un impatto significativo nella lotta ai cambiamenti climatici, la capacità di sequestro del CO₂ tramite CCS a livello globale dovrebbe attestarsi mediamente attorno ai 12 miliardi di tonnellate l’anno [35], un livello 260 volte superiore all’attuale. Non vi è un solo indicatore economico o tecnologico che suggerisca che si tratti di un obiettivo ragionevolmente raggiungibile nei tempi necessari per incidere nella lotta al cambiamento climatico. L’attuale fase di entusiasmo per il CCS che si registra a livello globale [36], si configura più come una raccolta di generosi fondi pubblici e incentivi fiscali da parte di aziende private, che come un atto di fiducia verso una tecnologia che da decenni continua a offrire risultati nulli nella lotta ai cambiamenti climatici, a costi proibitivi.

Chi intende investire in sperimentazioni sul CCS deve poterlo fare ma, se ci crede davvero, si deve assumere il rischio di impresa, senza caricare i costi sulla collettività. Vista la drammatica urgenza della crisi climatica, i (non illimitati) fondi pubblici per la decarbonizzazione devono essere concentrati per accelerare vigorosamente sulle soluzioni già disponibili, certe e consolidate sul mercato: produzione e accumulo da fonti rinnovabili, efficienza ed elettrificazione dei consumi finali, nuove tecnologie [2,8,9].

La scienza e la tecnologia, oltre al buon senso, ci dicono che la strategia più concreta per abbattere l’accumulo di CO₂ in atmosfera è ridurre le emissioni all’origine decarbonizzando i processi industriali e gli usi energetici finali, e non continuare ad emettere nella speranza che opzioni tecnologiche – complesse, costose e controverse, quanto improbabili come il CCS – eliminino l’enorme problema che abbiamo generato.

Il riscaldamento globale correlato principalmente alle emissioni di CO₂ è una minaccia per la sopravvivenza della civiltà moderna. Il tempo è scaduto: non abbiamo margini per investire tempo

* L’autore non è stato in grado di reperire la base scientifica di questa stima, sulla base dei documenti pubblicamente disponibili, ad oggi.

e risorse pubbliche in una soluzione come il CCS che, dopo oltre 50 anni di costosi quanto clamorosi insuccessi, non ha mostrato la capacità di poter andare oltre il suo perenne status di curiosità scientifica. O di utile strumento nelle mani di grandi aziende energetiche impegnate a ritardare il più possibile un cambiamento strutturale delle propria attività, che non è più rinviabile [37].

Bologna, 30 Dicembre 2023

Nicola Armaroli



Bibliografia

- [1] The Energy Institute, Statistical Review of World Energy, **2023**, <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- [2] N. Armaroli. *Emergenza Energia. Non Abbiamo più Tempo*. Edizioni Dedalo, Bari, **2020**.
- [3] NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), Trends in Atmospheric Carbon Dioxide, **2023**, <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
- [4] NOAA, Carbon dioxide levels are now higher than at anytime in the past 3.6 million years, **2020**, <https://research.noaa.gov/2021/04/07/despite-pandemic-shutdowns-carbon-dioxide-and-methane-surged-in-2020/>
- [5] T. Volk. *CO₂ rising. The World's Greatest Environmental Challenge*. MIT Press, Cambridge, MA, **2008**.
- [6] N. Armaroli, V. Balzani, The Legacy of Fossil Fuels, *Chem-Asian J*, **2011**, *6*, 768-784.
- [7] J. Cos, F. Doblas-Reyes, M. Jury, et al., The Mediterranean climate change hotspot in the CMIP5 and CMIP6 projections, *Earth Syst. Dynam.*, **2022**, *13*, 321-340, <https://esd.copernicus.org/articles/13/321/2022/>.
- [8] N. Armaroli, V. Balzani. *Energia per l'Astronave Terra. Terza Edizione, l'Era delle Rinnovabili*. Zanichelli Editore, Bologna, **2017**.
- [9] N. Armaroli, V. Balzani. *Energy for a Sustainable World. From the Oil Age to a Sun-Powered Future*. Wiley-VCH, Weinheim, Germany, **2011**.
- [10] International Energy Agency, The world has vast capacity to store CO₂: Net zero means we'll need it, **2021**, <https://www.iea.org/commentaries/the-world-has-vast-capacity-to-store-co2-net-zero-means-we-ll-need-it>
- [11] N. Armaroli, V. Balzani, Towards an electricity-powered world, *Energy Environ. Sci.*, **2011**, *4*, 3193-3222.
- [12] B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, et al., eds. *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge University Press, New York, **2005**.
- [13] Reuters, Navigator CO₂ Ventures cancels carbon-capture pipeline project in US Midwest, **2023**, <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/navigator-co2-ventures-cancels-carbon-capture-pipeline-project-us-midwest-2023-10-20/>
- [14] T. Wilberforce, A. G. Olabi, E. T. Sayed, et al., Progress in carbon capture technologies, *Sci. Total Environ.*, **2021**, *761*, 143203.
- [15] C. A. Bettenhausen, Carbon Capture's Steep Climb, *Chem. Eng. News*, **2021**, *99* (26), 28-35.
- [16] E. Barbera, A. Mio, A. Massi Pavan, et al., Fuelling power plants by natural gas: An analysis of energy efficiency, economical aspects and environmental footprint based on detailed process simulation of the whole carbon capture and storage system, *Energy Convers. Manag.*, **2022**, *252*, 115072, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890421012486>.
- [17] M. Bui, C. S. Adjiman, A. Bardow, et al., Carbon capture and storage (CCS): the way forward, *Energy Environ. Sci.*, **2018**, *11*, 1062 - 1176.
- [18] M. Erans, E. S. Sanz-Pérez, D. P. Hanak, et al., Direct air capture: process technology, techno-economic and socio-political challenges, *Energy Environ. Sci.*, **2022**, *15*, 1360-1405.
- [19] E. Smith, J. Morris, H. Khesghi, et al., The cost of CO₂ transport and storage in global integrated assessment modeling, *Int. J. Greenh. Gas Control.*, **2021**, *109*, 103367, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583621001195>.
- [20] Clean Air Task Force, Mapping the cost of carbon capture and storage in Europe, **2023**, <https://www.catf.us/2023/02/mapping-cost-carbon-capture-storage-europe/>

- [21] EU carbon permit prices, <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon>
- [22] E. J. Stone, J. A. Lowe, K. P. Shine, The impact of carbon capture and storage on climate, *Energy Environ. Sci.*, **2009**, *2*, 81-91.
- [23] J. Alcalde, S. Flude, M. Wilkinson, et al., Estimating geological CO₂ storage security to deliver on climate mitigation, *Nat. Commun.*, **2018**, *9*, 2201.
- [24] G. R. Foulger, M. P. Wilson, J. G. Gluyas, et al., Global review of human-induced earthquakes, *Earth Sci. Rev.*, **2018**, *178*, 438-514.
- [25] Institute for Energy Economics and Financial Analysis, The carbon capture crux: lessons learned, **2022**, <https://ieefa.org/resources/carbon-capture-crux-lessons-learned>
- [26] Eni: il progetto CCS di Ravenna entra nella lista europea dei Progetti di Interesse Comune, **2023**, <https://www.eni.com/assets/documents/press-release/migrated/2023-it/11/cs-eni-callisto.pdf>
- [27] Reuters, Callisto carbon storage development eligible for EU funding support, **2023**, <https://www.offshore-mag.com/energy-transition/article/14302029/callisto-carbon-storage-development-eligible-for-eu-funding-support>
- [28] Institute for Energy Economics and Financial Analysis, Norway's Sleipner and Snøhvit CCS: Industry models or cautionary tales?, **2023**, <https://ieefa.org/resources/norways-sleipner-and-snohvit-ccs-industry-models-or-cautionary-tales>
- [29] S. M. Smith, O. Geden, G. Nemet, et al. *The State of Carbon Dioxide Removal, 1st Edition*. stateofcdr.org, Oxford, **2023**.
- [30] International Energy Agency, Carbon Capture, Utilisation and Storage, **2023**, <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage>
- [31] International Energy Agency, CO₂ Emissions in 2022, **2023**, <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
- [32] ECCO and WWF, Ambiguità, rischi e illusioni della CCS-CCUS, **2021**, <https://www.wwf.it/cosa-facciamo/pubblicazioni/ambiguita-rischi-e-illusioni-della-carbon-capture/>
- [33] European Environment Agency, Health impacts of air pollution in Europe, 2022, **2023**, <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/health-impacts-of-air-pollution>
- [34] ISPRA, Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2021 - National Inventory Report 2023, **2023**, <https://www.isprambiente.gov.it/en/publications/reports/italian-greenhouse-gas-inventory-1990-2021-national-inventory-report-2023>
- [35] R. Conniff, The last resort, *Sci. Am.*, **2019**, *320(1)*, 52-59.
- [36] Global CCS Institute, Global Status of CCS 2022, **2022**, https://status22.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2022/11/Global-Status-of-CCS-2022_Download.pdf
- [37] N. Armaroli, Il tramonto degli idrocarburi, *Sapere*, **2021**, *88 (4)*, 5, <https://www.saperescienza.it/rubriche/l-editoriale/il-tramonto-degli-idrocarburi-15-7-2021/>.