



DIPARTIMENTO DI IMPRESA E MANAGEMENT

Corso di laurea in Economia e Management

Cattedra di Economia aziendale

*Scenario di adozione della tecnologia “Direct Air Capture”
per l’impresa sostenibile*

RELATORE

Prof. Giovanni Fiori

CANDIDATO

Riccardo Roberto

Matricola 279651

Anno Accademico 2024/2025

Ringraziamenti

Ai miei genitori, che con il loro amore incondizionato, i loro sacrifici e il loro costante sostegno hanno accompagnato ogni passo del mio percorso universitario. Senza la loro fiducia e i loro incoraggiamenti nei momenti più difficili, questo obiettivo non sarebbe stato raggiungibile.

Ai miei nonni, che con la loro saggezza e i loro preziosi consigli hanno saputo ispirarmi e guidarmi. La loro presenza nella mia vita è stata una fonte costante di forza e motivazione, e il loro orgoglio per i miei successi è stato uno dei motori più potenti del mio impegno.

Ai miei amici, tutte persone care senza le quali non sarei chi sono oggi. Grazie a tutti voi che mi avete supportato in questi anni ed aiutato quando ne ho avuto bisogno.

Sommario

Abstract.....	4
Introduzione.....	5
Capitolo 1 - Inquadramento dell'approccio Direct Air Capture (DAC) nel contesto della gestione d'impresa sostenibile	7
1.1. L'impresa e lo sviluppo sostenibile	7
1.2. Vincoli normativi e standard europei relativi all'ESG Reporting	9
1.3. Il punto di vista dell'industria finanziaria	12
1.4. Quale ruolo per il Direct Air Capture (DAC)	14
Capitolo 2 - L'impresa ed il carbon accounting	17
2.1. Il perché della decarbonizzazione e dei mercati del carbonio.....	17
2.2. Il punto di vista dell'industria assicurativa.....	19
2.3. Carbon accounting nella gestione d'impresa sostenibile.....	20
2.4. Il carbon accounting (e l'ESG Reporting) nei sistemi informativi dell'impresa sostenibile	21
2.5. Il caso SAP ed il Green Ledger	24
Capitolo 3 - Stato dell'arte della tecnologia Direct Air Capture e del suo impiego.....	26
3.1. Distinzione tra CCUS e DAC	26
3.2. Tecniche di rimozione CO ₂ dall'aria per il DAC.....	26
3.3. Operatori economici abilitanti al DAC	27
Capitolo 4 – Considerazioni sui costi di adozione della tecnologia Direct Air Capture (DAC)	30
4.1. Considerazioni sui costi dell'approccio DAC	30
Capitolo 5 - Considerazioni e prospettive per l'adozione della DAC da parte dell'impresa sostenibile	33
5.1. L'impresa di fronte alla scelta di adozione DAC (ad oggi)	33
5.2. Il ruolo del Regolatore	34
5.3. Approccio pool (o cluster)	35
5.4. Crediti di carbonio per l'impresa relativi al DAC (e non).....	36
Conclusioni.....	39
Bibliografia	43

Abstract

Relatore: Prof. Giovanni Fiori

Questo lavoro inquadra le opportunità che la tecnologia D.A.C. offre all'impresa nel contesto ESG in cui essa si trova oggi ad operare e di cui si sintetizzano i lineamenti; si affrontano quindi aspetti di carbon accounting per poi passare ad una breve disamina dello stato dell'arte di tale tecnologia di abbattimento della CO₂ prodotta, commentando i costi relativi all'adozione di tale tecnologia. Vengono infine delineate le prospettive di adozione di tale approccio elencando alcune considerazioni a conclusione del lavoro.

Introduzione

Il lavoro è articolato su cinque capitoli seguiti da una sezione finale di Conclusioni.

Nel primo capitolo si riepilogano i vincoli ESG a cui è sottoposta l'impresa oggi per potersi definire sostenibile; tra essi spicca la rendicontazione non finanziaria, o ESG reporting, ormai regolato da stringenti normative che, via via, vincoleranno anche aziende di piccole e medie dimensioni. Tale reporting è, ad esempio, da tempo usato dall'industria finanziaria per eseguire scoring delle grandi aziende quotate in borsa. Proprio dall'azione dell'industria finanziaria sugli investimenti in temi ambientali si nota l'interesse per la tecnologia D.A.C. (Direct Air Capture), considerata la sua azione di cattura della CO2 atmosferica.

Il secondo capitolo è dedicato all'approfondimento del perché la decarbonizzazione sia un tema centrale a livello sistematico: la stessa industria assicurativa, ad esempio, considera seriamente e quantitativamente il cambiamento climatico, ritenuto strettamente correlato all'aumento della CO2 atmosferica. Poiché le emissioni di CO2 imputabili ad una azienda sono non solo quelle dirette (Scope 1), relative al proprio processo produttivo, ma anche quelle indirette (Scope 2 e 3) qualsiasi azienda, in pratica, si ritrova implicata nella gestione del problema della CO2. Si comprende dunque come la contabilità del carbonio (carbon accounting) stia entrando nella pratica della gestione aziendale e si annota l'esistenza di veri e propri mercati del carbonio (che già esprimono un prezzo della tonnellata di CO2). Appare interessante riportare che nuovi strumenti ad hoc vengano concepiti per i sistemi informativi aziendali a supporto del tema ESG e del carbon accounting in particolare; in tal senso viene riportato il caso dell'azienda di software SAP, leader nella produzione e vendita di software di gestione aziendale.

Il terzo capitolo propone qualche dettaglio aggiuntivo sulla tecnologia DAC spiegando l'importante distinzione con la tecnologia CCUS (Carbon Capture Utilisation and Storage): mentre la DAC opera a prescindere dal processo produttivo della azienda la CCUS opera direttamente sui fumi di processo industriale (come per il caso dell'acciaio e del cemento). La DAC poi opera in svantaggio rispetto alla CCUS agendo su un gas a bassa concentrazione di CO2 (l'atmosfera). Soprattutto il capitolo espone l'osservazione di come alcuni operatori specializzati nella tecnologia emergente DAC abbiano già messo in opera alcuni grandi impianti con caratteristiche che vanno senz'altro annotate: è importante infatti notare che tali impianti lavorano a ridosso di grandi centrali elettriche da energia rinnovabile e su siti molto specifici ove sia possibile l'immagazzinamento perpetuo della CO2 catturata. Anche

importante osservare che grandi aziende (es. Swiss RE) abbiano stipulato contratti di acquisto dei crediti carbonio da DAC da tali operatori specializzati.

Il quarto capitolo espone alcune considerazioni sui costi legati all'approccio DAC. In particolare si constata che gli studi sul tema mostrano una grande variabilità di valutazione del costo per tonnellata di CO₂ estratta, comunque con valori lontani dal prezzo di vendita della tonnellata di CO₂ determinato sui mercati del carbonio. E' interessante scoprire inoltre che l'approccio CCUS converge su costi più bassi e maggiormente predicibili. In definitiva poi i costi CAPEX ed OPEX del DAC sono molto rilevanti senza contare che un investimento su un impianto DAC deve includere la lunga selezione di un sito adatto allo scopo.

Il quinto capitolo inizia con l'esporre alcune note riepilogative al fine di simulare la valutazione dell'opzione DAC da parte dell'impresa sostenibile. Alcune tipologie di aziende di grandi dimensioni, come acciaierie e cementifici, devono anzitutto privilegiare l'approccio CCUS; per le altre aziende l'opzione di acquisto di crediti di carbonio (correlati al DAC e non) appare percorribile ed interessante. In tal senso il capitolo propone dunque un approfondimento sui mercati del carbonio distinguendo quelli regolati da quelli volontari e rilevando l'importanza della certificazione dei crediti di carbonio emessi. Altro ambito di approfondimento proposto riguarda l'approccio pool nell'esercizio dei sistemi DAC e CCUS: la condivisione di queste risorse su siti di funzionamento in comune appare come una interessante economia di scala. Il capitolo infine rileva l'importanza delle azioni delle autorità regolatorie nell'indirizzare le scelte di tutti gli operatori.

La sezione finale di Conclusioni espone come, allo stato attuale delle cose, l'impresa sostenibile possa perseguire l'obiettivo di decarbonizzazione mediante la DAC: ad oggi prevalentemente mediante l'acquisizione di crediti di carbonio, molto più raramente avvalendosene nel contesto di speciali distretti industriali (pool). Per il futuro più che l'innovazione tecnologica l'azione delle autorità regolatorie appare determinante per la diffusione e adozione dell'approccio DAC.

Capitolo 1 - Inquadramento dell'approccio Direct Air Capture (DAC) nel contesto della gestione d'impresa sostenibile

1.1. L'impresa e lo sviluppo sostenibile

Negli ultimi anni si è imposta vieppiù una vera e propria disciplina di responsabilità sociale d'impresa. Tale responsabilità è correlata al concetto di sviluppo *sostenibile* basato su tre dimensioni:

1. Ambientale: conservazione di risorse, riduzione delle emissioni di carbonio, promozione delle energie rinnovabili.
2. Sociale: assicurare pratiche di lavoro etiche, promuovere l'uguaglianza sociale, di genere, la salute, la sicurezza.
3. Economica: trovare un equilibrio tra «profitto» e responsabilità sociale e ambientale, attraverso investimenti in tecnologie «green» e innovazione.

Il concetto di sviluppo sostenibile è diventato via via così importante che tutti gli Stati Membri delle Nazioni Unite hanno sottoscritto nel 2015 la cosiddetta Agenda 2030 a sostegno di un futuro di prosperità e pace mondiale.

Figura 1 - *Matrice dello Sviluppo Sostenibile*



Tale Agenda fa esplicito riferimento al perseguitamento di 17 obiettivi guida di sviluppo sostenibile (Sustainable Development Goals o SDG).

Figura 2 - *Obiettivi di sviluppo sostenibile (United Nations development goals)*

SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS



L'impresa si trova quindi oggi ad operare in un contesto in cui la propria “reputazione” di *sostenibilità* deve essere attentamente difesa e controllata avendo come riferimento i propri clienti, gli investitori, le autorità di regolamentazione ed i propri dipendenti nonché la pubblica opinione. Tale “reputazione” viene oggi esplicitata da punteggi ESG (acronimo per Environmental, Social and Governance) assegnati all'impresa da enti terzi (Morningstar Sustainalytics, s.d.). Più in dettaglio:

1. E - Environmental: il focus è su emissioni di gas serra, consumo di energia, utilizzo di acqua, produzione di rifiuti, inquinamento.
2. S - Social: il focus è su iniziative di diversità e inclusione, pratiche lavorative, salute e sicurezza dei dipendenti, politiche sui diritti umani, programmi di coinvolgimento della comunità e attività filantropiche.
3. G - Governance: il focus è sulle strutture, politiche e pratiche che governano il modo in cui un'azienda viene gestita e controllata. Ciò include la diversità del consiglio di amministrazione, la remunerazione dei dirigenti, i diritti degli azionisti, la condotta aziendale etica, le misure anticorruzione, la gestione del rischio e la conformità ai requisiti normativi.

Da questo punto di vista si è quindi consolidata la pratica di *pubblicare* la performance dell'impresa nei riguardi del suo impatto ambientale, sociale e del suo stile di governance (appunto ESG). Tale pubblicazione si concretizza nel Bilancio di Sostenibilità ad integrazione dell'usuale Bilancio Finanziario dell'impresa. In altri termini si è affermata una rendicontazione non finanziaria (ESG Reporting) con obblighi normativi e di standard

sempre più stringenti. Il paragrafo a seguire propone i recenti riferimenti normativi e di standard per l'ESG Reporting.

1.2 Vincoli normativi e standard europei relativi all'ESG Reporting

Il bisogno di rendere trasparente e oggettivo il profilo ESG dell'impresa ha indotto l'Unione Europea ad emettere specifici atti normativi. La CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive) è infatti una normativa dell'Unione Europea (UE), in vigore dal 5 gennaio 2023, che impone alle imprese dell'UE - comprese le filiali UE qualificate di società non UE - di riferire sull'impatto ambientale e sociale delle loro attività e sull'impatto aziendale dei loro sforzi e delle loro iniziative ambientali, sociali e di governance (ESG). L'obiettivo della CSRD è quello di fornire trasparenza per aiutare investitori, analisti, consumatori e altri stakeholder a valutare meglio le prestazioni di sostenibilità delle aziende dell'UE, nonché gli impatti e i rischi aziendali correlati. La conformità alla CSRD prevede una progressiva adozione tra il 2024 e il 2029 basata principalmente sulle dimensioni dell'azienda; sono interessate dunque:

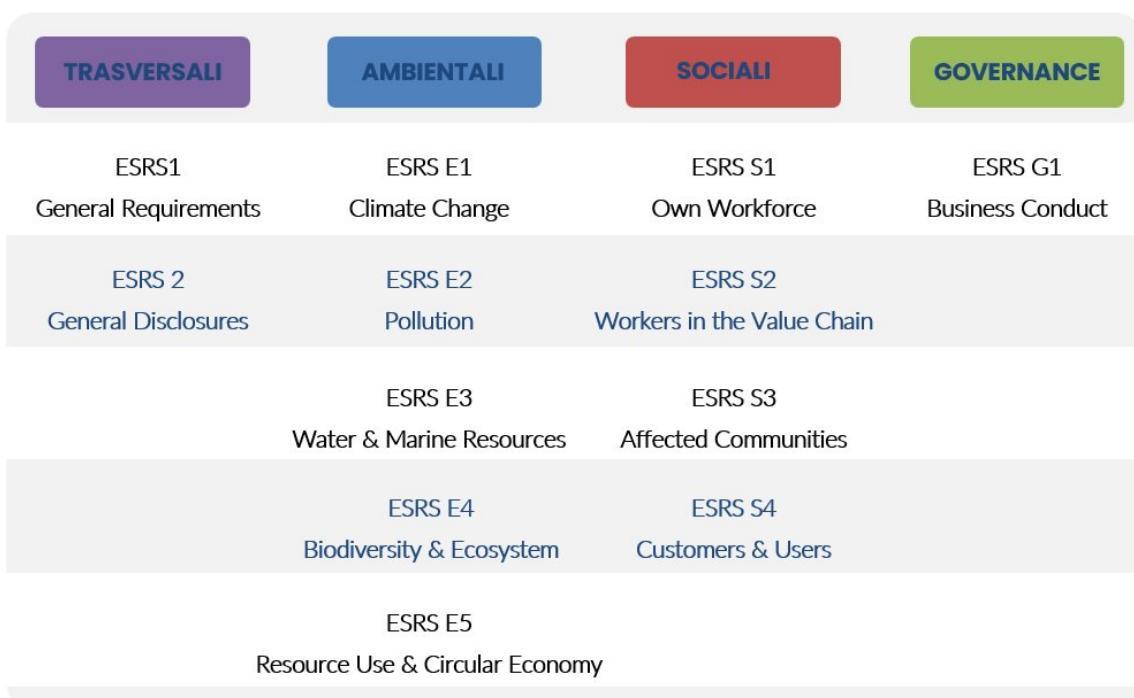
- le grandi imprese già soggette alla Direttiva 2014/95 (NFRD) sulla rendicontazione non finanziaria, a partire dal 1° gennaio 2024, con pubblicazione del primo report nel 2025
- le restanti grandi imprese attualmente non interessate dalla rendicontazione non finanziaria, a partire dal 1° gennaio 2025, con pubblicazione del primo report nel 2026
- le PMI e le altre imprese quotate sui mercati regolamentati dall'UE, ad eccezione delle microimprese quotate, a partire dal 1° gennaio 2026, con possibile deroga fino al 2028
- le società extra-UE quotate sui mercati regolamentati dell'UE
- le filiali UE di società non UE, a partire dal 1° gennaio 2028

Va comunque citato il recentissimo decreto Omnibus (Gazzetta Ufficiale, 2024) che in effetti mitiga/proroga le indicazioni stringenti sopra citate. Nel 2022, l'European Financial Reporting Advisory Group (EFRAG) ha emanato la prima serie di European Sustainability Reporting Standards (ESRS). Gli ESRS forniscono il quadro di riferimento per le metriche che le aziende devono comunicare e per le modalità di comunicazione, al fine di soddisfare gli obblighi di divulgazione della CSRD. Sono stati dunque concepiti 12 ESRS, che descrivono dettagliatamente le informazioni e le metriche relative alle questioni di sostenibilità in quattro (4) categorie:

- Trasversale: principi generali e informazioni generali.
- Ambientale: cambiamenti climatici, inquinamento, risorse idriche e marine, biodiversità ed ecosistemi, utilizzo delle risorse ed economia circolare.
- Sociale: forza lavoro, lavoratori nella catena del valore, comunità interessate, consumatori e utenti finali.
- Governo: condotta aziendale.

Lo schema a seguire sintetizza la distribuzione dei 12 dodici standard rispetto alle 4 categorie menzionate:

Figura 3 - Suddivisione degli standard ESRS



L'ESRS 1 (European Sustainability Reporting Standard 1) è particolarmente rilevante all'interno del framework degli European Sustainability Reporting Standards. Questo standard stabilisce i principi generali per la rendicontazione di sostenibilità secondo la normativa europea. Di seguito le caratteristiche principali dell'ESRS 1: L'ESRS 1 è intitolato "General Requirements" (Requisiti Generali) e funge da base per tutti gli altri standard ESRS. Stabilisce:

1. I principi fondamentali per la preparazione delle informazioni sulla sostenibilità, inclusi:

- a. Rilevanza (materiality)
- b. Rappresentazione fedele
- c. Comparabilità
- d. Verificabilità
- e. Comprensibilità

2. Le regole per la valutazione della materialità, introducendo il concetto di "doppia materialità" che include:

- a. Materialità d'impatto: come le attività dell'azienda impattano sulle persone e sull'ambiente
- b. Materialità finanziaria: come i temi di sostenibilità influenzano la performance finanziaria dell'azienda

3. La struttura delle divulgazioni, che comprende:

- a. Informazioni generali sull'azienda e la sua strategia di sostenibilità
- b. Valutazione della materialità e ambito di rendicontazione
- c. Governance della sostenibilità
- d. Politiche, obiettivi, piani d'azione e risorse
- e. Metriche e obiettivi

4. Requisiti per la qualità dell'informazione e la necessità di collegamenti tra informazioni finanziarie e di sostenibilità.

5. Linee guida per la preparazione del report di sostenibilità, incluse le regole per la presentazione delle informazioni, l'uso di stime e la gestione dell'incertezza.

L'ESRS 1 è dunque particolarmente importante perché definisce l'approccio metodologico che le aziende devono seguire quando preparano le loro divulgazioni di sostenibilità in conformità con la CSRD, fornendo il quadro concettuale per l'applicazione di tutti gli altri standard tematici ESRS.

1.3 Il punto di vista dell'industria finanziaria

L'industria finanziaria ha da tempo inquadrato il tema dello sviluppo sostenibile incorporandolo nell'approccio di valutazione delle aziende. I punteggi ESG sono dunque entrati nella pratica corrente di valutazione del valore aziendale e l'industria finanziaria si ingegna costantemente ad identificare tecnologie innovative per il miglioramento dell'impatto ambientale; più precisamente si ingegna sia ad identificare aziende che direttamente contribuiscono all'innovazione nel campo della sostenibilità sia aziende che se ne giovano adottandole. In tal senso vengono qui proposti due esempi specifici:

- L'ente terzo valutatore di fondi di investimento MorningStar e la sua metrica (Morningstar, 2016) sulla sostenibilità;
- Come si sta posizionando un grande fondo di private equity quale Apollo (Apollo, s.d.) su tematiche di investimento legate a tecnologie innovative sulla sostenibilità;

MorningStar può essere considerato uno dei principali enti valutatori dei fondi di investimento prodotti dall'industria finanziaria. Il rating del fondo preso in esame riflette varie dimensioni di analisi quali ad esempio persone del team, metodologia applicata ovvero costi del fondo. A tale rating ne è stato associato un altro legato appunto alla sostenibilità. Poichè un fondo di investimento detiene varie aziende in portafoglio lo scoring deve fare riferimento all'insieme dei punteggi ESG delle singole aziende componenti; viene anche preso in considerazione il tasso di controversie¹ in cui le aziende incappano durante la loro vita.

¹ Viene proposto a titolo di esempio il caso della azienda Bayer: dopo aver acquisito l'azienda nordamericana Monsanto è incappata in varie contese legali negli Stati Uniti per la commercializzazione del prodotto RoundUp (controllo crescita piante per scopo agricolo e non). Le contese sono nate per la pretesa cancerogenicità del glicosofato (sostanza base del RoundUp).

Step 1**Step 2****Portfolio Sustainability Score =**

Company ESG Scores – Controversy Deduction

Portfolio Sustainability Rating =

Portfolio Sustainability Score relative to Morningstar Category, sorted into five-normally distributed groups:



Distribution	Score	Descriptive Rank	Rating Icon
Highest 10%	5	High	
Next 22.5%	4	Above Average	
Next 35%	3	Average	
Next 22.5%	2	Below Average	
Lowest 10%	1	Low	

Apollo è un leader nella proposizione e gestione di asset alternativi; esprime un forte focus sulla transizione energetica ed ha, ad esempio, recentemente lanciato l’Apollo Clean Transition Equity ELTIF ovvero un fondo centrato sulle tecnologie innovative in campo energetico ed ambientale. Nelle sue pubblicazioni a corredo del lancio del fondo si scopre ad esempio che la tecnologia Direct Air Capture (DAC) è annoverata tra le opportunità di investimento.

Più in dettaglio tale fondo esprime un focus su quattro temi di investimento:

- Passaggio a produzione di energia mediante fonti rinnovabili
- Elettrificazione dei trasporti
- Cattura/abbattimento del carbonio nei settori ad alte emissioni
- Economia circolare

L’approccio DAC è quindi censito nella classe degli investimenti relativi all’abbattimento del carbonio con una rilevante proiezione in crescita al 2030.

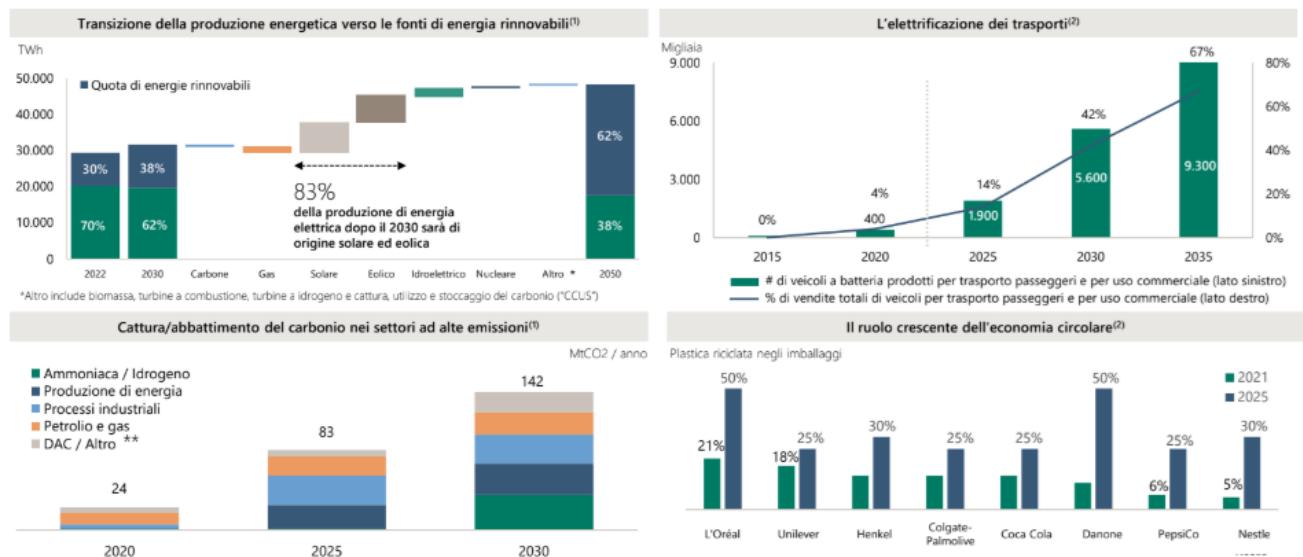
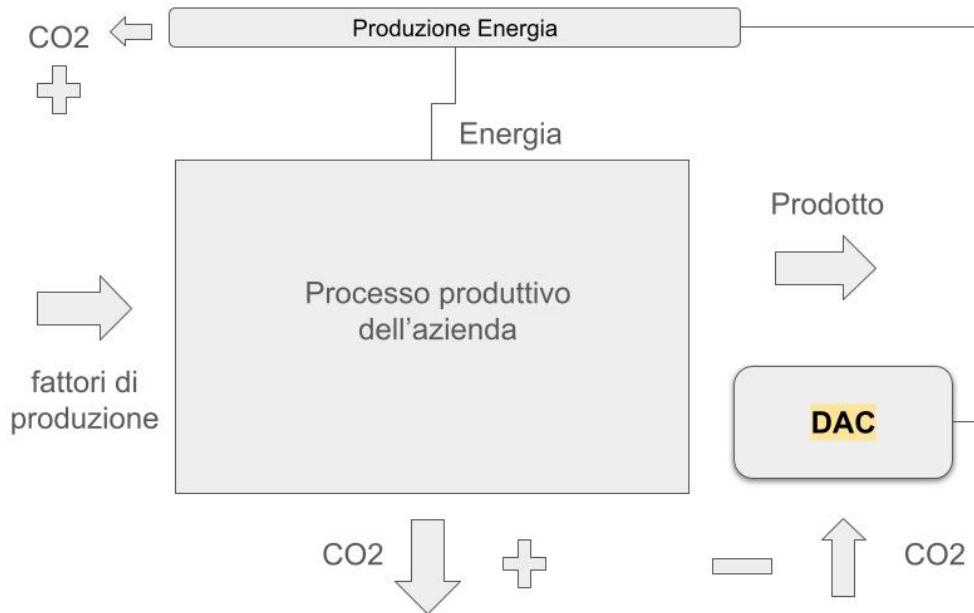


Figura 4 – quattro ambiti di investimento del fondo Apollo Clean Transition Equity

1.4 Quale ruolo per il Direct Air Capture (DAC)

Dunque proprio l'industria finanziaria evidenzia la DAC come soluzione innovativa in ambito ambientale. Con riferimento alla E-Environmental del punteggio ESG risulta del massimo interesse l'abbattimento dei gas serra tra cui primeggia l'anidride carbonica (CO₂). Viene proposto il semplice schema della figura a seguire per comprendere dunque la logica di adozione del DAC; il processo produttivo di una azienda crea un prodotto a partire da altri prodotti e servizi di input consumando energia. Nel farlo può emettere CO₂.



L'idea del DAC è quella di dotarsi di uno specifico e speciale macchinario, a valle del processo produttivo, capace di catturare aria atmosferica per depurarla da CO₂ (con relativo stoccaggio della medesima). Idealmente se il DAC assorbisse tanta CO₂ quanta quella generata dal processo produttivo l'impresa potrebbe definirsi dotata di un processo di produzione carbon - neutral ovvero ad impronta di carbonio nulla. In realtà, come mostrato schematicamente dalla figura, l'impresa ha tre strade per dimostrare la minimizzazione della propria impronta di carbonio:

- dimostrare che il consumo di energia sia legata a fonti rinnovabili (dunque senza partire da combustibili fossili che producono CO₂) ovvero ricorrendo a combustibili a basso tenore di carbonio;
- migliorare il processo produttivo affinché sia a minor generazione possibile di anidride carbonica;
- catturare anidride carbonica dall'aria atmosferica per compensare quanto generato con il proprio processo produttivo.

L'approccio DAC si colloca in relazione alla terza opzione elencata; va sottolineato che la DAC medesima (vedi schema) consuma energia per il proprio funzionamento (Iea, s.d.).

Da notare che il consumo di energia spesso non può considerarsi sotto il controllo diretto dell’impresa venendo acquistata nella maggior parte dei casi. La produzione di energia da combustibili fossili genera a sua volta CO₂; inoltre anche i fattori di produzione resi disponibili da terzi all’impresa potrebbero aver generato CO₂. In definitiva va distinta la causalità diretta di generazione di CO₂ associata alla produzione del prodotto dell’impresa da una causalità indiretta legata all’energia consumata e ai fattori di produzione e vendita (vedi nel capitolo a seguire la definizione di Scope 1, 2 e 3 delle emissioni). Conviene evidenziare, ricorrendo al caso di esempio dell’industria del cemento (Atlas Copco, s.d.), che la seconda opzione può essere percorsa in vari modi quali l’uso di materiali di partenza a basso contenuto di carbonio ovvero tecniche di cattura e stoccaggio² dell’anidride carbonica *prima* dell’emissione in atmosfera.

² si fa riferimento a tecniche definite come CCUS = Carbon Capture Utilization and Storage che non vanno confuse con l’approccio DAC = Direct Air Capture (come illustrato nei capitoli a seguire).

Capitolo 2 - L'impresa ed il carbon accounting

2.1 Il perché della decarbonizzazione e dei mercati del carbonio

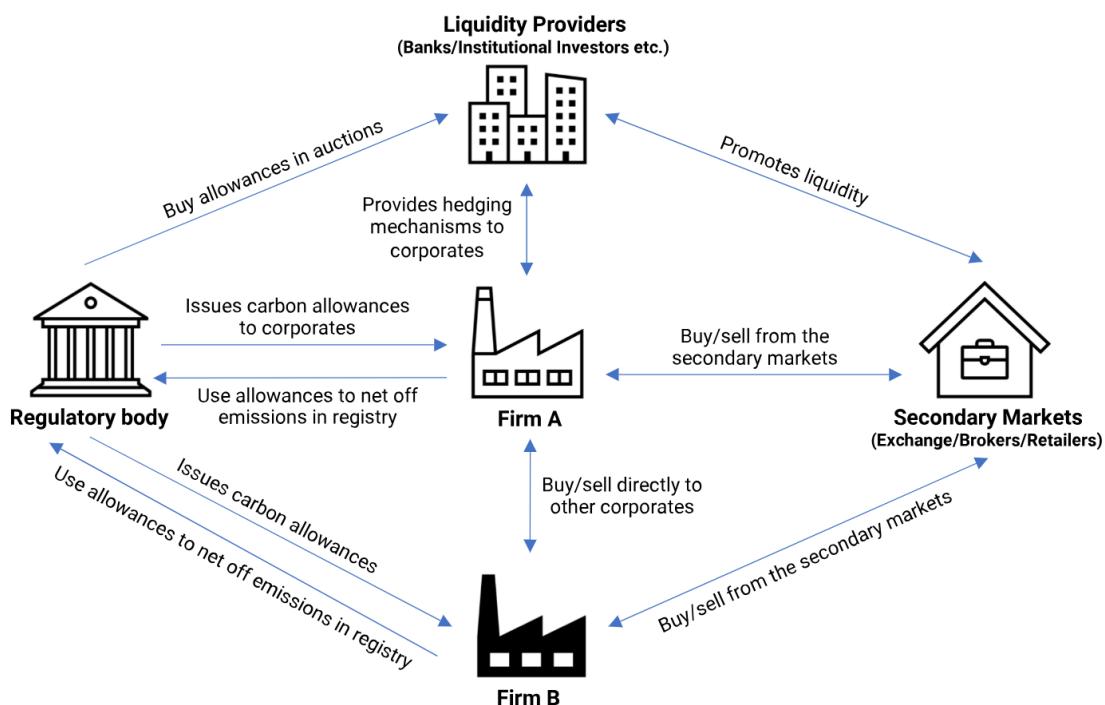
Lo SDG 13 dell'Agenda 2030 è stato concepito per il contrasto al Climate Change. Il cambiamento climatico è correlato all'aumento dei gas serra (Parlamento Europeo, 2023) (o GHG = GreenHouse Gas) nell'atmosfera con speciale riferimento al caso dell'anidride carbonica (CO₂) ritenuta largamente la maggior responsabile (soprattutto in virtù della prevalenza di quantità (EPA (United States Environmental Protection Agency), s.d.) emesse in atmosfera rispetto agli altri gas serra. Il Protocollo di Kyoto (United Nations Climate Change, s.d.) del 1997 ha reso operative le determinazioni delle Nazioni Unite in merito al contrasto del cambiamento climatico. l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)³, ossia il gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico, stima che entro il 2050 avremo bisogno di rimuovere dalle 3-12 gigatonnellate di CO₂ dall'aria ogni anno per massimizzare le nostre possibilità di limitare il riscaldamento globale a 1,5°C sopra i livelli pre-industriali. L'Accordo di Parigi (United Nations Climate Change, s.d.), adottato nel 2015, ha stabilito diversi obiettivi cruciali per affrontare la crisi climatica globale. Innanzitutto, mira a limitare il riscaldamento globale ben al di sotto dei 2°C rispetto ai livelli preindustriali, con sforzi per contenerlo a 1,5°C. L'accordo punta anche ad aumentare la capacità di adattamento dei paesi agli impatti dei cambiamenti climatici e ad allineare i flussi finanziari verso uno sviluppo a basse emissioni di carbonio. Un altro obiettivo fondamentale è raggiungere la neutralità carbonica nella seconda metà del secolo, dopo aver raggiunto il picco delle emissioni (MSCI, 2022) il prima possibile. L'accordo prevede inoltre un meccanismo di revisione quinquennale degli impegni nazionali, un quadro di trasparenza potenziato e sostegno finanziario, tecnologico e di capacity building per i paesi in via di sviluppo. In particolare l'Accordo di Parigi ha rafforzato il mercato del carbonio nella direzione di contenimento delle emissioni. L'impresa oggi si trova (vedi figura a seguire) a poter operare su specifici mercati in cui è possibile l'acquisto e vendita di titoli legati all'emissione di CO₂. In particolare sono rilevanti i cosiddetti Compliance Carbon Markets (CCMs) anche noti come Emissions Trading Systems (ETS); sono anche noti come Cap and Trade markets poiché il regolatore che assegna alle imprese i permessi di emissione CO₂ come titoli ne riduce progressivamente l'ammontare concesso (cap); l'idea è che il prezzo

³ È un organismo delle Nazioni Unite creato nel 1988 dalla World Meteorological Organization (WMO) e dal Programma delle Nazioni Unite per l'Ambiente (UNEP).

del carbonio determinato da tali mercati porti progressivamente all'efficienza di emissioni CO2 da parte dei partecipanti.

Tra tali mercati ETS va senz'altro citato a livello europeo lo EU ETS market (European Commission, s.d.)⁴.

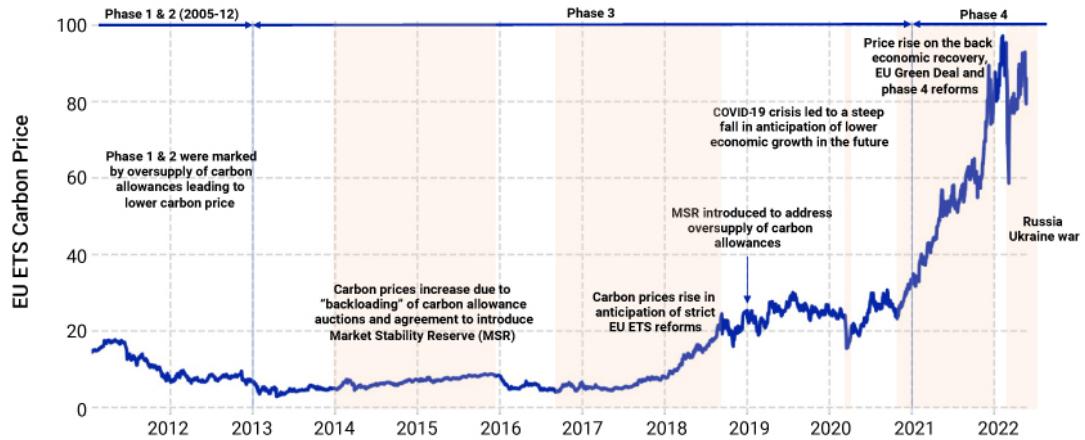
Figura 5 – schema di azienda operante sul mercato del carbonio



Dunque tali mercati determinano un prezzo delle emissioni di anidride carbonica che può essere anche molto variabile nel tempo come visibile nella figura a seguire.

Figura 6 – andamento storico del prezzo del carbonio sul mercato EU ETS

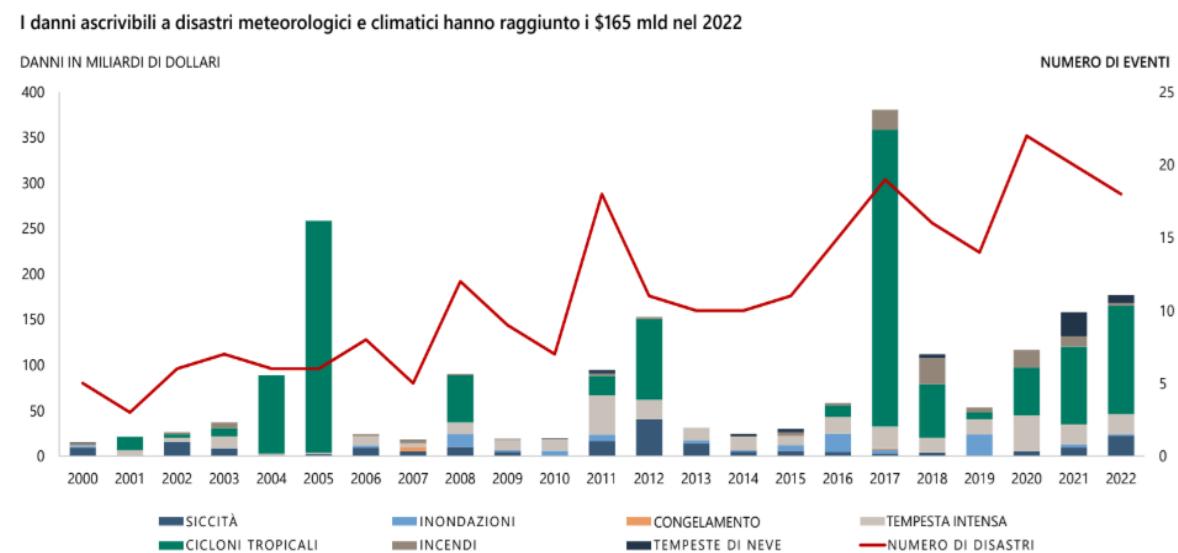
⁴ Una specifica direttiva europea del 2003 istituisce lo EU ETS (come conseguenza del protocollo di Kyoto del 1997):
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02003L0087-20240301>



2.2 Il punto di vista dell'industria assicurativa

Il cambiamento climatico ha grandemente attirato l'attenzione dell'industria assicurativa (McKinsey e Company, 2020). Un modo infatti per apprezzare l'impatto del cambiamento climatico già in atto appare quello della valutazione dei danni da eventi estremi. Il grafico a seguire mostra l'aumento del numero di eventi avversi e l'importo crescente dei danni espresso in miliardi di dollari. La crescente attenzione verso le polizze catastrofali appare del tutto correlata a questo fenomeno. Il volume dei danni è tale, in prospettiva, da determinare rischi di destabilizzazione dell'ordine economico mondiale. In definitiva è un obiettivo strategico quello della neutralità carbonica dell'economia con la potenziale necessità di dover eseguire un processo di rimozione su larga scala della CO₂ esistente in atmosfera.

Figura 7 – danni da catastrofi dal 2000

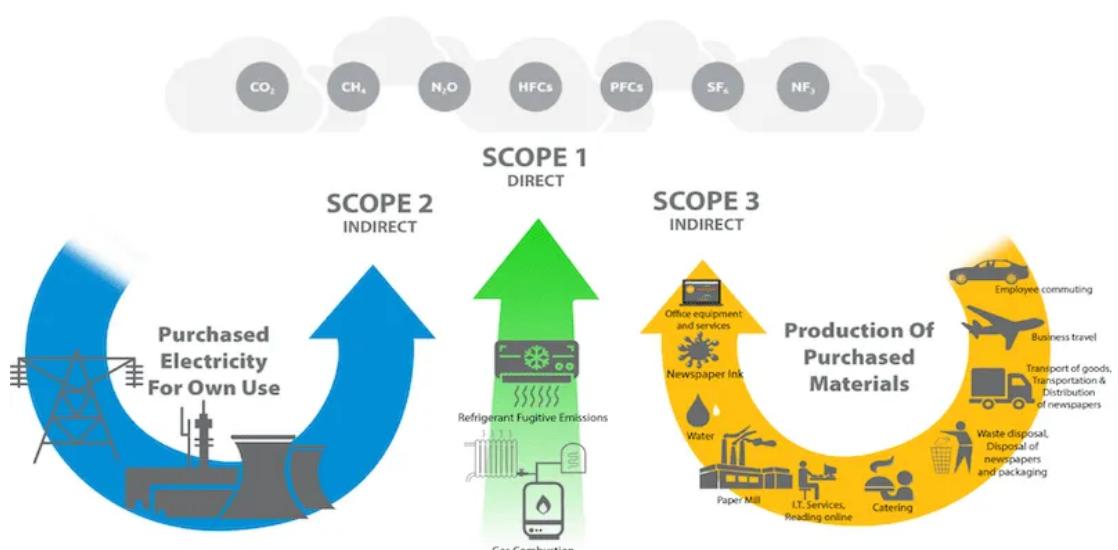


2.3 Carbon accounting nella gestione d'impresa sostenibile

Il Carbon Accounting, o Greenhouse Gas Accounting (GHG) è un insieme di metodologie per calcolare e tracciare la quantità di emissioni di un'azienda (Carbon footprint o impronta di carbonio). Le emissioni vengono classificate in 3 cosiddetti Scope:

1. Scope 1: (emissioni dirette) - comprende le emissioni derivanti da fonti di proprietà o controllate dalle imprese in oggetto (per es: i combustibili fossili usati per riscaldare gli edifici) nonché quelle direttamente correlate alla produzione;
2. Scope 2: (emissioni indirette) - include le emissioni connesse con l'energia acquistata dall'impresa, anzitutto ai fini dei consumi elettrici (si tratta dunque di combustibili bruciati da terzi);
3. Scope 3: comprende tutte le emissioni indirette connesse all'attività dell'azienda che non rientrano né nello Scope 1 né nello Scope 2 (per es. le emissioni relative alla mobilità dei dipendenti, alla catena di fornitura, all'utilizzo dei beni prodotti, etc.).

In modo visuale:



Tali macro-aree vanno opportunamente suddivise in sotto-categorie (Compare your FOOTPRINT, 2023) definendo così le foglie di una gerarchia di voci. Dunque calcolando sulle singole “foglie” la quantità di CO₂ emessa dall'impresa e sapendo che esiste un prezzo di

mercato della CO2 emessa è possibile determinare i costi associati alle emissioni. Si arriva così alla possibilità e necessità di una contabilità del carbonio (carbon accounting), a corredo della classica contabilità aziendale, basata su un “piano dei conti” definito sulla logica di scope 1, 2 e 3 (articolati secondo le foglie suddette).

2.4 Il carbon accounting (e l'ESG Reporting) nei sistemi informativi dell'impresa sostenibile

Come per gli altri processi aziendali l'impresa deve curare l'aspetto di dotare il proprio IT degli strumenti atti ad informatizzare il carbon accounting e l'ESG Reporting correlato. Va precisato che l'aspetto carbon accounting, pur spesso dominante, non esaurisce il dominio dell'ESG Reporting; il Bilancio di Sostenibilità comprende infatti ad esempio anche aspetti sociali e di governance. Si propone lo schema di figura a seguire per comprendere quali tematiche vanno affrontate per l'informatizzazione dei dati ESG.

Anzitutto le fonti dati in gioco sono svariate; se dal dominio Risorse Umane (HR) è possibile estrarre dati pertinenti per il dominio social e governance sarà invece il dominio Produzione e Logistica la fonte pertinente per l'impatto di carbonio.

Conviene schematizzare la natura delle fonti dati in relazione agli scopes GHG e alle funzioni aziendali ed interlocutori in gioco. L'area della Produzione è evidentemente legata allo scope 1 mentre i servizi di supporto allo scope 2 assieme ai servizi di distribuzione e commercializzazione; i fattori di produzione acquistati da fornitori sono correlati allo scope 3 con la complicazione che tali fattori possono essere generati da una catena di fornitori di cui solo una parte sono in diretto legame di fornitura con l'impresa.

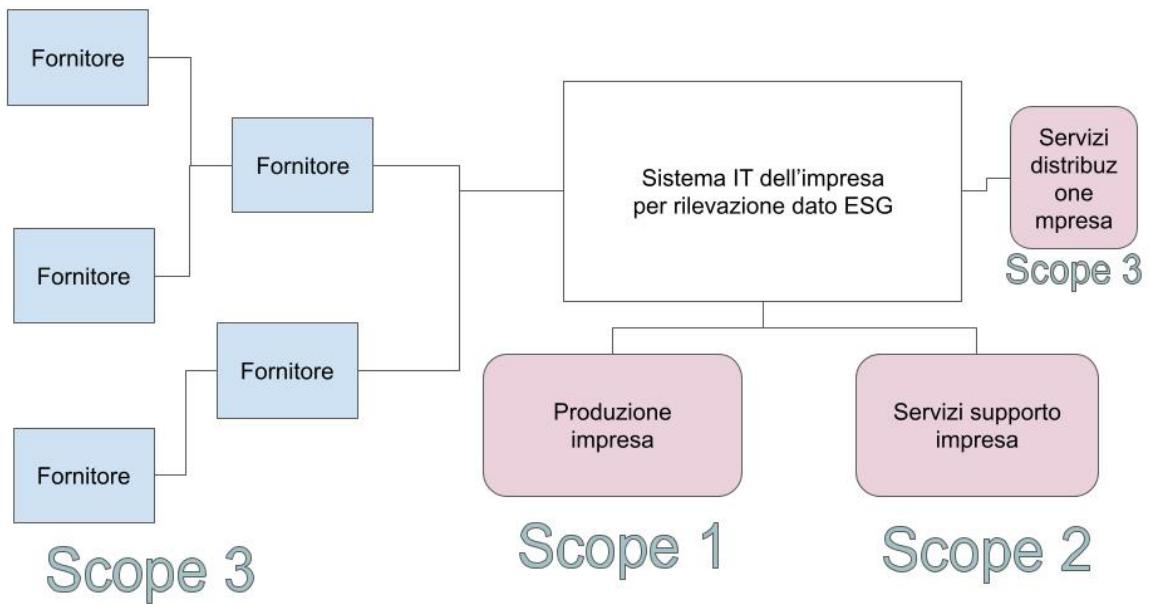


Figura 8 – schema semplificato degli scope 1, 2 e 3 come dati da fornire alla funzione IT.

Si verifica dunque il tipico ambito di azione del data warehouse ovvero quello di una base dati ottimizzata per la lettura e federazione di dati da molte fonti. Segue poi un livello di front-end ad uso utente per l'analisi del dato e per la redazione della pubblicazione dei dati ESG (che tipicamente si concretizza con il rilascio del bilancio di sostenibilità annuale).

La gestione del dato ESG deve declinarsi sia in senso anagrafico che transazionale. Gli scope 1, 2 e 3 con i rispettivi livelli foglia gerarchici costituiscono una anagrafica ESG specifica (come detto: una sorta di piano dei conti ESG). Seguono poi anagrafiche tipiche di un modello di controllo quali tempo, impianto produzione, centro di costo, etc.

Dunque, vedi figura di esempio a seguire, il dato transazionale rilevante ai fini del carbon accounting è costituito dai Kg o Ton di CO₂ equivalenti alla produzione di un Kg di prodotto creato dall'impresa; ciò è relativamente semplice per il caso dello scope 1 partendo dalle caratteristiche fisico-chimiche del processo di produzione e logistico dell'impresa.

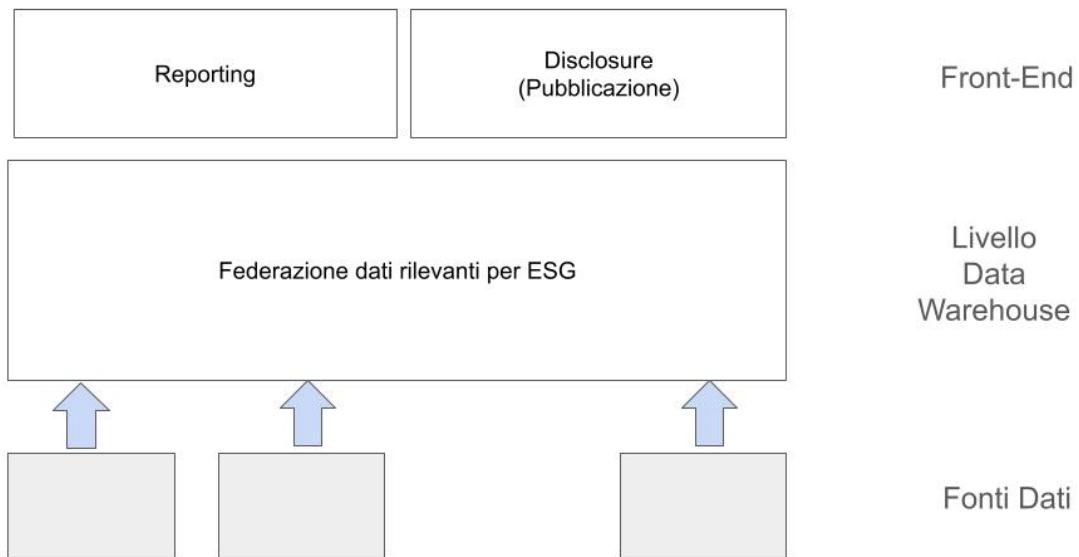


Figura 9 – schema di data warehouse aziendale ai fini della pubblicazione ESG.

Meno semplice per ciò che concerne gli scope 2 e 3. Altro aspetto del dato transazionale è quello della distinzione tra un dato di consuntivo ESG e quello di pianificazione. L’impresa deve sia rendicontare il dato consuntivato di carbon accounting che pianificare un obiettivo annuale o pluriennale per operare confronti di miglioramento nel tempo.

Supplier

Warehouse

Dark Chocolate 60 %

Purchased Product Footprints (SAP Sustainability Footprint Management)

Product	Plant	Supplier	Validity	CO2e / 1 kg
Dark Chocolate	Munich	Mayer Foods	Jan 01 – Aug 15	12 kg
		Mayer Foods	Aug 16 – Nov 30	14 kg
		Malmer GmbH	Jan 01 – Dec 31	15 kg

Aggregated Business Transactions (ERP)

Product	Plant	Month	Business Transaction	Supplier	Product Quantity	Calculation (SAP Sustainability Footprint Management)	
						CO2e/ 1 kg	Total CO2e
Dark Chocolate	Munich	August	Opening Inventory		10 kg	15 kg	150 kg
			Goods Receipt from Supplier	Mayer Foods	100 kg	12 kg	1.200 kg
			Goods Receipt from Supplier	Malmer GmbH	100 kg	15 kg	1.500 kg
		Total		210 kg	13,57 kg	2.850 kg	
		September	Opening Inventory		10 kg	13,57 kg*	135,7 kg
			Goods Receipt from Supplier	Mayer Foods	100 kg	14 kg	1.400 kg
			Total		110 kg	13,96 kg	1.535,7

Figura 10 – esempio di calcolo della CO2 emessa per la produzione di prodotto.

2.5 Il caso SAP ed il Green Ledger

Viene proposto il caso del vendor software SAP per fornire un saggio dell'impegno dell'industria del software sul dominio ESG; SAP⁵ è azienda leader in ambito ERP⁶ ovvero nel supporto IT alle aziende per i propri processi aziendali.

SAP ha creato soluzioni specifiche per la Sustainability. La figura a seguire intende dare un'idea del grado di copertura su tale variegato ambito che spazia dall'economia circolare, al contrasto del cambiamento climatico fino alla responsabilità sociale di impresa; il tutto con l'esigenza di eseguire reporting e pubblicazione dei dati ESG come spiegato.

SAP Sustainability Portfolio

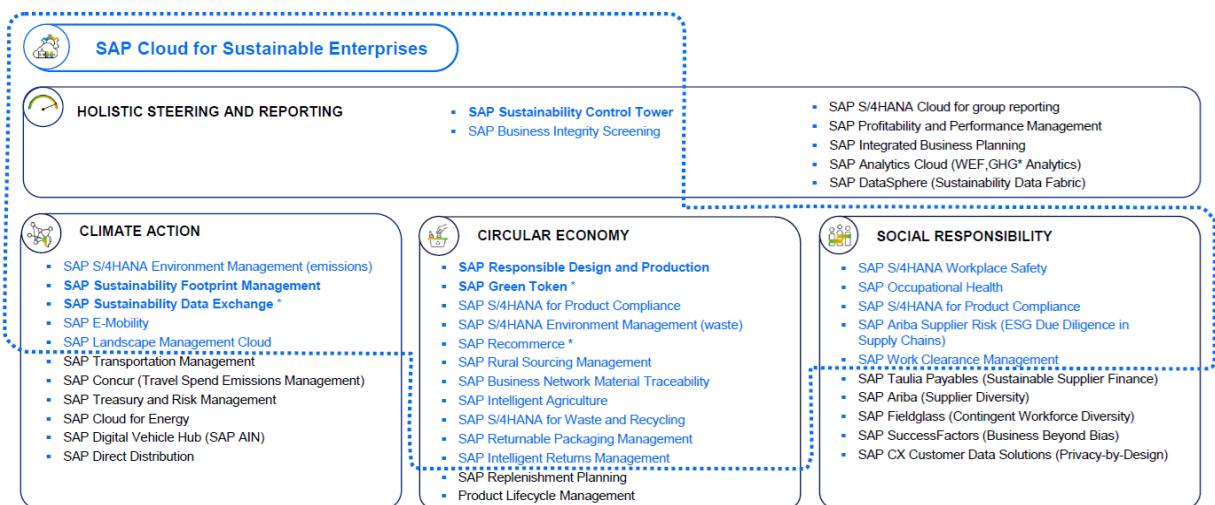


Figura 11 – Offerta di software per la Sustainability da parte di SAP.

Quindi, avendo a mente lo schema di flusso dati IT per l'ESG Reporting, il software SAP può presidiare la maggior parte degli ambiti applicativi necessari per informatizzare il requisito di rendicontazione ESG partendo dalle fonti dati identificate.

⁵ www.sap.com; SAP è attualmente la prima società europea in termini di capitalizzazione di borsa contendendosi il primato con LVMH e Novo Nordisk.

⁶ ERP è acronimo per Enterprise Resource Planning.

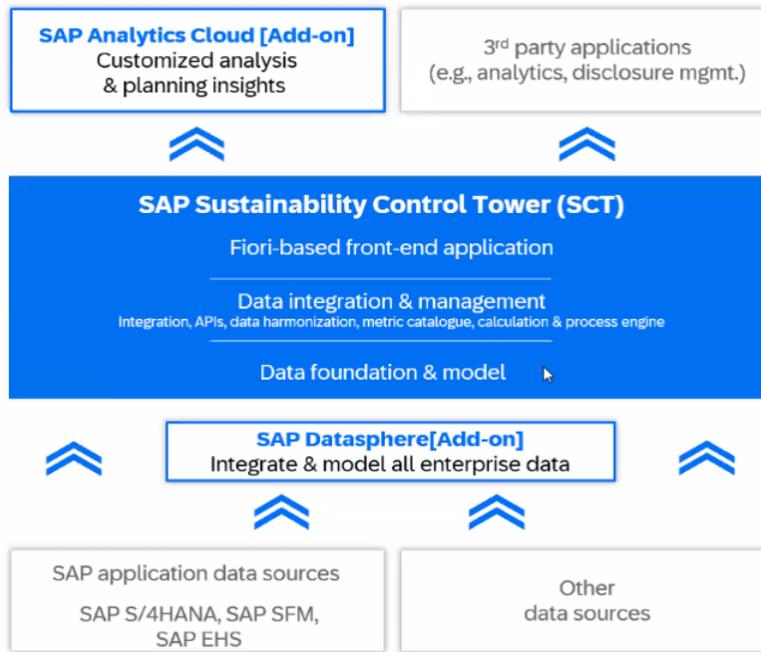
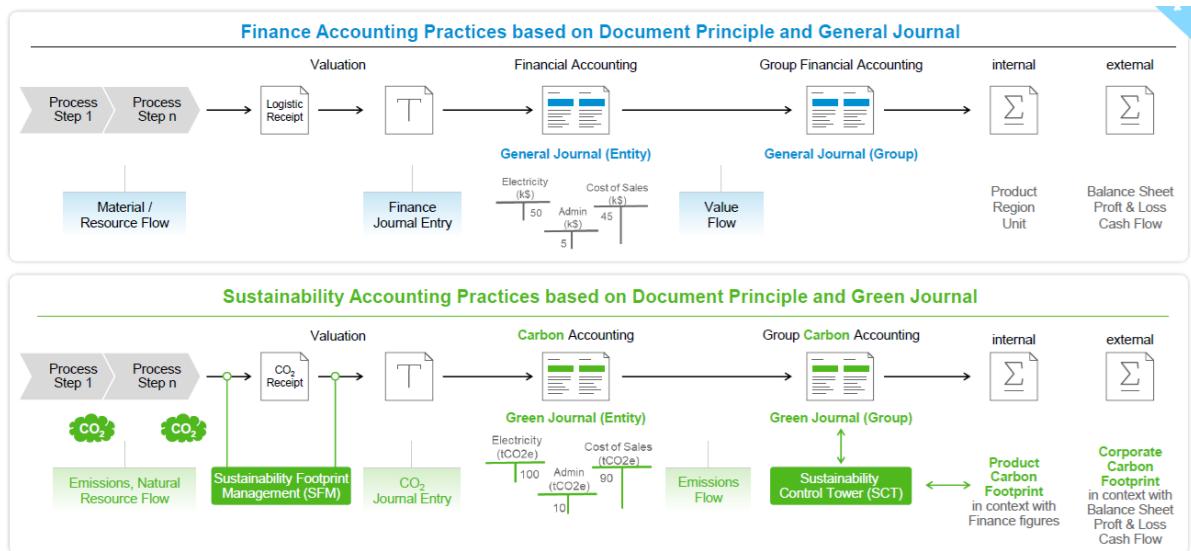


Figura 12 – Soluzione SAP per data warehouse e pubblicazione ESG.

Più recentemente SAP ha rilasciato anche la soluzione Green Ledger che si affianca al Finance Ledger (vedi immagine a seguire). Tale Green Ledger ha appunto lo scopo di tracciare informaticamente le transazioni relative alla CO2.



Capitolo 3 - Stato dell'arte della tecnologia Direct Air Capture e del suo impiego

3.1 Distinzione tra CCUS e DAC

Nel contesto delle tecniche di cattura della CO₂ va fatta una distinzione sostanziale tra l'acronimo CCUS ed il DAC.

CCUS sta per Carbon Capture Utilization and Storage; tale dicitura raggruppa una serie di tecniche per abbattere la quantità di CO₂ emessa da un processo industriale (es. caso di una acciaieria ovvero di un cementificio). Dunque tali tecniche puntano a *mitigare* l'impronta di carbonio di un processo che inevitabilmente deve produrre CO₂.

Il DAC (Direct Air Capture) indica invece tecniche di rimozione della CO₂ atmosferica *indipendentemente* dal processo a monte.

Un importante fattore di distinzione tra CCUS e DAC è che la DAC lavora su un fluido (l'aria atmosferica) a bassa concentrazione di CO₂ mentre il CCUS opera sui fumi di processo industriali ad alta concentrazione di CO₂: complessivamente è più onerosa, energeticamente, l'azione eseguita dal DAC.

L'attuale dibattito sull'impatto climatico è orientato a dimostrare che, purtroppo, non basta l'approccio di mitigazione dell'impronta di carbonio ma che occorra invece già ridurre la CO₂ esistente in atmosfera per evitare il temuto aumento della temperatura globale. In tal senso l'approccio DAC viene ritenuto strategico in una logica di abbattimento della CO₂ dell'atmosfera terrestre.

3.2 Tecniche di rimozione CO₂ dall'aria per il DAC

La tecnologia DAC si basa principalmente su due (Carbon Credits, 2023) approcci:

1. Sorbenti liquidi (si parla di L-DAC): utilizzano soluzioni alcaline (come KOH) che fluiscono su strutture di contatto
2. Sorbenti solidi (si parla di S-DAC): impiegano substrati a nido d'ape con ammine legate alla struttura

L'aria dell'atmosfera deve essere pompata e veicolata verso i reagenti; occorre spendere energia sia per il pompaggio dell'aria che per riscaldare i reagenti affinché liberino la CO₂ catturata ed essere così nuovamente pronti ad un nuovo ciclo di assorbimento. Da annotare che

il dispendio energetico prevalente è quello del riscaldamento dei reagenti rispetto al pompaggio dell'aria. Come accennato il dispendio energetico è particolarmente legato alla concentrazione di CO₂ del fluido da cui si parte. Comparativamente la figura a seguire mostra la condizione di svantaggio del DAC che opera su aria atmosferica, dunque a bassa concentrazione di anidride carbonica.

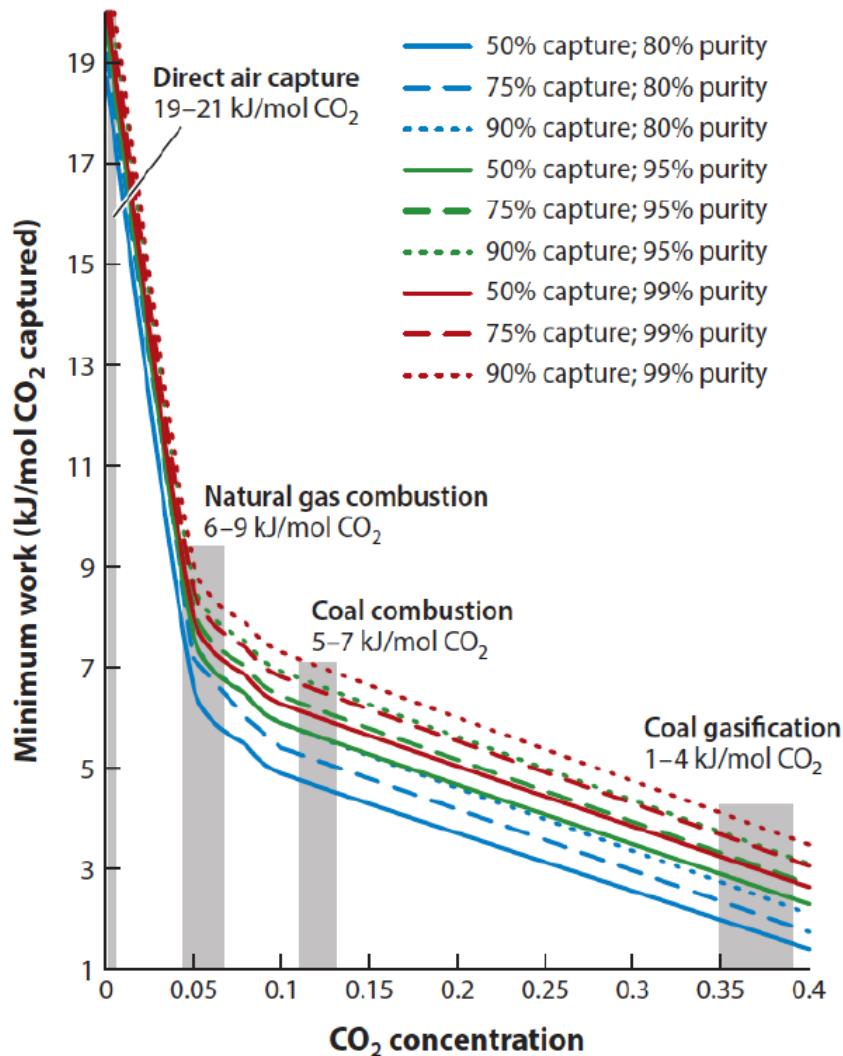


Figura 13 – comparazione energia spesa per la rimozione di CO₂ da aria ovvero fumi industriali.

3.3 Operatori economici abilitanti al DAC

Sembra utile avere un riferimento, nel contesto di questo lavoro, del numero di operatori attivi nella abilitazione verso la tecnologia di rimozione del carbonio e di tipo DAC in particolare.

Nella ormai lunga lista⁷ di soggetti attivi si prende in particolare in esame il caso (di maggior rilievo) dell’azienda svizzera ClimeWorks per esporre alcune caratteristiche dei suoi progetti in corso (Belfer Center for Science and International Affairs, 2023) e come esempio di operatore economico attivo nella vendita di crediti di carbonio.

Nel 2021 ClimeWorks ha reso operativo il grande impianto ORCA (Climeworks, s.d.) sito in Islanda con capacità di rimozione CO2 per 4.000 tonnellate annue (suddivise su otto sub-unità operative da 500 tonnellate CO2 l’una). Importante osservare che l’impianto è alimentato dall’impianto generatore di potenza elettrica di tipo geo-termico Hellisheidi (Power Technology, 2023) da oltre 300 MW di potenza; tale impianto è tra i più grandi al mondo come fonte geo-termica e comunque è l’impianto generatore di potenza elettrica più grande di Islanda.

E’ quindi interessante notare che l’impianto ORCA rispetta in pieno i vincoli di impatto ambientale in quanto la fonte energetica in gioco è di tipo rinnovabile e dunque carbon-neutral. In altri termini: la dipendenza energetica dell’impianto da una unica fonte accertata di tipo rinnovabile risolve per definizione il problema dello scope 2 già enunciato in capitolo 2.

Altra osservazione importante: le attuali installazioni DAC come ORCA si distinguono per le grandi dimensioni e per la complessità di definizione del sito di funzionamento.

ClimeWorks sta attualmente mettendo in operatività un impianto denominato MAMMOTH avente circa 10 volte la capacità di ORCA (36.000 ton CO2 annue). Tale secondo impianto è contiguo a quello di ORCA e sempre beneficiario dell’impianto geotermico Hellisheidi.

In tutti i casi va anche determinata la capacità dell’impianto di depositare la CO2 catturata e solidificata; tale passo è parte integrante del processo di un sistema DAC poichè evidentemente la CO2 catturata non deve più disperdersi nell’atmosfera. Tale aspetto contribuisce alla complessità di determinazione di un sito adatto al DAC.

Va anche precisato che la capacità nominale di cattura della CO2 dell’impianto DAC deve essere decurtata di alcune perdite durante il processo nonché degli inevitabili fermi macchina per manutenzione.

ClimeWorks evidenzia dunque che si è dotata di una metodologia (Climeworks, 2022) specifica affinchè possa passare l’esame di qualità del processo che ne certifichi l’effettiva produttività di cattura della CO2 durante l’anno.

⁷ vengono proposti come riferimenti: <https://carbonherald.com/top-20-direct-air-capture-companies/> e <https://carbonbasedcommentary.substack.com/p/a-list-of-every-direct-air-capture> per saggiare concretamente il numero degli operatori attivi. Interessante anche l’iniziativa <https://circularcarbon.org/about/> per osservare gli operatori attivi nella rimozione CO2 in generale.

Aspetto fondamentale da notare nel modello di business di ClimeWorks è la stipula di contratti veri e propri di rimozione della CO₂ con i primi grandi clienti. Ad esempio Swiss RE⁸ ha stipulato con ClimeWorks un contratto di acquisto decennale di rimozione CO₂ (10 ML USD). Anche da tale punto di vista si nota l'importanza del lavoro di un ente certificatore a garanzia di una vera e propria transazione commerciale.

Notevole inoltre che ClimeWorks sia già aperta a transazioni anche con singoli sottoscrittori che volessero acquistare la rimozione della CO₂. Ad oggi, consultando il sito web di ClimeWorks, è possibile ad esempio, come privati, acquistare una sottoscrizione di 96 Euro mensili (che in un anno equivalgono alla rimozione di 1.200 Kg di CO₂).

In questo paragrafo si vuole infine evidenziare l'interesse delle grandi compagnie petrolifere sull'argomento DAC. Il caso dell'azienda americana Occidental (Oxy, s.d.) appare emblematico: assieme al gigante degli investimenti BlackRock ha creato (Oxy, 2023) una joint venture (mediante la sua sussidiaria 1PointFive⁹) per il progetto STRATOS ovvero per rendere operativo il più grande impianto DAC al mondo (500.000 ton CO₂ di capacità rimozione annue). L'avvio in esercizio è previsto per metà 2025.

Il caso inglese HyNet (HyNet North West, s.d.), in cui è coinvolta l'italiana ENI, viene richiamato come esempio significativo di cosa voglia dire un distretto (o pool) nella economia della riduzione della CO₂ (vedi anche approfondimento in capitolo 5). Il distretto consente a più siti produttivi manifatturieri di condividere una logistica della CO₂ catturata che a fine ciclo viene immagazzinata in fondali in mare aperto.

⁸ come espresso in capitolo 2 le aziende assicuratrici sono in prima linea nella gestione dell'impatto ambientale e climatico da CO₂.

⁹ il nome richiama volutamente l'obiettivo di evitare l'aumento temuto di 1,5 gradi centigradi a livello mondiale.

Capitolo 4 – Considerazioni sui costi di adozione della tecnologia Direct Air Capture (DAC)

4.1 Considerazioni sui costi dell'approccio DAC

Come illustrato un impianto DAC, ad oggi, in pratica richiede la coesistenza di una centrale di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili per il proprio funzionamento così come un sito adatto all'immagazzinamento duraturo della CO₂ solidificata. Eventualmente occorre un sistema di trasporto della CO₂ catturata in favore di operatori capaci di riutilizzarla (es: industrie settore beverages come un birrificio).

I costi dunque sono legati a questi macro-vincoli e sono di grandissima entità (sia come CAPEX che OPEX). Lo stato corrente dei costi e quello prospettico sono di solito riferiti al costo per tonnellata di CO₂ rimossa; un costo unitario che sintetizza l'onere complessivo. Tale costo unitario oltre ad essere analizzato in assoluto è anche esaminato in relazione ad altre condizioni di cattura di anidride carbonica. Ad esempio la figura a seguire (IEA, 2020) espressa in USD/tonn CO₂ consente di apprezzare quanto sia più economicamente dispendiosa la cattura dall'aria atmosferica (caso del DAC)

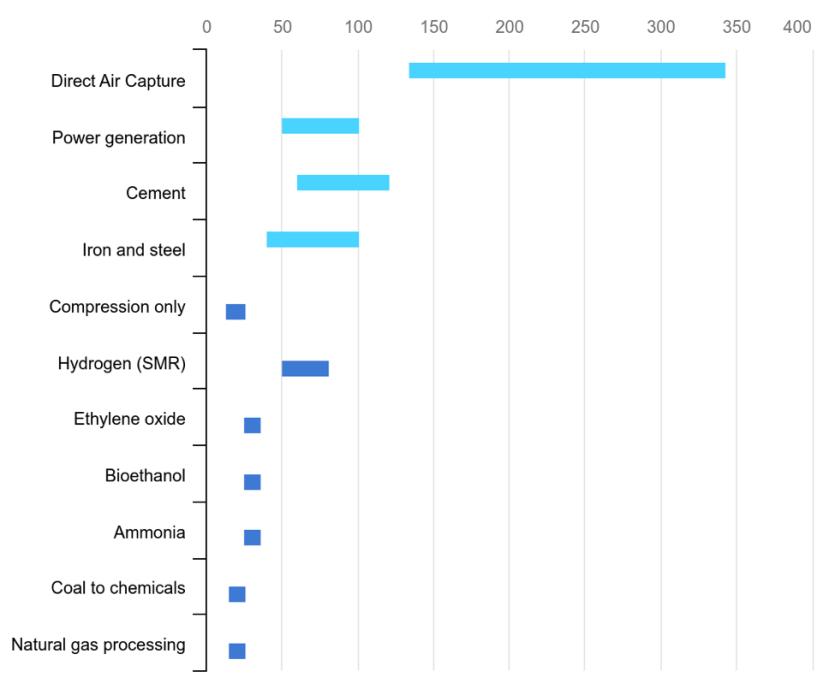


Figura 14 – comparazione costo di rimozione della CO₂.

rispetto ad altri processi industriali dove, come illustrato, si parla di CCUS come tecnica di cattura CO₂ dai fumi di processo.

Il grafico è anche interessante per introdurre un altro aspetto dei costi associati al DAC: gli studi attuali su tali costi fanno sempre riferimento ad ampi intervalli tra valore minimo e massimo segno della variabilità ed incertezza circa i fattori in gioco.

Un altro grafico a seguire (SSRN (Social Science Research Network), 2022) pare utile per comprendere la grandezza dei costi in gioco e la grande variabilità pure associata. Il grafico pone in relazione il costo USD / Ton CO₂ rimossa al crescere dei volumi rimossi negli anni (il cosiddetto learning rate) comparando quattro tecniche innovative di esecuzione della rimozione della CO₂; poichè i costi energetici sono una delle grandi variabili in gioco è interessante analizzare queste curve anche per nazione in cui avviene il processo DAC.

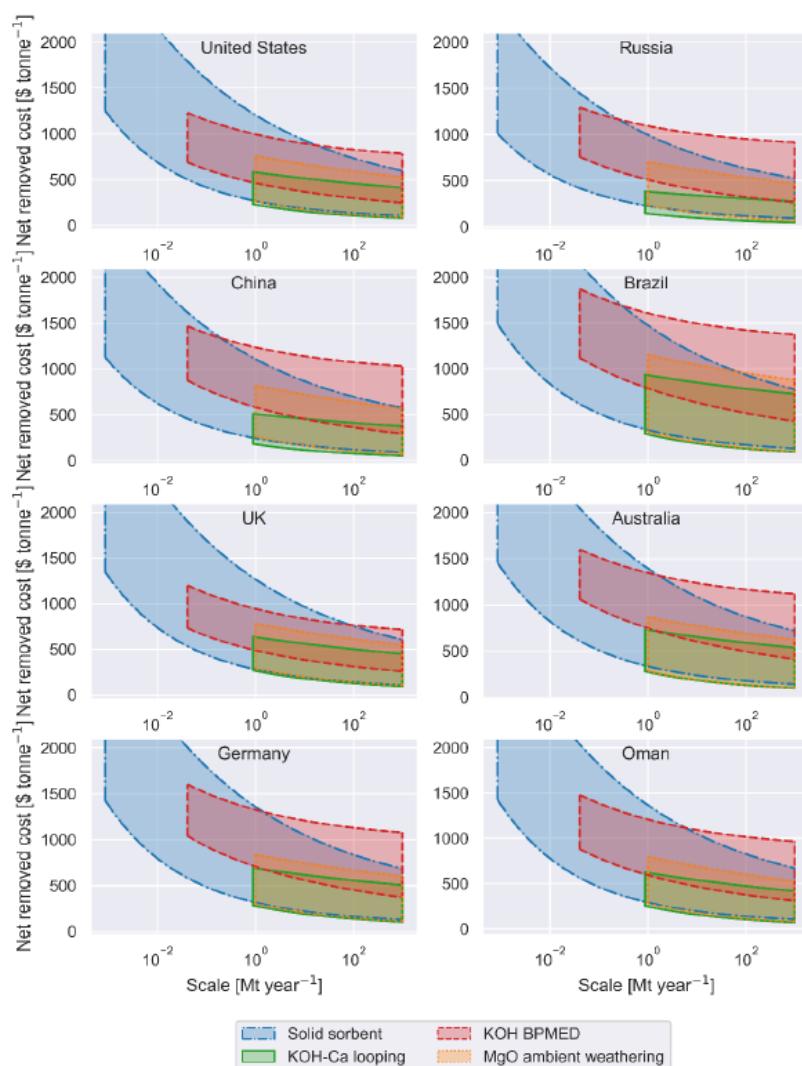


Figura 15 – comparazione costi di rimozione CO₂ in nazioni diverse e all'aumento dell'esercizio della tecnica di rimozione (4 tecniche raffrontate).

Il grafico intende illustrare anche quanto è più dispendioso *introdurre* una tecnica innovativa (parte a sinistra del grafico): solo dopo molto tempo ed esercizio del processo in gioco subentrano economie di scala. Notando l'ampiezza poi degli intervalli (in verticale) ci si rende conto di quanto siano variabili le stime di costo di impianti di questo tipo. Grossolanamente il valore di 500 USD / Ton appare ancora come una sorta di valore di riferimento per il costo unitario; se si pensa che i mercati del carbonio hanno solo di recente segnalato un prezzo intorno ai 100 USD / Ton si comprende, anche a grandi linee, quanto sia difficile la strada per dimostrare una economicità di tali impianti senza una qualche forma di sussidio a supporto.

Capitolo 5 - Considerazioni e prospettive per l'adozione della DAC da parte dell'impresa sostenibile

5.1 L'impresa di fronte alla scelta di adozione DAC (ad oggi)

L'impresa deve oggi curare l'aspetto della sostenibilità come elemento imprescindibile della propria vita nel contesto economico in cui si trova ad operare.

La cosiddetta doppia materialità definisce come l'azienda determini un impatto sull'ambiente circostante così come l'ambiente medesimo possa influenzare l'azienda.

E' ormai pratica corrente, come illustrato, che aziende quotate in borsa si vedano assegnare punteggi ESG; in tale senso una impresa deve curare non solo l'aspetto di impatto ambientale ma anche quello sociale e di governance tanto da dovere procedere ad una formale rendicontazione non finanziaria. Dunque sempre meno l'impresa può ignorare la propria visibilità ESG.

Come espresso in questa ricerca, per l'impatto ambientale, il fattore più frequente ed importante da considerare risulta quello della generazione della CO2 da parte dell'azienda; ciò per le sue implicazioni causali di cambiamento climatico. Si parla dunque in tal senso di impronta di carbonio dell'impresa.

Non tutte le aziende appaiono eguali di fronte a questo aspetto: se un cementificio o una acciaieria primeggiano per impatto diretto di generazione di CO2 altre sono intrinsecamente meno coinvolte in tale impatto diretto. Le definizioni però viste di Scope 1, 2 e 3 fanno capire che tutte le aziende hanno una qualche responsabilità, anche indiretta, circa la generazione di CO2.

Si pone quindi per l'impresa sostenibile il quesito su come ridurre il proprio impatto CO2 e come affrontare l'obiettivo di carbon neutrality.

Importante allora la distinzione riportata in questo lavoro tra approccio tecnologico CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage) e DAC (Direct Air Capture): mentre il primo punta a mitigare la produzione di CO2 *durante* l'esecuzione del processo produttivo (prima dunque dell'emissione in atmosfera) il secondo punta a diminuire la quantità di CO2 in atmosfera *indipendentemente* dal processo produttivo aziendale in gioco.

Da questo punto di vista dunque qualsiasi impresa potrebbe/dovrebbe domandarsi se adottare una soluzione DAC.

L'osservazione degli operatori economici odierni coinvolti nell'approccio DAC (e CCUS) porta ad annotare che:

- Operatori specializzati in tecnologia DAC costruiscono impianti DAC sempre più grandi e commercializzano con le imprese¹⁰ i crediti di carbonio sollevandole dall'onere di costruirsi propri impianti DAC;
- Aziende di grandi/grandissime dimensioni come acciaierie e cementifici si dotano di impianti CCUS grazie ad operatori specializzati su tale tecnologia.

In effetti la disamina della struttura ed entità dei costi odierni legati ad un impianto DAC conferma che tale tecnologia non può essere ritenuta una commodity a disposizione dell'impresa sostenibile. Tanto più pensando che la scelta di un sito adatto ad un impianto DAC è di difficile portata per qualsiasi impresa.

Dunque, ad oggi, l'adozione possibile di un approccio DAC per l'impresa sostenibile in generale appare sotto forma di scenario di sostenimento di un costo legato all'acquisto di crediti di carbonio associati all'impiego di DAC (esercito da parte di altri operatori). Inoltre, se è pur vero, come mostrato, che il carbon accounting è ormai una realtà anche informatizzabile in azienda i costi legati a tale informatizzazione e rendicontazione sono costi aggiuntivi per l'impresa sostenibile.

I capitoli a seguire intendono delineare quei fattori che potrebbero modificare questo stato delle cose, anche magari parzialmente, e specificando meglio quali tipologie di aziende oggi potrebbero permettersi l'adozione diretta del DAC.

5.2 Il ruolo del Regolatore

Sembra conveniente ricorrere al parallelo dell'adozione dell'auto elettrica per inquadrare la complessità sistematica del ricorso all'approccio DAC. Contestualmente conviene anche tenere in considerazione come la domanda di energia elettrica sia in crescita a livello mondiale e come recentemente tale incremento si sia ingigantito (Iea, 2025) a causa delle necessità relative all'uso dell'Intelligenza Artificiale.

L'auto elettrica è tuttora una risorsa ed un'opzione costosa per il singolo cittadino; più costosa delle opzioni di motore endotermico o ibrido endotermico-elettrico. L'incentivazione da parte del Regolatore¹¹ è tuttora determinante per tale scelta.

¹⁰ Non del tutto secondario appare che anche privati cittadini possono acquistare crediti di carbonio da tali operatori specializzati.

¹¹ Nel caso europeo il Regolatore è la Comunità Europea a livello centrale e lo Stato Membro a livello locale.

Come per il DAC l'auto elettrica deve ricorrere ad energia elettrica prodotta centralmente altrove; in tal senso solo il ricorso ad energie rinnovabili nella generazione di potenza elettrica rende davvero virtuoso il ricorso al DAC ovvero all'auto elettrica.

Quindi il Regolatore deve affrontare temi come DAC ovvero auto elettrica calcolando la generazione di potenza elettrica come fattore imprescindibile e concomitante. Di qui, ad esempio, la recentissima decisione del governo italiano circa la ripresa dell' opzione nucleare come fonte di energia non fossile. Rilevante annotare che i nuovi approcci tecnologici di ricorso a energia nucleare da fissione contemplano l'uso di piccoli reattori modulari.

Riesaminando l'approccio DAC si può postulare che il Regolatore abbia spazio di intervento:

- nell'influenzare la fonte di generazione di potenza elettrica
- nel regolamentare/favorire la scelta dei siti¹² di installazione degli impianti DAC
- nel regolamentare/favorire il mercato dei crediti di carbonio
- nel determinare una fiscalità favorevole all'impresa sostenibile che adotti il DAC
- nel determinare la credibilità delle certificazioni circa l'effettiva rimozione della CO2

Per comprendere meglio l'aspetto del sito di installazione ed esercizio del DAC vengono proposte nel paragrafo a seguire alcune considerazioni specifiche.

5.3 Approccio pool (o cluster)

L'aspetto della notevole potenza elettrica in gioco nell'esercizio del DAC nonchè quello dell'immagazzinamento definitivo¹³ della CO2 solidificata portano a considerare un approccio per cui le aziende possano condividere le risorse per il fine comune di sostenibilità. Si parla allora di *pool* per indicare appunto una associazione di entità cooperanti nella gestione della produzione di energia elettrica, nella cattura della CO2 ovvero nel suo trasporto ed immagazzinamento o di ri-uso ai fini industriali (vedi figura a seguire).

L'impresa sostenibile si colloca dunque all'interno di un tale schema cooperativo che comprende sia aziende produttrici di CO2 che aziende fruittici della CO2 catturata (esempio:

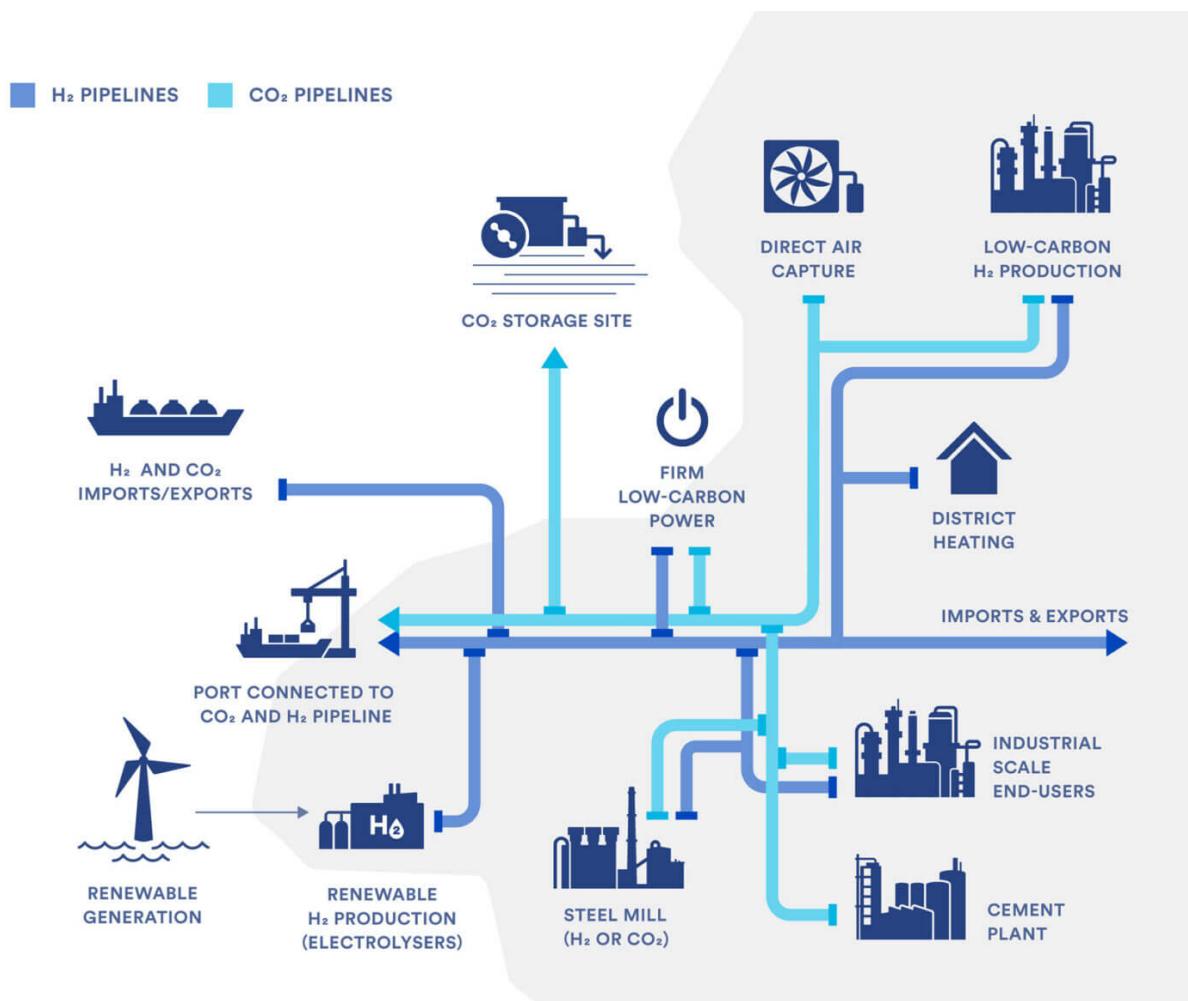
¹² ciò con particolare riferimento alla necessità di immagazzinare per sempre la CO2 solidificata (storage). Sussistono anche preoccupazioni di identificazione di sufficienti spazi di immagazzinamento della CO2 per il medio e lungo termine nel mondo.

¹³ si propone <https://www.catf.us/resource/policy-framework-for-carbon-capture-and-storage-in-europe/> come riferimento introduttivo al tema del trasporto ed immagazzinamento della CO2.

aziende del settore beverage). Si nota anche che il pool è adatto sia al caso CCUS che quello DAC.

E' quindi evidente che il Regolatore possa intervenire a vario titolo nel favorire questo approccio cooperativo.

Figura 16 – esempio di distretto industriale con sistema DAC condiviso.



5.4 Crediti di carbonio per l'impresa relativi al DAC (e non)

L'impresa sostenibile, nel caso non fosse nelle condizioni di dotarsi di impianti quali CCUS e DAC, ha comunque la concreta opzione di posizionarsi sul mercato del carbonio. L'acquisto e vendita di crediti di carbonio può rientrare a pieno titolo nel novero delle sue operazioni finanziarie. Due possibilità operative appaiono perseguibili (Zero C02, 2024):

- Agire sul mercato regolamentato
- Agire sul mercato volontario (Voluntary Carbon Market)

Nel caso del mercato regolamentato il regolatore agisce o mediante una carbon tax stabilendo un prezzo esplicito della tonnellata di CO₂ ovvero stabilendo un meccanismo *cap and trade*; nel primo caso non si stabilisce un tetto alle emissioni mentre nel secondo caso sì lasciando liberi gli operatori di vendere / acquistare crediti (sotto forma di permessi di emissioni) secondo le esigenze contingenti. Per il contesto europeo si cita, con riferimento alla carbon tax, il Regolamento (UE) 2023/956 che introduce il CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism) per regolare l'importazione di prodotti extra UE dal punto di vista di impatto CO₂ (si parla di *sistema di adeguamento del carbonio alle frontiere*).

Il mercato regolamentato UE si distingue per l'EU ETS (European Commission, s.d.) (Exchange Trade System) che appunto si basa sul principio del cap and trade: la Commissione Europea stabilisce obiettivi pluriennali di riduzione delle emissioni ed indica dei limiti (cap), decrescenti nel tempo, di emissioni consentite. All'interno di tali limiti determinate aziende ad alta impronta di carbonio sono obbligate a partecipare ad aste di acquisto di permessi di emissioni che possono poi essere venduti/riacquistati a seconda delle esigenze. L'obiettivo di fondo è che mediante il segnale del prezzo di tale mercato le aziende diventino sempre più efficienti nel contenere le emissioni di gas serra.

Nel caso dei mercati volontari le aziende acquistano dei crediti di carbonio certificati da determinati enti¹⁴. Tali enti verificano che i progetti di salvaguardia ambientale, associati ai crediti da loro emessi, siano conformi e misurabili nella loro efficacia. Si nota che il prezzo di tali crediti risulta influenzato dalla qualità di tali certificati rivelando così quanto non sia semplice esercire una metodologia di accertamento e certificazione della bontà ambientale di una iniziativa green.

Si osserva comunque che, sia nel caso regolamentato che volontario, l'acquisizione di crediti di carbonio non è necessariamente correlata ad iniziative DAC: si contribuisce dunque spesso alla diminuzione dell'impronta di carbonio con crediti di carbonio generati da qualsiasi provvedimento/approccio (ad esempio: forestazione o riforestazione di aree del territorio). D'altro canto esistono già comunque esempi concreti di acquisto crediti di carbonio che sono esplicitamente legati alla rimozione di CO₂ da DAC: si propone in tale senso il caso di

¹⁴ Si citano i casi di Verra, Plan Vivo Foundation, Climate Action Reserve.

Climeworks (<https://climeworks.com/sme-self-service>) che già consente ad utenza business o privata l'acquisto online dei crediti.

Conclusioni

Le seguenti osservazioni di riepilogo vengono proposte a sostegno delle conclusioni, a seguire, tratte da questa ricerca:

- Per quanto l'impronta di carbonio di una impresa sia correlabile a varie cause quella predominante è legata alla generazione di CO₂; di qui l'interesse verso la tecnologia DAC.
- La tecnologia DAC dimostra di evolvere costantemente e con impianti installati di sempre maggiore capacità disegnati ed eserciti da operatori economici specializzati (come l'azienda ClimeWorks).
- L'approccio DAC si aggiunge/affianca a quello CCUS (Carbon Capture Utilization and Storage); mentre quello DAC punta ad abbattere le emissioni CO₂ indipendentemente da dove generata quello CCUS mira a contenere la generazione di CO₂ durante il processo produttivo in gioco (caso ad esempio delle acciaierie o dei cementifici).
- L'approccio CCUS lavora, per così dire, in condizioni di vantaggio rispetto al DAC per la concentrazione di CO₂ superiore di partenza; questo ha contribuito nel recente passato a privilegiare questa opzione. La tecnologia DAC è però ritenuta indispensabile in ottica sistematica visti gli obiettivi di riduzione mondiali al 2050 di CO₂ (non basta la mitigazione sui processi; occorre ridurre la CO₂ atmosferica ormai già prodotta).
- Un vantaggio degli approcci DAC e CCUS è che la loro azione risulta precisamente misurabile; in una logica di carbon accounting e rendicontazione non finanziaria sempre più sfidanti questo aspetto appare molto rilevante.
- Gli approcci DAC e CCUS condividono di essere processi complessi ed energivori; per il DAC addirittura si arriva a concepire la connessione diretta a centrali di generazione di potenza elettrica (da fonti rinnovabili) per lavorare in condizioni credibili di risultato netto di decarbonizzazione.
- I due approcci condividono anche la necessità di depositare in via definitiva ovvero riutilizzare la CO₂ catturata; ciò porta ad una ulteriore complessità di scelta ed uso del sito di funzionamento.
- Entrambi i due fattori precedenti hanno evidentemente influenzato la tendenza in atto di concepire dei veri e propri distretti industriali (o pool o cluster) per armonizzare ed ottimizzare economicamente la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile, il

funzionamento del CCUS e del DAC nonchè la logistica legata al trasporto della CO2 da depositare ovvero riutilizzare.

- I temi di produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile, gli obiettivi sistemici di de-carbonizzazione legati agli accordi di Parigi e Kyoto ed il bisogno di mantenere le aziende tra loro competitive internazionalmente (con riferimento agli oneri ambientali) hanno indotto il Regolatore, da vari anni, ad emettere provvedimenti ovvero concepire entità specifiche: a titolo di esempio si cita, per il caso europeo, il mercato regolato del carbonio EU ETS. Dunque l'approccio DAC appare influenzato da un sistema regolatorio tuttora in evoluzione.
- Strettamente correlata al punto precedente è la constatazione che esiste ormai un mercato del carbonio e che l'opzione di acquistare crediti di carbonio da parte di una azienda è sia una possibilità che un obbligo (quando sia riconosciuta dalla normativa come ad alto impatto di carbonio). In tal senso si acquisisce la constatazione che una azienda non debba per forza detenere ed esercire un sistema DAC per essere esplicitamente contributore alla decarbonizzazione; è infatti anche possibile acquistare dei crediti che siano direttamente correlabili ad un impianto DAC gestito da terzi.
- L'analisi dei costi legati alla installazione ed esercizio dei DAC rivela a tutt'oggi il grande onere di tali costi e la grande incertezza circa una potenziale loro riduzione nei prossimi anni. Per avere quindi una idea concreta di chi, oggi, nel 2025 davvero intraprende la strada dell'installazione ed uso diretto di un impianto DAC si propone il caso della grande multi-utility svedese (municipalizzata) Stockholm Exergi¹⁵.

In definitiva l'impresa sostenibile, alla luce dei punti riepilogativi sopra esposti, di fronte all'opzione di adozione DAC oggi potrebbe comportarsi al modo seguente in un contesto economico avanzato come quello UE:

- Nel caso di grande/grandissima azienda con processo produttivo ad alta impronta di carbonio (secondo lo Scope 1) tendenzialmente essa si doterebbe primariamente di una soluzione CCUS e/o agirebbe sul mercato del carbonio (soprattutto regolato) per ottemperare ai capi imposti dal Regolatore. Il DAC potrebbe essere già una opzione

¹⁵ <https://www.stockholmexergi.se/en/>. L'italiana Banca Intesa appare tra i finanziatori della iniziativa DAC (con ingresso in attività al 2028): <https://imi.intesasanpaolo.com/it/news/2025/finanziamento-exergi-cattura-co2/> .

interessante nel contesto di un pool come componente aggiuntivo. Tipico esempio di tale casistica appare l’azienda dell’acciaio e del cemento.

- Nel caso di grande/grandissima azienda ad alta impronta di carbonio (secondo lo Scope 2) l’opzione DAC potrebbe già essere attraente nel caso il ricorso ai crediti di carbonio non fosse sufficiente; è anche in tale caso interessante l’approccio pool. Tipico esempio di tale casistica è l’azienda legata alla produzione di energia (esempio: utility). Emblematico comunque che il recente caso di grande impianto DAC Stockholm Exergy sia dichiaratamente coperto anche da fondi pubblici (Stockholm Exergi, s.d.).
- Nel caso di piccole/medie aziende, ad oggi, appare percorribile solo una strada di acquisizione crediti di carbonio che, come illustrato, spesso non sono correlati alla soluzione DAC (che non appare alla portata diretta di tali aziende visti i costi in gioco e la necessità di sito di funzionamento). Tali aziende possono in particolare trovare conveniente il ricorso ai crediti di carbonio legati al mercato volontario¹⁶ (VCM).
- Sembra anche pertinente citare il caso, senza particolare riferimento alle dimensioni, delle aziende capaci di riutilizzare la CO2 catturata (si pensi al settore beverage che usa appunto CO2 per la produzione della bevanda venduta). Tali aziende, soprattutto in caso di un pool, possono influenzare indirettamente l’adozione del DAC (così come del CCUS).

Infine si propongono le seguenti osservazioni per prospettare come gli equilibri sopra esposti potrebbero cambiare in futuro in favore di una maggiore adozione del DAC:

- Se la visione sistematica di raggiungimento degli obiettivi di Parigi per il 2050 dovesse sempre più indurre a privilegiare la cattura della CO2 atmosferica potrebbero nascere nuove condizioni normative a favore del DAC.
- Il Regolatore potrebbe sempre più favorire la soluzione DAC mediante specifici interventi sui mercati del carbonio.
- L’approccio pool potrebbe essere regolamentato sempre più nel rendere attraente la partecipazione di aziende condividendo esse la soluzione DAC.

¹⁶ ancora citando il caso Stockholm Exergi si nota che parte delle coperture finanziarie provengono proprio dal mercato volontario.

- La domanda di energia elettrica potrebbe crescere troppo rapidamente, ad esempio per l'adozione massiva della intelligenza artificiale, imponendo la necessità di dotarsi del DAC per rendere sostenibile tale crescita.

Difficilmente invece appare visibile che sul breve termine l'innovazione tecnologica possa rivoluzionare radicalmente l'efficienza energetica della soluzione DAC.

Bibliografia

Apollo. (s.d.). *Apollo*. Tratto da Apollo: <https://www.apollo.com>

Apollo. (s.d.). *Apollo*. Tratto da Apollo: <https://www.apollo.com>

Atlas Copco. (s.d.). *Atlas Copco*. Tratto da Come ridurre le emissioni di CO2 del cemento?: <https://www.atlascopco.com/it-it/compressors/wiki/compressed-air-articles/reducing-cement-co2-emissions-to-meet-the-paris-agreement>

Belfer Center for Science and International Affairs. (2023, November 30). *Belfer Center for Science and International Affairs*. Tratto da Prospects for Direct Air Carbon Capture and Storage: Costs, Scale, and Funding: <https://www.belfercenter.org/publication/prospects-direct-air-carbon-capture-and-storage-costs-scale-and-funding>

Carbon Credits. (2023, March 7). *Carbon Credits*. Tratto da How Direct Air Capture Works (And 4 Important Things About It): <https://carboncredits.com/how-direct-air-capture-works-and-4-important-things-about-it/>

Climeworks. (2022, September 19). *Climeworks*. Tratto da DAC+S methodology validated by DNV - developed and implemented by Climeworks and Carbfix as partners for permanent carbon removal: <https://climeworks.com/news/methodology-for-permanent-carbon-removal>

Climeworks. (s.d.). *Climeworks*. Tratto da Orca: the first large-scale plant: <https://climeworks.com/plant-orca>

Compare your FOOTPRINT. (2023, March 2). *Compare your FOOTPRINT*. Tratto da What is the Difference Between Scope 1, 2, and 3 Emissions? : <https://www.compareyourfootprint.com/difference-scope-1-2-3-emissions/>

EPA (United States Environmental Protection Agency). (s.d.). *EPA*. Tratto da Overview of Greenhouse Gases: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>

European Commission. (2015, Febbraio 13). *European Commission* . Tratto da European Long-term Investment Funds: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/hr/memo_15_4423

European Commission. (s.d.). *European Commission*. Tratto da EU Emissions Trading System: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en

European Commission. (s.d.). *European Commission*. Tratto da EU Emissions Trading System: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en

Gazzetta Ufficiale. (2024, Agosto 9). *Gazzetta Ufficiale*. Tratto da Testo coordinato del decreto-legge: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2024/10/08/24A05294/SG>

Hynet North West. (s.d.). *Hynet North West*. Tratto da UNLOCKING A LOW CARBON FUTURE: <https://hynet.co.uk>

IEA. (2020, September 24). *IEA*. Tratto da Levelised cost of CO2 capture by sector and initial CO2 concentration, 2019: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/levelised-cost-of-co2-capture-by-sector-and-initial-co2-concentration-2019>

Iea. (2025, April 10). *Iea*. Tratto da AI is set to drive surging electricity demand from data centres while offering the potential to transform how the energy sector works: <https://www.iea.org/news/ai-is-set-to-drive-surging-electricity-demand-from-data-centres-while-offering-the-potential-to-transform-how-the-energy-sector-works>

Iea. (s.d.). *Iea*. Tratto da Direct Air Capture: <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/direct-air-capture#programmes>

Iea. (s.d.). *Iea*. Tratto da Direct Air Capture: <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/direct-air-capture#programmes>

McKinsey e Company. (2020, November 19). *McKinsey e Company*. Tratto da Climate change and P&C insurance: The threat and opportunity: <https://www.mckinsey.com/industries/financial-services/our-insights/climate-change-and-p-and-c-insurance-the-threat-and-opportunity>

Morningstar. (2016, Marzo 3). *Morningstar*. Tratto da Morningstar Sustainability Rating: <https://www.morningstar.it/it/news/148095/il-morningstar-sustainability-rating.aspx>

Morningstar Sustainalytics. (s.d.). *Sustainalytics*. Tratto da Sustainalytics: <https://www.sustainalytics.com/about-us>

MSCI. (2022, June 8). *MSCI*. Tratto da Introducing the Carbon Market Age: <https://www.msci.com/research-and-insights/blog-post/introducing-the-carbon-market-age>

Oxy. (2023, November 7). *Oxy*. Tratto da Occidental and BlackRock Form Joint Venture to Develop STRATOS, the World's Largest Direct Air Capture Plant: <https://www.oxy.com/news/news-releases/occidental-and-blackrock-form-joint-venture-to-develop-stratos-the-worlds-largest-direct-air-capture-plant/>

Oxy. (s.d.). *Oxy*. Tratto da Oxy: <https://www.oxy.com>

Parlamento Europeo. (2023, Marzo 23). *Parlamento Europeo*. Tratto da Cambiamento climatico: gas a effetto serra che causano il riscaldamento globale: <https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20230316STO77629/cambiamento-climatico-gas-a-effetto-serra-che-causano-il-riscaldamento-globale>

Power Technology. (2023, September 13). *Power Technology*. Tratto da Hellisheiði Geothermal Power Plant, Hengill, Iceland: <https://www.power-technology.com/projects/hellisheiði-geothermal-power-plant/>

SSRN (Social Science Research Network). (2022, November 16). *SSRN (Social Science Research Network)*. Tratto da Driving down the cost of direct air capture with intelligent policy design and technology deployment: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4277708

Stockholm Exergi. (s.d.). *Stockholm Exergi*. Tratto da About Beccs Stockholm: <https://www.stockholmexergi.se/en/bio-ccs/>

United Nations Climate Change. (s.d.). *United Nations Climate Change*. Tratto da What is the Kyoto Protocol ?: https://unfccc.int/kyoto_protocol

United Nations Climate Change. (s.d.). *United Nations Climate Change*. Tratto da Wha is the Paris Agreement ?: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>

Zero C02. (2024, Dicembre 13). *Zero C02*. Tratto da Esplorando il Carbon Market: dove e come comprare crediti di carbonio: <https://zeroco2.eco/it/magazine/sostenibilita-aziendale/carbon-market-come-funziona/>