



**Harnessing the potential of
biological CO2 capture for the
Circular Economy**



Co-funded by the
European Commission
within the Horizon 2020
programme

Report:

CooCE Handbook methodologies and tools

Italian version/ Versione italiana

Project information

Project Acronym	CooCE
Full Title	Harnessing potential of biological CO2 capture for Circular Economy
Project Number	327331
Grand Agreement Number	691712
Programme	ACT3 - Accelerating CCS Technologies
Start date	07/10/2021
Kick Off Meeting	29/11/2021
Website	https://cooce.eu/
ACT Project Officer	Ragnhild Rønneberg
Project Manager	Prof. Tomas Morosinotto
Project Administrator	Prof. Luigi Bubacco

This project is part of the ACT - Accelerating CCS Technologies supported by the Research Council of Norway, Research and Innovation programme

Document information

Deliverable	Handbook CooCE methods and tools
Work Package:	WP5
Issue date:	31 December 2024
Due date:	30 November 2024
Nature:	R – Report
Dissemination level:	PU - Public
Lead Beneficiary:	Imperial College
Main authors:	Rocio Diaz-Chavez, Yara Evans, Sara Giarola, Pablo Basterrechea, Ioannis Zacharopoulos, Laura Treu, Maria Silvia Morlino, Maria Gaspari, Bettina Müller, Isabella Porqueddu and Sara Agostini
Reviewer(s):	

Document history

Version	Date	Responsible	Changes
1.0	20/11/2024	Rocio Diaz-Chavez	

LEGAL NOTICE

Neither the Research Council of Norway Foundation nor any person acting on behalf of the Foundation is responsible for the use, which might be made, of the following information. The views expressed in this report are those of the authors and do not necessarily reflect those of the Research Council of Norway Foundation.



Department for
Energy Security
& Net Zero

UK participants in ACT ERA-NET COFUND Horizon 2020 Project (CooCE) GA. 691712 is supported by The Department for Energy Security and Net Zero (DESNZ) grant number 415000049187 (Imperial College London). Project CooCE is funded by the European Union under Horizon H2020 Grant Agreement No. 691712. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or DESNZ. Neither the European Union nor DESNZ can be held responsible for them.

Sommario

Abbreviazioni	4
1. Il kit di strumenti	5

Abbreviations

ACRONYM	DEFINITION
BioSA	Biosuccinic Acid
CCUS	Carbon Capture, Use and Storage
CH ₄	Methane/Biomethane
CNG	Compressed Natural Gas
CO ₂	Carbon Dioxide
IC	Imperial College London
EOR	Enhanced Oil Recovery
EU	European Union
EUBCE	European Biomass Conference and Exhibition
EU ETS	EU Emissions Trading Scheme
HRS	Heat recovery steam generator
H ₂	Hydrogen
LNG	Liquefied Natural Gas
Net Zero	Commitment to reaching net zero carbon emissions by 2050
PHA	Polyhydroxyalkanoates (polymers)
R&D	Research and Development
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats
TRL	Technological Readiness Level
T&S	Transport and Storage
WP	Work Package

1. Il kit di strumenti

L'obiettivo di questo rapporto è quello di presentare il **Manuale** di CooCE sotto forma di Toolkit . L'obiettivo è quello di presentare in forma rapida i metodi, gli strumenti e i processi chiave utilizzati per i diversi percorsi della piattaforma CooCE. Il toolkit ha lo scopo di consentire agli attori industriali e ad altre parti interessate di definire la fattibilità e le procedure per la produzione dei principali prodotti nell'ambito del concetto CooCE.

Il toolkit presenta anche i risultati chiave del progetto CooCE come parte dei suoi obiettivi di sfruttamento. Il manuale o toolkit affronta nove argomenti principali per un rapido accesso da parte degli utenti per valutare le proprie attività relative all'economia circolare e le possibilità di utilizzare l'anidride carbonica catturata da diverse fonti, in questo caso gli impianti di biogas. Ogni argomento contiene una serie di collegamenti in tempo reale che consentono all'utente di accedere a vari documenti all'interno della pagina web di COOCE e di altra letteratura pertinente.

Gli argomenti presentati sono:

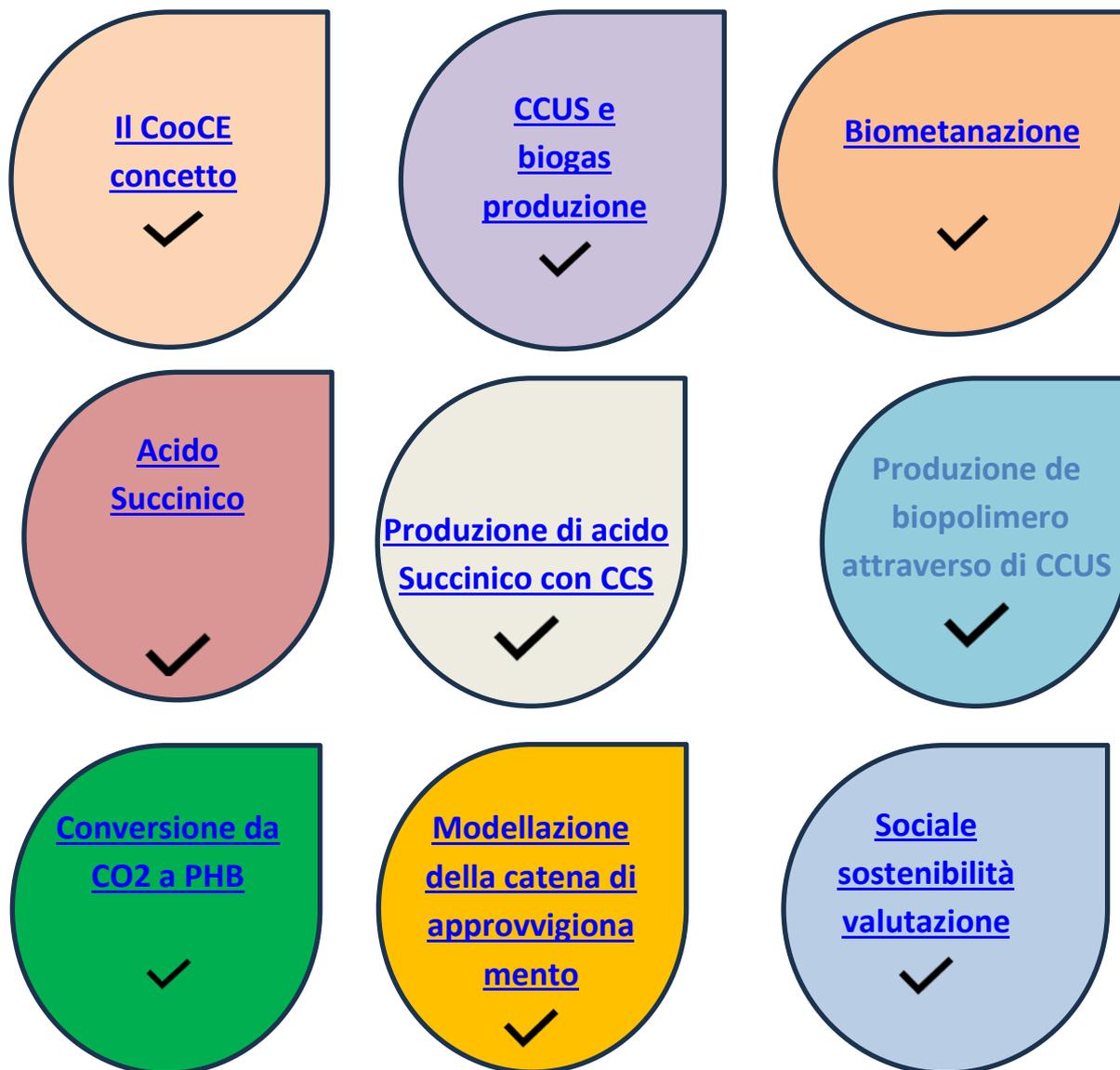
1. Il concetto di CooCE
2. CCUS e produzione di biogas
3. Biometanazione
4. Acido succinico
5. Acido succinico con upgrade del biogas
6. Produzione di biopolimeri attraverso CCUS
7. Conversione circolare da CO₂ a PHB
8. Moderazione della catena di approvvigionamento
9. Valutazione della sostenibilità sociale

Il manuale/toolkit non intende sostituire le descrizioni complete dei metodi, ma è invece inteso a fornire un accesso facile e immediato a una varietà di metodi, informazioni e risorse.

Ogni sezione presenta riferimenti e collegamenti. Il manuale è disponibile anche in greco, italiano e danese.

Facendo clic su ciascuna sezione, l'utente può accedere direttamente a quella sezione e facendo clic su toolkit si ritorna alla pagina di tutte le sezioni.

TOOLKIT



Il concetto COOCE

[Toolkit](#)

Il concetto CooCE mira a contribuire alla transizione verso un'economia efficiente nelle risorse, a basse emissioni di carbonio e resiliente ai cambiamenti climatici. Lo farà offrendo alle industrie un modo per decarbonizzare le proprie operazioni tramite un portafoglio di diverse e flessibili tecnologie CCUS, che possono anche aiutare a ridurre la dipendenza dalle risorse fossili. Le tecnologie CCUS trasformano il CO₂ in prodotti o materiali commerciali di valore (ad esempio, materiali da costruzione, carburanti, prodotti chimici e plastiche) o in materie prime per ulteriori lavorazioni industriali. Nel concetto CooCE, il CO₂ viene convertito in bioprodotto (finali o intermedi) utilizzando diverse tecnologie CCUS (Figura 1), descritte come segue.

Il biometano ad alta purezza (CH₄ > 95%) viene ottenuto dalla idrogenazione del CO₂. Questa tecnologia consente una storage ibrida dell'energia in loco: valorizza l'eccesso di energia rinnovabile in idrogeno e genera biometano. Il biometano può essere utilizzato sia come liquido (equivalente al GNL e che può fornire un'alternativa utile per il trasporto marittimo) sia come gas compresso (equivalente al CNG), che può essere utilizzato nella maggior parte dei veicoli e può essere iniettato nella rete del gas naturale.

L'acido biosuccinico (BioSA) viene ottenuto dalla fermentazione del biogas insieme a una materia prima ricca di carboidrati (tipicamente proveniente da flussi di rifiuti). Questa tecnologia eliminerebbe la necessità di utilizzare materie prime biologiche e eviterebbe l'uso del terreno per la coltivazione. Il BioSA sostituisce facilmente l'acido succinico derivato dai combustibili fossili. L'acido succinico viene utilizzato per la produzione di numerosi beni nelle industrie chimiche, alimentari, agricole e farmaceutiche. La sua domanda proviene dalle industrie della cura personale, delle bevande, del poliuretano e delle bioplastiche.

I biopolimeri (PHA) vengono ottenuti tramite tecnologie bio-catalitiche (basate su *Cupriavidus necator* e *Synechocystis*) che utilizzano flussi di rifiuti ricchi di carbonio, come il biogas. Questi biopolimeri si accumulano come materiali di riserva all'interno delle cellule dei microrganismi, fungendo sia da riserva di carbonio che di energia. I PHA hanno caratteristiche simili a quelle delle plastiche comuni. Inoltre, sono biocompatibili e biodegradabili. Vengono prodotti su scala industriale per molti prodotti, come bioplastiche per imballaggi, composti prebiotici e nutrizionali per applicazioni mediche e bio-creme per cosmetici.

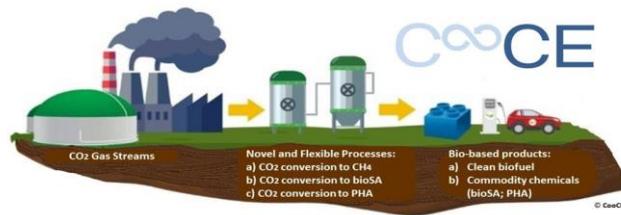


Figure 1 The CooCE Concept

References/Links

CooCE. 2024. Harnessing potential of biological CO₂ capture for Circular Economy.

<https://cooce.eu/>

CCUS e produzione di biogas

[Toolkit](#)

Il Panel Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici (IPCC) (2014) ha dichiarato che il mondo deve raggiungere emissioni nette di gas serra pari a zero entro la metà del secolo e emissioni nette negative poco dopo, per mitigare le gravi conseguenze del riscaldamento climatico. Pertanto, attività come il riciclo del CO₂ contribuiscono a ridurre le emissioni antropogeniche, in quanto il CO₂ emesso viene catturato e convertito in sostanze chimiche, combustibili o materiali di valore. Poiché il CO₂ è utilizzato come materia prima in diverse industrie, le aziende sono interessate al CO₂ biogenico, una fonte di CO₂ a basso impatto ambientale.

Il CO₂ biogenico è il diossido di carbonio (CO₂) risultante dalla decomposizione, digestione o combustione della biomassa o dei prodotti derivati dalla biomassa. Fa parte del "ciclo del carbonio naturale a breve termine". Questo CO₂ atmosferico viene assimilato dalla biomassa attraverso la fotosintesi, quindi restituito, come CO₂ biogenico, all'atmosfera o al suolo, a seconda del tipo di conversione e dell'uso finale della biomassa. Secondo l'Associazione Europea della Biomassa (EUBA, 2022), non c'è accumulo di CO₂ nell'atmosfera durante il ciclo del carbonio naturale a breve termine, mentre la combustione del carbonio fossile, immagazzinato sottoterra e precedentemente inaccessibile, rilascia ulteriore CO₂ nell'atmosfera.

Le fonti di CO₂ biogenico includono: la combustione di combustibili biomassa solidi, liquidi e gassosi, la fermentazione del bioetanolo, la produzione di vino e birra e il processo di upgrading del biogas nell'industria del biogas, come nel caso di CooCE.

CO₂ sources: biogas & exhaust gasses



Figura 1. Esempi di fonti di CO₂ nel progetto CooCE.

Sono state adottate diverse misure di mitigazione per ridurre le emissioni di gas serra (GHG), come la riduzione dell'uso di combustibili fossili (inclusi carbone e gas naturale), il miglioramento dei carburanti per il trasporto con biocarburanti, l'abbandono dell'uso di combustibili fossili nel settore dei trasporti, la riduzione delle emissioni dal settore industriale e la riduzione della deforestazione e delle emissioni dall'agricoltura, tra le altre.

Alcuni degli approcci più recenti includono forme alternative di riduzione della CO₂ atmosferica utilizzando tecnologie come la cattura e stoccaggio del carbonio (CCS), la cattura e utilizzo del carbonio (CCU), e la cattura, utilizzo e stoccaggio del carbonio (CCUS), come quella utilizzata nel progetto CooCE. Di seguito sono riportate alcune definizioni dalla European Biomass Association (EUBA, 2022):

- Carbon Capture and Utilisation o CCU: soluzioni che prevedono la cattura della CO₂ per il suo utilizzo come materia prima nella produzione di combustibili, prodotti chimici e materiali. Utilizzando CO₂ biogenica, fonti di energia a basse emissioni di carbonio o rinnovabili, queste soluzioni possono sostituire i loro equivalenti fossili e ridurre così le emissioni nette di diossido di carbonio nell'atmosfera. Queste soluzioni sono denominate "bio-CCU" e coinvolgono i principi dell'economia circolare del carbonio sostenibile, poiché includono la riduzione, il riutilizzo, il riciclo e la rimozione della CO₂.
- Bio-Carbon Capture and Storage o bio-CCS: si verifica quando la CO₂ biogenica viene catturata e immagazzinata permanentemente sotto terra, sotto forma di stoccaggio geologico, come nei giacimenti di gas esauriti o nelle falde saline profonde; consente alla CO₂ di essere rimossa permanentemente dall'atmosfera.
- Bio-CCUS: si riferisce alla CO₂ biogenica immagazzinata a lungo termine in un nuovo prodotto, come materiale da costruzione o plastica. Questo utilizza la CO₂ biogenica per produrre nuovi materiali.

Quando si confrontano il CCU con CO₂ fossile e il CCU con CO₂ biogenica, come illustrato nel diagramma seguente (EUBA, 2022), emergono diversi vantaggi associati al CCU con CO₂ biogenica.



Figura 2. Confronto delle emissioni di CO₂ da fonti fossili e non fossili (EUBA, 2022)

Vantaggi

1. la fonte di CO₂ (fossile vs biogenica)
2. il prodotto o servizio che il prodotto a base di CO₂ sta sostituendo e la relativa riduzione delle emissioni consentita dall'uso della CO₂ biogenica
3. la durata dell'immagazzinamento del carbonio nel prodotto (temporaneo vs permanente)
4. l'efficienza energetica e l'impronta di carbonio nella conversione della CO₂ in altre molecole
5. la scala dell'opportunità per l'utilizzo della CO₂

Le possibilità di catturare la CO₂ e di essere utilizzate per altre catene di approvvigionamento e prodotti sono spiegate nel concetto CooCE. [L'Imperial College](#) ha contribuito a diversi *forum*

internazionali per spiegare questi concetti. Ulteriori [concetti e database sulla CCUS](#) sono disponibili sul sito web CooCE e sulle [politiche nazionali sulla CCUS](#).

Riferimenti e link

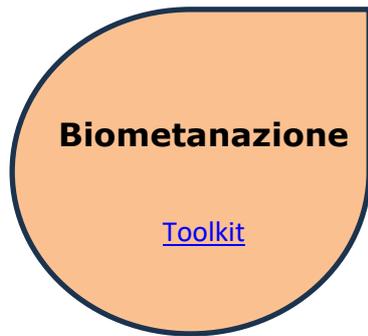
CooCE. 2024. Harnessing potential of biological CO2 capture for Circular Economy.

<https://cooce.eu/>

Diaz-Chavez R and Muller B. 2024. “Biogenic CO2 use and storage: Enhancing the circularity and climate benefits of biogas”. GBEP webinar. <https://www.youtube.com/watch?v=p6bSd3PISww&t=4s>

EUBA, 2022. EBA Statistical Report 2022. https://www.europeanbiogas.eu/_trashed-3/

International Panel on Climate Change (IPCC) (2014). <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>



CONDIZIONI OTTIMALI PER LA BIOMETANAZIONE EX-SITU IN CONTINUO

Il metano (CH_4) è un gas incolore e inodore, nonché il componente principale del gas naturale. Grazie alla sua ampia disponibilità e al suo elevato contenuto energetico, il metano è utilizzato in numerosi settori industriali. Le principali applicazioni includono la generazione di energia, dove viene bruciato nelle centrali elettriche per produrre elettricità, il riscaldamento in ambienti domestici, commerciali e industriali, e come carburante per i trasporti sotto forma di gas naturale compresso o liquefatto (CNG o LNG). Il metano può essere prodotto anche biologicamente convertendo anidride carbonica (CO_2) e idrogeno (H_2) in metano, un processo noto come "biometanazione". Questa conversione è facilitata da microrganismi anaerobici specializzati, noti come metanogeni idrogenotrofici. Il processo è definito ex-situ quando il CO_2 proviene da fonti esterne (ad esempio gas di scarico, biogas, syngas ecc.) e viene fornito con H_2 nella fase liquida del reattore.

Nel contesto del progetto CooCE, [ELGO-DIMITRA](#) ha guidato il [Work Package 2](#), che si è concentrato sullo studio del processo di biometanazione e sull'individuazione delle condizioni ideali. Questo studio è stato condotto utilizzando reattori anaerobici di piccola scala (a livello di laboratorio) con configurazione a letto a flusso continuo (Fig. 1). I reattori di questo tipo sono riempiti con materiali che permettono ai microrganismi di stabilirsi su di essi. Sono stati testati due materiali: pellet di carbone attivo e anelli Raschig in polietilene K1. I reattori sono stati valutati in base alla quantità di CH_4 prodotto quando la fornitura di gas veniva aumentata gradualmente, e anche quando la fornitura di gas veniva interrotta per 2-5 settimane. Nel primo caso, gli anelli Raschig K1 hanno funzionato meglio, raggiungendo una purezza di CH_4 del 95% a tutti i livelli di fornitura di gas testati (da 0,083L/Lreattore/h a 1L/Lreattore/h). Nel secondo caso, entrambi i materiali hanno funzionato bene anche dopo lunghi periodi senza substrato, tornando rapidamente alla purezza del 95% di CH_4 quando la fornitura è stata ripristinata.

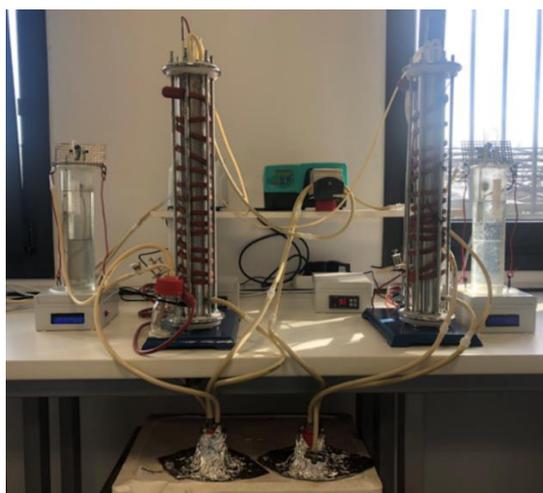


Figura 1. Impianto di bioreattori a scala di laboratorio

Inoltre, il processo di biometanazione è stato testato su scala maggiore utilizzando un reattore prototipo con un volume di lavoro di 100L (Fig. 2). Sulla base dei risultati ottenuti su piccola scala, sono stati scelti gli anelli di Raschig K1 per il reattore pilota. Tuttavia, lo studio ha evidenziato che il passaggio da esperimenti su piccola scala a quelli su larga scala non è sempre semplice. Quando si cercava di aumentare gradualmente la fornitura di gas come nei test di laboratorio, le prestazioni del reattore sono diventate instabili. Nonostante queste difficoltà, con un attento monitoraggio e aggiustamenti, il reattore è stato in grado di soddisfare e superare gli obiettivi di CooCE, raggiungendo una purezza del CH₄ superiore al 95% e catturando oltre 5 kg di CO₂ per m³ di reattore al giorno, soddisfacendo gli obiettivi del progetto.



Figure 2. Impianto del bioreattore su scala pilota

Riferimenti e link

<https://cooce.eu/hellenic-agricultural-organization-dimitra-elgo/>

<https://cooce.eu/oral-presentation-in-international-conference-by-gaspari-et-al-2023/>

<https://cooce.eu/seminar-at-summer-school-by-dr-kougias-in-2022/>

Acido Succinico

[Toolkit](#)

L'[Università Tecnica della Danimarca](#) (DTU) ha lavorato sull'acido succinico. L'acido succinico è un acido dicarbossilico con la formula chimica $(\text{CH}_2)_2(\text{CO}_2\text{H})_2$. Il suo nome deriva dalla parola latina *succinum*, che significa ambra, poiché storicamente veniva prodotto tramite distillazione di ambra. Oggi, tuttavia, l'acido succinico è principalmente derivato industrialmente da substrati a base petrolchimica e il principale processo per la sua produzione è l'idrogenazione dell'anidride maleica. Tuttavia, per raggiungere l'obiettivo di emissioni nette zero entro il 2050 stabilito dall'Unione Europea, c'è una necessità urgente di passare a metodi di produzione più puliti e meno intensivi in carbonio. Questo diventa ancora più importante se si considera che la domanda di acido succinico sta aumentando, con previsioni che lo vedono come un'industria da 200 milioni di dollari entro il 2026¹.

L'aumento della domanda di acido succinico è guidato dal suo ruolo di chimico di piattaforma e dalla vasta e diversificata gamma di applicazioni che possiede. Può essere utilizzato come precursore per produrre una vasta gamma di prodotti chimici industriali e come blocco costruttivo per bioplastiche, principalmente il succinato di polibutilene. Grazie alle sue proprietà come tensioattivo, l'acido succinico viene utilizzato come ingrediente nei detergenti ed è stato anche impiegato nell'industria alimentare come regolatore di acidità. Infine, grazie alle sue proprietà antinfiammatorie, ha trovato applicazioni nell'industria farmaceutica^{2,3}.

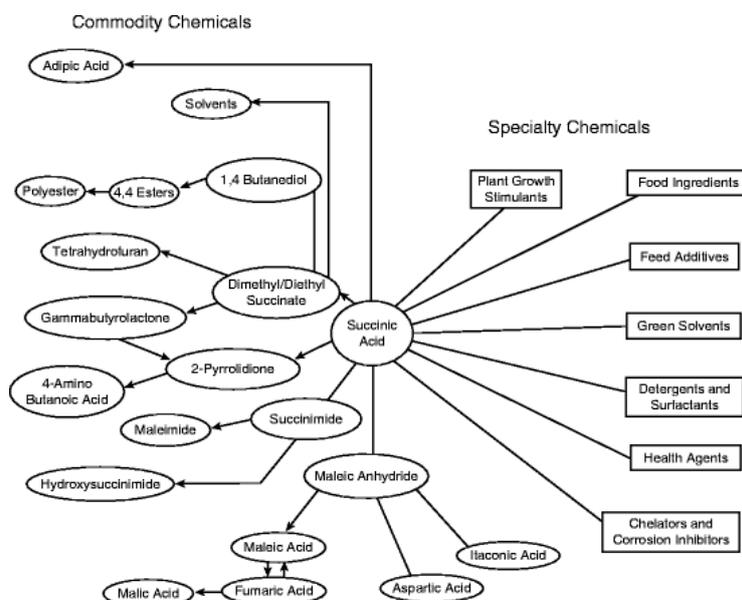


Figura 1: Applicazioni dell'acido succinico (Zeikus et al., 1999)

L'alternativa alla produzione di acido succinico basata sulla petrolchimica è l'uso di processi biologici come la fermentazione microbica. Il loro utilizzo comporta numerosi vantaggi: questi processi sono meno intensivi in termini di energia e carbonio rispetto ai processi che utilizzano substrati derivati dalla petrolchimica, i flussi di rifiuti possono essere utilizzati come substrati e il processo può essere incluso in un sistema di bioraffineria. La produzione microbica di acido succinico richiede il consumo di CO₂, rendendo il processo un eccellente metodo di sequestro del carbonio. Succinic acid is part of the tricarboxylic acid (TCA) cycle.

La maggior parte dei microrganismi capaci di produrre acido succinico ottengono questo risultato tramite il ciclo TCA inverso e quindi, anziché produrre CO₂, la consumano. Più precisamente, per ogni mole di acido succinico prodotto è necessaria 1 mole di CO₂, che viene di conseguenza catturata dal processo. Inoltre, maggiore è la concentrazione di CO₂, maggiore sarà il rendimento di acido succinico, poiché alte concentrazioni di CO₂ favoriscono il cambiamento metabolico verso la via dell'acido succinico, producendo meno di altri sottoprodotti di acidi organici come l'acido acetico e formico.^{4,5}

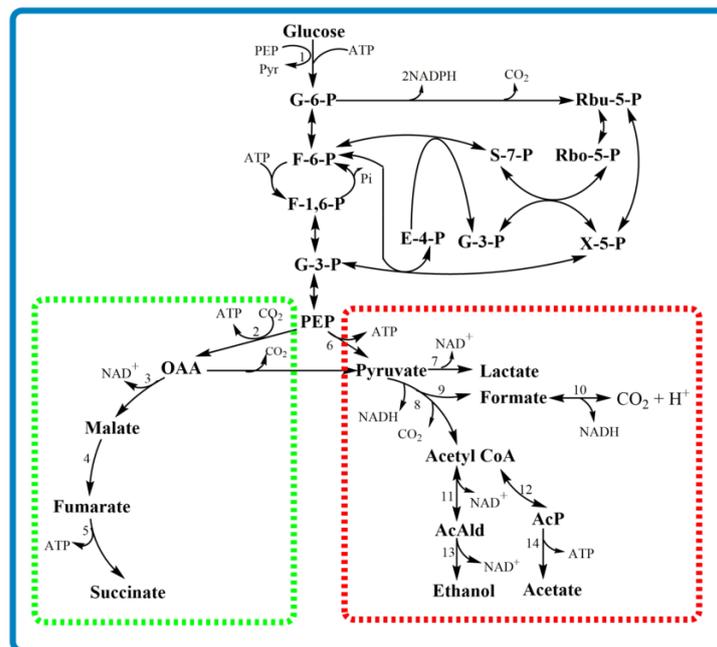


Figura 2: Via metabolica di *Actinobacillus succinogenes*, uno dei principali microrganismi produttori di acido succinico (Dessie et al., 2021)

La capacità di fissazione del carbonio di un processo di produzione di acido succinico è stata dimostrata essere superiore rispetto ad altri processi biologici di assimilazione del carbonio, come la coltivazione di alghe, e la sua combinazione con l'utilizzo di flussi di rifiuti come substrato di fermentazione potrebbe essere una soluzione per il tanto necessario spostamento verso una produzione di sostanze chimiche più sostenibile.

Riferimenti e link

1. Intelligence, M. *Succinic Acid Market - Growth, Trends and Forecasts (2019- 2024)*. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/succinic-acid-market> (2019).
2. Zeikus, J. G., Jain, M. K. & Elankovan, P. Biotechnology of succinic acid production and markets for derived industrial products. *Appl Microbiol Biotechnol* **51**, 545–552 (1999).
3. Saxena, R. K., Saran, S., Isar, J. & Kaushik, R. Production and Applications of Succinic Acid. in *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (eds. Pandey, A., Negi, S. & Soccol, C. R.) 601–630 (Elsevier, 2017). doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63662-1.00027-0>.
4. McKinlay, J. B. & Vieille, C. 13C-metabolic flux analysis of *Actinobacillus succinogenes* fermentative metabolism at different NaHCO₃ and H₂ concentrations. *Metab Eng* **10**, 55–68 (2008).
5. Dessie, W., Wang, Z., Luo, X., Wang, M. & Qin, Z. Insights on the Advancements of In Silico Metabolic Studies of Succinic Acid Producing Microorganisms: A Review with Emphasis on *Actinobacillus succinogenes*. *Fermentation* **7**, (2021).
6. Zhang, Q. *et al.* Carbon capture and utilization of fermentation CO₂: Integrated ethanol fermentation and succinic acid production as an efficient platform. *Appl Energy* **206**, 364–371 (2017).

**Produzione
de Acido succinico
con CCS**

[Toolkit](#)

L'acido succinico può essere prodotto biologicamente in quanto è uno dei principali metaboliti del ciclo degli acidi tricarbossilici (TCA), la principale via metabolica che i microrganismi utilizzano per produrre energia consumando una fonte di carbonio organico. Alcuni batteri, come *Actinobacillus succinogenes*, sono produttori naturali di acido succinico, in quanto lo producono e lo secernono in grandi quantità. La produzione di acido succinico avviene attraverso il ciclo inverso del TCA e, oltre al carbonio organico, è necessario il CO₂ per spostare la via metabolica verso la produzione di acido succinico, favorendo la sua produzione invece di quella di altri acidi organici, come l'acido acetico o formico. Inoltre, la produzione di acido succinico e il consumo di CO₂ avvengono in un rapporto molare 1:1, il che significa che questo processo è particolarmente adatto per essere utilizzato come tecnologia di cattura del carbonio ¹.

Un altro processo biologico con un grande potenziale economico e un impatto ambientale positivo è la digestione anaerobica, in cui una coltura mista consuma un substrato organico, producendo biogas (CH₄ e CO₂), una miscela che somiglia al gas naturale. Il biogas ha una composizione di circa il 55% di CH₄ e il 45% di CO₂. Tuttavia, affinché possa essere utilizzato come combustibile e iniettato nella rete del gas naturale, deve avere un contenuto di CH₄ superiore al 90%. Pertanto, il biogas deve essere aggiornato rimuovendo il CO₂ che contiene.

Guardando entrambi i processi, si evidenzia una chiara connessione tra di essi, e possono essere combinati sinergicamente, creando una piattaforma che produce sia chimici di valore che biocarburanti puliti. Il biogas proveniente da un'unità di digestione anaerobica può essere utilizzato come fonte di carbonio inorganico per la fermentazione dell'acido succinico, con il risultato della produzione sia di biometano di alta qualità che di acido succinico.

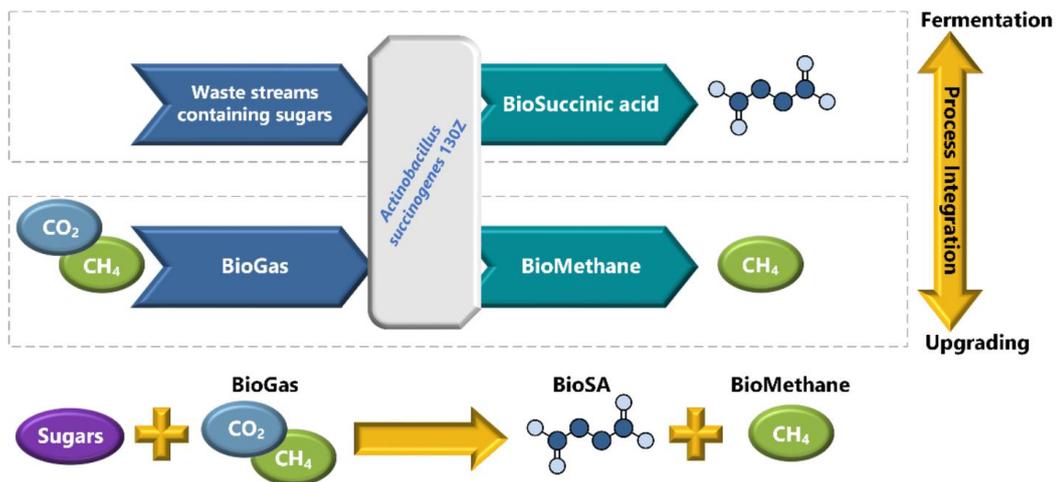


Figura 1: Schema del processo di produzione di acido succinico sviluppato al DTU

Per il processo sviluppato a la [Technical University of Demark \(DTU\)](#) su [WP3](#), viene utilizzato il flusso di scarto della produzione di caramelle. Il flusso di scarto è composto da tre zuccheri diversi, ossia glucosio, saccarosio e maltosio. Questo è un eccellente substrato per la fermentazione microbica per una serie di motivi. È principalmente composto da zuccheri, sui quali i batteri possono crescere naturalmente, senza la necessità di modifiche genetiche. Nonostante sia un flusso di scarto, non contiene sostanze tossiche che possano avere un effetto inibitorio sulla crescita della cultura batterica. Inoltre, essendo un flusso di scarto, ha un costo molto basso, riducendo il costo complessivo del processo, aumentando la sua sostenibilità e la sua redditività ².

L'alta quantità di acido succinico che *A. succinogenes* è in grado di produrre può rappresentare uno svantaggio, poiché concentrazioni elevate possono avere un effetto inibitorio sulla sua crescita e, di conseguenza, sulla resa e sulla produttività del processo. Per questa ragione, è stato incorporato nel processo un modulo di recupero elettrochimico in situ. Applicando un potenziale elettrico al sistema, l'acido succinico viene separato utilizzando una membrana a scambio anionico³.

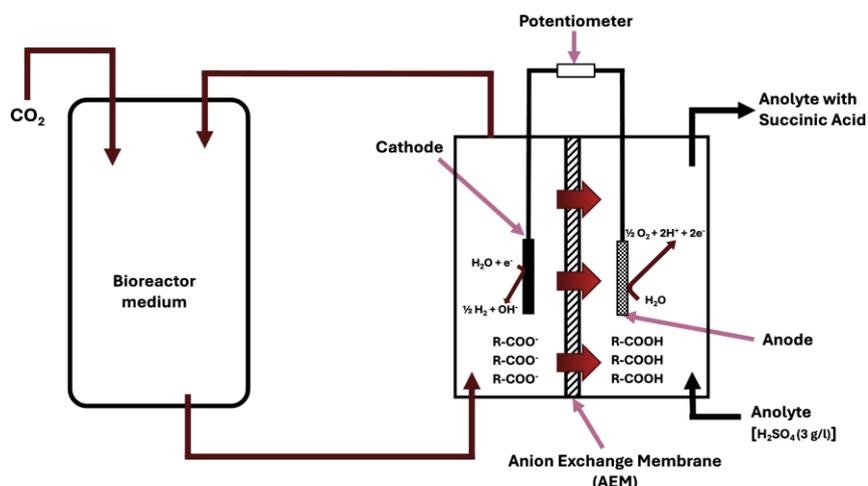


Figura 2: Schema del processo di recupero del prodotto in situ.

L'incorporazione di questo modulo nel processo può portare a numerosi vantaggi: rimuovendo l'acido succinico inibitore e altri sottoprodotti acidi organici, si ottiene un rendimento maggiore del processo. L'acido succinico viene separato in situ, riducendo i costi nella parte di processo a valle, che è un noto collo di bottiglia economico per la maggior parte dei bioprocessi⁴.

Questo processo, che incorpora sia l'aggiornamento del biogas che il recupero in-situ del prodotto, rappresenta una soluzione molto promettente per integrare la produzione di acido succinico in una bioraffineria di piattaforma chimica ed energetica, integrando un aspetto di cattura del carbonio, aumentando la sostenibilità ambientale e la fattibilità economica.

Riferimenti e link

1. McKinlay, J. B. & Vieille, C. ¹³C-metabolic flux analysis of *Actinobacillus succinogenes* fermentative metabolism at different NaHCO₃ and H₂ concentrations. *Metab Eng* **10**, 55–68 (2008).
2. Lithourgidis, A. A. *et al.* Bio-succinic acid production, up to pilot scale, by fermentation of industrial candy waste with *Actinobacillus succinogenes* 130Z and its downstream purification process. *J Environ Chem Eng* **11**, 110920 (2023).
3. Pateraki, C., Andersen, S. J., Ladakis, D., Koutinas, A. & Rabaey, K. Direct electrochemical extraction increases microbial succinic acid production from spent sulphite liquor. *Green Chemistry* **21**, 2401–2411 (2019).
4. Kumar, R., Basak, B. & Jeon, B.-H. Sustainable production and purification of succinic acid: A review of membrane-integrated green approach. *J Clean Prod* **277**, 123954 (2020).

Produzione di biopolimero attraverso CCUS

Toolkit

L'uso massiccio della plastica contribuisce notevolmente all'inquinamento e al riscaldamento globale, poiché la produzione si basa principalmente su fonti di carbonio e energia derivanti da combustibili fossili. Le plastiche contribuiscono direttamente all'emissione di gas a effetto serra (GHG) in ogni fase del loro ciclo di vita, dall'estrazione, raffinazione e produzione allo smaltimento. Inoltre, di solito sono non rinnovabili e non biodegradabili, quindi possono persistere negli ecosistemi per centinaia di anni, entrando nella catena alimentare e diventando infine anche una preoccupazione per la salute umana. I biopolimeri possono essere prodotti da piante (ad esempio amido e acido polilattico, PLA), animali (chitosano e chitina) e microrganismi (poliidrossialcanoati, PHA) o ottenuti attraverso il trattamento di risorse rinnovabili (ad esempio biomassa, residui agricoli e rifiuti industriali). L'adozione di biopolimeri può essere vantaggiosa per l'ambiente, tanto più se il processo di produzione si basa sul catturare il CO₂ come fonte di carbonio.

Tra gli obiettivi del progetto CooCE, la produzione di biopolimeri a partire dal CO₂ rappresenta un aspetto innovativo, contribuendo a chiudere il ciclo del carbonio, in un sistema circolare dove le emissioni di carbonio vengono riciclate in prodotti di valore. I biopolimeri sono prodotti naturalmente dagli organismi viventi, rendendoli disponibili per la produzione tramite fermentazione: conoscendo le condizioni di coltura appropriate, è possibile sfruttare il metabolismo degli organismi selezionati per massimizzare la produzione del biopolimero.

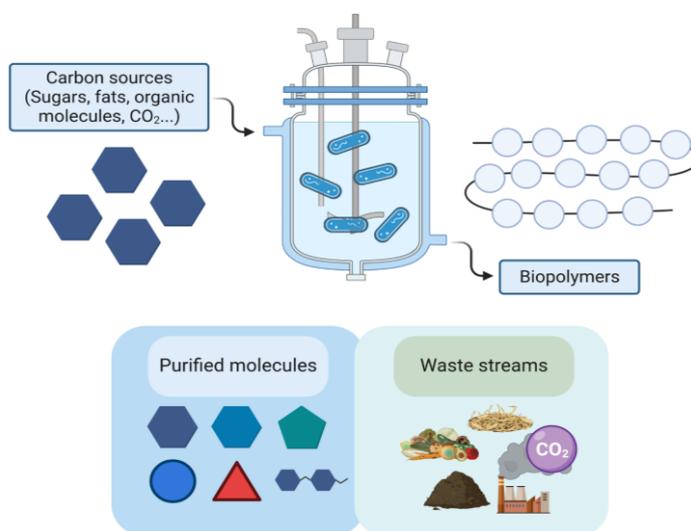


Figura 1. Rappresentazione schematica di un bioprocesso in cui i microrganismi convertono la fonte di carbonio fornita in un biopolimero. Le fonti di carbonio sono esemplificate nel pannello inferiore.

In un contesto di economia circolare, il carbonio contenuto nei flussi di rifiuti può essere utilizzato come fonte per la produzione di biopolimeri: questa è una strategia eccellente per ridurre i costi, offrendo al contempo una via per smaltire i flussi di rifiuti. In questa prospettiva, il CO₂ è una fonte ideale di carbonio a basso costo da sfruttare, in quanto è abbondante nei gas di scarico di molti processi industriali in settori che vanno dalla produzione di acciaio, ferro e cemento alla produzione di biocarburanti e incenerimento dei rifiuti. L'esistenza di microrganismi capaci di fissare simultaneamente il CO₂ e produrre biopolimeri apre la strada allo sviluppo di alternative per la cattura, l'utilizzo e lo stoccaggio del CO₂ (CCUS) che si basano su queste capacità metaboliche.

Le plastiche tradizionali dominano ancora molti settori industriali. Sono economiche, durevoli e possiedono diverse caratteristiche che le rendono ancora difficili da sostituire per le aziende. Tuttavia, il loro utilizzo è associato a problematiche che non sono più trascurabili e si rende urgentemente necessaria un'alternativa ambientalmente ed economicamente sostenibile. La crescente domanda di biopolimeri nel mercato proviene principalmente dal settore degli imballaggi e dalla produzione di articoli monouso, dove i biopolimeri rappresentano un'alternativa valida alle plastiche derivate da fonti fossili. Tuttavia, il PHB, che possiede le migliori caratteristiche in termini di biodegradabilità, rappresenta ancora una quota limitata a causa dei costi elevati, che dipendono fortemente dalla fonte di carbonio. Pertanto, lo sviluppo di una conversione economica del CO₂ in PHB rappresenta un'opportunità che risponderebbe alla crescente domanda di mercato e contribuirebbe a mitigare il cambiamento climatico.

Riferimenti/link:

- <https://cooce.eu/wp4/>
- <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/biopolymers-market-report>

Conversione da CO₂ a PHB

Toolkit

L'Università di Padova è coinvolta nel progetto CooCE con un [pacchetto di lavoro](#) focalizzato sulla bioconversione di CO₂ e flussi di rifiuti industriali in polidrossibutirrato (PHB), all'interno di una visione di economia circolare. La conversione della CO₂ in PHB viene realizzata utilizzando il batterio *Cupriavidus necator* e il cianobatterio *Synechocystis* sp. B12. Il PHB è un polimero altamente biodegradabile, con proprietà simili all'alternativa fossile più comune, il polipropilene. I microrganismi impiegati nella bioconversione producono PHB sotto forma di granuli intracellulari e sono in grado di utilizzare la CO₂ come unica fonte di carbonio. *C. necator* è in grado di immagazzinare alte quantità di biopolimero (fino al 70% del peso secco della cellula) e fissare la CO₂ in presenza di idrogeno e ossigeno. Tuttavia, le acque reflue ricche di zuccheri e acidi grassi volatili possono essere utilizzate per la crescita batterica, consentendo lo sviluppo di un processo flessibile. Il cianobatterio *Synechocystis* sp. B12 è un organismo fotosintetico, quindi necessita principalmente di luce solare, acqua e CO₂ per prosperare e non richiede substrati costosi che spesso rappresentano un grande costo per questo tipo di processi biologici, influenzando la loro scalabilità complessiva.

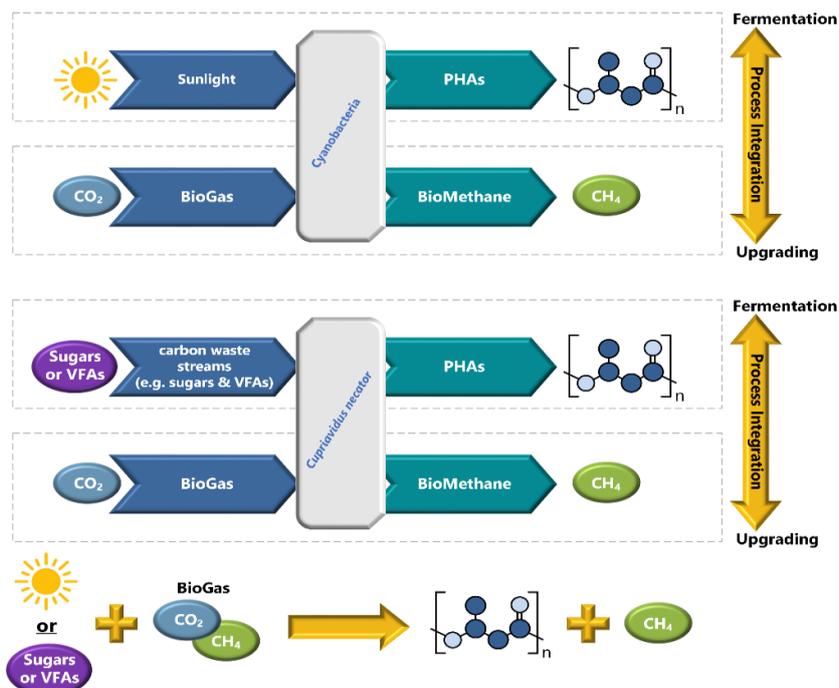


Figura 1. Diagramma di flusso dei bioprocessi per la conversione di CO₂ in PHB, ideato nel Pacchetto di Lavoro 4 di CooCE.

Pertanto, l'Università di Padova (UniPD) sta sviluppando due bioprocessi per la conversione di CO₂ in PHB, con l'ambizioso obiettivo di combinarli con la produzione di biogas: infatti, il biogas grezzo contiene una quantità significativa di CO₂ che può essere catturata e fissata in PHB, producendo biometano di alta qualità (>95% CH₄) che può essere iniettato nella rete del gas come equivalente del gas naturale. A tal fine, UniPD sta collaborando con [BTS Biogas Srl](#) per la fornitura di campioni reali di biogas, al fine di effettuare prove e simulazioni del processo. Inoltre, BTS supporta UniPD nello sviluppo del processo, partecipando alla progettazione dei sistemi necessari per la biocatalisi.



Figura 2. Bioreattori e fotobioreattori utilizzati per la produzione di PHB con *C. necator* (in alto a sinistra) e *Synechocystis* sp. B12 (in alto a destra). I campioni di PHB prodotti all'UniPD sono stati testati come laminati (in basso a sinistra) e sono in fase di sviluppo applicazioni per il packaging (in basso a destra).

Attualmente, l'UniPD sta ottimizzando i due sistemi di bioconversione a scala pilota con miscele di gas sintetici e sta dimostrando la fattibilità dell'integrazione con l'aggiornamento del biogas, con risultati promettenti riguardo all'applicabilità del biogas come fonte di CO₂.

L'aspetto cruciale per la bioconversione di CO₂ in PHA è la disponibilità di idrogeno, e il processo deve essere condotto, almeno nelle fasi iniziali, in presenza di un eccesso di idrogeno. Il metabolismo autotrofico di *C. necator* coinvolge anche l'ossigeno, pertanto le miscele di gas all'interno del reattore

si trovano nell'intervallo esplosivo per l'idrogeno. Per questi motivi, il design del reattore garantisce che la miscela di gas non entri in contatto con potenziali fonti di accensione, mentre i liquidi vengono atomizzati passando attraverso un ugello speciale che massimizza il trasferimento di massa gas-liquido.

Il bioprocesso di produzione di PHA accoppiato al miglioramento del biogas è previsto in cicli produttivi: il biogas grezzo entra nel sistema e vengono forniti H₂ e O₂ per consentire la fissazione della CO₂ in granuli di bioplastica. Il metano non viene utilizzato dalla coltura batterica; di conseguenza, viene purificato mentre le cellule batteriche accumulano PHA. Alla fine del processo, quando si raggiunge il consumo completo di CO₂, H₂ e O₂, il brodo di coltura ricco di PHA e il biometano migliorato vengono raccolti dal reattore, e un nuovo ciclo può iniziare (Figura 3).

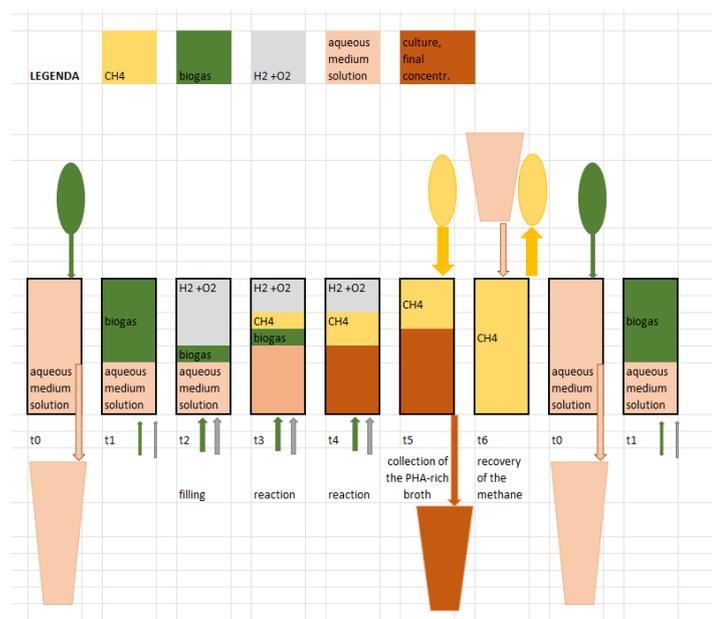


Figura 3. Bioprocesso

I gas sono stati forniti secondo la seguente stechiometria per la produzione autotrofa di PHB:

$$33 \text{ H}_2 + 12 \text{ O}_2 + 4 \text{ CO}_2 \rightarrow \text{C}_4\text{H}_6\text{O}_2 + 30 \text{ H}_2\text{O}$$

Riferimenti e link

<https://cooce.eu/bts-biogas-s-r-l/>

<https://cooce.eu/oral-presentation-in-international-conference-by-morlino-et-al-2024-mary-dk/>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852424007727?via%3Dihub>

<https://cooce.eu/oral-presentation-in-international-conference-by-collura-et-al-2023/>

<https://bts-biogas.com/en/>

Modellazione della catena di approvvigionamento

[Toolkit](#)

[IMPERIAL](#) ha contribuito al progetto CooCE con il [WPS](#) di valutazione della sostenibilità. La valutazione della sostenibilità includeva la valutazione ambientale, sociale, tecnico-economica e politica.

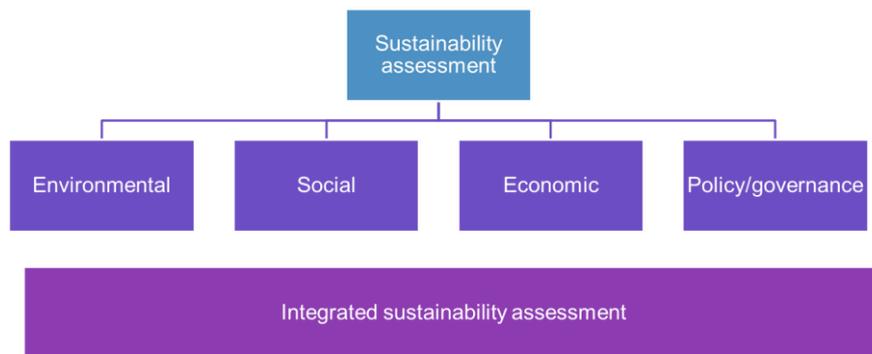


Figura 1. Valutazione della sostenibilità condotta da Imperial.

La valutazione ambientale e tecnico-economica si basano sulla modellazione delle catene di approvvigionamento e sulla valutazione del ciclo di vita per ottimizzare le catene di approvvigionamento considerando diversi fattori. L'approccio alla modellazione delle catene di approvvigionamento include due sezioni:

- **La Sezione del Processo Chimico:** In questa parte della modellazione, è stata sviluppata una simulazione di una pianta su scala industriale per il processo chimico specifico in esame. Questo ha permesso di ottenere una varietà di informazioni utili sul processo, come bilanci di massa, bilanci energetici, valutazioni economiche, ecc.
- **La Sezione di Modellazione della Supply Chain:** La modellazione effettiva riguardante le diverse fasi della supply chain che ci si aspetta durante il ciclo di vita del processo. Questo include l'acquisizione delle materie prime, la vendita dei prodotti, le fasi di trasporto, ecc. I risultati ottenuti dalla Sezione del Processo Chimico sono stati utilizzati anche qui, poiché la produzione chimica è una parte integrante della supply chain.

Questo approccio complessivo è applicato per le diverse tecnologie studiate nel progetto [CooCE](#): biometanazione, produzione di acido succinico biologico e produzione di biopolimeri, sebbene la

struttura della modellazione venga adattata alle peculiarità di ciascun caso. La Figura 2 mostra il processo seguito per la valutazione ambientale e tecnico-economica.

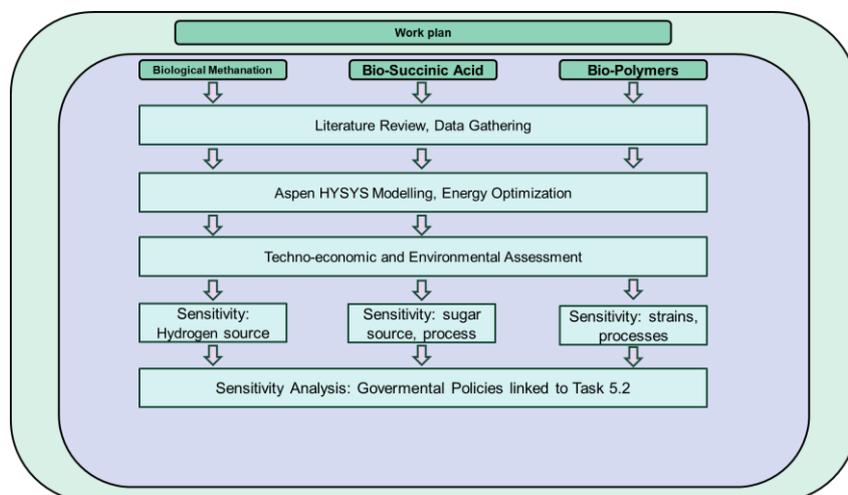


Figura 2. Processo seguito nel WP5 per la valutazione delle catene di approvvigionamento

A) Sezione del Processo Chimico

La sezione del Processo Chimico consiste in un modello matematico che simulerà il funzionamento interno di un impianto industriale su scala del processo studiato. Questo fornirà quanto segue:

- **Viabilità Tecnologica:** L'implementazione del modello aiuterà a definire i limiti tecnologici del progetto iniziale dell'impianto, portando a uno schema finale più affinato per il processo.
- **Balance di Massa:** Quantità totali di materie prime consumate e prodotti generati, così come le utilità utilizzate nell'impianto, come vapore o acqua refrigerata.
- **Balance Energetico:** Quantità totale di energia consumata nell'impianto, sia sotto forma di elettricità proveniente dalla rete (o da fonti alternative) sia come utilità sotto forma di scambio termico.
- **Ottimizzazione Energetica e Analisi Pinch:** A seconda del design complessivo del processo, potrebbe essere possibile utilizzare l'analisi pinch per ottimizzare la rete di scambiatori di calore impiegata nell'impianto, con conseguenti costi economici e impatti ambientali inferiori.
- **Valutazione Economica:** Una valutazione economica dell'impianto include il costo di acquisto e installazione delle attrezzature, nonché i costi operativi per un determinato periodo di tempo, inclusi i costi energetici, gli stipendi dei dipendenti, la manutenzione, ecc. Questo può essere esteso per includere i costi di progettazione e legali, nonché per adattare questi valori in base alla posizione dell'impianto.

A causa delle complessità nello sviluppo di questo modello, non è stato codificato direttamente a mano, ma è stato utilizzato uno dei tanti simulatori professionali di processi chimici disponibili sul mercato. Ognuno di questi simulatori può presentare alcune difficoltà, ma in generale dovrebbe essere in grado di completare i compiti precedenti. Nel caso del progetto CooCE, è stata utilizzata la suite Aspen (Aspen HYSYS, Aspen Energy Analyzer, Aspen Process Economic Analyzer, ecc.).

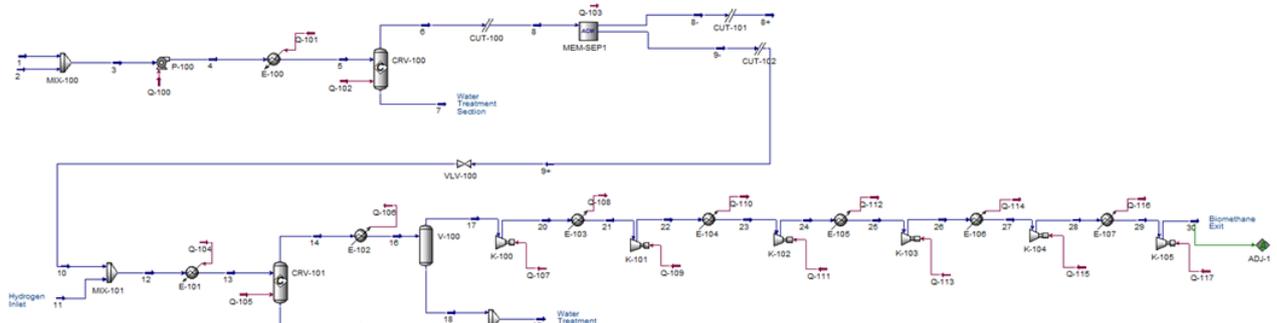


Figura 3. Modello Aspen HYSYS del processo di Biometanazione.

B) Sezione di Modellazione della Catena di Fornitura

Il Modello della Catena di Fornitura è una rappresentazione matematica del ciclo di vita studiato, e include una serie di nodi:

- **Fornitori:** Nodi che rappresentano i fornitori di materie prime / materie prime necessarie come punto di partenza del processo.
- **Centri di Produzione:** Nodi che rappresentano i luoghi in cui le materie prime vengono trasformate tramite processi chimici nei prodotti raffinati che saranno commercializzati. Definiti dal Modello del Processo Chimico.
- **Clienti:** Nodi che rappresentano la destinazione finale a cui i prodotti arriveranno, ricevendo il relativo ricavo.

Questi nodi sono definiti utilizzando coordinate geografiche e una serie di variabili dipendenti dalla posizione. I nodi sono connessi tramite linee di trasporto, che possono essere classificate in due:

- Quelle che connettono i fornitori e i centri di produzione, corrispondenti al trasporto delle materie prime.
- Quelle che connettono i centri di produzione e i clienti, corrispondenti al trasporto dei prodotti.

Una volta completato il modello e fornite tutte le informazioni e gli input necessari, la catena di approvvigionamento sarà ottimizzata sia per la redditività economica che per la sostenibilità ambientale. Questo modello deve essere sviluppato utilizzando un programma commerciale già disponibile. Esistono diverse opzioni, ma in questo caso, è stato utilizzato AIMMS per implementare il modello. La Figura 4 mostra la mappa di una catena di approvvigionamento ottimizzata generata da AIMMS.

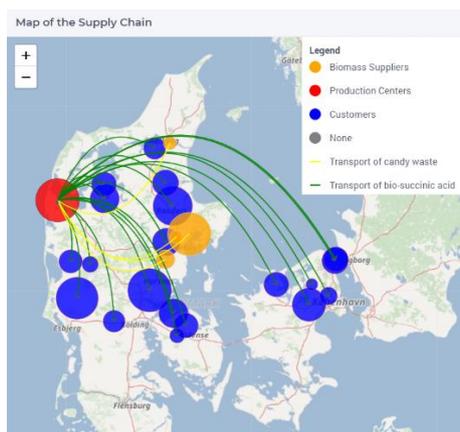


Figura 4. Mappa di una catena di approvvigionamento ottimizzata generata da AIMMS.

I risultati della valutazione di sostenibilità sono nella sezione dei deliverable del sito web del progetto CooCE.

Inoltre, come parte delle attività di formazione di CooCE, Imperial ha sviluppato un'app. Questa applicazione consente di valutare le opzioni per valorizzare il biogas. L'app contiene tre tutorial che permettono all'utente di modificare i dati della capacità in un impianto di biogas e rivedere le modifiche che essa produce nei flussi di cassa, nel tempo di recupero dell'investimento e in altri parametri. Questa app può essere accessibile tramite il codice QR sottostante:



IMPERIAL APP FOR TRAINING

Figura 5. App utilizzata durante la formazione CooCE

Riferimenti e link

[Aspen HYSIS](#) website

CooCE. 20224. Harnessing potential of biological CO₂ capture for Circular Economy.

<https://cooce.eu/>

ISO. 2006. International Standard Organisation, SS-EN ISO 14044, Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines, ISO.



Svolgere una valutazione della sostenibilità sociale: il caso di CooCE

La valutazione della sostenibilità che affronta gli impatti ambientali, economici e sociali è diventata una pratica consolidata e obbligatoria per le nuove tecnologie che coinvolgono i bioprocessi, e deve essere valutata lungo l'intera catena del valore.

[Imperial](#) ha lavorato nel [WPS](#) sulla valutazione della sostenibilità sociale. Ciò comporta la valutazione degli impatti sociali ed economici delle politiche, dei progetti o delle pratiche. È stata sviluppata una varietà di metodologie e framework per la valutazione della sostenibilità sociale, inclusa la Social Life Cycle Assessment (SLCA), che si basa sulla Life Cycle Assessment (LCA). LCA valuta gli impatti ambientali potenziali di un prodotto o di un processo, fornendo informazioni sull'efficienza della produzione e individuando aree di miglioramento. Copre tutte le fasi del ciclo di vita di un prodotto, tra cui l'estrazione delle materie prime, la lavorazione, il trasporto, l'uso e lo smaltimento. Tuttavia, mentre LCA implica la raccolta di dati sul prodotto principale e sull'intero ciclo di vita di tutti i materiali coinvolti nella sua produzione, SLCA richiede la raccolta di dati aggiuntivi relativi agli aspetti organizzativi e sociali lungo tutta la catena di approvvigionamento. SLCA può anche essere combinata con la Social Impact Assessment (SI) per fornire una valutazione più completa e robusta (Diaz-Chavez, 2014). La Figura 1 mostra un campione di questioni sociali, economiche e politiche che possono essere valutate in termini di impatti. La Figura 2, a sua volta, mostra come queste siano interrelate.

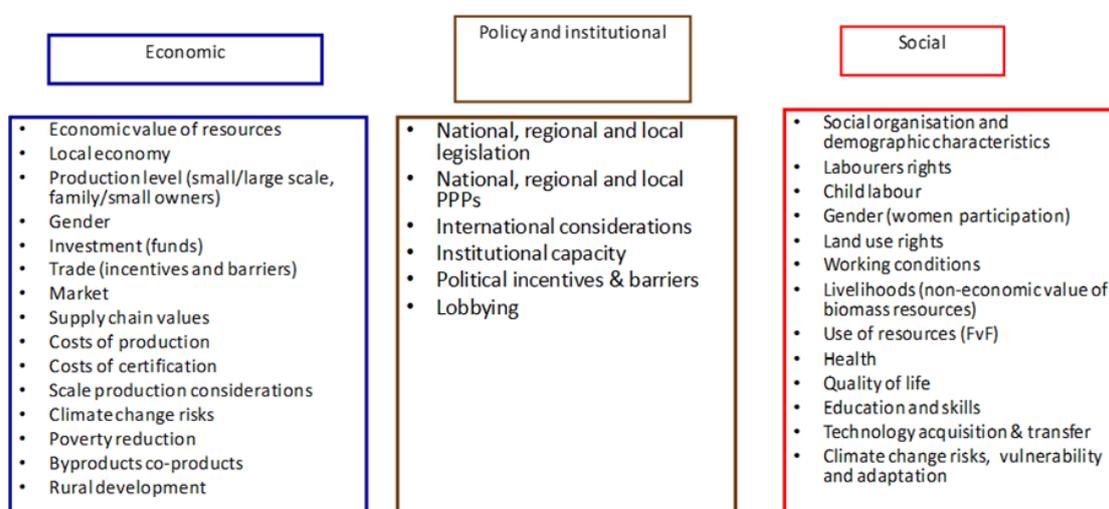


Figura 1: Questioni per la valutazione degli impatti (Diaz-Chavez, 2014).



Figura 2: Analisi di un sistema di prodotto con SLCA e SIA (Diaz-Chavez, 2014).

La valutazione della sostenibilità sociale di CooCE è stata effettuata utilizzando un approccio composito sviluppato da Diaz-Chavez (2014), che combina elementi di SLCA e SIA e viene applicato a una serie di parametri tematici per la valutazione attraverso indicatori quantitativi e qualitativi. In CooCE sono stati esaminati un totale di 11 parametri. Essi sono: Commercio di materie prime; Identificazione degli stakeholder; Politiche e normative; Punto di emissione di CO₂; Partecipazione della comunità; Sviluppo rurale e infrastrutture; Creazione di posti di lavoro e salari; Parità di genere; Condizioni di lavoro; Salute e sicurezza; e Competizione con altri settori.

La Figura 3 illustra i parametri per la mappatura degli stakeholder, i criteri e altre specifiche. La Figura 4 illustra l'approccio per la mappatura degli stakeholder, mentre la Figura 5 mostra la sua applicazione alla Grecia, uno dei paesi in cui le biotecnologie CooCE sono in fase di sviluppo.

Tabella 1 Parametri Stakeholder

Parameter	Characteristics/ criteria	Assessment Level	Supply chain stage	Data type and source
Identification of stakeholders along the supply chain	Associations Authorities/regulators Businesses CO ₂ emitters Investors Researchers etc	National Local	All	<i>Qualitative</i> Desk search Research Partners <i>Quantitative</i> Survey

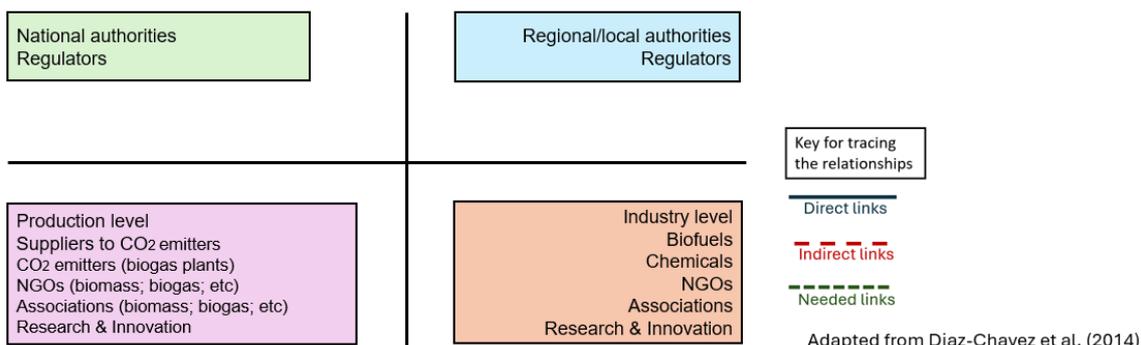


Figura 4 Matrice per la Mappatura degli Stakeholder

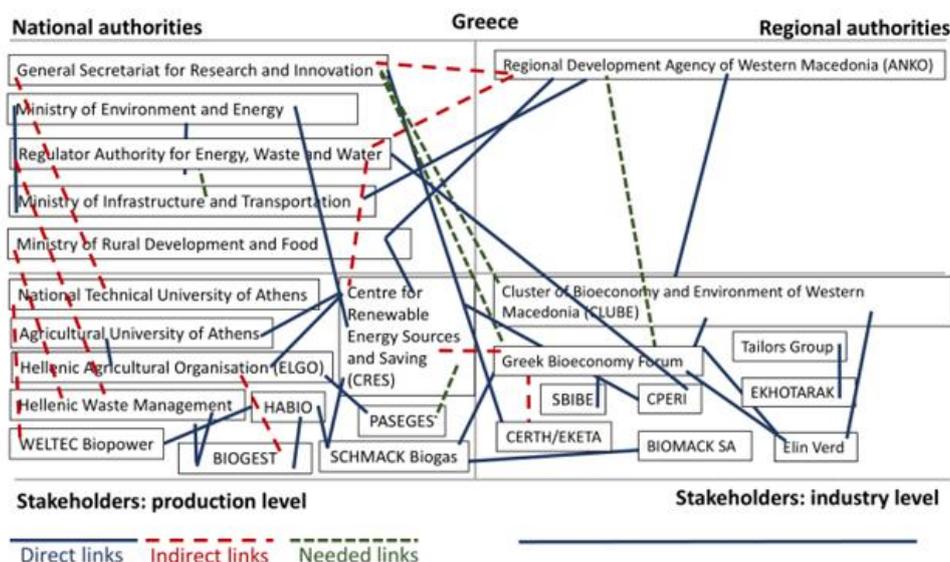


Figura 5 Stakeholder Mappati

Una varietà di indicatori può essere utilizzata per abilitare la valutazione sociale, tratti da database reputati o anche da strumenti per SLCA. La Tabella 1 illustra gli indicatori e i dati dal Social Hotspot Database, uno strumento per la Valutazione del Ciclo di Vita Sociale (SLCA), per il parametro Condizioni di Lavoro.

Tabella 2 Rischi Relativi alla Forza Lavoro

<i>CooCE countries/ Sectors</i>	<i>Chemicals/plastics</i>	<i>Electricity</i>	<i>Gas</i>	<i>Transportation</i>	<i>Water</i>
Overall country-sector risk of child labour					
Denmark, Italy, UK	L	L	L	L	L
Greece	M	M	M	M	M
Overall country-sector risk of forced labour					
Denmark	M	L	L	M	L
Greece	H	H	H	H	H
Italy	M	M	M	M	M
UK	L	L	L	L	L
Risk of trafficking in persons					
Denmark, Greece, Italy	M	M	M	M	M
UK	L	L	L	L	L

Source: SHDB (2024) Key: L= low; M=Medium; H=High; VH= Very High; ND= No Data; risk level colour is as used in the SHDB

Una varietà di indicatori può essere utilizzata per abilitare la valutazione sociale, tratti da database reputati o anche da strumenti per SLCA. La Tabella 1 illustra gli indicatori e i dati dal Social Hotspot Database, uno strumento per la Valutazione del Ciclo di Vita Sociale (SLCA), per il parametro Condizioni di Lavoro.

Tabella 2 Rischi Relativi alla Forza Lavoro

<i>Impact</i>	<i>Type</i>	<i>Evaluation</i>
Direct	D	Where the project itself produces the impact
Background	B	Where local conditions influence implementation of the project
Positive	+	Project likely to produce a benefit
Negative	-	Project likely to produce impact that will not be of social benefit to country/local community
Neutral	N	Project produces no impact at all

<i>Risk</i>	<i>Benefit</i>	<i>Type</i>	<i>Evaluation</i>
L	L	Low	According to the data and indicators examined, and the likelihood of a problem emerging in the future even where the impact was assessed as positive
M	M	Medium	
H	H	High	
VH	VH	Very High	

La Matrice di Valutazione della Sostenibilità Sociale fornisce quindi una panoramica dei principali impatti socio-economici, dei rischi e dei benefici associati all'implementazione di CooCE, insieme a raccomandazioni per mitigare gli impatti negativi e i rischi elevati. La Tabella 1 mostra i risultati per un parametro.

Tabella 4 Matrice di Valutazione della Sostenibilità Sociale

Parameter	Characteristics/Criteria	Type	Impact	Risk	Benefit	Actions/Mitigation	Observations
Policies and regulations	International National	B	- +	M	VH	Ensure stable, coherent, and interconnected policies for energy, transport, and platform biochemicals to encourage investment in the CooCE concept; devise policies specific to CCUS; amend existing EU policy instruments (e.g. <i>CEAP, CRCF, ETS-I, FuelEU Maritime, PWD, RED III, TEN-E, WDF</i>); advocate for policies that support the circular economy and prioritise the use of captured CO ₂ to reduce competition with other CO ₂ sources	Extensive EU policy framework for energy, transport and platform biochemicals but many gaps (no specific legislation for CCUS nor bioproducts obtained through it); normative instruments need to be transposed properly/timely by member states to enable and support the scaling up of CooCE into successful commercial ventures

Nel complesso, questa metodologia composita consente una valutazione completa degli impatti socio-economici potenziali e dei rischi associati all'implementazione di processi biotecnologici innovativi e alla creazione di catene del valore a livello locale, come nel caso di CooCE.

Riferimenti e link

CooCE (2024) Harnessing the Potential of Biological CO₂ Capture for the Circular Economy: <https://cooce.eu/>

Diaz-Chavez, R (2014) 'Indicators for Socio-Economic Sustainability Assessment', in Ruts, D and R Janssen, (eds) Socio-economic impacts of Bioenergy Production, Springer: Switzerland: 17-37.

SHDB (2024) Social Hotspot Database: <http://www.socialhotspot.org/>

This Handbook/toolkit was prepared as part of WP5 of the CooCE project and should be cited as follows:

Díaz-Chavez R, Evans Y, Giarola S, Basterrechea P, Zacharopoulos I, Treu L, Morlino M S, Gaspari M Müller B, Porqueddu I and Agostini S. 2024. Best practice handbook/toolkit for the potential of biological CO₂ capture for circular economy. The CooCE project. <https://cooce.eu/>

NOTE: The original version of this Handbook/toolkit is in English. The translated version into Italian was AI originated and therefore there may be inaccuracies.

NOTA: La versione originale di questo manuale/toolkit è in inglese. La versione tradotta in italiano è stata originata dall'intelligenza artificiale e quindi potrebbero esserci delle imprecisioni.

CooCE CO₂toCH₄ 20th
CooCE - LIFE CO₂toCH₄ Conjoint Public Workshop
November 26th, 2024, at 14.00 CET
Click to Join the meeting

CooCE
ACT-CooCE
Harnessing potential of biological CO₂ capture
for Circular Economy

Accelerating
CCS
Technologies

Biomethane

Biofuel

Biosuccinic acid

Chemical building block

PHAs

Biopolymer