



ecosister



**POLITECNICO
MILANO 1863**

XX CONVEGNO DELL'ASSOCIAZIONE RETE ITALIANA LCA

LCA PER L'OTTIMIZZAZIONE DI SISTEMI INNOVATIVI SVILUPPATI ALLA SCALA DI LABORATORIO

**Giovanni Dolci • Mary Jo Floriana Antonia Nichilo •
Mario Grosso • Lucia Rigamonti**

Politecnico di Milano
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale



**LCA E METODI LIFE CYCLE-BASED PER LA MISURAZIONE DELLA SOSTENIBILITÀ DI
PRODOTTI, SERVIZI, ORGANIZZAZIONI E SOLUZIONI CIRCOLARI**

23-25 SETTEMBRE 2026 • UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BARI ALDO MORO • DIPARTIMENTO JONICO • TARANTO



Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU



Ministero
dell'Università
e della Ricerca

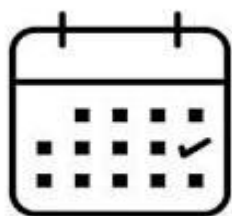


Italiadomani
PIANO NAZIONALE
DI RIPRESA E RESILIENZA

Il progetto



ecosister



10/2022 - 1/2026



23 Partner:

6 Università, 4 istituzioni pubbliche -
centri di ricerca, 13 imprese

<https://ecosister.it>

SPOKE 1
Materials for
sustainability
and ecological
transition

SPOKE 2
Clean energy
production,
storage and
saving

SPOKE 3
Green
manufacturing
for a
sustainable
economy

SPOKE 4
Smart mobility,
housing and
energy
solutions

SPOKE 5
Circular
economy and
Blue economy

SPOKE 6
Ecological
transition
based on HPC
& data
technology

DICA - POLIMI





Il progetto

SPOKE 5 - WP2 - Waste and wastewater arising from production and domestic consumption chains:
valorisation and transformation of waste into new materials products

“Dimostratori” sviluppati per promuovere l'**economia circolare**

- | | | |
|---|-------------------------------|---|
| 1 | Polimi | Pilota che integra la coltivazione di microalghe in un impianto di trattamento delle acque reflue |
| 2 | IMEM-CNR -
Parma | Substrati per l' intrappolamento di enzimi ottenibili da rifiuti alimentari (film a base di caseina e lignina) |
| 3 | UniPr | Pavimentazioni stradali in asfalto realizzate con plastica recuperata da imballaggi alimentari |
| 4 | ISSMC-CNR -
Faenza | Materiali ibridi per il trattamento delle acque reflue prodotti integrando microalghe con nanomateriali inorganici |

VALUTAZIONE
DELL'EFFETTIVA
SOSTENIBILITÀ
AMBIENTALE
(LCA)

Il progetto

SPOKE 5 - WP2 - Waste and wastewater arising from production and domestic consumption chains:
valorisation and transformation of waste into new materials products

“Dimostratori” sviluppati per promuovere l'**economia circolare**

- 1 **Polimi** Pilota che integra la **coltivazione di microalghe** in un impianto di trattamento delle **acque reflue**
- 2 **IMEM-CNR - Parma** **Substrati** per l'**intrappolamento di enzimi** ottenibili da **rifiuti alimentari** (film a base di caseina e lignina)
- 3 **UniPr** **Pavimentazioni stradali** in asfalto realizzate con **plastica** recuperata da **imballaggi alimentari**
- 4 **ISSMC-CNR - Faenza** Materiali ibridi per il trattamento delle **acque reflue** prodotti integrando **microalghe** con **nanomateriali** inorganici

VALUTAZIONE
DELL'EFFETTIVA
SOSTENIBILITÀ
AMBIENTALE
(LCA)



Obiettivo e metodologia

Analisi dei due dimostratori sviluppati attualmente alla sola
scala di laboratorio



Obiettivi:

- **confrontare le prestazioni ambientali delle varianti sviluppate**
- individuare le **criticità ambientali** dal primo sviluppo, in modo che possano essere limitate o risolte **prima dell'ingegnerizzazione a scala più ampia**

Obiettivo e metodologia

Analisi dei due dimostratori sviluppati attualmente alla sola
scala di laboratorio



Obiettivi:

- **confrontare le prestazioni ambientali delle varianti sviluppate**
- individuare le **criticità ambientali** dal primo sviluppo, in modo che possano essere limitate o risolte **prima dell'ingegnerizzazione a scala più ampia**

Dati primari direttamente dal processo di laboratorio:

misurazione diretta dei **materiali** e dell'**energia** utilizzati e degli **scarti** prodotti

Database di supporto: ecoinvent, versione 3.10, *allocation, cut-off by classification*; Software: SimaPro 9.6



Obiettivo e metodologia

Analisi dei due dimostratori sviluppati attualmente alla sola
scala di laboratorio



Obiettivi:

- **confrontare le prestazioni ambientali delle varianti sviluppate**
- individuare le **criticità ambientali** dal primo sviluppo, in modo che possano essere limitate o risolte **prima dell'ingegnerizzazione a scala più ampia**

Dati primari direttamente dal processo di laboratorio:

misurazione diretta dei **materiali** e dell'**energia** utilizzati e degli **scarti** prodotti

Database di supporto: ecoinvent, versione 3.10, *allocation, cut-off by classification*; Software: SimaPro 9.6



Metodo di caratterizzazione

(+ normalizzazione e pesatura):

Environmental Footprint 3.1 (midpoint)



acidificazione
cambiamento climatico
ecotossicità, acqua dolce
particolato
eutrofizzazione, marina
eutrofizzazione, acqua dolce
eutrofizzazione, terrestre
tossicità umana, cancerogena
tossicità umana, non cancerogena
radiazioni ionizzanti
uso del suolo
riduzione dello strato di ozono
formazione di ozono fotochimico
uso delle risorse, fossili
uso delle risorse, minerali e metalli
uso dell'acqua

Fazio et al., 2018 <https://doi.org/10.2760/671368>

Crenna et al., 2019 <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01604-y>

Sala et al., 2018 <https://doi.org/10.2760/945290>

Granuli ibridi per il trattamento di acque reflue

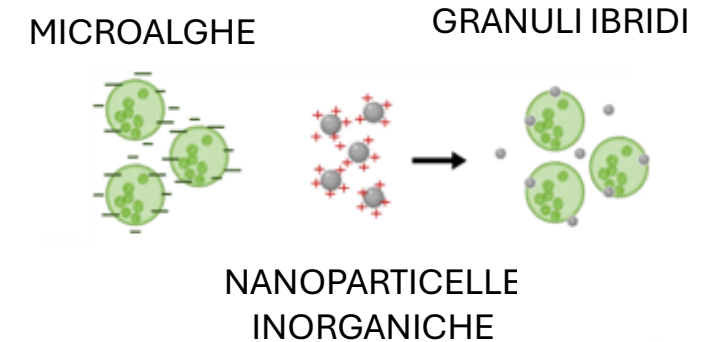
Biomassa microalgale accoppiata con **nanoparticelle inorganiche** al fine di produrre granuli reattivi

Combinazioni di microalghe (*Neochloris oleoabundans* - NeoC, *Phaeodactylum tricornutum* - Ptr) e nanofasi inorganiche (nanopolvere di biossido di titanio - TiO_2NP , nanosol di silice - SiO_2NP)



Granuli ibridi:

- *Granulo 1*: NeoC / TiO_2NP
- *Granulo 2*: Ptr / TiO_2NP
- *Granulo 3*: NeoC / $\text{TiO}_2\text{NP-SiO}_2\text{NP}$
- *Granulo 4*: Ptr / $\text{TiO}_2\text{NP-SiO}_2\text{NP}$



Zanoni I., Amadori S., Brigliadori A., Costa A.L., Ortellì S., Giacò P., Baldisserotto C., Pancaldi S., Blosi M., 2025. [Hybrid materials for wastewater treatment: synergistic coupling of *Neochloris oleoabundans* and \$\text{TiO}_2\$ nanoparticles](#). Nanoscale Advances 7, 3803.

Granuli ibridi per il trattamento di acque reflue

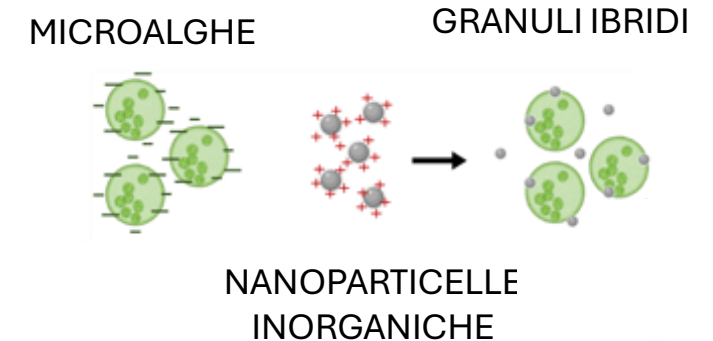
Biomassa microalgale accoppiata con **nanoparticelle inorganiche** al fine di produrre granuli reattivi

Combinazioni di microalghe (*Neochloris oleoabundans* - NeoC, *Phaeodactylum tricornutum* - Ptr) e nanofasi inorganiche (nanopolvere di biossido di titanio - TiO_2NP , nanosol di silice - SiO_2NP)



Granuli ibridi:

- Granulo 1: NeoC / TiO_2NP
- Granulo 2: Ptr / TiO_2NP
- Granulo 3: NeoC / $\text{TiO}_2\text{NP-SiO}_2\text{NP}$
- Granulo 4: Ptr / $\text{TiO}_2\text{NP-SiO}_2\text{NP}$



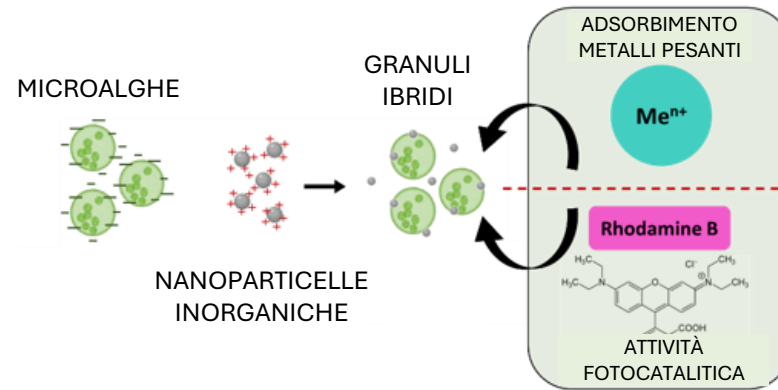
Processo produttivo:

- **coltivazione e raccolta delle microalghe**
- **preparazione della sospensione colloidale:** microalghe combinate con i nanomateriali inorganici
- **atomizzazione:** sospensione colloidale sottoposta ad atomizzazione
- **spray freeze-drying:** sospensione atomizzata sottoposta a liofilizzazione

Zanoni I., Amadori S., Brigliadori A., Costa A.L., Ortelli S., Giacò P., Baldisserotto C., Pancaldi S., Blosi M., 2025. [Hybrid materials for wastewater treatment: synergistic coupling of *Neochloris oleoabundans* and \$\text{TiO}_2\$ nanoparticles](#). Nanoscale Advances 7, 3803.

Granuli ibridi per il trattamento di acque reflue - LCA

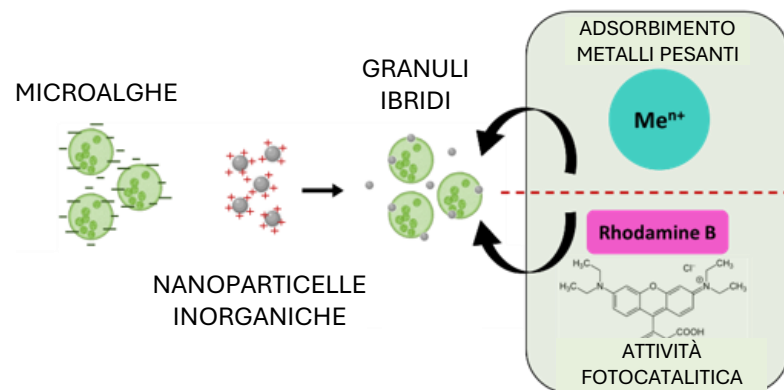
I **granuli ibridi** combinano le **proprietà adsorbenti** delle microalghe con l'**azione fotocatalitica** delle nanoparticelle



Alternativa,
potenzialmente più
sostenibile, al **carbone
attivo** per il **trattamento
delle acque reflue**

Granuli ibridi per il trattamento di acque reflue - LCA

I **granuli ibridi** combinano le **proprietà adsorbenti** delle microalghe con l'**azione fotocatalitica** delle nanoparticelle



Alternativa, potenzialmente più sostenibile, al **carbone attivo** per il trattamento delle acque reflue

Prove sperimentali → **prestazioni fotocatalitiche comparabili** tra loro e rispetto al carbone attivo



LCA comparativa: granuli vs carbone attivo sulla base delle differenti **capacità di adsorbimento**

Unità funzionale (UF): adsorbimento di 1 mg di Cu(II)

Confine del sistema: cradle-to-use (dall'acquisizione delle materie prime all'uso dei granuli)

Materiale	Adsorbimento - rimozione Cu(II) (mg Cu(II)/g materiale)	Flusso di riferimento (g materiale)
Granulo 1	4,41	0,227
Granulo 2	4,39	0,228
Granulo 3	4,17	0,240
Granulo 4	2,81	0,356
Carbone attivo	2,27	0,441



Granuli ibridi per il trattamento di acque reflue - Risultati LCA

Confronto tra alternative

Diverse rese del processo di *spray freeze-drying*

Per il granulo 4 bassa efficienza di adsorbimento



Granulo 1: impatti minori per tutte le categorie

Granulo 2: +28/29% per le diverse categorie

Granulo 3: +60/66%

Granulo 4: +180/190%

Granuli ibridi per il trattamento di acque reflue - Risultati LCA

Confronto tra alternative

Diverse rese del processo di *spray freeze-drying*

Per il granulo 4 bassa efficienza di adsorbimento



Granulo 1: impatti minori per tutte le categorie

Granulo 2: +28/29% per le diverse categorie

Granulo 3: +60/66%

Granulo 4: +180/190%

Confronto con l'alternativa tradizionale

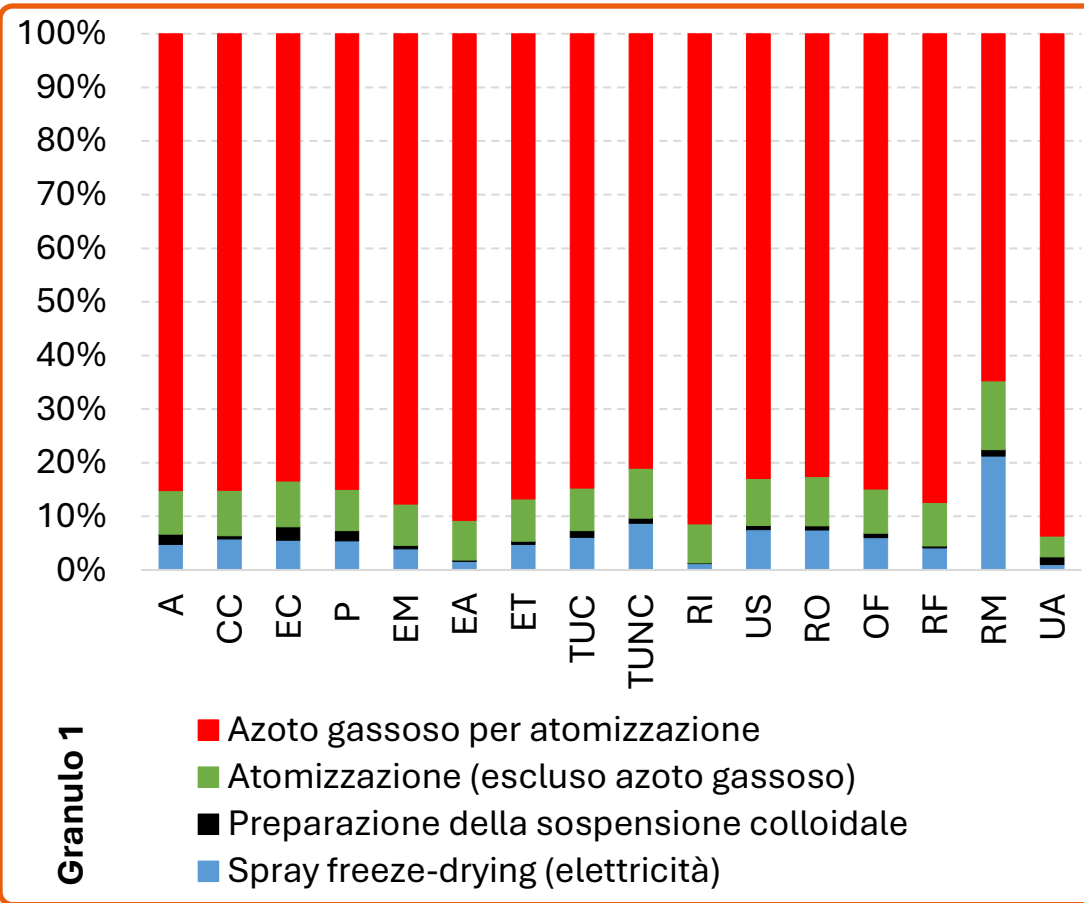
Impatti largamente inferiori (1/4% rispetto al granulo 1) per il **carbone attivo**

Confrontabilità limitata dal **diverso livello di maturità tecnologica**. Il processo produttivo del carbone attivo è ottimizzato alla scala industriale



LCA di produzione del carbone attivo alla scala di laboratorio mostrano impatti (sul cambiamento climatico) 100/1000 volte superiori rispetto al processo industriale

Granuli ibridi per il trattamento di acque reflue - Risultati LCA

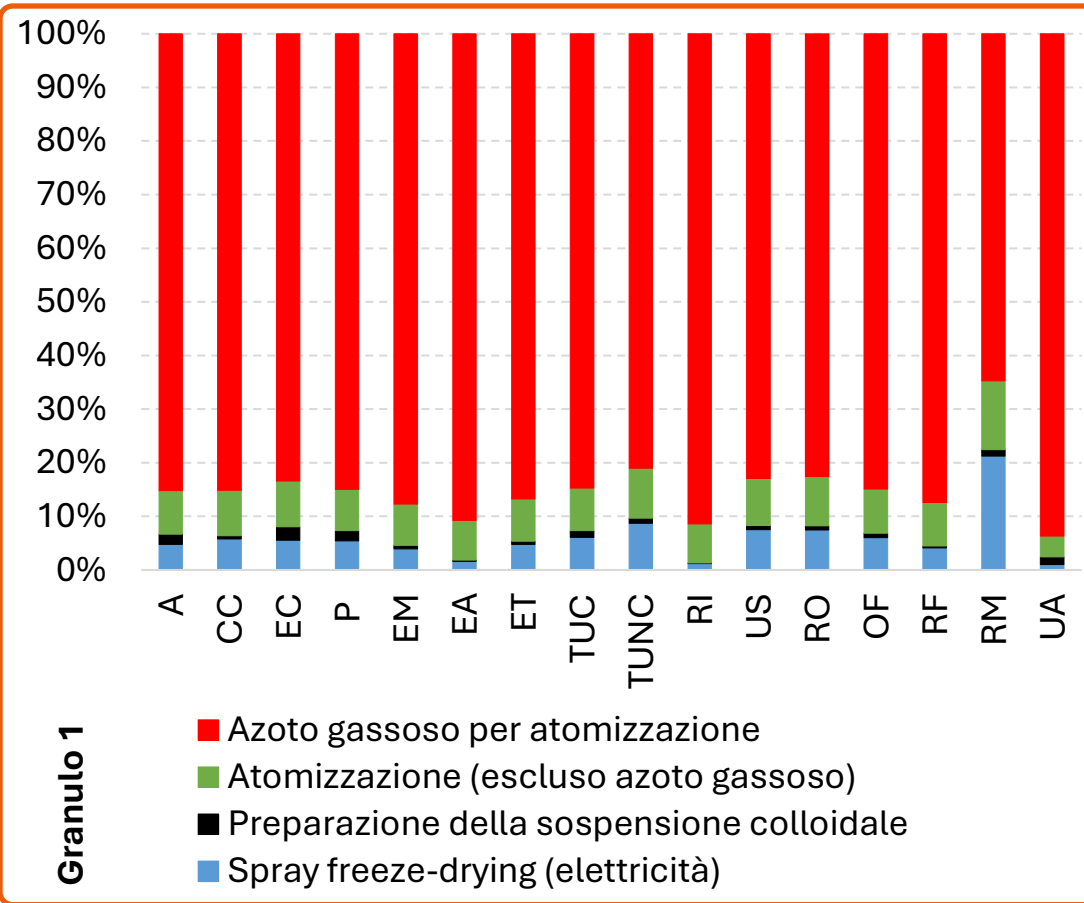


Principali contributi agli impatti:

- uso di rilevanti quantità di **azoto gassoso** durante l'atomizzazione
- consumo di **elettricità** per lo *spray freeze-drying*

Acidificazione (A), Cambiamento climatico (CC), Ecotossicità, acqua dolce (EC), Particolato (P), Eutrofizzazione, marina (EM), Eutrofizzazione, acqua dolce (EA), Eutrofizzazione, terrestre (ET), Tossicità umana, cancerogena (TUC), Tossicità umana, non cancerogena (TUNC), Radiazioni ionizzanti (RI), Uso del suolo (US), Riduzione dello strato di ozono (RO), Formazione di ozono fotochimico (OF), Uso delle risorse, fossili (RF), Uso delle risorse, minerali e metalli (RM), Uso dell'acqua (UA)

Granuli ibridi per il trattamento di acque reflue - Risultati LCA



Principali contributi agli impatti:

- uso di rilevanti quantità di **azoto gassoso** durante l'atomizzazione
- consumo di **elettricità** per lo *spray freeze-drying*

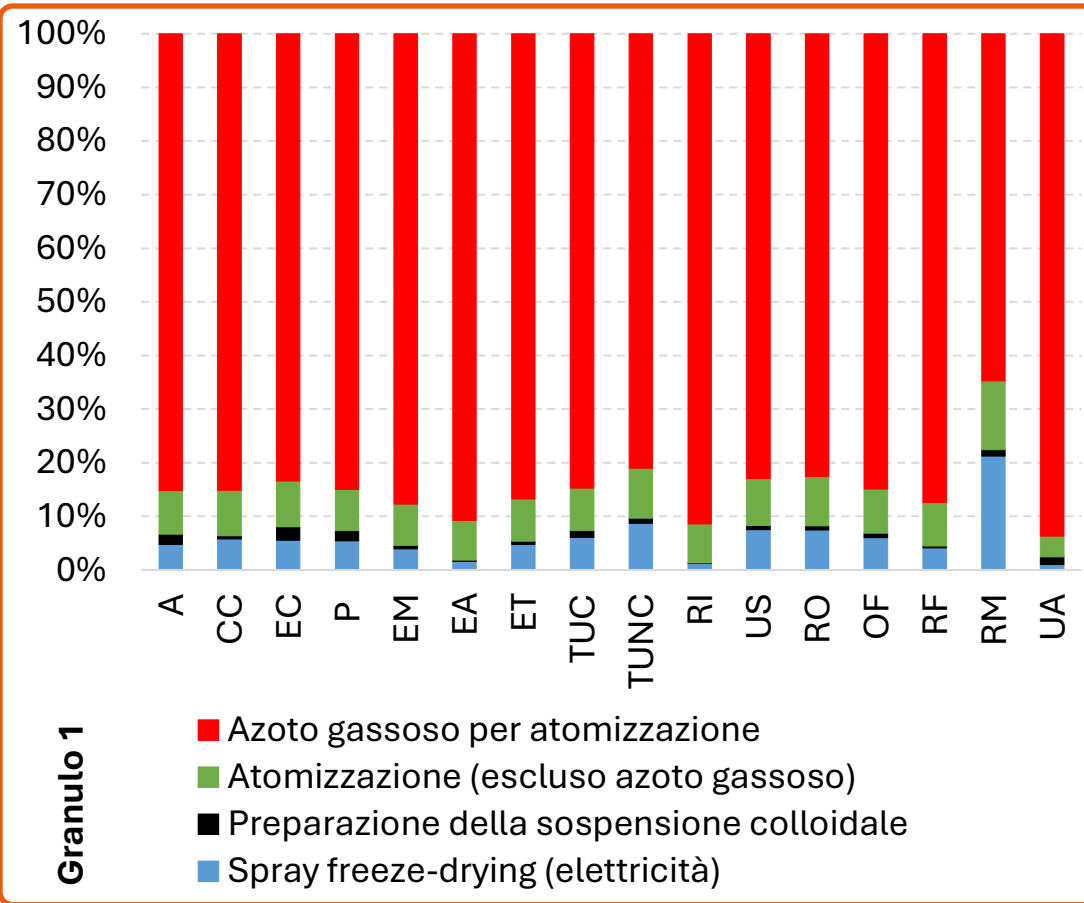
Microalghe:

- **ridotto contributo** della fase di preparazione della sospensione colloidale, che include anche gli impatti della **coltivazione delle microalghe**
- **elevate efficienze di adsorbimento**

Tuttavia, **non è possibile** prevederne un **utilizzo autonomo** in assenza di un supporto inorganico

Acidificazione (A), Cambiamento climatico (CC), Ecotossicità, acqua dolce (EC), Particolato (P), Eutrofizzazione, marina (EM), Eutrofizzazione, acqua dolce (EA), Eutrofizzazione, terrestre (ET), Tossicità umana, cancerogena (TUC), Tossicità umana, non cancerogena (TUNC), Radiazioni ionizzanti (RI), Uso del suolo (US), Riduzione dello strato di ozono (RO), Formazione di ozono fotochimico (OF), Uso delle risorse, fossili (RF), Uso delle risorse, minerali e metalli (RM), Uso dell'acqua (UA)

Granuli ibridi per il trattamento di acque reflue - Ottimizzazione

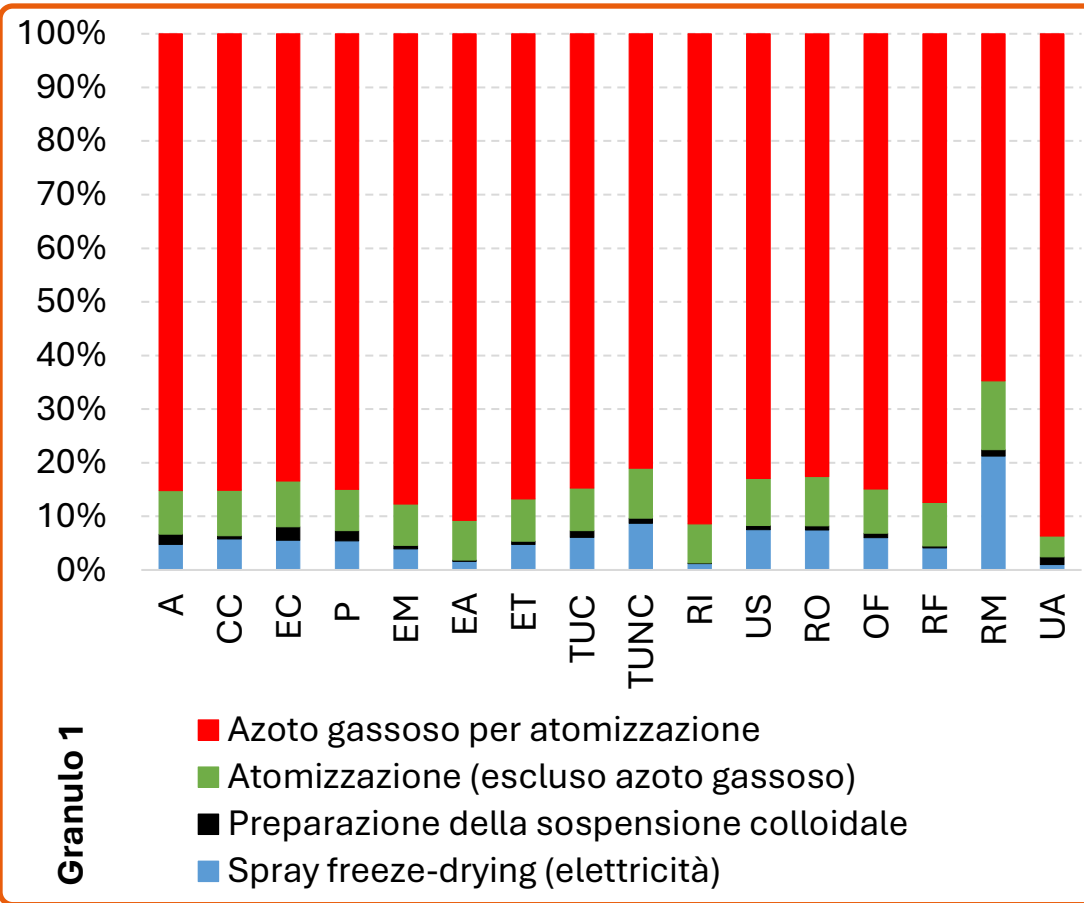


Principali contributi agli impatti:

- uso di rilevanti quantità di **azoto gassoso** durante l'atomizzazione
- consumo di **elettricità** per lo *spray freeze-drying*

Acidificazione (A), Cambiamento climatico (CC), Ecotossicità, acqua dolce (EC), Particolato (P), Eutrofizzazione, marina (EM), Eutrofizzazione, acqua dolce (EA), Eutrofizzazione, terrestre (ET), Tossicità umana, cancerogena (TUC), Tossicità umana, non cancerogena (TUNC), Radiazioni ionizzanti (RI), Uso del suolo (US), Riduzione dello strato di ozono (RO), Formazione di ozono fotochimico (OF), Uso delle risorse, fossili (RF), Uso delle risorse, minerali e metalli (RM), Uso dell'acqua (UA)

Granuli ibridi per il trattamento di acque reflue - Ottimizzazione



Principali contributi agli impatti:

- uso di rilevanti quantità di **azoto gassoso** durante l'atomizzazione
- consumo di **elettricità** per lo *spray freeze-drying*

Confronto con gli sviluppatori del sistema:

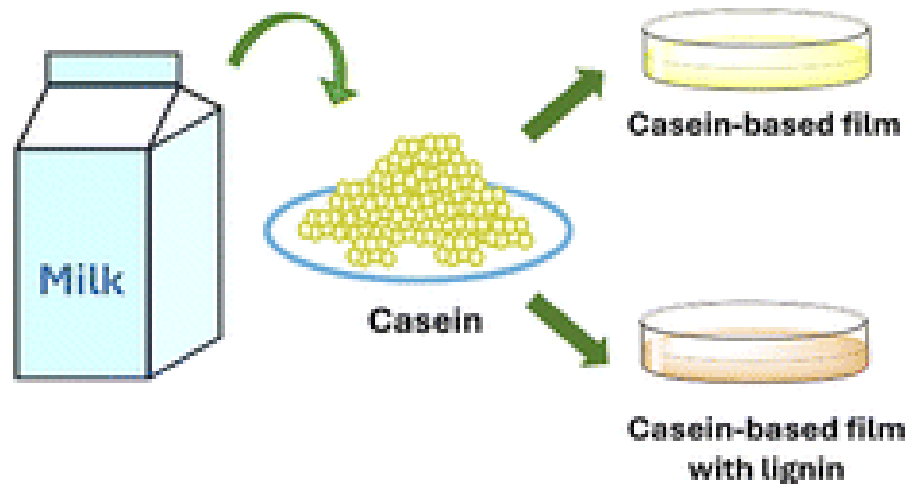
 **sostituzione dell'azoto gassoso** con un flusso di aria compressa, senza influenze sul processo

- Granulo 1 con azoto gassoso: 39 $\mu\text{Pt}/\text{UF}$
- Granulo 1 con l'uso di aria compressa: 4,8 $\mu\text{Pt}/\text{UF}$

Acidificazione (A), Cambiamento climatico (CC), Ecotossicità, acqua dolce (EC), Particolato (P), Eutrofizzazione, marina (EM), Eutrofizzazione, acqua dolce (EA), Eutrofizzazione, terrestre (ET), Tossicità umana, cancerogena (TUC), Tossicità umana, non cancerogena (TUNC), Radiazioni ionizzanti (RI), Uso del suolo (US), Riduzione dello strato di ozono (RO), Formazione di ozono fotochimico (OF), Uso delle risorse, fossili (RF), Uso delle risorse, minerali e metalli (RM), Uso dell'acqua (UA)

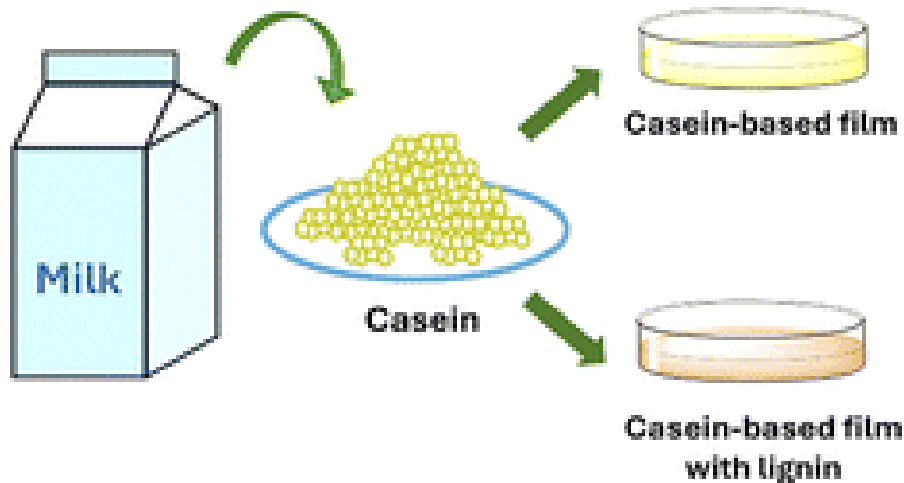
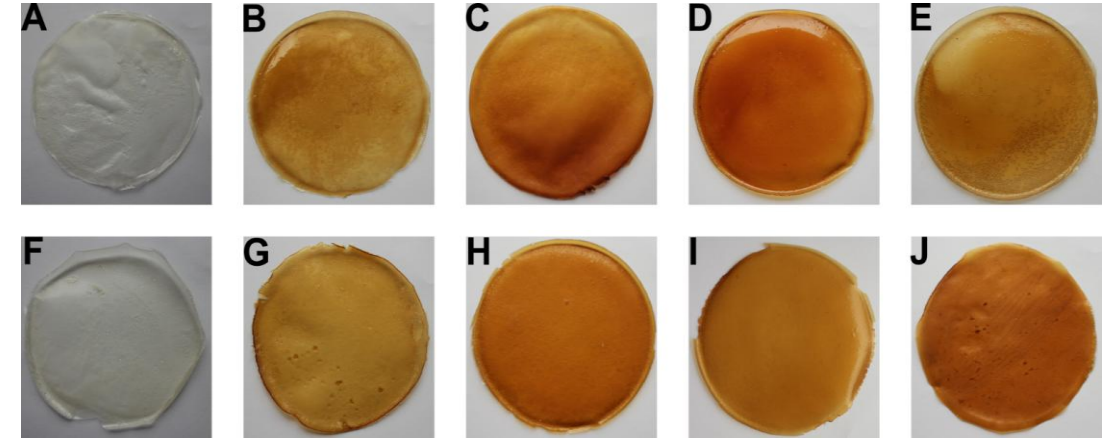
Film di caseina per l'intrappolamento di enzimi

Caseina, ottenuta **da latte** scremato bovino
UHT tramite acidificazione, utilizzata con
l'eventuale **aggiunta di lignina** e altri additivi
per **produrre film biodegradabili**



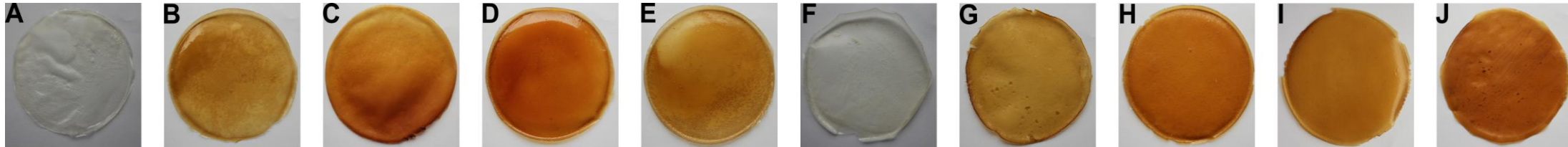
Film di caseina per l'intrappolamento di enzimi

Caseina, ottenuta **da latte** scremato bovino UHT tramite acidificazione, utilizzata con l'eventuale **aggiunta di lignina** e altri additivi per **produrre film biodegradabili**



Film	Caseina	Glicerolo	NaOH 0.5M	Lignina Sigma	Lignina UPM	TGM
A	X	X	X			
B	X	X		X (50 mg)		
C	X	X		X (100 mg)		
D	X	X	X		X (50 mg)	
E	X	X	X		X (100 mg)	
F	X	X				X
G	X	X		X (50 mg)		X
H	X	X		X (100 mg)		X
I	X	X	X		X (50 mg)	X
J	X	X	X		X (100 mg)	X

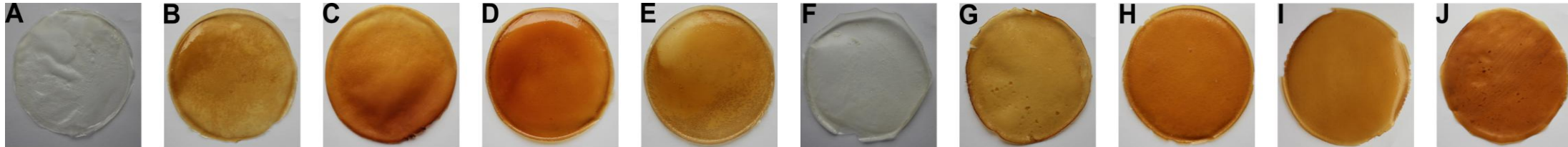
Film di caseina per l'intrappolamento di enzimi - LCA



Film testati efficacemente in termini di **capacità di immobilizzazione enzimatica** ma ancora senza una specifica funzione applicativa

Dembech E., Sotgiu G., Donnadio A., Buoso S., Dolci G., Nichilo M.J.F.A., Sinisi V., 2025. [Casein-based film enriched with lignin as a biodegradable substrate for enzyme immobilization](#). RSC Advances 15(7), 5344-5355.

Film di caseina per l'intrappolamento di enzimi - LCA



Film testati efficacemente in termini di **capacità di immobilizzazione enzimatica** ma ancora senza una specifica funzione applicativa



LCA non comparativa *cradle-to-gate*
(dall'estrazione delle materie prime alla produzione del film)

Unità funzionale (UF): *una unità di film* (disco di diametro 10 cm e spessore 200 μ m)

Dembech E., Sotgiu G., Donnadio A., Buoso S., Dolci G., Nichilo M.J.F.A., Sinisi V., 2025. [Casein-based film enriched with lignin as a biodegradable substrate for enzyme immobilization](#). RSC Advances 15(7), 5344-5355.



Film di caseina per l'intrappolamento di enzimi - Risultati LCA

Confronto tra alternative
Differenze inferiori al 2%
tra i 10 film per tutte le
categorie di impatto

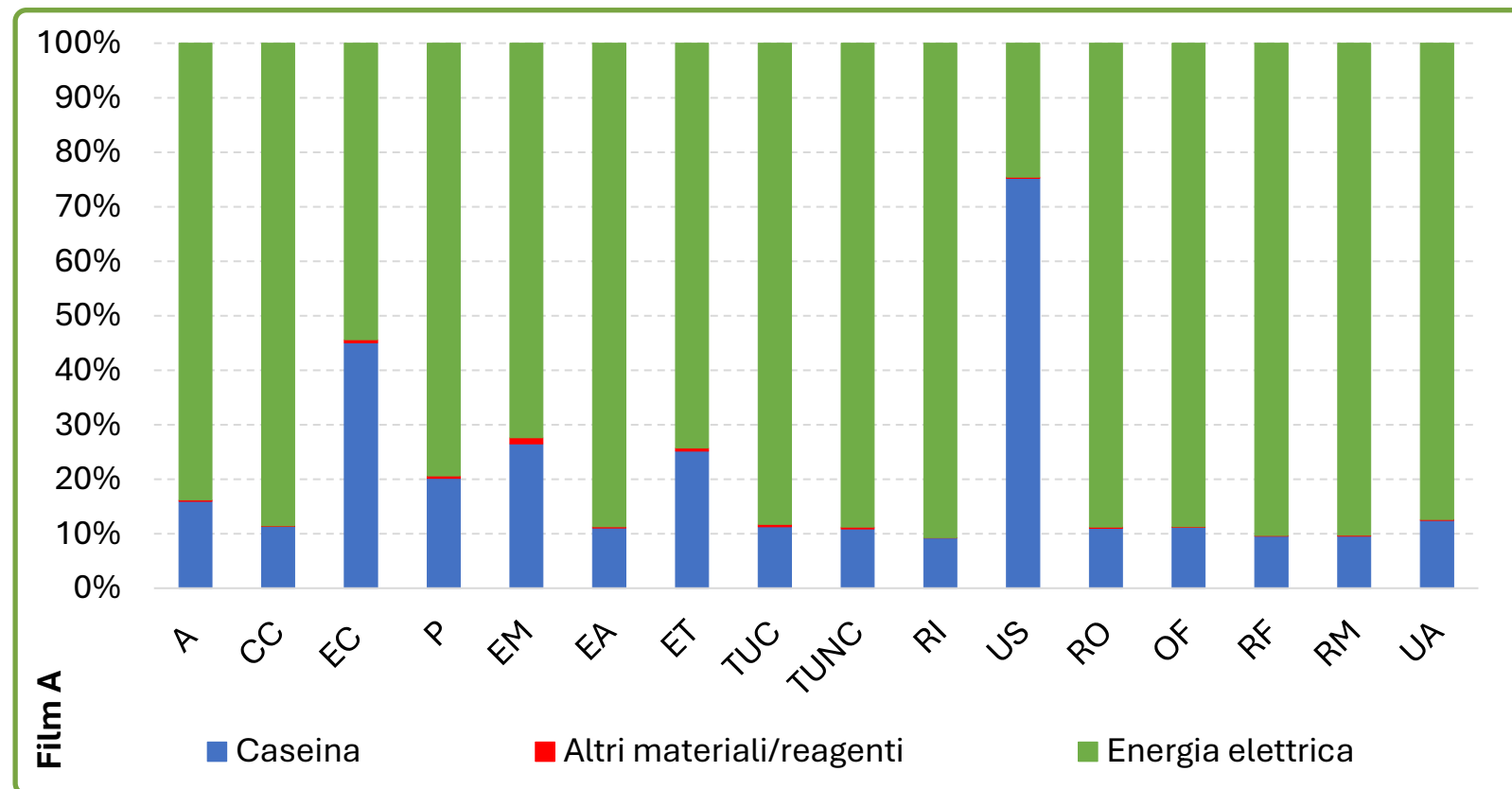
Film di caseina per l'intrappolamento di enzimi - Risultati LCA

Confronto tra alternative
Differenze inferiori al 2%
tra i 10 film per tutte le
 categorie di impatto

Produzione del film: > 70%
 dell'impatto per 14 categorie,
 seguita dalla produzione di
 caseina

Produzione **caseina**: 78% per la
 categoria **uso del suolo**

Altri reagenti/materie prime (tra
 cui la lignina): < 5%



Acidificazione (A), Cambiamento climatico (CC), Ecotossicità, acqua dolce (EC), Particolato (P), Eutrofizzazione, marina (EM), Eutrofizzazione, acqua dolce (EA), Eutrofizzazione, terrestre (ET), Tossicità umana, cancerogena (TUC), Tossicità umana, non cancerogena (TUNC), Radiazioni ionizzanti (RI), Uso del suolo (US), Riduzione dello strato di ozono (RO), Formazione di ozono fotochimico (OF), Uso delle risorse, fossili (RF), Uso delle risorse, minerali e metalli (RM), Uso dell'acqua (UA)



Film di caseina per l'intrappolamento di enzimi - Ottimizzazione

Possibili scenari di
ottimizzazione:

- **uso di latte scaduto** (ossia un rifiuto) per la produzione di caseina
 *burden-free*
disponibilità di latte di scarto?
- **riduzione dei consumi di elettricità** per la produzione della caseina e dei film

Film di caseina per l'intrappolamento di enzimi - Ottimizzazione

Possibili scenari di
ottimizzazione:

- **uso di latte scaduto** (ossia un rifiuto) per la produzione di caseina

 *burden-free*
disponibilità di
latte di scarto?

- **riduzione dei consumi di elettricità** per la produzione della caseina e dei film

Scenario latte scaduto

Scenario ottimizzato:

uso di latte scaduto + riduzione del 50% dei consumi energetici

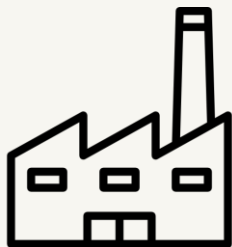
Categoria di impatto	Impatti film A (UM/UF)	Variazione impatti Δ (x-film A)/film A	
		Latte scaduto	Scenario ottimizzato
Acidificazione (moli H ⁺ eq)	7,07E-03	-8%	-54%
Cambiamento climatico (kg CO ₂ eq)	1,59E+00	-3%	-52%
Ecotossicità, acqua dolce (CTUe)	6,84E+00	-40%	-70%
Particolato (incidenza malattie)	3,68E-08	-13%	-56%
Eutrofizzazione, marina (kg N eq)	1,22E-03	-20%	-59%
Eutrofizzazione, acqua dolce (kg P eq)	3,53E-04	-3%	-51%
Eutrofizzazione, terrestre (moli N eq)	1,30E-02	-18%	-59%
Tossicità umana, cancerogena (CTUh)	8,22E-10	-3%	-51%
Tossicità umana, non cancerogena (CTUh)	1,97E-08	-3%	-51%
Radiazioni ionizzanti (kBq U-235 eq)	1,85E-01	-1%	-50%
Uso del suolo (Pt)	3,35E+01	-73%	-86%
Riduzione dello strato di ozono (kg CFC11 eq)	3,65E-08	-2%	-51%
Formazione di ozono fotochimico (kg COVNM eq)	4,65E-03	-3%	-51%
Uso delle risorse, fossili (MJ)	2,50E+01	-1%	-51%
Uso delle risorse, minerali e metalli (kg Sb eq)	1,95E-05	-1%	-51%
Uso dell'acqua (m ³ acqua)	1,17E+00	-5%	-52%

149 μ Pt/UF 140 μ Pt 71 μ Pt

Conclusioni e implicazioni



La **LCA** applicata a **sistemi innovativi alla scala di laboratorio** ha permesso di individuare le **differenti prestazioni** ambientali **delle** diverse **varianti** sviluppate



L'analisi di tali sistemi si è dimostrata efficace nell'**individuazione delle criticità ambientali sin dal primo sviluppo**, in modo che possano essere **limitate** o risolte **prima dell'ingegnerizzazione** a scala più ampia



GRAZIE PER L'ATTENZIONE

Giovanni Dolci

Politecnico di Milano

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

giovanni.dolci@polimi.it



Assessment on WAstE
and REsources



XX CONVEGNO DELL'ASSOCIAZIONE RETE ITALIANA LCA

LCA E METODI LIFE CYCLE-BASED PER LA MISURAZIONE DELLA SOSTENIBILITÀ DI PRODOTTI,
SERVIZI, ORGANIZZAZIONI E SOLUZIONI CIRCOLARI

23-25 SETTEMBRE 2026 · UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BARI ALDO MORO · DIPARTIMENTO JONICO · TARANTO