



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
DIPARTIMENTO DI CHIMICA



CARBONIO

STRATEGIE E TECNICHE DI SEQUESTRO, CATTURA E STOCCAGGIO

Alessandro Minguzzi, Antonio Tripodi, Ilenia Rossetti

Dipartimento di Chimica, Università degli Studi di Milano, via Golgi 19, 20133, Milano, Italy;

alessandro.minguzzi@unimi.it

antonio.tripodi@unimi.it

ilenia.rossetti@unimi.it

Il potenziale innovativo dell'Università degli Studi di Milano e l'impresa sostenibile - 9 Novembre 2022

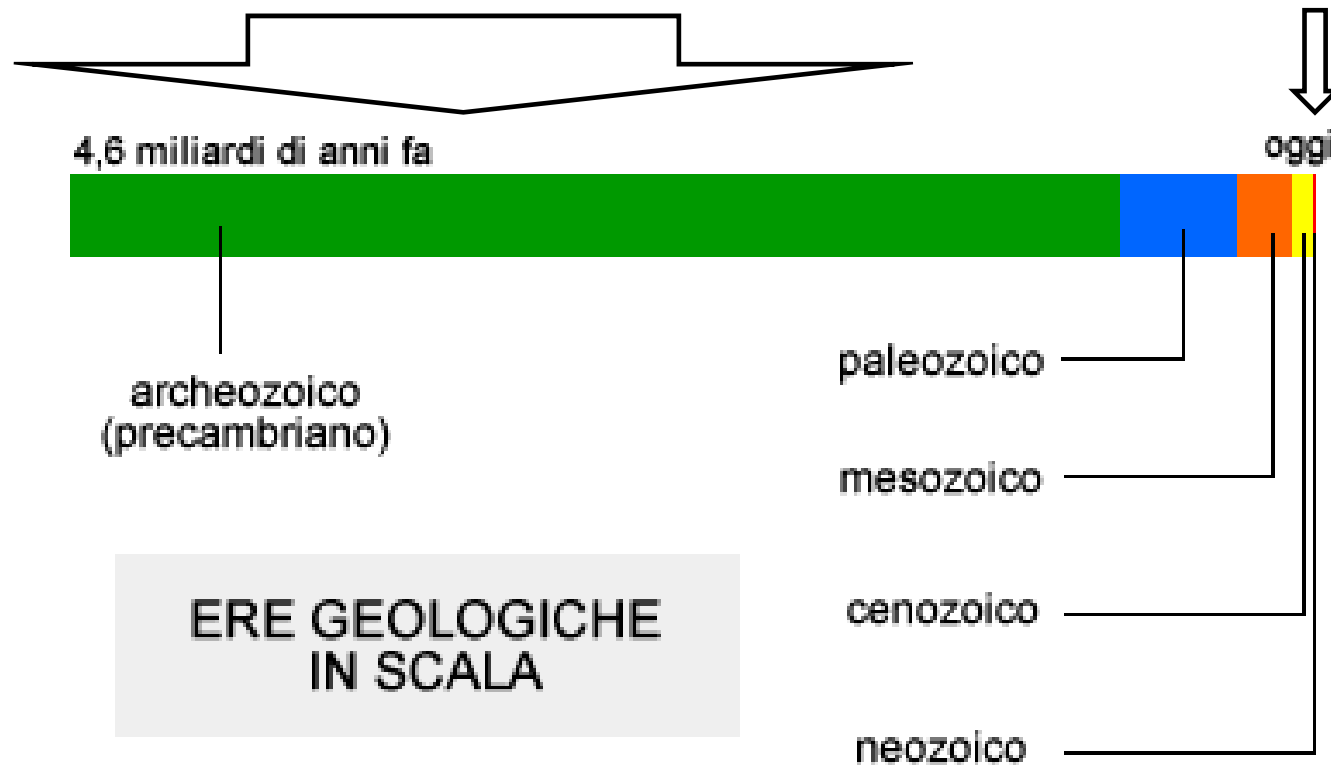
«Il tempo passa, siamo in lotta per la nostra vita e stiamo perdendo. Le **emissioni di gas serra** continuano a crescere, le **temperature globali** continuano ad aumentare e il nostro pianeta si sta avvicinando rapidamente a punti critici che renderanno il caos climatico irreversibile. Siamo su un'autostrada per l'**inferno climatico** con il piede ancora sull'acceleratore...
...L'umanità può scegliere: **cooperare o morire.**».

Antonio Guterres, segretario generale dell'Onu,
United Nation Climate Change – COP 27, **ieri**, 8 novembre

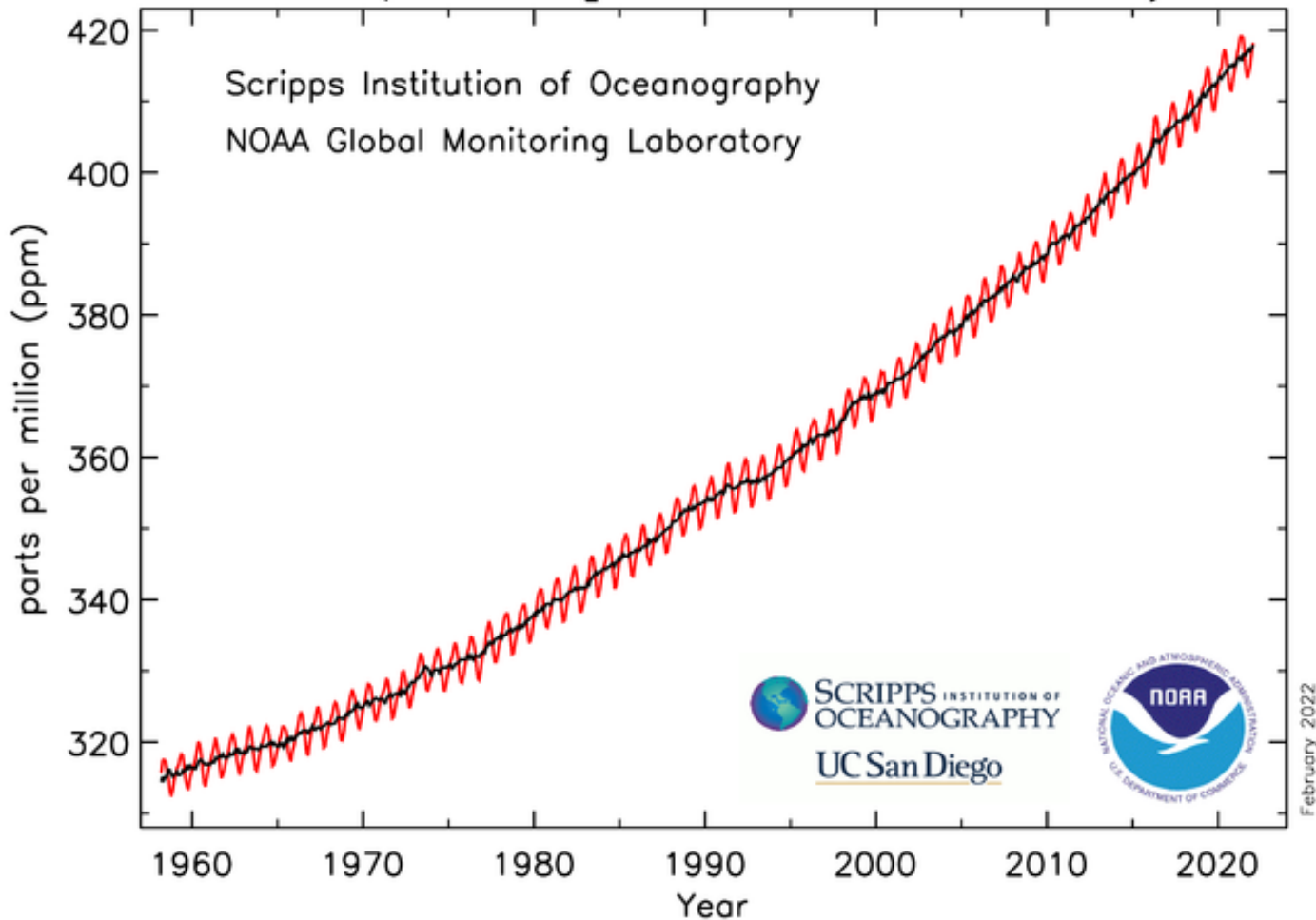


Concentrazione CO₂: circa 4000 ppm

circa 400 ppm



Atmospheric CO₂ at Mauna Loa Observatory



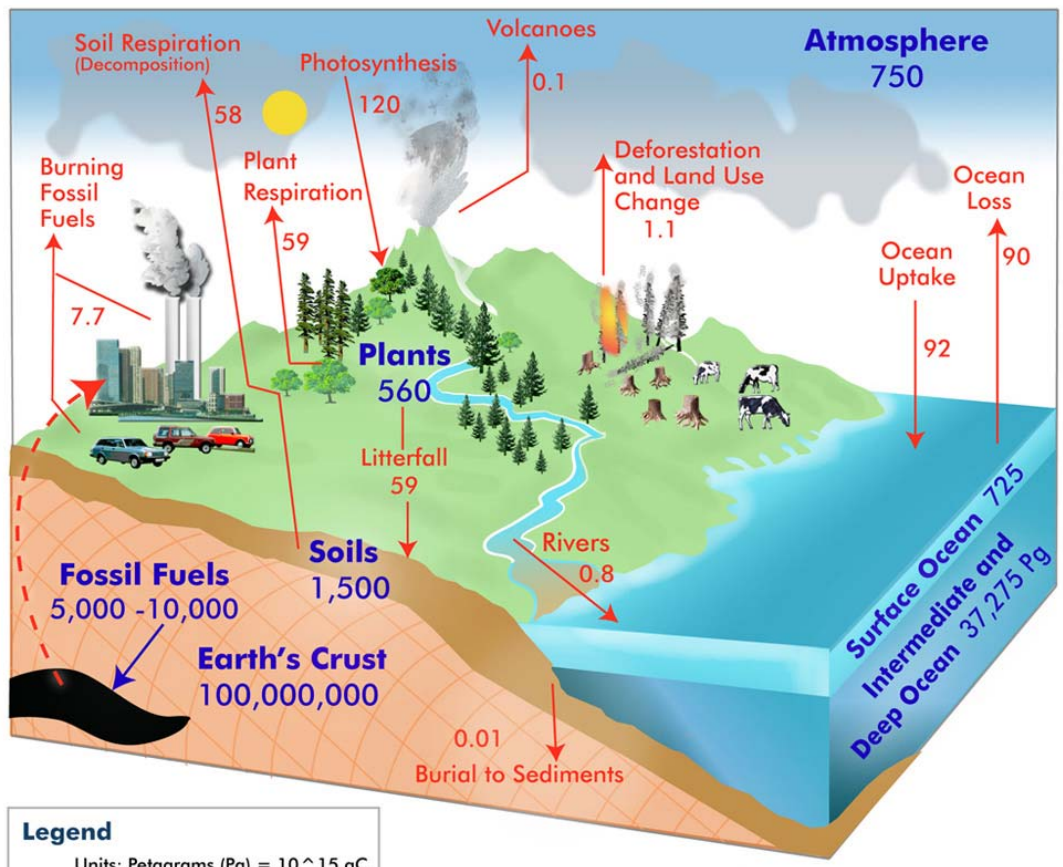
Perché oscilla (ogni anno)?

Giugno, CO₂ ↓: primavera nell'emisfero settentrionale, dove è concentrata la maggior parte della terra del pianeta, e le piante assorbono CO₂ dall'atmosfera per alimentare la loro nuova crescita.

Novembre, CO₂ ↑: le piante rallentano la produzione di carboidrati



Global Carbon Cycle



Legend
 Units: Petagrams (Pg) = 10^{15} gC
 • Pools: Pg
 • Fluxes: Pg/year

1 Pg = 1giga tonnellata

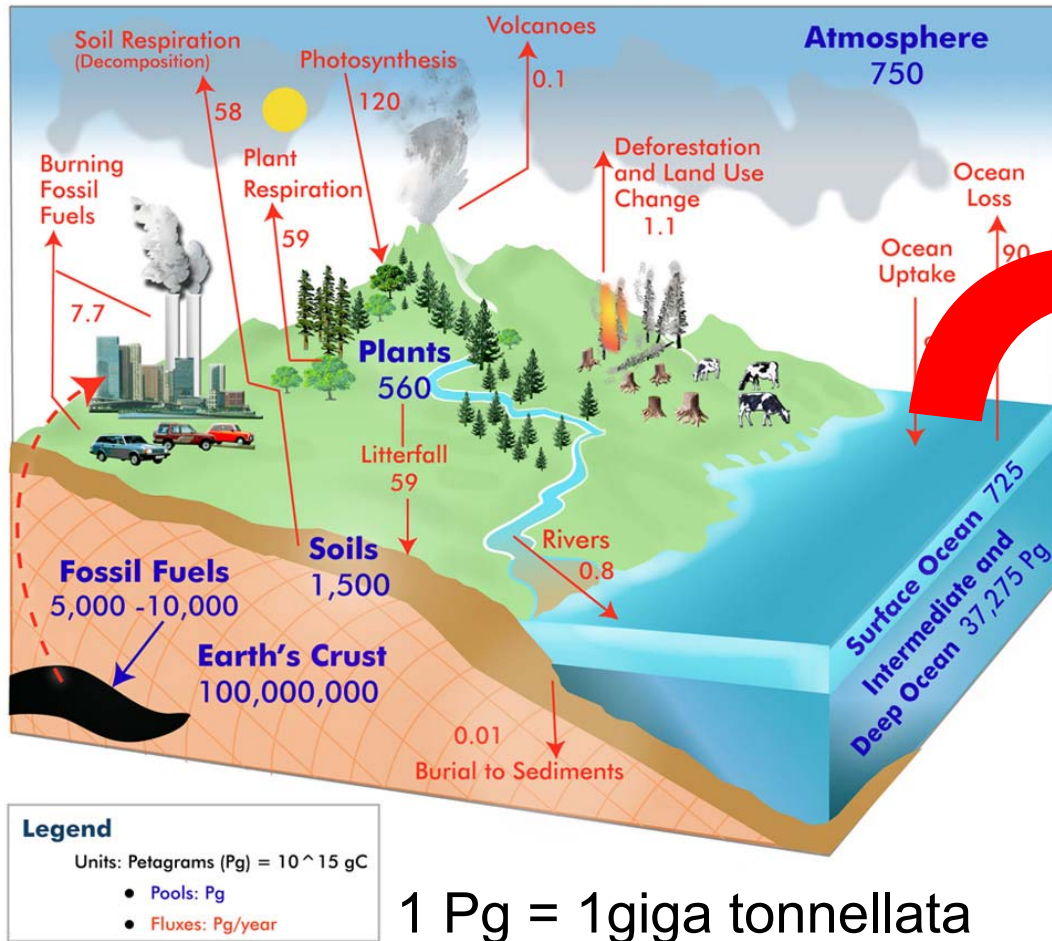
Copyright 2010 GLOBE Carbon Cycle Project, a collaborative project between the University of New Hampshire, Charles University and the GLOBE Program Office.
 Data Sources: Adapted from Houghton, R.A. Balancing the Global Carbon Budget. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 007.35:313-347, updated emissions values are from the Global Carbon Project: Carbon Budget 2009.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
 DIPARTIMENTO DI CHIMICA

<https://airs.jpl.nasa.gov/resources/155/global-carbon-cycle/>

Global Carbon Cycle



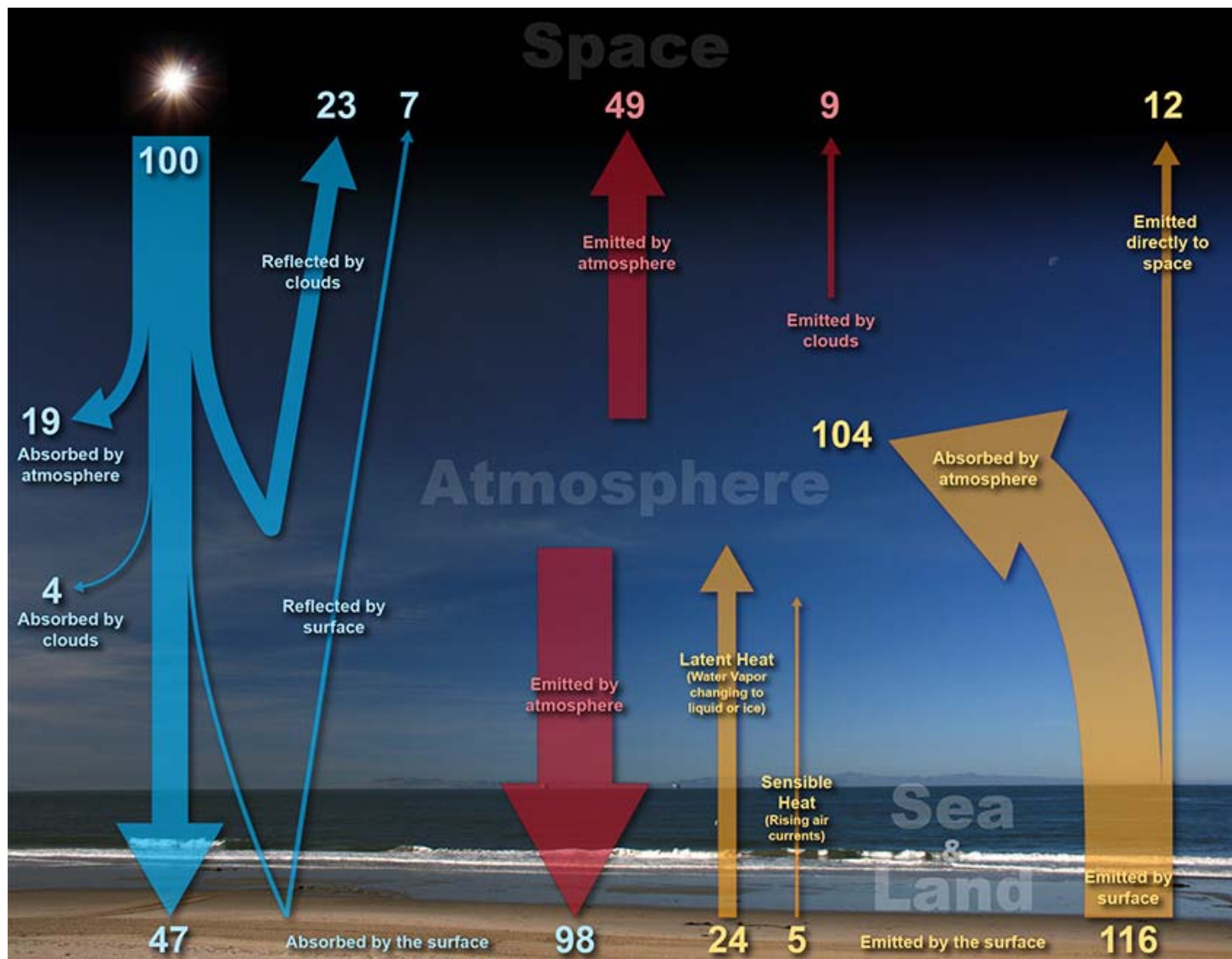
The Greenhouse Effect

Some sunlight that hits Earth is reflected back into space, while the rest becomes heat

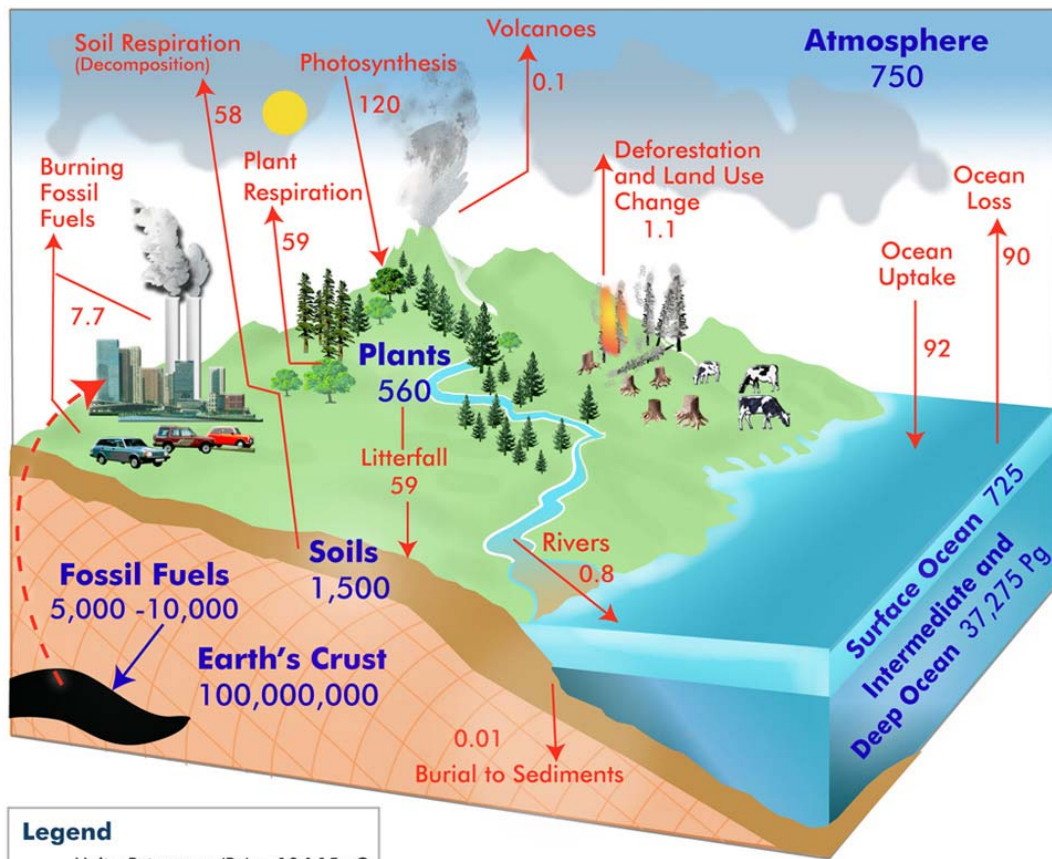
Greenhouse gases absorb and reflect heat radiated by Earth, preventing it from escaping into space

Copyright 2010 GLOBE Carbon Cycle Project, a collaborative project between the University of New Hampshire, Charles University and the GLOBE Program Office.
 Data Sources: Adapted from Houghton, R.A. Balancing the Global Carbon Budget. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 007.35:313-347, updated emissions values are from the Global Carbon Project: Carbon Budget 2009.





Global Carbon Cycle



Legend
 Units: Petagrams (Pg) = 10^{15} gC
 • Pools: Pg
 • Fluxes: Pg/year

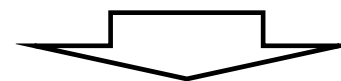
1 Pg = 1giga tonnellata

Copyright 2010 GLOBE Carbon Cycle Project, a collaborative project between the University of New Hampshire, Charles University and the GLOBE Program Office.
 Data Sources: Adapted from Houghton, R.A. Balancing the Global Carbon Budget. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 007.35:313-347, updated emissions values are from the Global Carbon Project: Carbon Budget 2009.

CO₂ immagazzinata prevalentemente

1. Nella crosta terrestre (come minerali)
2. Negli oceani
3. Nei combustibili fossili

Riducendo il volume d'acqua limitiamo il «magazzino» di CO₂, che viene liberata provocando un ulteriore aumento di temperatura

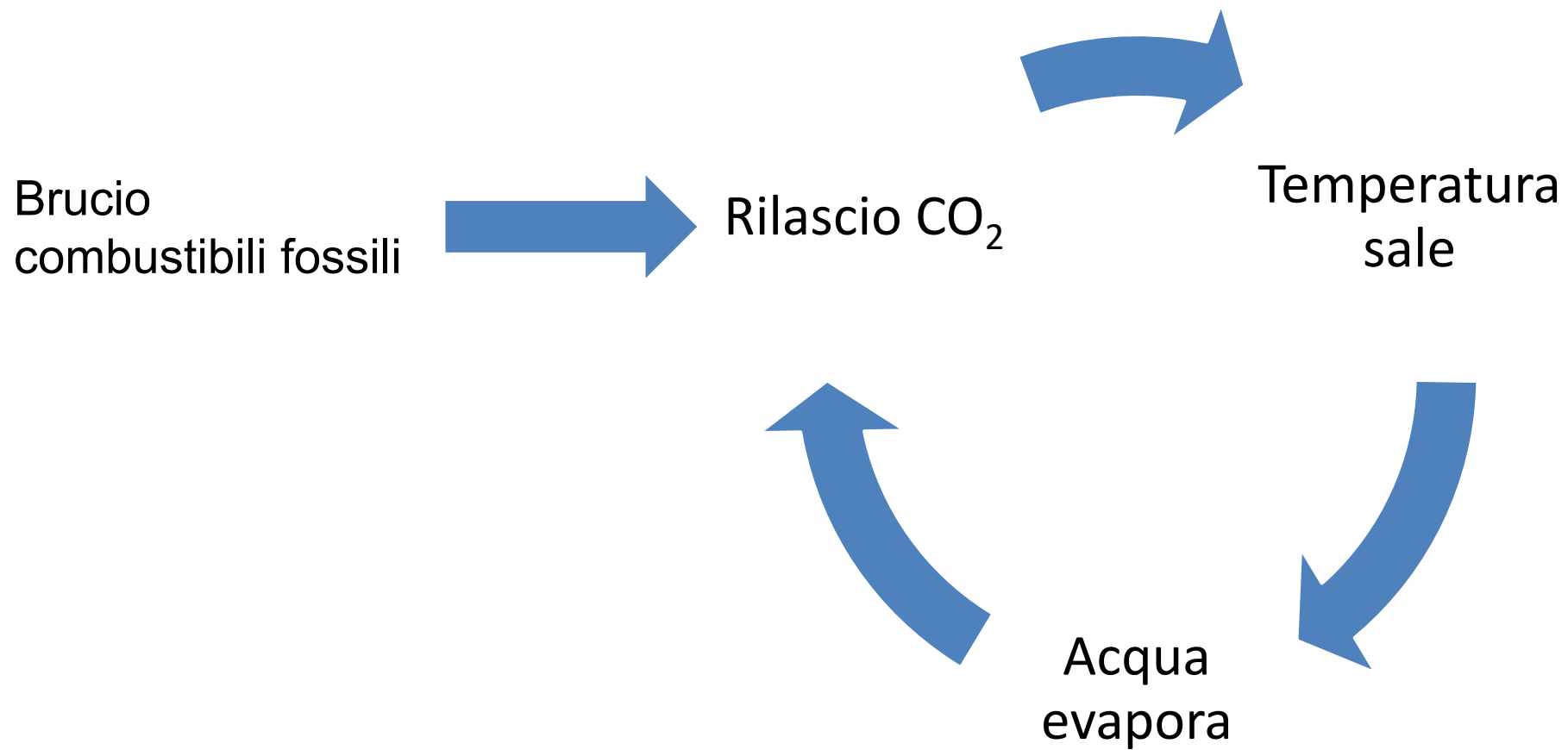


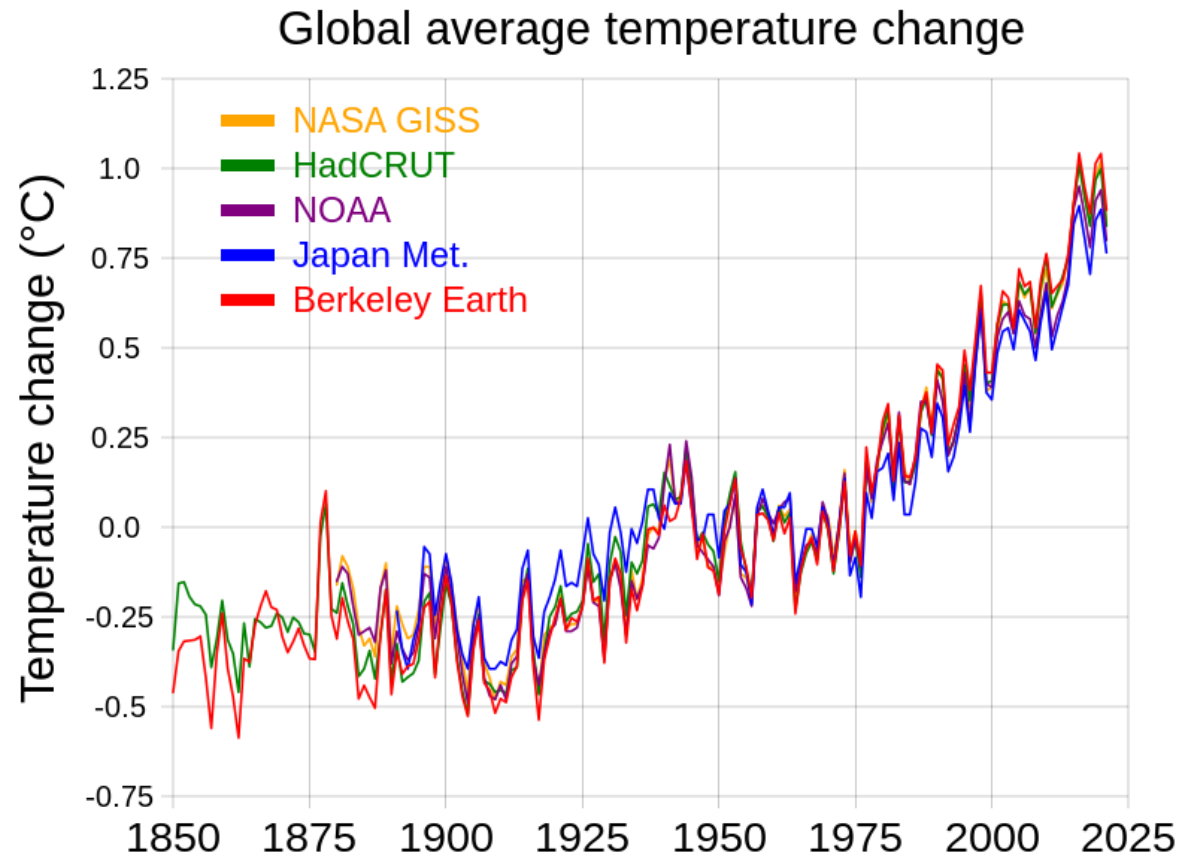
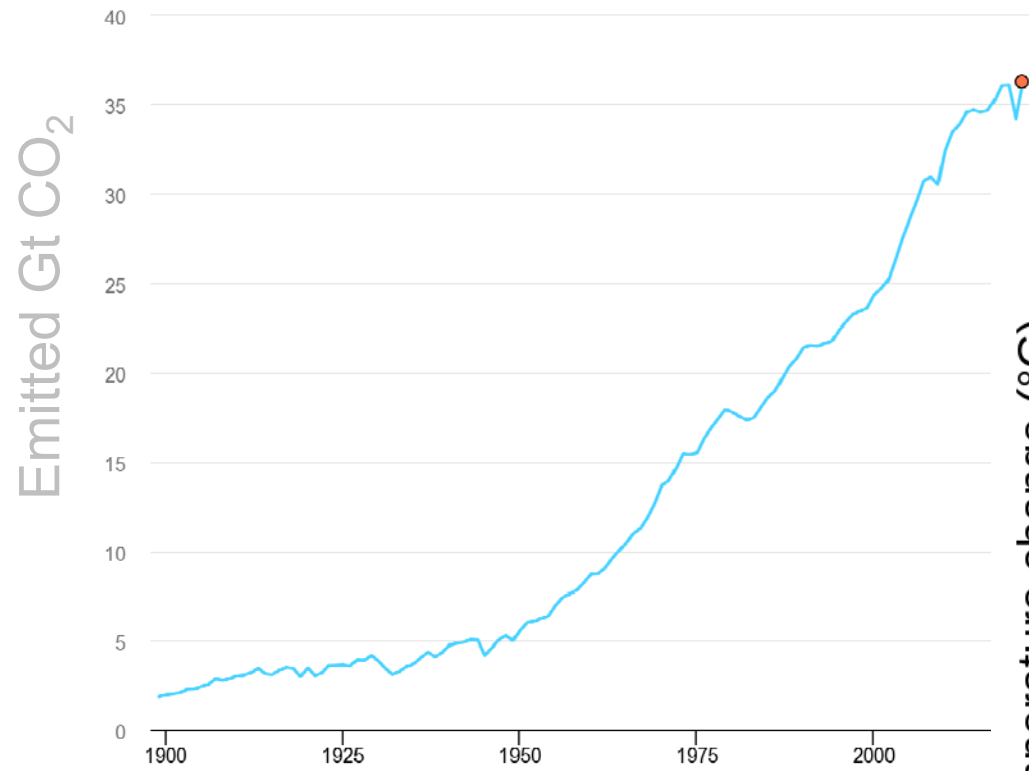
MECCANISMO AUTOCATALITICO



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
 DIPARTIMENTO DI CHIMICA

<https://airs.jpl.nasa.gov/resources/155/global-carbon-cycle/>







“We came all this way to explore the moon, and the most important thing is that we discovered the Earth.”

William Anders (NASA Astronaut)

THE GREAT ACCELERATION

SOCIO-ECONOMIC TRENDS



EARTH SYSTEM TRENDS



REFERENCE: Steffen, W., Broadgate, L., Deutsch, O., Gaffney, C. and Ludwig, J. The Trajectory of the Anthropocene: the Great Acceleration, *The Anthropocene Review*, 16 January 2015.
 MAP & DESIGN: Felix Pharand-Deschênes / Globalia

Paul Jozef Crutzen

1995 Nobel Prize in Chemistry for his
*“lavoro sulla Chimica dell’atmosfera, in
particolare sulla formazione e la
decomposizione dell’ozono”*

Ha proposto il termine
“Anthropocene”

Dal momento che le attività umane
(per la prima volta) stanno
indubbiamente avendo un effetto sulla
geologia e sugli ecosistemi terrestri





SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS



Obiettivi di sviluppo sostenibile, OSS (Sustainable Development Goals, SDG, Agenda 2030),
17 obiettivi interconnessi, definiti dall'ONU

**«as a universal call to action to end poverty, protect the planet, and ensure that by 2030
all people enjoy peace and prosperity »**

Obiettivo 13: I cambiamenti del clima

**«si devono adottare misure urgenti per contrastare il cambiamento climatico e i suoi
impatti regolando le emissioni e promuovendo gli sviluppi nell'energia rinnovabile»**

Lo sviluppo economico e il clima sono strettamente legati, in modo particolare attorno ai temi di povertà, parità di genere e, soprattutto, energia.



Paris agreement (2015) – COP 21, UN Climate Change Conference (UNCCC)

Trattato internazionale legalmente vincolante per limitare il surriscaldamento del pianeta ai 2° C (possibilmente a 1.5° C).

Questo non deve precludere la possibilità di accesso all'energia elettrica da parte di tutti gli abitanti del mondo (sviluppo sostenibile, sradicare la povertà)



2020, la Commissione EU ha quindi messo in atto il **2030 Climate Target Plan**

Ridurre le emission di gas (serra) di almeno il 55% (confronto ai valori del 1990) entro il 2030.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0562>

Tappa del **Green Deal Europeo** (2019),

“trasformare l'UE in una società giusta e prospera, dotata di un'economia moderna, efficiente sotto il profilo delle risorse e competitiva che nel 2050 non genererà emissioni nette di gas ad effetto serra e in cui la crescita economica sarà dissociata dall'uso delle risorse.”

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>



International Energy Agency: 4 scenari

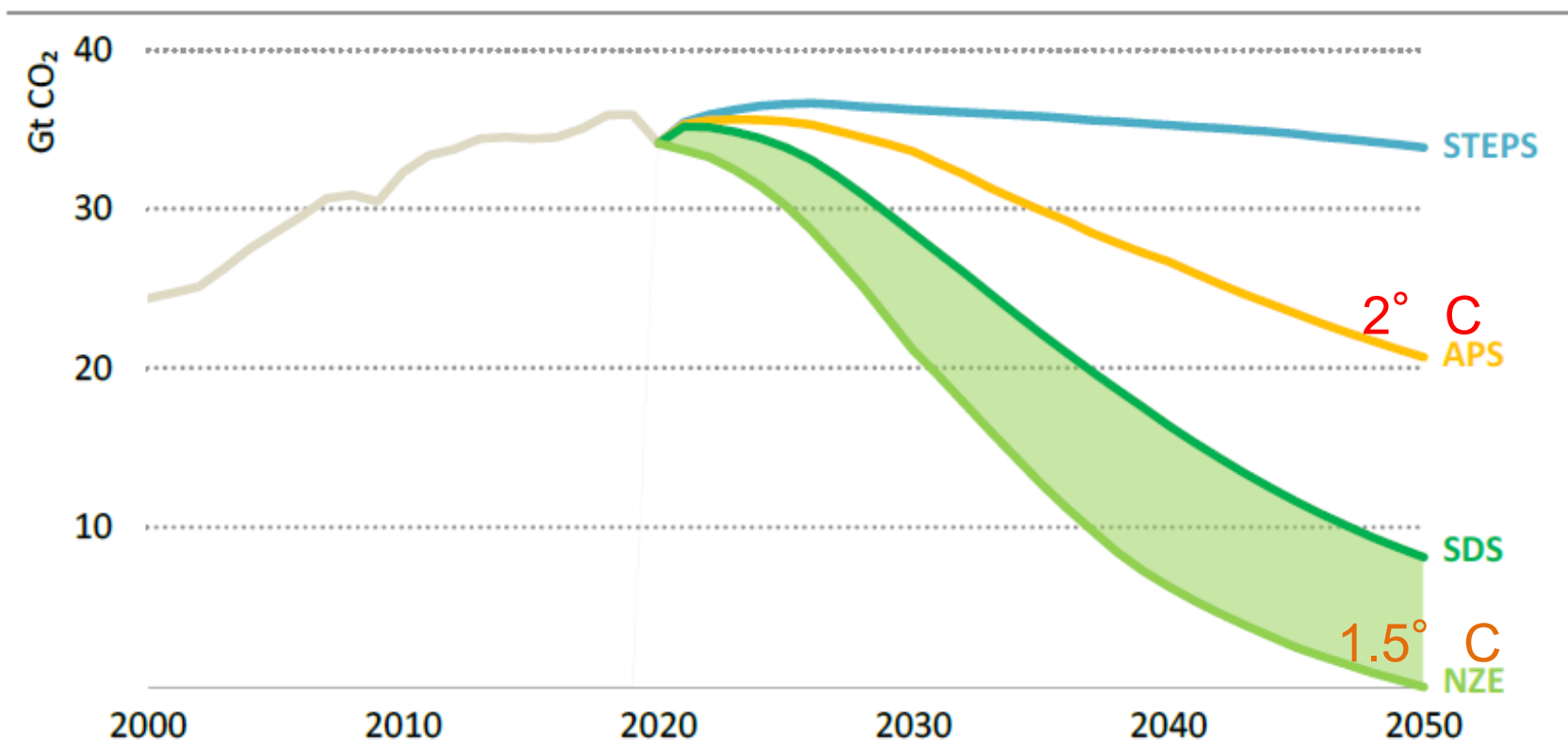
STEPS = Stated Policies Scenario, considera le politiche al momento in atto, settore per settore, includendo quelle già annunciate dai governi del Mondo.

APS = Announced Pledges Scenario, tiene conto di tutti gli impegni presi dai governi mondiali saranno pienamente rispettati, inclusi quelli derivanti dall'accordo di Parigi

SDS = Sustainable Development Scenario: Zero emissioni entro il 2070 (ben sotto i 2° C)

NZE = Zero emissioni (Net Zero Emissions) entro il 2050, per tenere l'aumento di T entro i 1.5° C





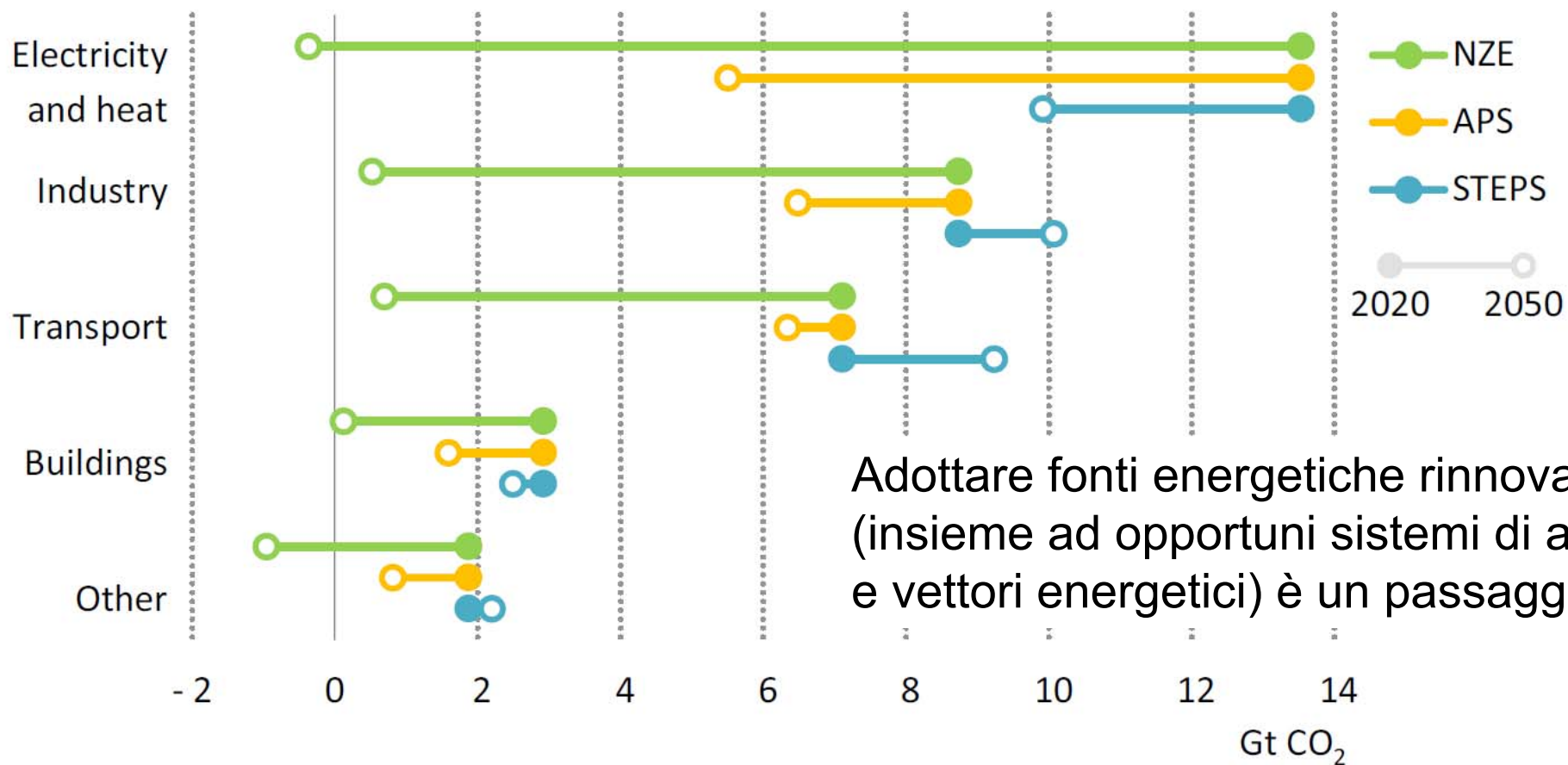
IEA. All rights reserved.

The APS pushes emissions down, but not until after 2030; the SDS goes further and faster to be aligned with the Paris Agreement; the NZE delivers net zero emissions by 2050



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
DIPARTIMENTO DI CHIMICA

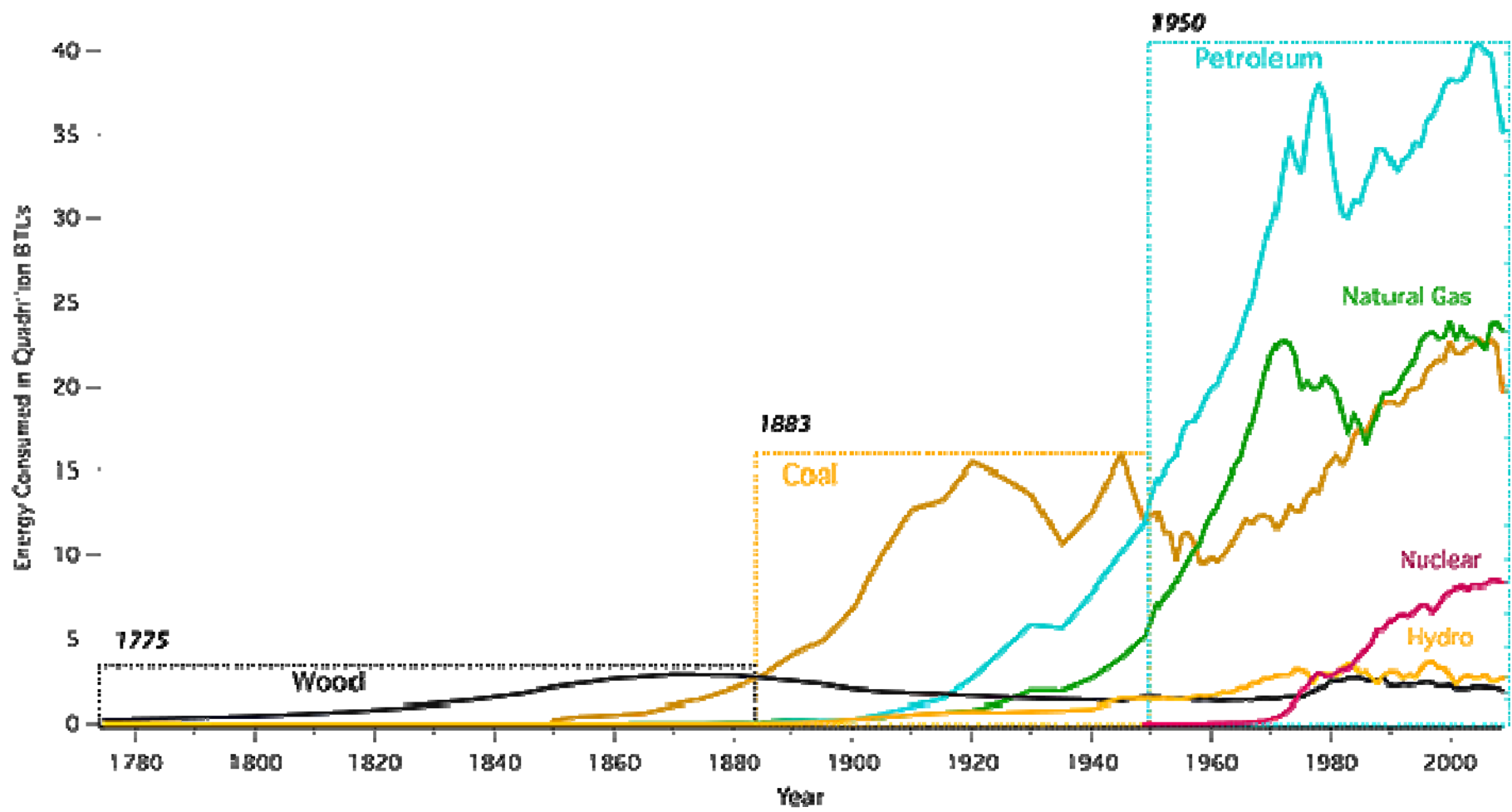
Figure 1.1 ▶ CO₂ emissions by sector and scenario



Adottare fonti energetiche rinnovabili (insieme ad opportuni sistemi di accumulo e vettori energetici) è un passaggio chiave

IEA. All rights reserved.





Credit: U.S. Energy Information Administration, Annual Energy Review 2011, published September 2012





SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS

1 NO POVERTY

2 ZERO HUNGER

3 GOOD HEALTH AND WELL-BEING

4 QUALITY EDUCATION

5 GENDER EQUALITY

6 CLEAN WATER AND SANITATION

7 AFFORDABLE AND CLEAN ENERGY

8 DECENT WORK AND ECONOMIC GROWTH

9 INDUSTRY, INNOVATION AND INFRASTRUCTURE

10 REDUCED INEQUALITIES

11 SUSTAINABLE CITIES AND COMMUNITIES

12 RESPONSIBLE CONSUMPTION AND PRODUCTION

13 CLIMATE ACTION

14 LIFE BELOW WATER

15 LIFE ON LAND

16 PEACE, JUSTICE AND STRONG INSTITUTIONS

17 PARTNERSHIPS FOR THE GOALS

SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS

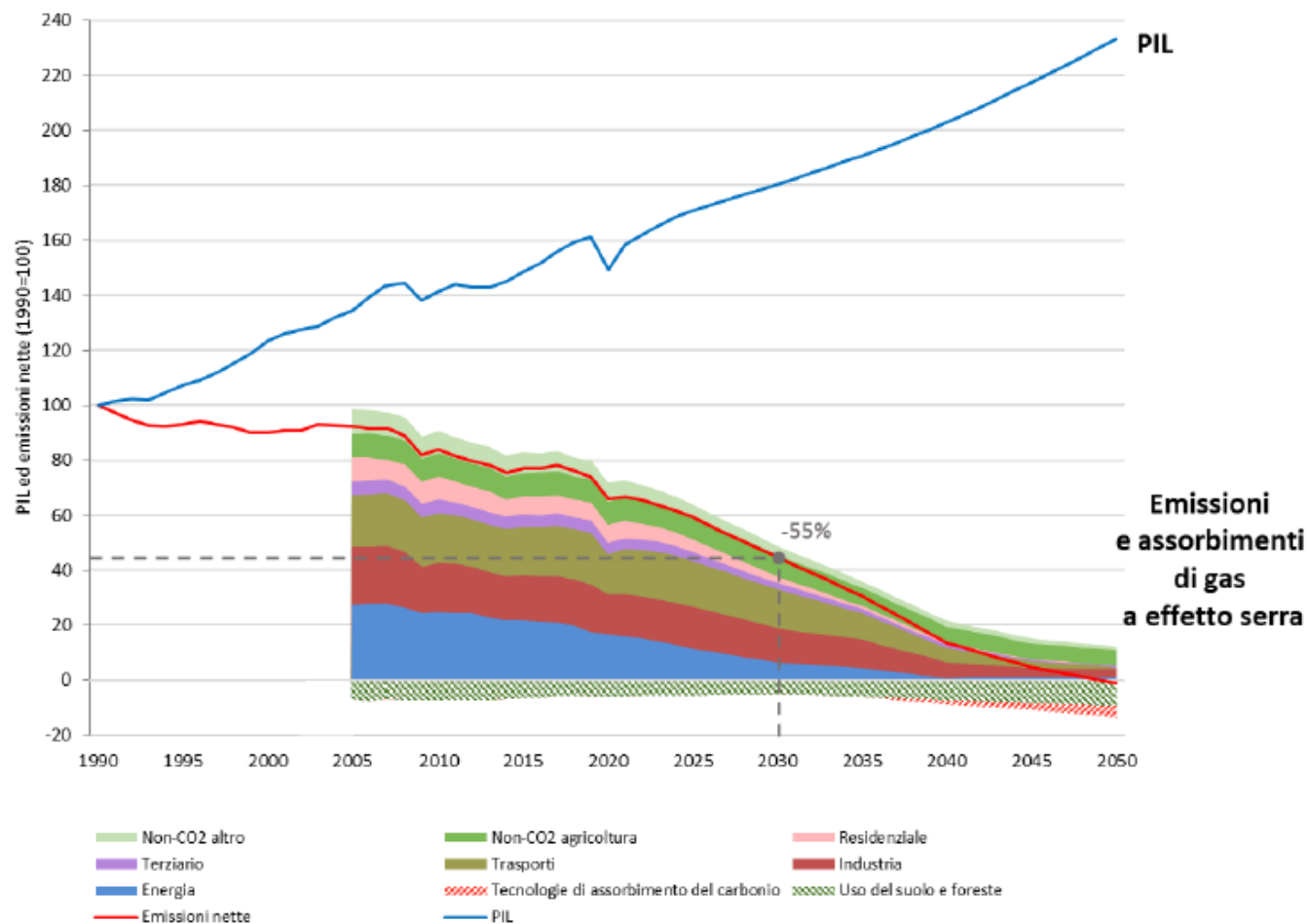
Incontro PLEF-UNIMI del 13/12



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
DIPARTIMENTO DI CHIMICA

<https://www.undp.org/>

«Occorrono 25 anni – una generazione – per trasformare un settore industriale e tutte le catene del valore. Per essere pronti nel 2050, le decisioni e le azioni dovranno essere prese nei prossimi cinque anni.»



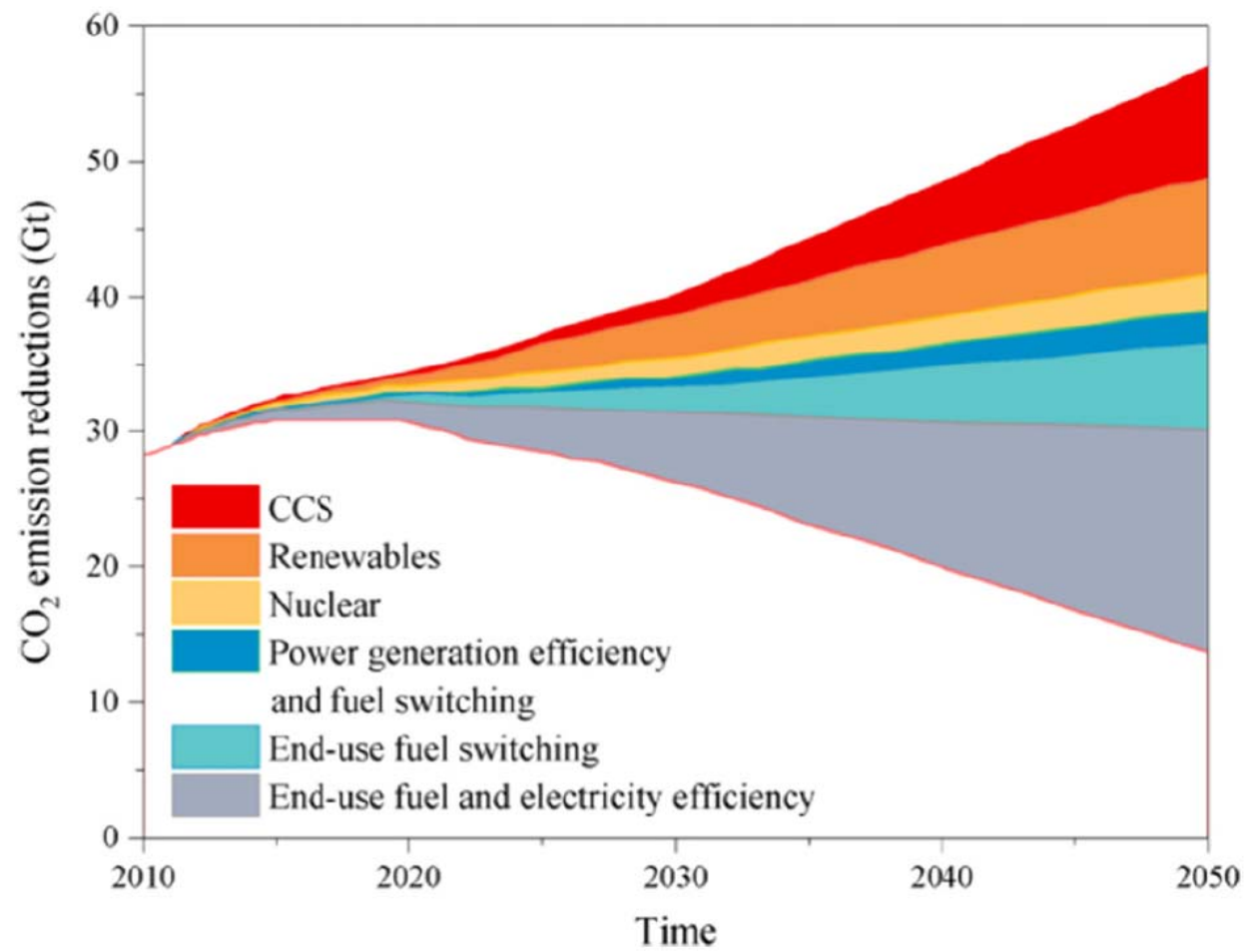
COMUNICAZIONE DELLA COMMISSIONE AL PARLAMENTO EUROPEO,
AL CONSIGLIO, AL COMITATO ECONOMICO E SOCIALE EUROPEO E
AL COMITATO DELLE REGIONI

Un traguardo climatico 2030 più ambizioso per l'Europa

Investire in un futuro a impatto climatico zero nell'interesse dei cittadini

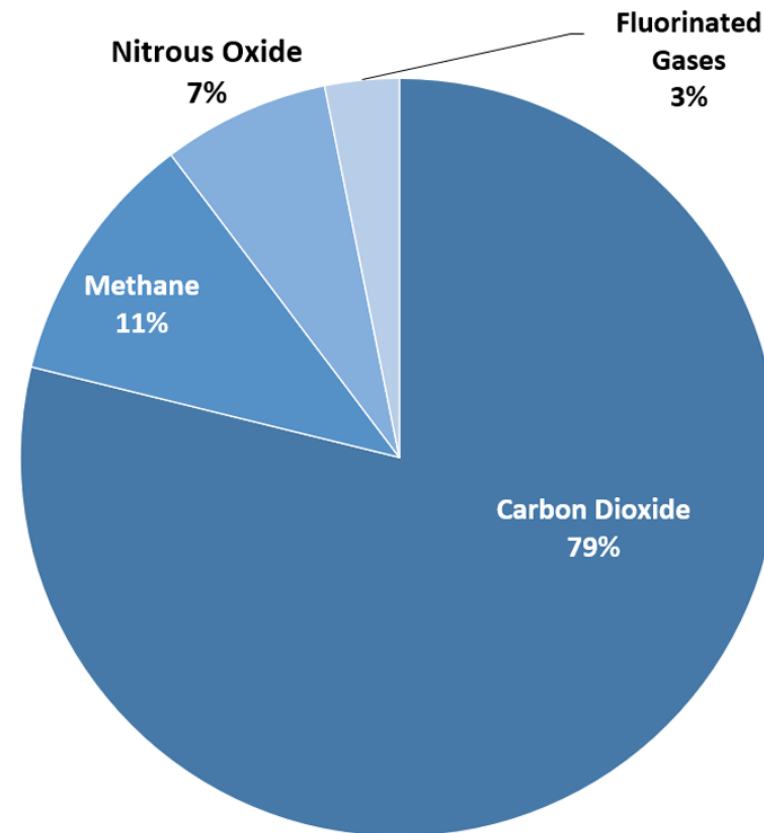
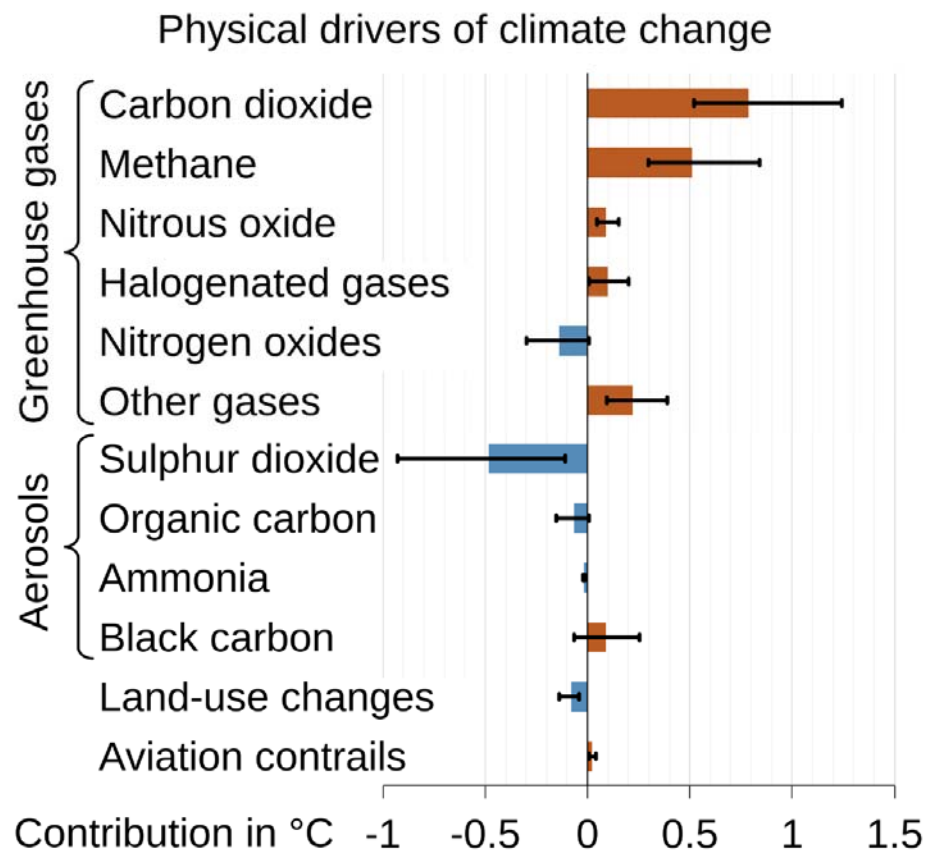


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
DIPARTIMENTO DI CHIMICA



Non solo CO₂

Overview of U.S. Greenhouse Gas Emissions in 2020



U.S. Environmental Protection Agency (2022). Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2020



Tecnologie CCS (*Carbon Capture and Storage*): permettono di sequestrare il CO₂ in modo permanente in serbatoi naturali.

- 1) sfruttare le **proprietà acide** dell'anidride carbonica facendola reagire con una base.
- 2) **assorbimento fisico** che prevede il **temporaneo intrappolamento** delle molecole di CO₂ all'interno di strutture porose come zeoliti, carboni attivi o **microscopiche spugne metallo-organiche**
- 3) **assorbimento chimico** per cui la CO₂ forma dei veri e propri legami con un apposito substrato. In entrambi i casi l'anidride carbonica può essere recuperata in maniera concentrata tramite **trattamento termico** ripristinando così la **matrice attiva** per un altro **ciclo di cattura**.

CCU (*Carbon Capture and Utilization*).

Catturare di questo gas serra **direttamente** dall'atmosfera?



Catturare di questo gas serra **direttamente** dall'atmosfera.

Problema: è estremamente **diluata**: 420 ppm (**0,042%** dell'aria)

Per immagazzinare 1 L di CO₂ bisogna trattare **2500 L di aria**: i costi per catturarla sono quindi alti

2011 **American Physical Society**: **530 €/ton** cattura dall'aria.

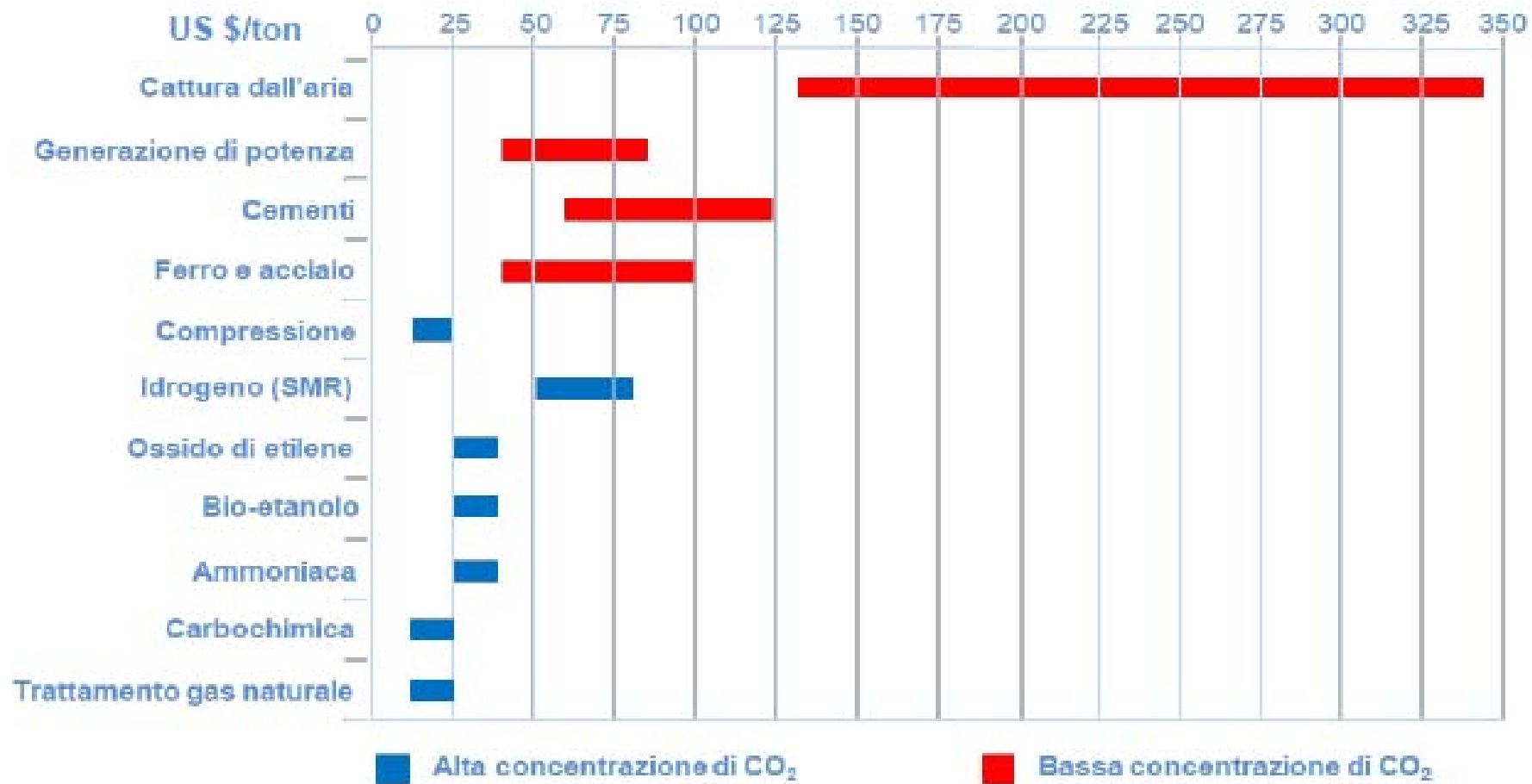
2022 **World Resources Institute**: 250 - 600 €/ ton in funzione della tecnologia

Stime: entro 2030 **150-200€/ton**

Non sono competitivi con cattura di CO₂ da point sources di processi di combustione dove è concentrata (ca. 15%).

Progetti di riforestazione ca. **50€/ton CO₂** sequestrata.





Allora, dove agire?

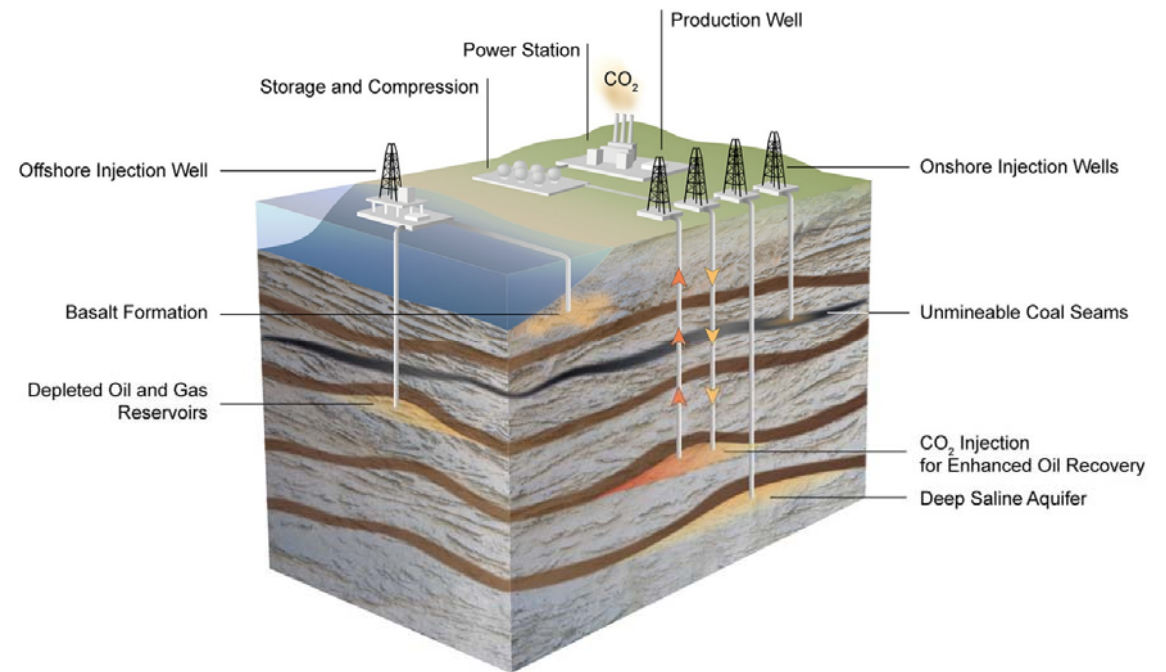
Fonti specifiche di CO₂, come ad esempio:

- centrali termoelettriche
- impianti industriali
 - Metallurgico/siderurgico
 - Industria chimica (ad es. sintesi dell'ammoniaca e quindi idrogeno), petrolchimica
 - Cementifici



Cosa me ne faccio?

- CCS = Carbon Capture and STORAGE

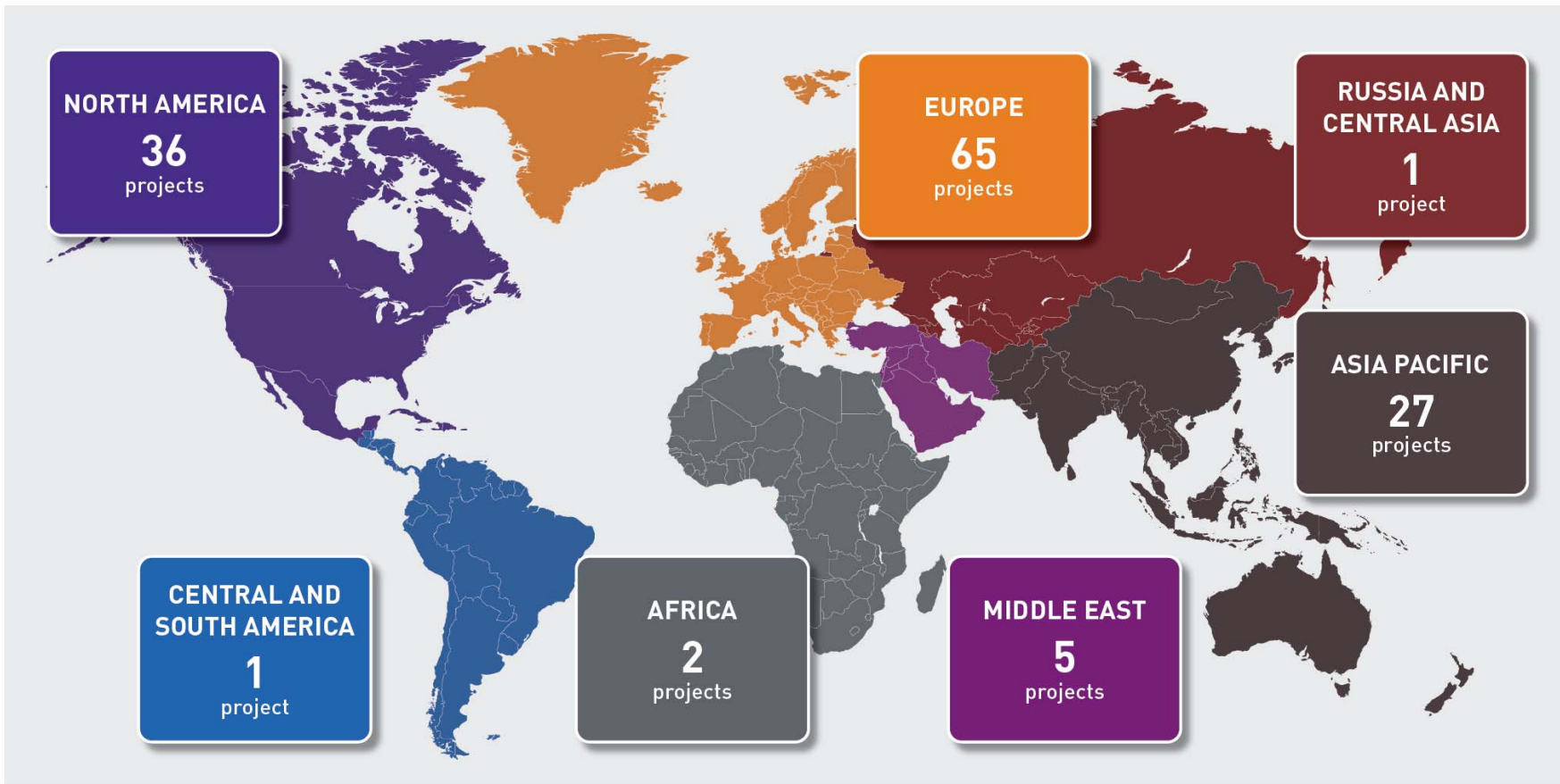


- CCU = Carbon Capture and USE (V dopo)

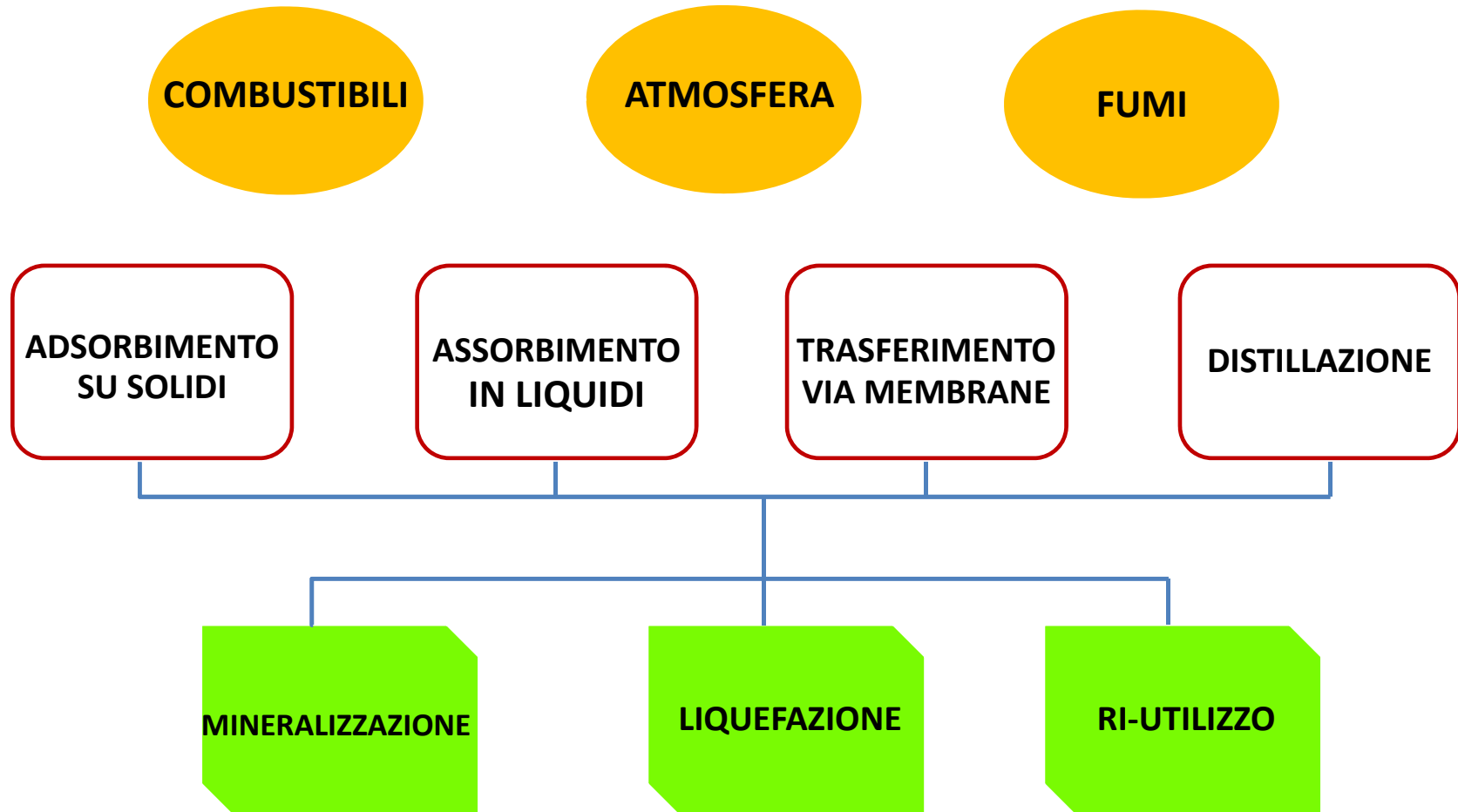


Global CCUS projects

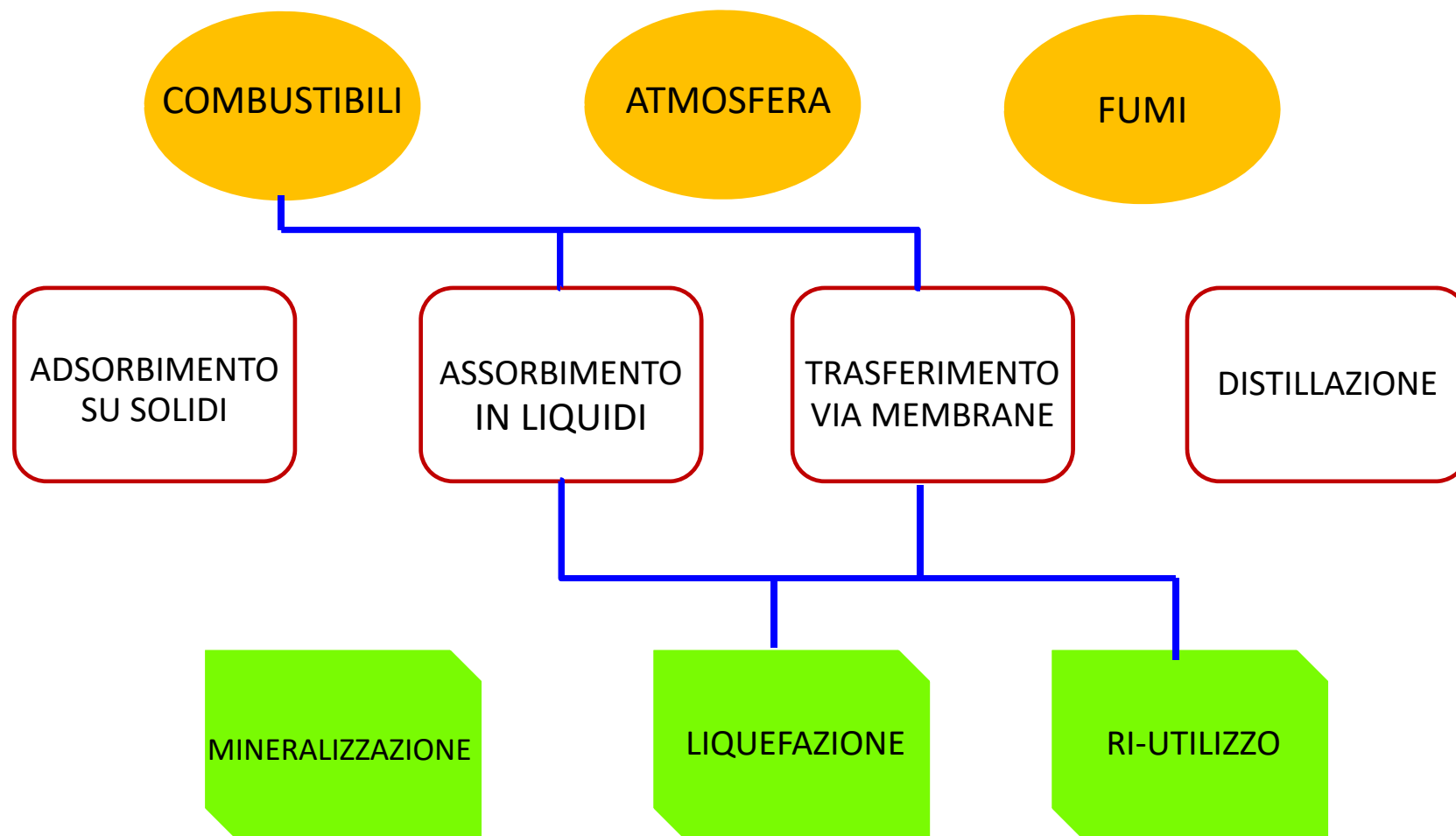
Overview of existing and planned CCUS facilities



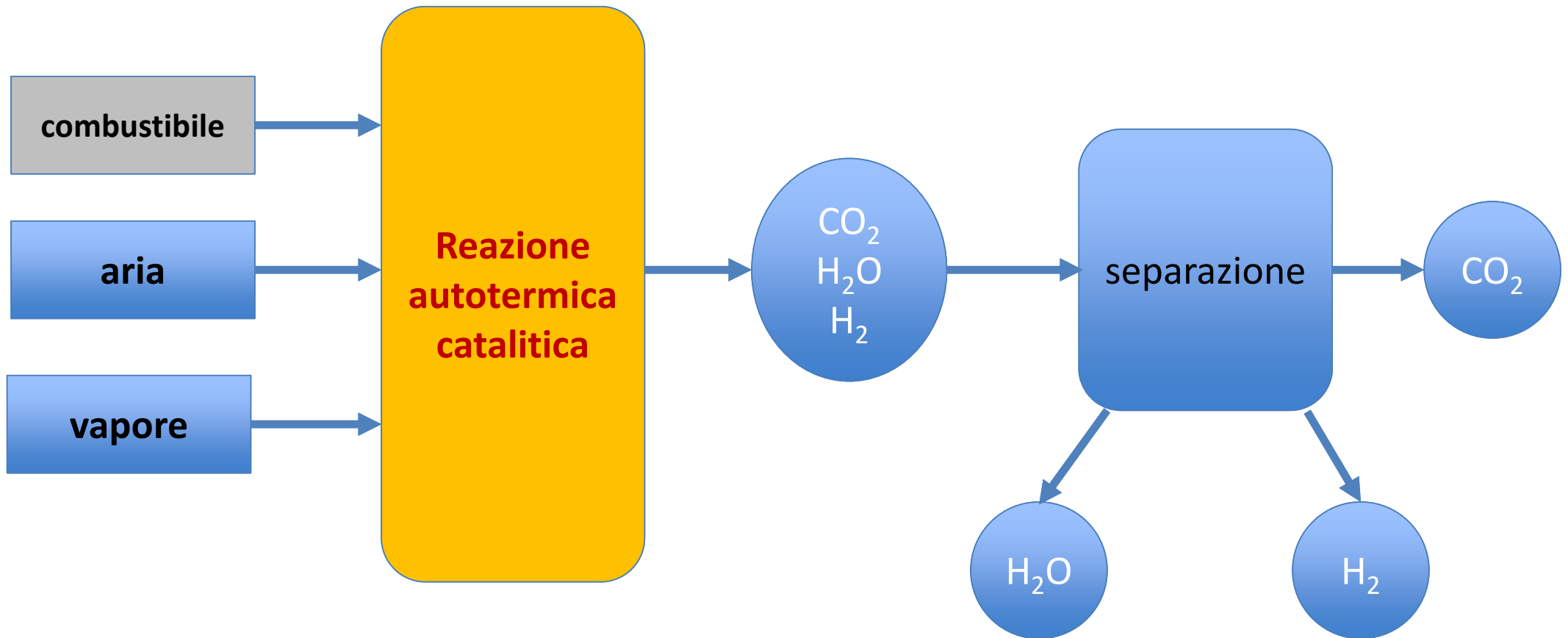
Schematica del sequestro



Vie praticabili: reforming & Chemical looping

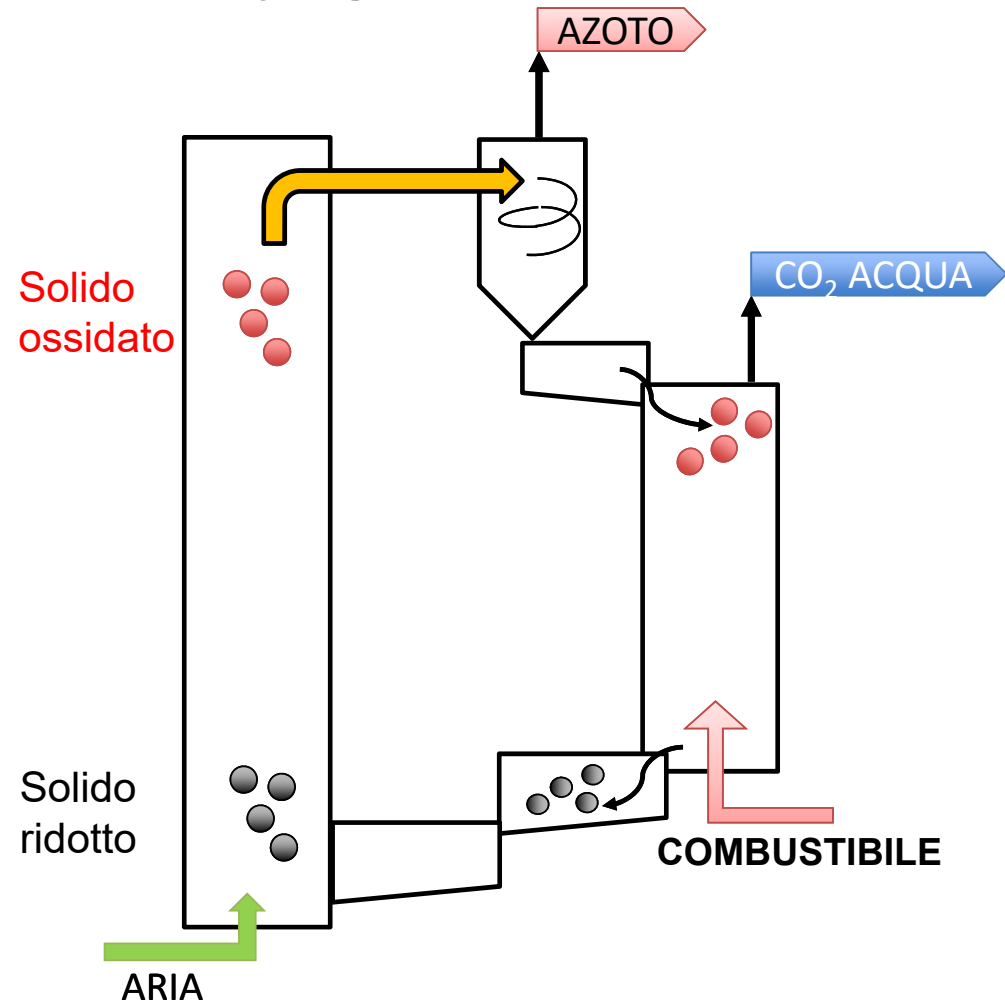


Cattura pre-combustione (reforming)

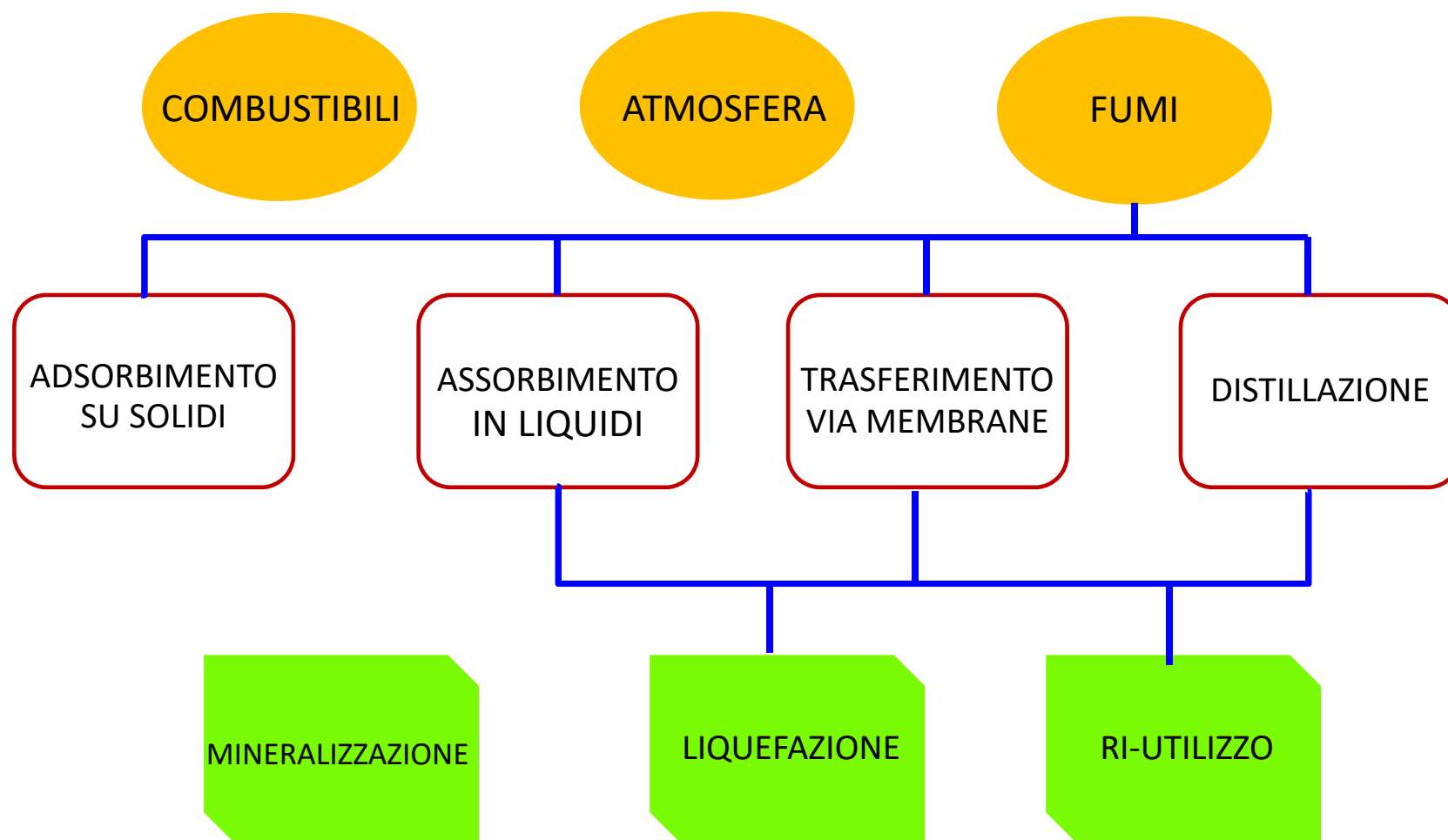


Chemical Looping

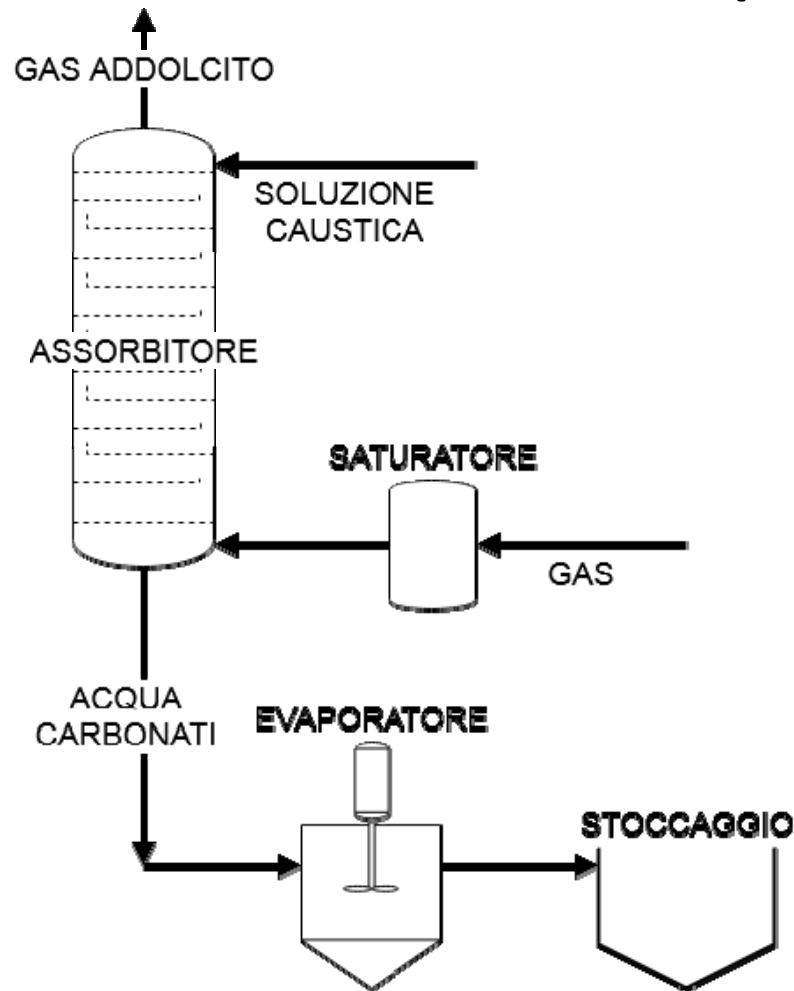
- Cattura diretta della CO₂
- Minimizza i sottoprodotti di combustione
- Modulabile su combustibili solidi / gas
- Diversi solidi impiegabili
- Adattabile ai normali GV
- Non adattabile a TG
- Doppio reattore fluidizzato



Vie praticabili: cattura post-combustione



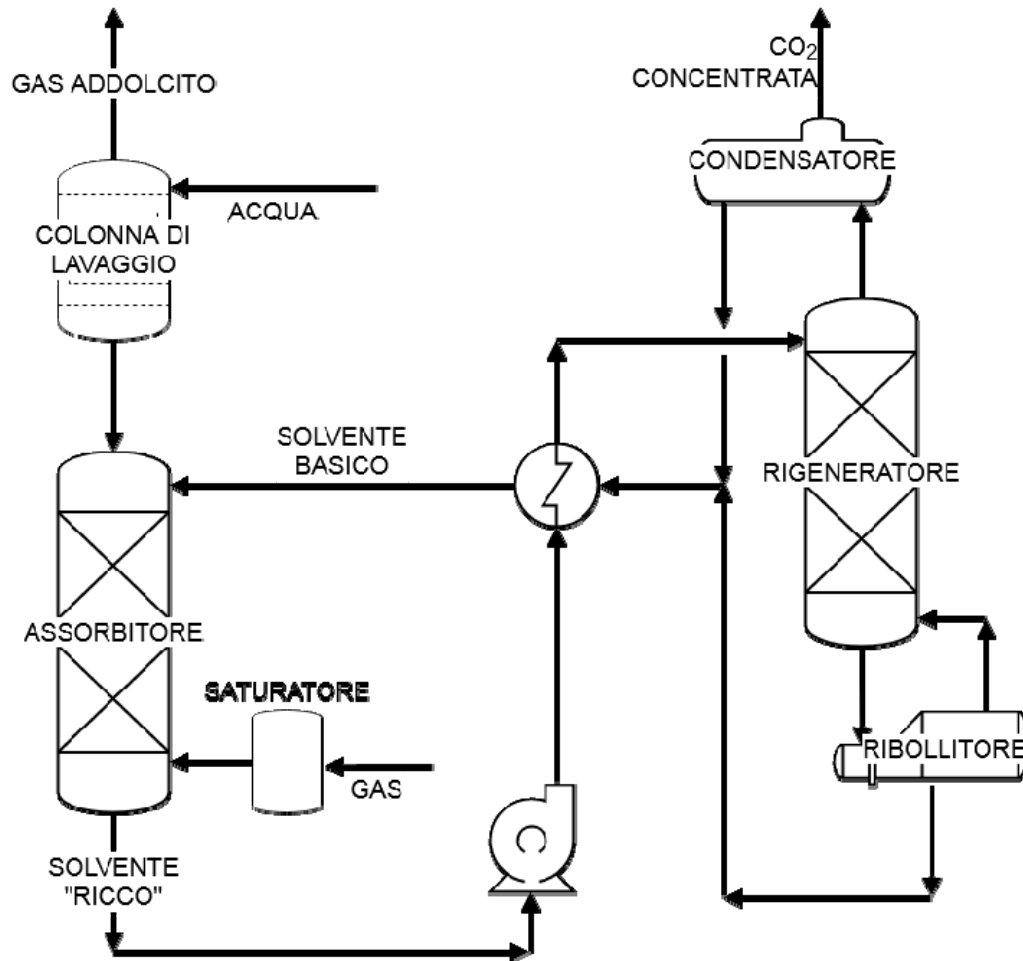
Assorbimento in liquido con base minerale



- Alta efficienza di cattura
- Tratta anche l'aria
- Rigenerazione del caustico complessa
- Produzione netta di minerali da stoccare



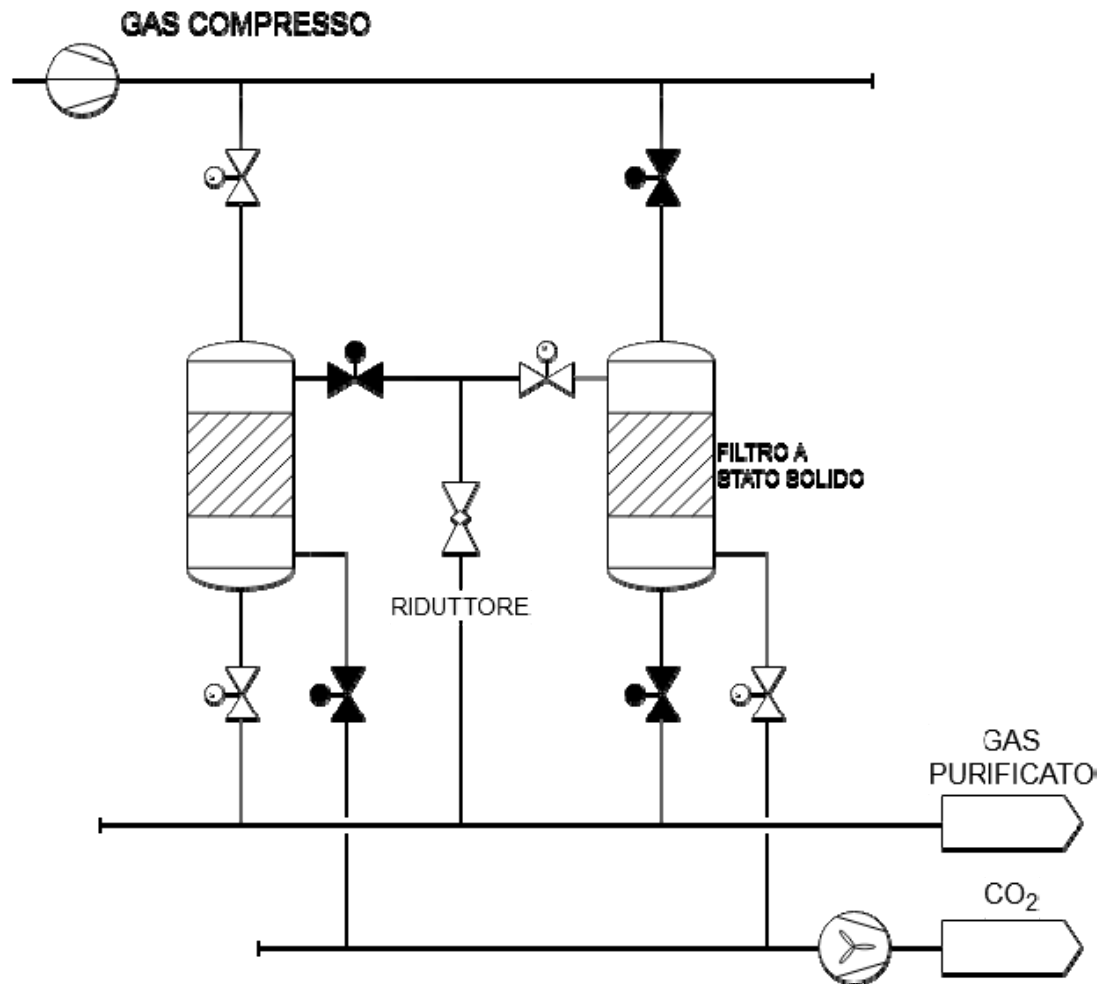
Assorbimento in liquido con basi organiche



- Promozione cinetica di assorbimento
- Minimizzazione scarti
- Rigenerazione endotermica
- Necessità inibitori di corrosione
- Preferito su larga scala



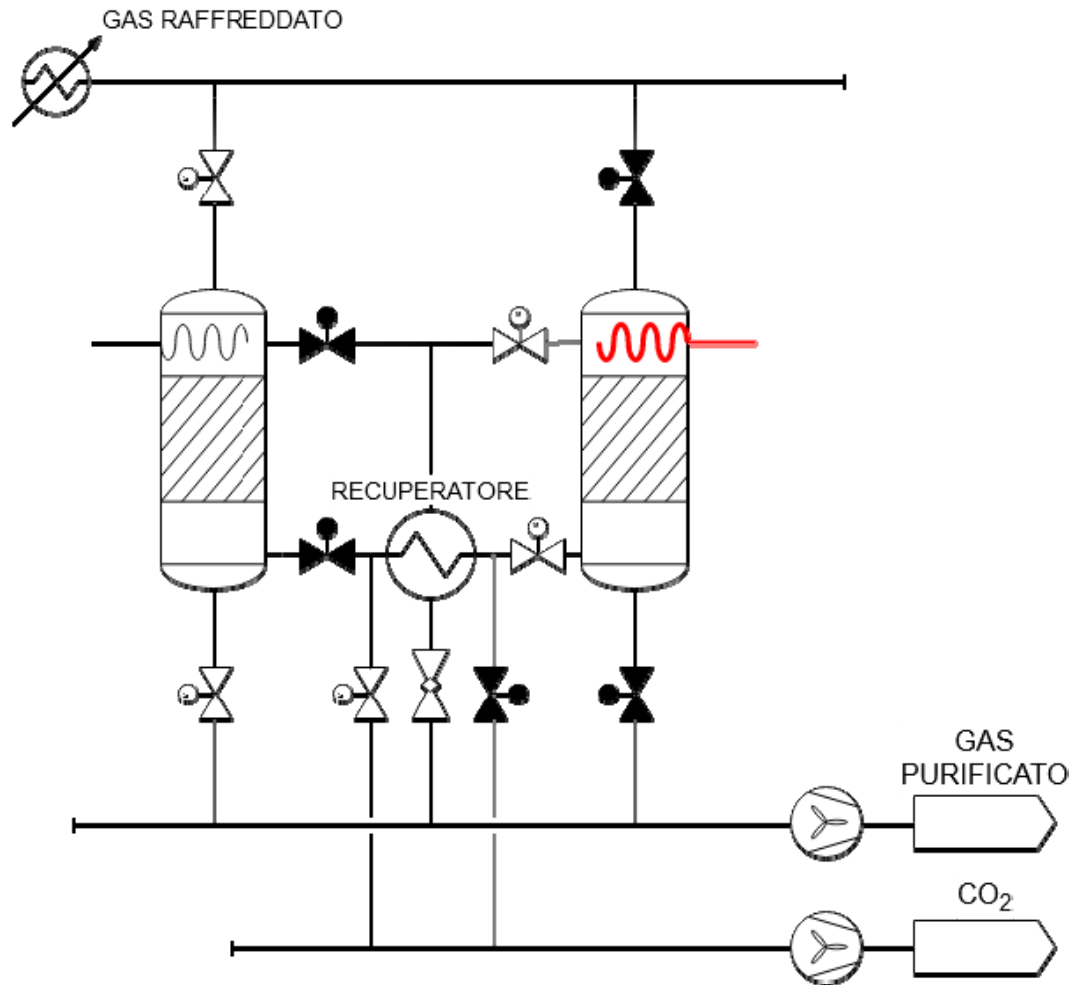
Adsorbimento su solido (PSA)



- Modulare e scalabile
- Non richiede energia termica
- Ciclo valvole adattabile al numero di assorbitori
- Richiede pressurizzazione
- Processo semi-batch
- Non garantisce purezze spinte



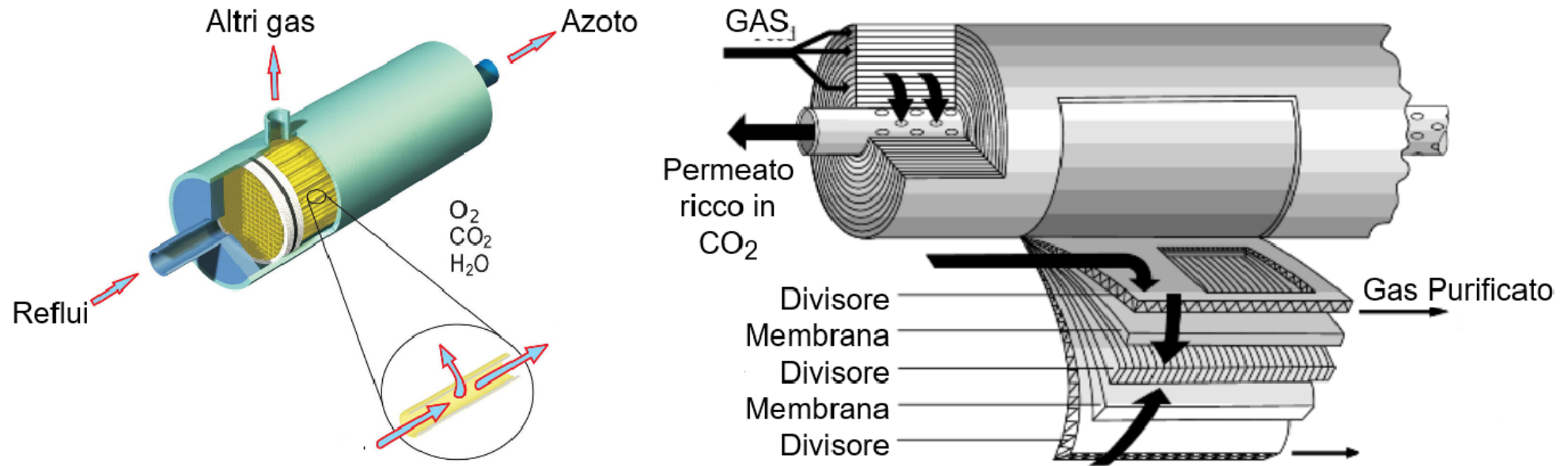
Adsorbimento su solido (TSA)



- Modulare e scalabile
- Non richiede pressurizzazione
- Ciclo valvole adattabile al numero di assorbitori
- Richiede recuperi termici
- Processo semi-batch
- Non garantisce purezze spinte



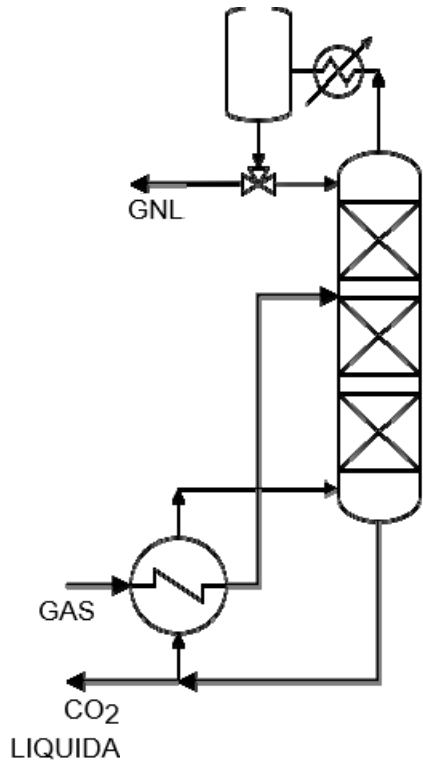
Trasferimento via membrane



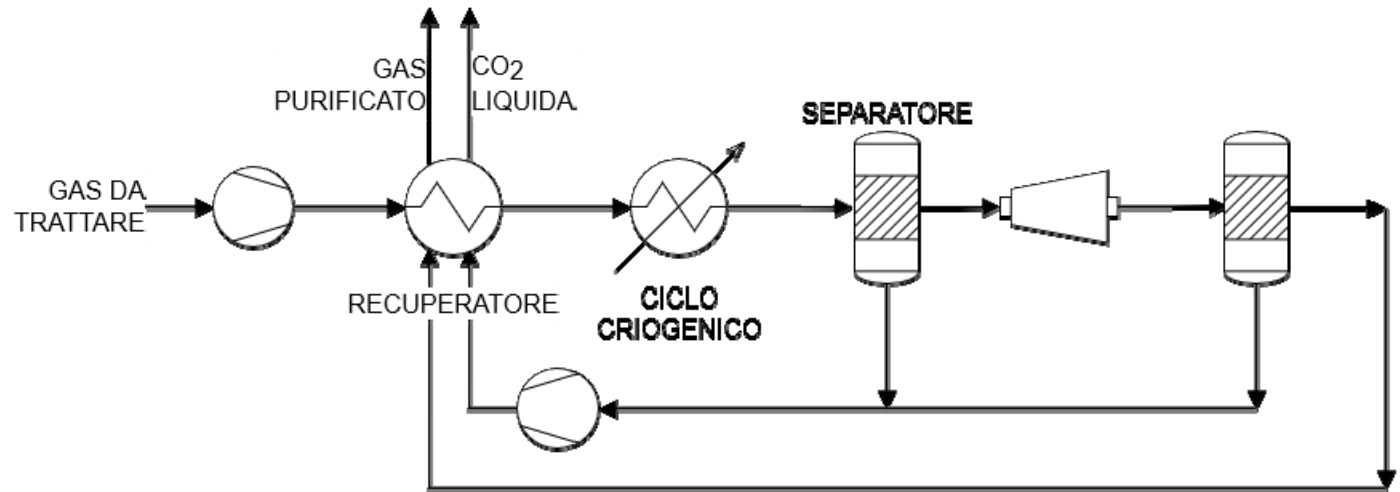
- Funziona a pressioni medio-basse
- Utilizzabile per diverse miscele gassose
- Modulare e scalabile
- **Tratta grandi volumi**
- **Richiede condizionamenti termici**
- **Non garantisce purezze spinte**



Tecniche criogeniche



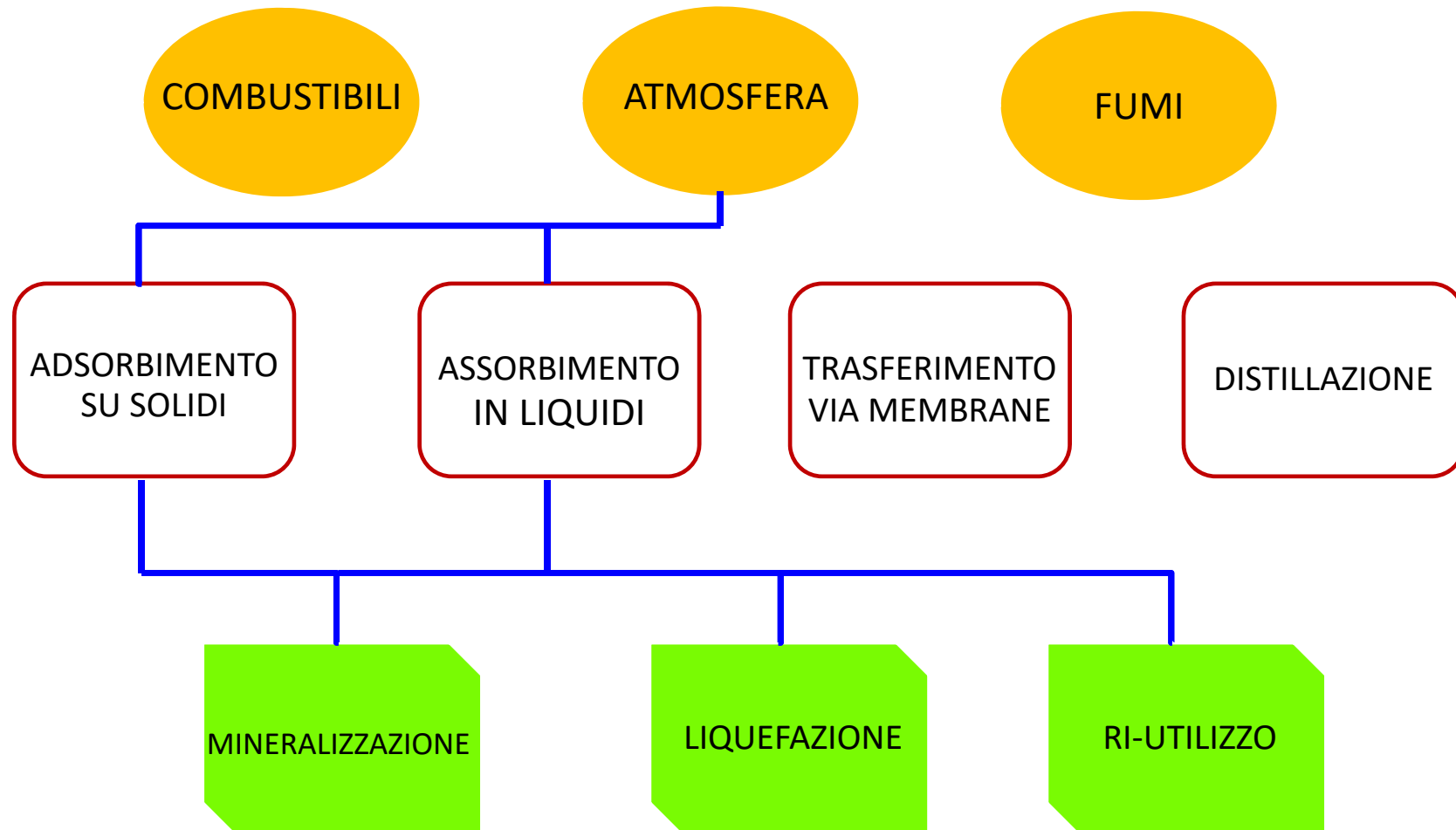
Distillazione:
utile per purificare il metano



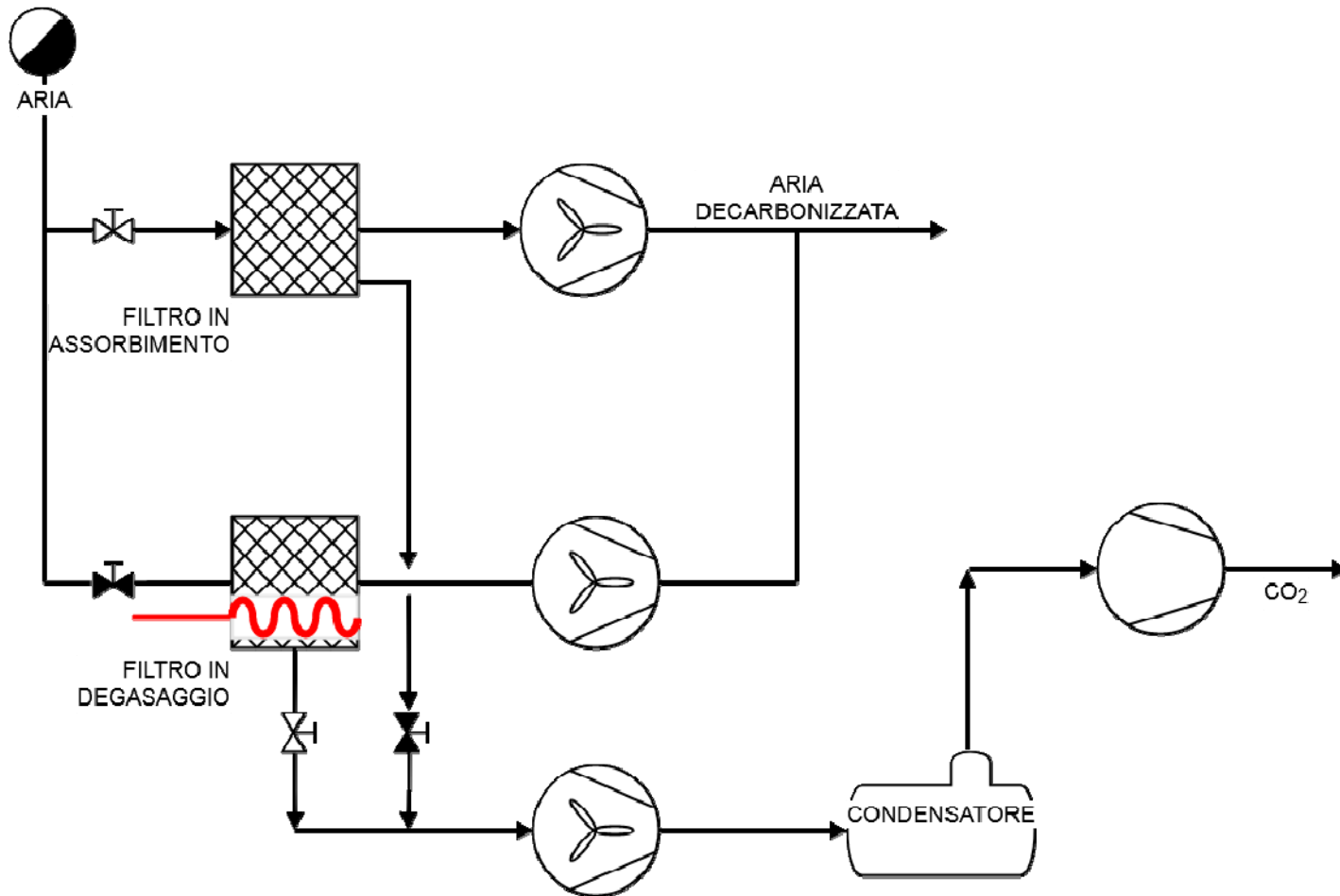
Adsorbimento a bassa temperatura:
più adatto per gas composti



Vie praticabili: cattura da atmosfera



Cattura da atmosfera a filtro

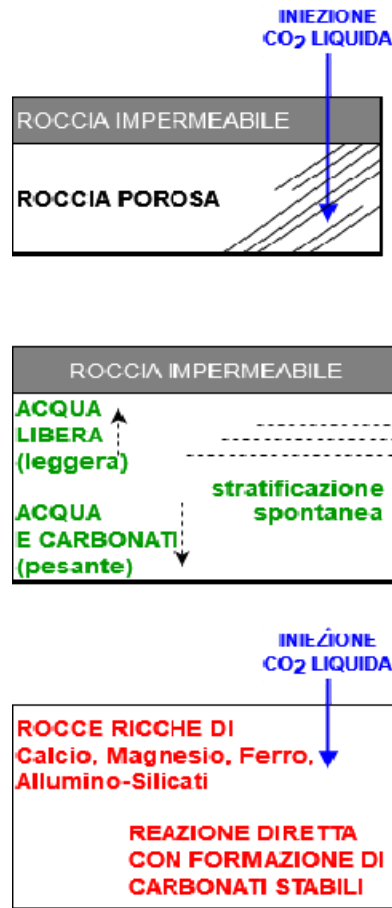


- Installazioni tecnologicamente semplici
- Scarti minimi
- Indicato per cattura da atmosfera
- **Bassa efficienza**
- **Tratta grandi volumi d'aria**

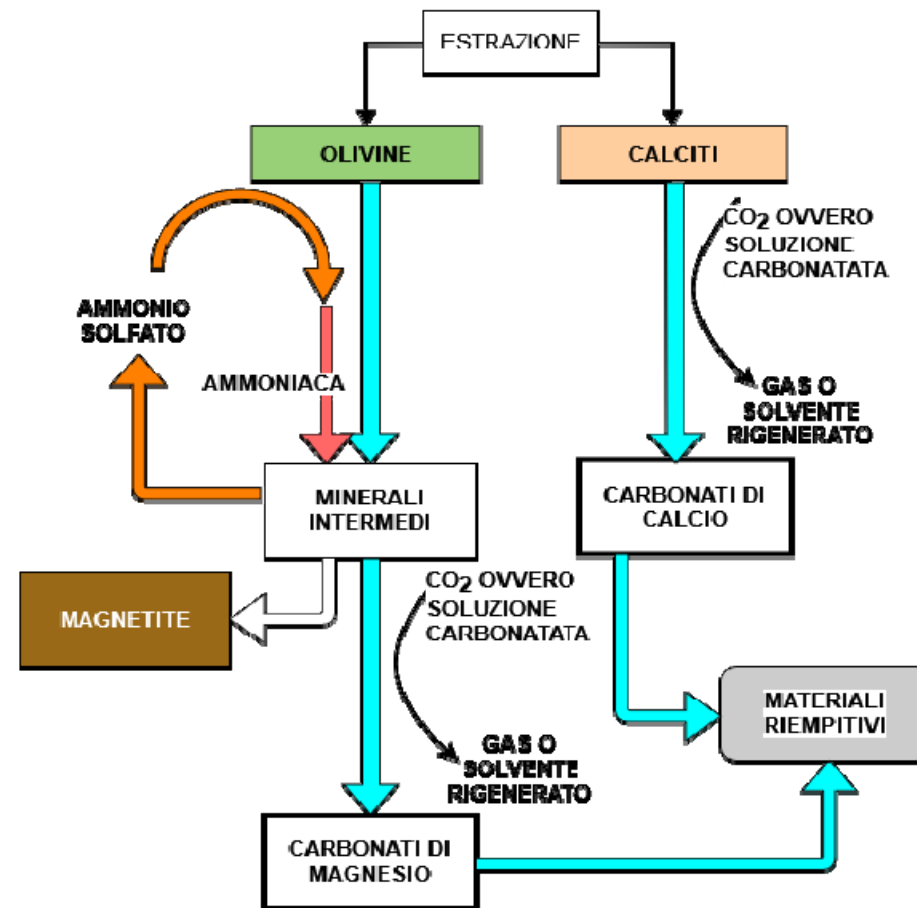


Stoccaggio & mineralizzazione

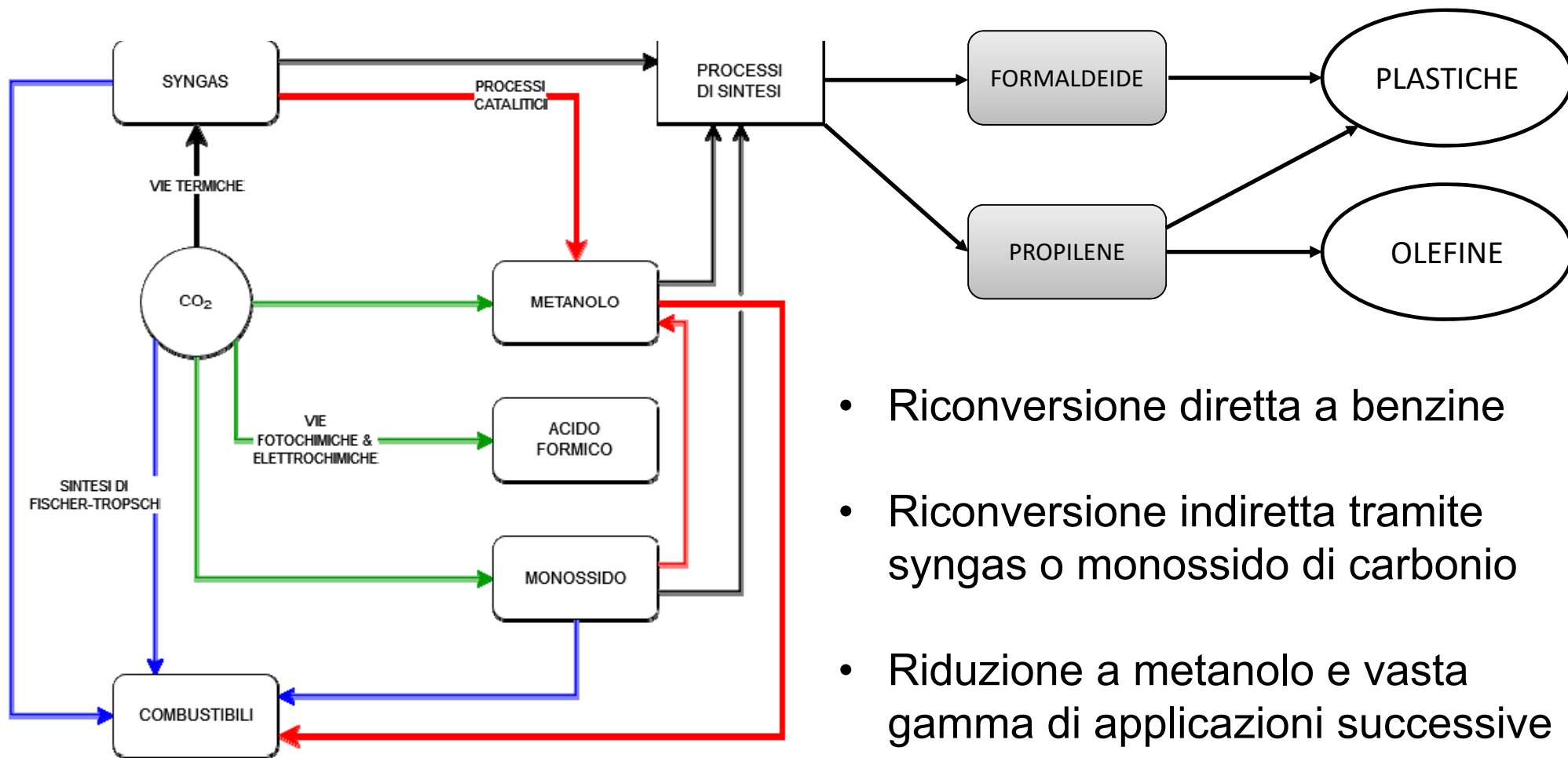
in situ



ex situ



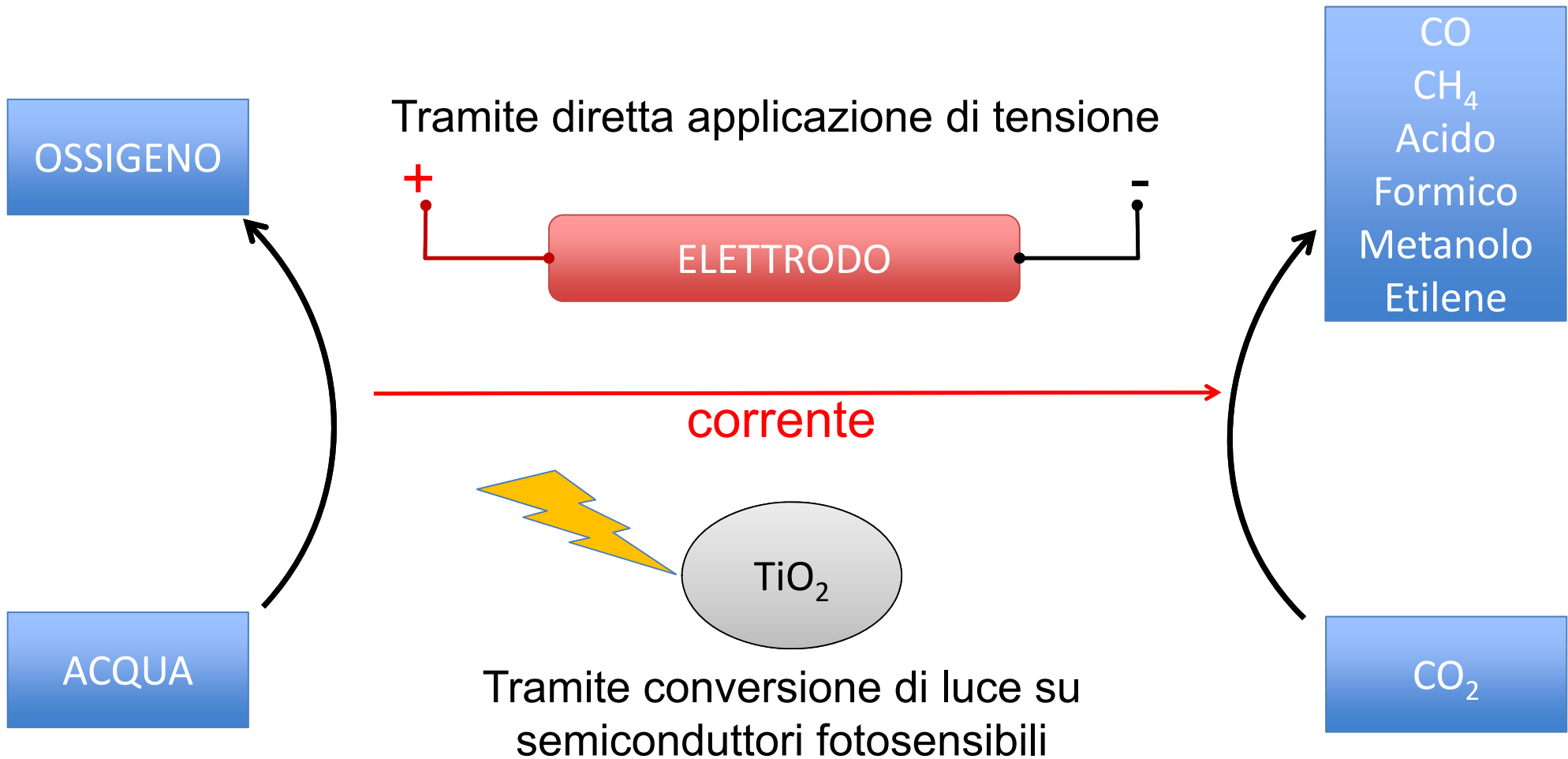
Riutilizzo (1)



- Riconversione diretta a benzine
- Riconversione indiretta tramite syngas o monossido di carbonio
- Riduzione a metanolo e vasta gamma di applicazioni successive



Riutilizzo (2)



Applicazioni industriali di stoccaggio



ENI (ITA)

- Progetto stoccaggio permanente dell'anidride carbonica in giacimento di gas naturale dismesso
- Costruzione di impianto di mineralizzazione basato su Magnesio-Silicati

<https://www.eni.com/it-IT/attivita/gestione-anidride-carbonica.html>

<https://www.eni.com/it-IT/media/comunicati-stampa/2022/01/eni-annuncia-collaborazione-holcim-sviluppo-tecnologia-utilizzo-co2.html>



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
DIPARTIMENTO DI CHIMICA

Applicazioni industriali combinate



Climework (CH)

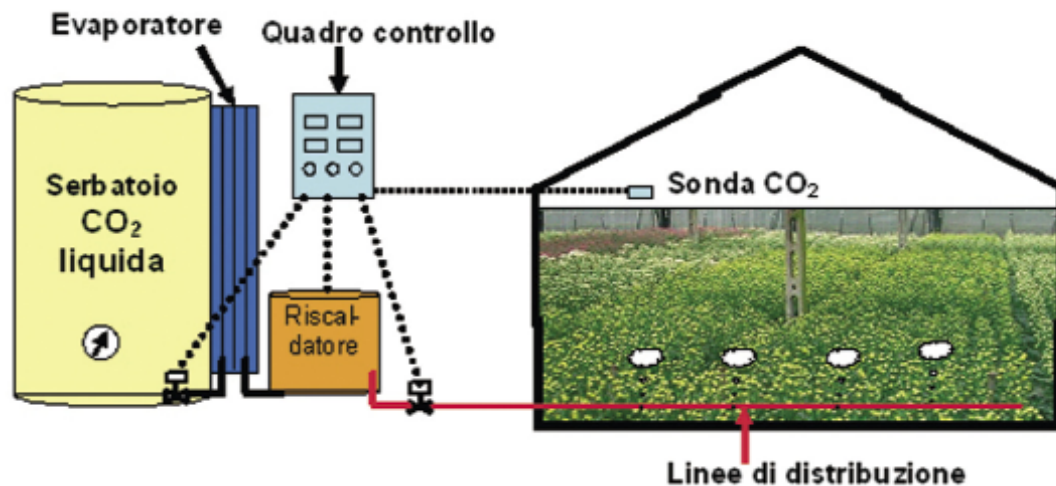
- Impianto commerciale di cattura atmosferica seguita da mineralizzazione *in-situ*

<https://www.swissinfo.ch/ita/il--viaggio-ambizioso--verso-la-cattura-di-miliardi-di-tonnellate-di-co2/47880260>



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
DIPARTIMENTO DI CHIMICA

Riutilizzo della CO₂ in serra



Soluzioni commerciali da piccole/medie aziende (Italia)

- SIAD
- Stubbe
- SOL

...

<https://www.agrifoodtoday.it/smart-green/il-carbon-farming-puo-essere-un-opportunita-per-l-agricoltura-italiana.html>



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
DIPARTIMENTO DI CHIMICA

Soluzioni commerciali per la separazione



MEMBRANE



LAVAGGIO AMMINICO



PRESSURE-SWING

<https://www.fiorentini.com/it/soluzioni/sistemi/trattamento-del-gas/purificazione-del-gas-attraverso-membrane/>

<https://xebecinc.com/funzionamento/?lang=it#how-it-work-psa>

https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/combustibili-fossili-ccs/2013/rds-par2013-276.pdf



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
DIPARTIMENTO DI CHIMICA

Materiale utile

<https://www.iogp.org/bookstore/product/map-of-global-ccs-projects/>

<https://www.aidic.it/Position%20PaperCCUS.pdf>



GRAZIE
per la cortese attenzione



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
DIPARTIMENTO DI CHIMICA