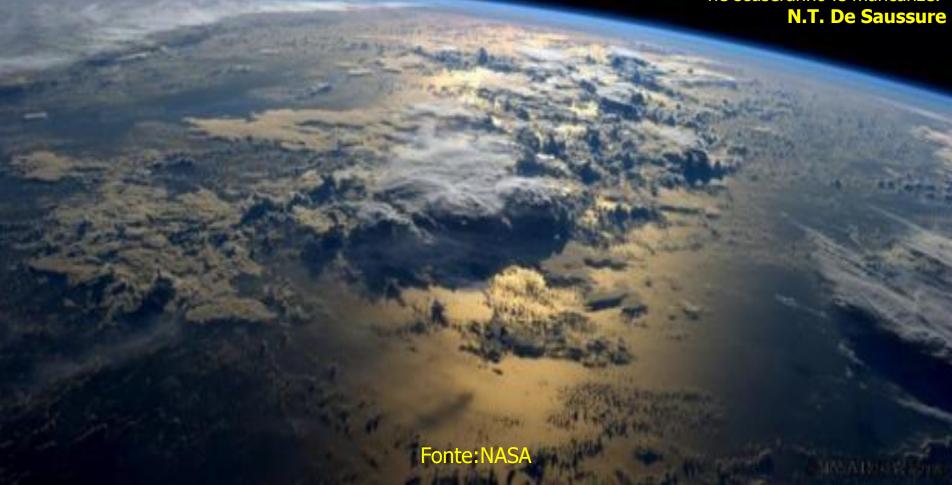
# AGRICOLTURA COME GESTORE DEL CICLO DEL CARBONIO

#### Luigi Mariani

Società agraria di Lombardia, Museo Lombardo di storia dell'agricoltura

"Il percorso che mi sono imposto è senza dubbio arduo e faticoso, ma se si considera che il miglioramento dell'agricoltura è l'obiettivo verso cui è diretto, se ne sopporteranno le difficoltà e se ne scuseranno le mancanze."

N.T. De Saussure











NASA image created by Jesse Allen (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alluvial\_fan\_in\_Iran.jpg)











# ...questa bellezza la dobbiamo alle forme organiche del carbonio che si generano da CO<sub>2</sub>



# $CO_2 = vita$

La vita sul nostro pianeta si fondata sul carbonio, componente principale delle materia vivente vegetale e animale (40% circa della sostanza secca). Ciò è rispecchiato dalla scienza con discipline come la chimica organica (chimica dei composti del carbonio) e la biochimica (chimica della materia vivente).

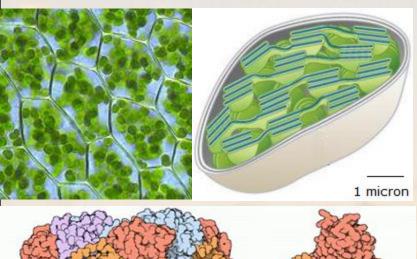
**Autotrofi**= organismi in grado di produrre sostanza organica a partire dalla CO<sub>2</sub> Per organicare il carbonio gli autotrofi attingono energia dalla luce solare (**foto-autotrofi** – piante superiori, alghe, batteri) o da reazioni chimiche come la denitrificazione (**chemio-autotrofi** – batteri).

Dagli autotrofi dipendono tutte le catene alimentari del pianeta per cui la nutrizione carbonica degli autotrofi ha un significato unico per l'ecosistema (di qui in avanti parleremo solo di fotoautotrofi e di piante superiori).

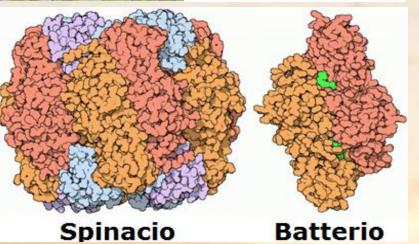
#### **Fotosintesi**

La fotosintesi consta di una fase luminosa che si svolge nei cloroplasti (intercettano energia solare e la trasformano in energia chimica stoccandola in ATP e NADPH) e di una fase oscura ove l'energia chimica è usata per la reazione:

$$6CO_2 + 6H_2O + 48$$
 fotoni ->  $C_6H_{12}O_6 + 6O_2$ 



Cloroplasti (wikipedia)



Rubisco = Ribuloso-bifosfatocarbossilasi /ossigenasi (http://pdb101.rcsb.org/motm/11) accettore della CO2 atmosferica per cui è la proteina più diffusa in natura.

# Perchè Rubisco si chiama carbossilasi/ossigenasi

**Rubisco = enzima bifunzionale** che a bassi livelli di CO<sub>2</sub> acquisisce ossigeno dando il via alla fotorespirazione che consuma grandi quantità di energia.

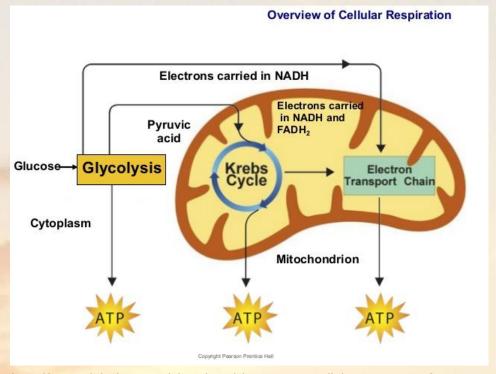
#### Ragioni evolutive della fotorespirazione:

Rubisco nasce in un mondo a CO<sub>2</sub> elevata in cui la possibilità di "sbagliarsi" acquisendo ossigeno era molto bassa. Con la fotorespirazione il Rubisco usa CO2 per formare glicolato (anziché combinarla con ribuloso bisfosfato RUBP per la sequenza fotosintetica ordinaria che porta al glucosio). Il pathway del glicolato è complesso (il carbonio del glicolato è in parte emesso come CO<sub>2</sub> e in parte re-immesso nel ciclo di Calvin) ed è dai iù ritenuto un adattamento evolutivo per riparare a una brutta situazione: le piante fotorespirano per proteggersi dagli effetti nocivi di concentrazioni interne troppo elevate di ossigeno e/o di molecole per lo stoccaggio di energia.

# Respirazione (autotrofi e eterotrofi)

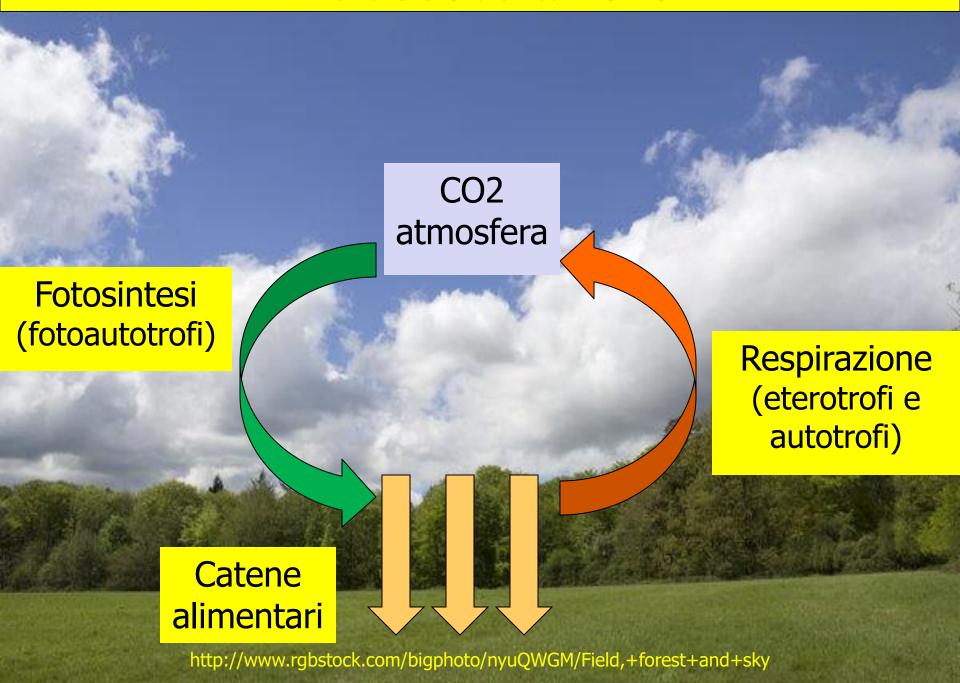
**Respirazione**: negli autotrofi e negli eterotrofi fornisce l'energia necessaria ai processi metabolici che portano ad esempio alla sintesi di prodotti quali amidi, proteine, grassi, vitamine, ecc.

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 -> CO_2 + 6H_2O + energia$$



http://www.slideshare.net/elmochem/chapter-nine-cellular-respiration-fermentation

#### Vita e ciclo del carbonio

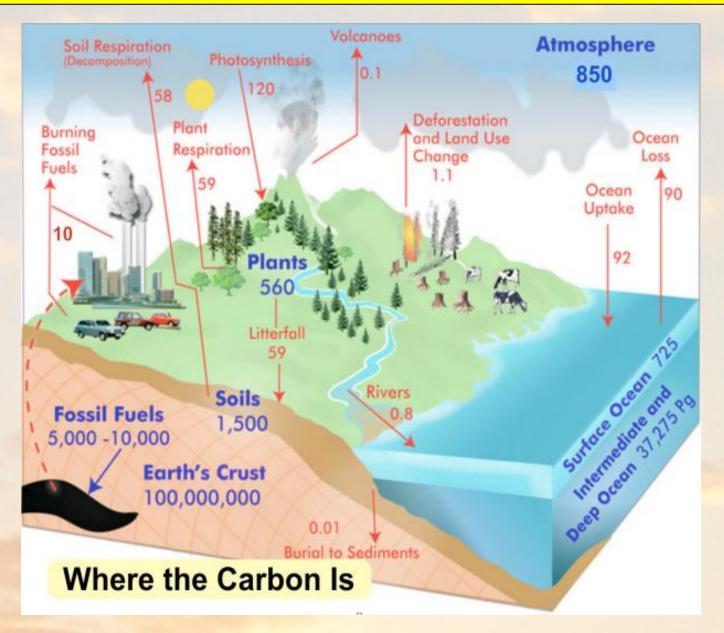


#### CO2 e catene alimentari: la CO2 nel piatto



70 g di pasta contengono 70\*0.58=41 g di carbonio, per ottenere i quali sono stati necessari 41\*44/12=149 g di CO<sub>2</sub>

# Serbatoi e flussi annui globali di carbonio (GT di C)



fonte: GLOBE Carbon Cycle Project, 2010

#### Il concetto di scala sotteso a tutto ciò

#### POTENZE DI DIECI

PHILIP E PHYLES MORRISON CON LO STUDIO DE CHARLES E RAY FAMES



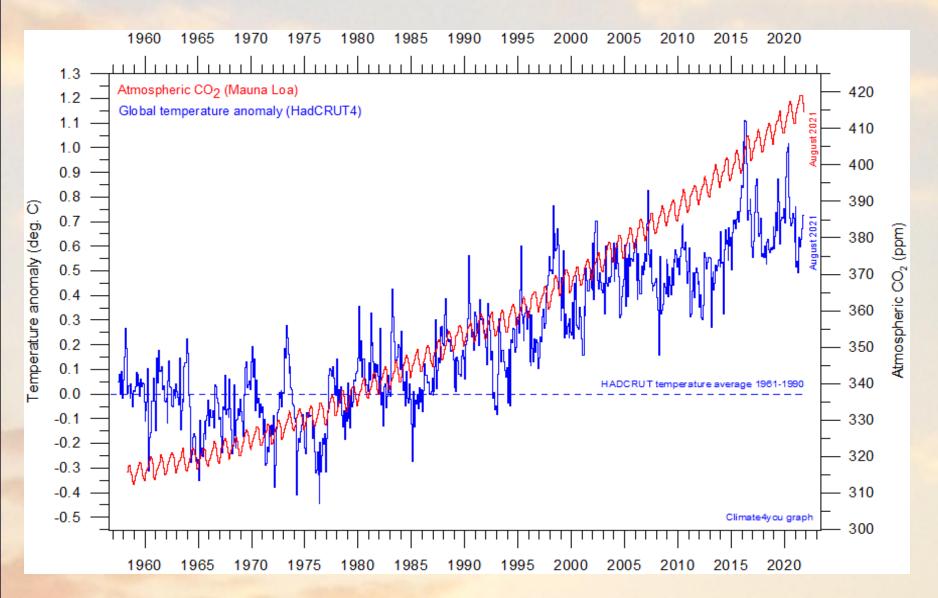
Morrison P. et al., 1986. Potenze di dieci, Le dimensioni delle cose nell'universo. Ovvero: che cosa succede aggiungendo un altro zero.

Scala dei fenomeni: concetto potentissimo (si pensi al libro potenze di 10)

#### ..Da un cloroplasto al pianeta

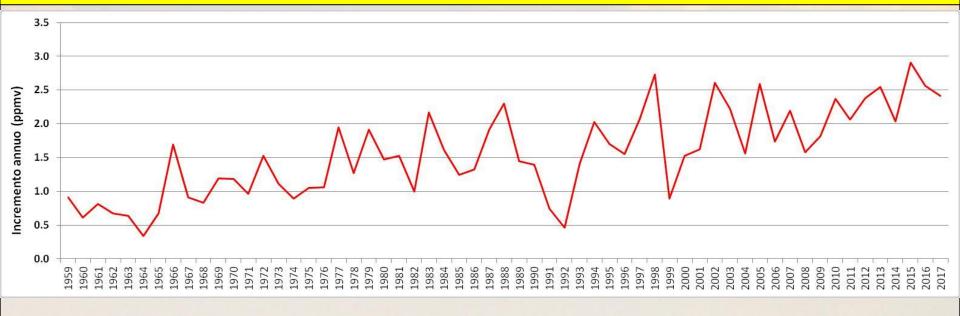
- -> due esempi:
- **Rubisco** (accettore di CO<sub>2</sub> nei fotoautotrofi) è la proteina più diffusa in natura
- l'attività di una foglia e le ciclicità stagionali nei livelli atmosferici di CO<sub>2</sub>

# La potenza della fotosintesi



fonte: Ole Humlum – Cliamte4you.com

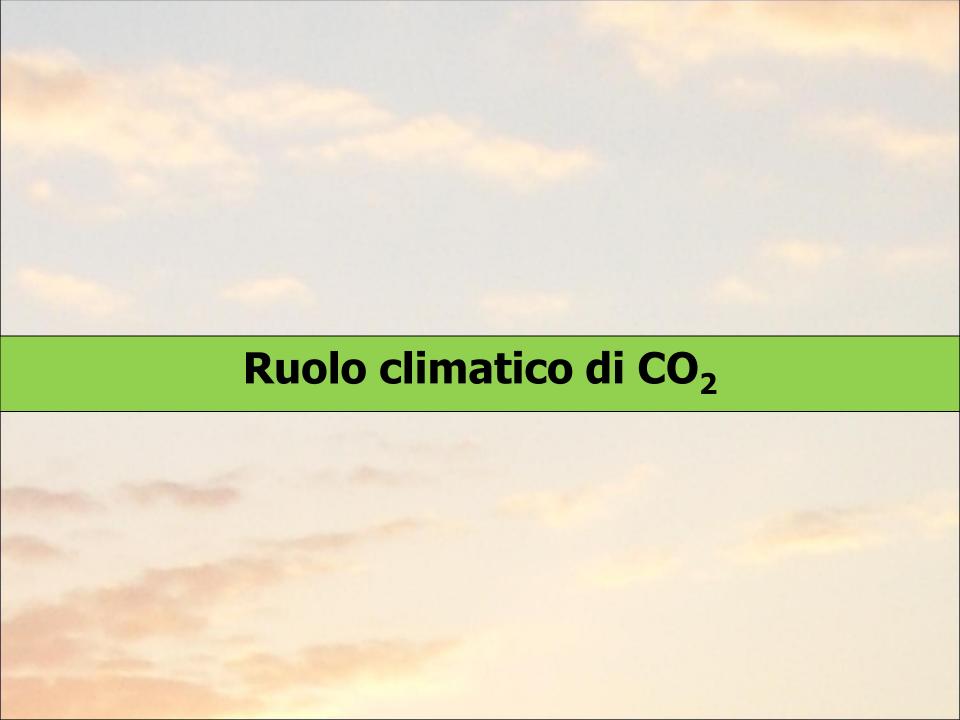
### Incremento annuo di CO<sub>2</sub> in atmosfera (dati Mauna Loa)



Incremento medio 1961-1970: **+0.85 ppmv**Incremento medio 2008-2017: **+2.27 ppmv** 

#### Si notino:

- 1. grande variabilità interannuale
- ogni anno i livelli atmosferici calano di circa 8 ppmv nell'estate boreale per effetto delal fotosintesi: media 2009-2018: maggio (mese del massimo) =400,8 ppmv; settembre (mese del minimo): 392 ppmv -> calo medio di 8,2 ppmv



#### CO2 e sistema climatico

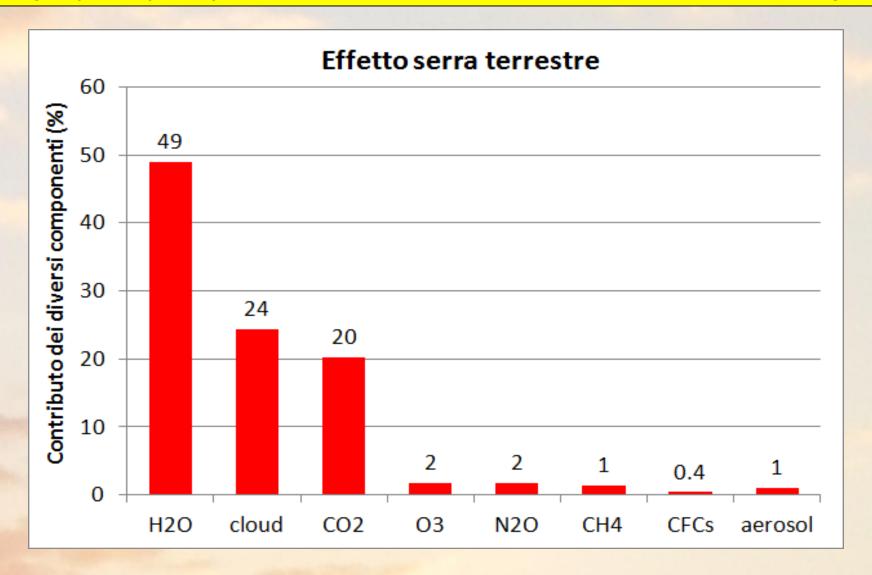
Il ruolo climatico di CO2 si lega al fatto che è un gas serra.

Come tale interviene in un fenomeno di per sé utilissimo (senza effetto serra non ci sarebbe vita sulla Terra) e che è uno dei 3 pilastri su cui si fonda il sistema climatico del pianeta (gli altri 2 sono l'equilibrio energetico e la circolazione atmosferica ed oceanica).

L'agricoltura emette **tre tipi principali di gas serra** (anidride carbonica  $CO_2$ , metano  $CH_4$  e protossido di azoto  $N_2O$ ) che a differenza del vapore acqueo sono **well mixed GHG.** 

### Atmosfera terrestre: peso delle sostanze a effetto serra

(Acqua = principale artefice dell'effetto serra -> 73% del fenomeno)



LACIS A.A., Schmidt G.A., Rind D. Ruedy R.A., 2010. Atmospheric CO2: Principal Control Knob Governing Earth's Temperature, Science, 15 OCTOBER 2010 VOL 330.

#### Elementi di preoccupazione e relative incertezze

**Elemento di preoccupazione**: l'aumento di CO<sub>2</sub> porta ad un aumento del vapore acqueo emesso in primis dagli oceani con un effetto a catena ("Runaway greenhouse effect") che spingerà sempre più verso l'alto le temperature.

#### Elementi critici rispetto a tale ipotesi:

- precipitazioni: eliminano l'eccesso di vapore acqueo in atmosfera (al Nino segue la Nina)
- -nubi: descritte in modo inadeguato dai modelli (il che ci porta anche ad avere descrizioni inaccurate del comportamento futuro delle precipitazioni) -> esempio: il trend positivo delle temperature globali dal 2001 al 2020 è dovuto in massima parte al comportamento delle nubi (meno albedo del previsto -> più radiazione a onda corta giunta al suolo) (Dübal & Vahrenholt, 2021).

Dübal, H.-R.; Vahrenholt, F. Radiative Energy Flux Variation from 2001–2020. Atmosphere 2021, 12, 1297. https://doi.org/10.3390/atmos12101297

## Le nubi anello debole dei modelli climatici globali

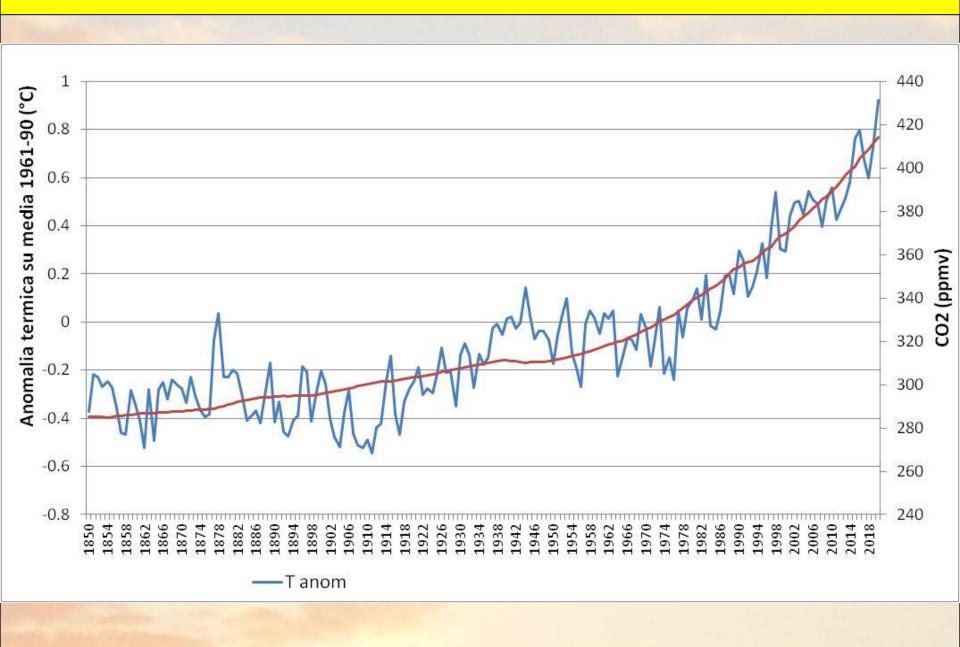


#### Cosa dice IPCC (AR6 vs AR5)

A.1.3 The likely range of total human-caused global surface temperature increase from 1850-1900 to 2010-2019 is 0.8°C to 1.3°C, with a best estimate of 1.07°C. It is likely that well-mixed GHGs contributed a warming of 1.0°C to 2.0°C, other human drivers (principally aerosols) contributed a cooling of 0.0°C to 0.8°C, natural drivers changed global surface temperature by -0.1°C to 0.1°C, and internal variability changed it by -0.2°C to 0.2°C. It is very likely that well-mixed GHGs were the main driver of tropospheric warming since 1979, and extremely likely that human-caused stratospheric ozone depletion was the main driver of cooling of the lower stratosphere between 1979 and the mid-1990s." Compare this to the statements in the AR5 SPM:

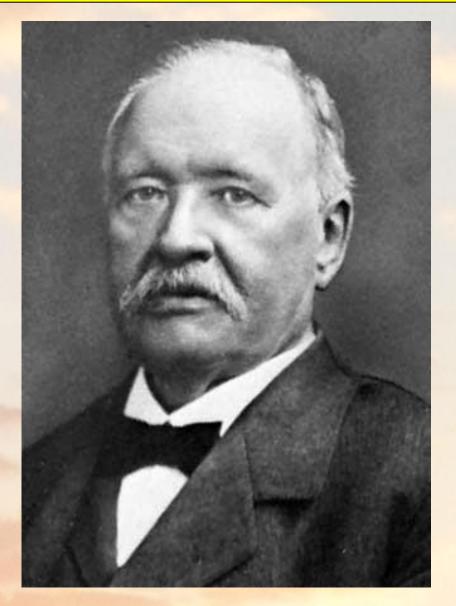
"It is *extremely likely* that more than half of the observed increase in global average surface temperature from 1951 to 2010 was caused by the anthropogenic increase in greenhouse gas concentrations and other anthropogenic forcings together. The best estimate of the human-induced contribution to warming is similar to the observed warming over this period."

### Temperature globale e CO2 atmosferica (1850-2020)



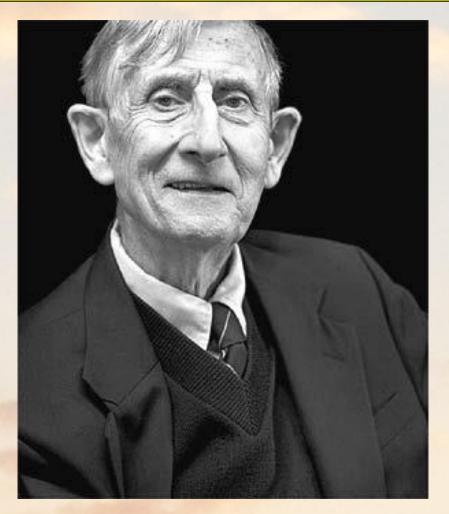
#### La chiave di lettura di Svante Harrenius

(1859 - 1927)



Svante Harrenius (Nobel per la chimica nel 1903 e padre nobile della teoria AGW). Da svedese riteneva positivo l'aumento di CO<sub>2</sub> operato dall'uomo perché avrebbe reso più ospitali la fredda Svezia in cui lui viveva.

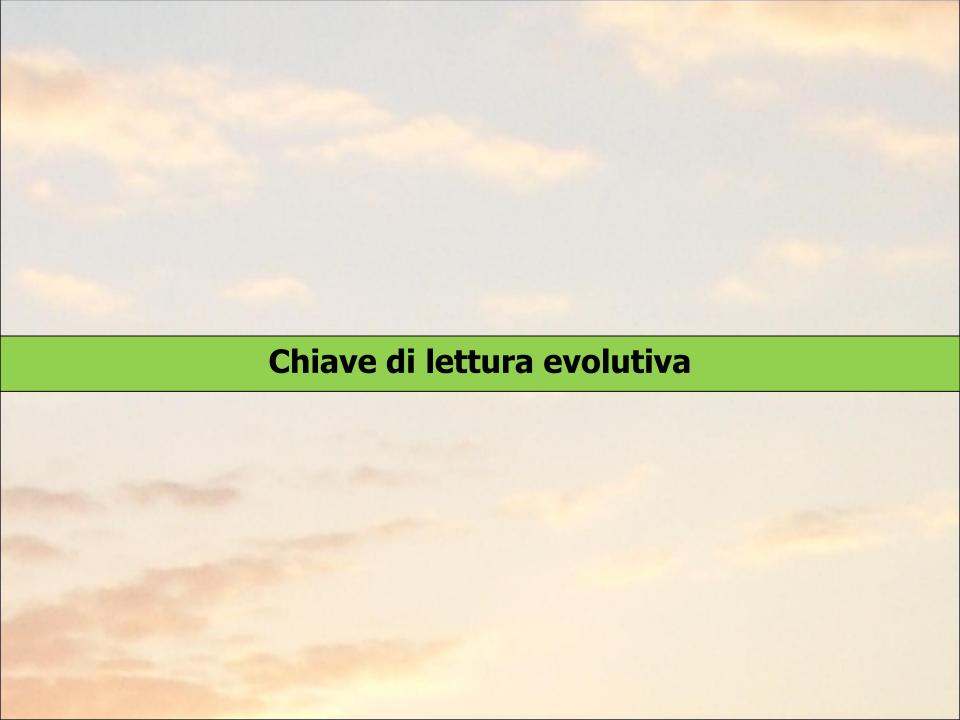
# Spingersi alcune leghe più avanti rispetto al luogo comune Freeman Dyson (1923-2020)



The problem of carbon dioxide in the atmosphere is a problem of land management, not a problem of meteorology.

-> se la CO2 è un problema perchè non risolverlo almeno in parte con la fotosintesi?

HERETICAL THOUGHTS ABOUT SCIENCE AND SOCIETY An essay by Freeman Dyson [8.7.07] - https://www.edge.org/conversation/freeman\_dyson-heretical-thoughts-about-science-and-society



#### L'origine della CO2 atmosferica

Si pensa che all'origine della CO<sub>2</sub> atmosferica siano le massicce eruzioni vulcaniche avvenute in epoca remota e che le temperature estreme che le caratterizzarono abbiano causato l'ossidazione del carbonio all'interno della Terra con formazione di CO<sub>2</sub>.



Etna, cratere di sud-est (eruzione del 2006) - https://it.wikipedia.org/wiki/Vulcano

# 3,5-2,7 m.di di anni fa: primi organismi fotosintetici (cianobatteri =alghe verdi-azzurre)

Stromatoliti = strutture sedimentarie, appartenenti al gruppo dei calcari non particellari biocostruiti, finemente laminate e frutto dell'attività di microrganismi fotosintetici bentonici che per miliardi di anni sono stati la forma di vita dominante sul pianeta





Stromatoliti dell'archeano dal Craton di Pilbara (Western Australia)

#### Grazie alla fotosintesi si possono colonizzare le terre emerse

La vita sulla Terra per tre miliardi di anni fu per lo più costituita da organismi unicellulari microscopici (cianoficee) e rimase confinata negli oceani, perché l'acqua marina proteggeva la vita dall'UV-C (fortemente mutageno)

In seguito l'O<sub>2</sub> emesso dagli organismi fotosintetici raggiunsela stratosfera e reagendo con UV formò ozono che impedì all'UV-C di giungere in superficie.

In tal modo le terre emerse divennero abitabili.



# L'esplosione cambriana

540 milioni di anni orsono con la CO<sub>2</sub> atmosferica a 7000 ppmv (13000 GT di carbonio) mentre i valori odierni sono di 400 ppmv (760 GT di carbonio). La "vita moderna" irrompe sulla scena del pianeta, dapprima negli oceani e poi sulle terre emerse, in un'imponente varietà di forme frutto di catene alimentari sempre più complesse nutrite dagli elevatissimi livelli di CO<sub>2</sub>.



Earth in the Middle Cambrian ~ 514 Ma

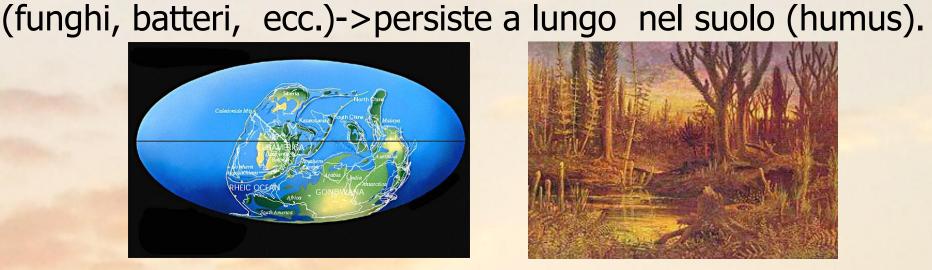
Disposizione dei continenti nel Cambriano Fonte, wikipedia



Flora e fauna oceanica nel Cambriano http://www.actaplantarum.org/morfologia/morfologia1c.php

# Il devoniano e la comparsa del legno

Legno (cellulosa + lignina): è fra le "invenzioni" più importanti del Devoniano (420-360 milioni di anni fa). Consente alle piante di generare strutture robuste (tronchi, rami) che portano le foglie ad altezze prima impensabili. Prima comparsa del legno: nel tardo Devoniano, quando emergono piante con spore (es: Archaeopteris), con tessuti legnosi e che danno foreste d'alto fusto. Lignina: polimero difficilmente attaccabile dai decompositori







Flora del devoniano http://www.actaplantarum.org/morfologia/morfologia1c.php

# Carbonifero, Permiano e Giurassico



Flora del Cambriano in una ricostruzione ottocentesca http://www.actaplantarum.org/morfologia/morfologia/norfologia1c.php

La lignina, per la sua difficile degradabilità, sarebbe alla base delle riserve fossili di carbone che si generano durante il Carbonifero (360-290 milioni di anni fa), allorché la CO2 atmosferica scende per la prima volta a valori vicini a quelli odierni. La CO<sub>2</sub> inizia di nuovo a salire nel Permiano (290-250 milioni di anni fa), per raggiungere un massimo di 2500 ppmv (4690 GT i carbonio) nel Giurassico (200-145 milioni di anni fa).

### **Ere successive**

A partire dal Giurassico si assiste alla discesa graduale dei livelli atmosferici di CO2, che porta tale gas a raggiungere le 280 ppmv (559 GT di carbonio) intorno a 2,5 milioni di anni orsono, all'inizio del quaternario. Durante tale era geologica (di cui fa parte anche il nostro Olocene) si verificano inoltre periodiche ere glaciali (fin qui una quindicina, guidate dalle ciclicità astronomiche descritte da Milancovich) durante le quali la CO<sub>2</sub> scende grossomodo a 200 ppmv (410 GT di carbonio) con un minimo di 180 ppmv (372 GT di carbonio) toccato circa 18 mila anni orsono.

## Ma dovè finito l'eccesso di CO2?

L'atmosfera si "libera" della CO<sub>2</sub> in eccesso soprattutto sequestrandola nelle rocce carbonatiche (che se organogene sono composte di scheletri di animali marini, conchiglie, coralli, gusci di radiolari e foraminiferi, ecc.), ove sono oggi stoccate 100 milioni di GTC contro le 5-10mila GTC dei combustibili fossili.

L'accumulo del carbonio in rocce carbonatiche è un processo imponente che negli ultimi 140 milioni di anni ha rimosso il 90% della CO<sub>2</sub> atmosferica, portando la vita sull'orlo dello sterminio per fame.

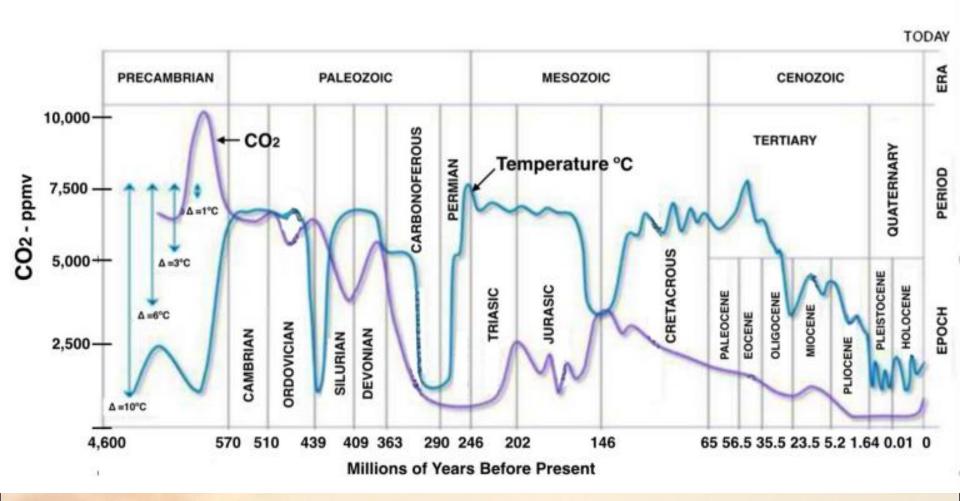
Ironia della sorte: la vita costituendo sistemi efficientissimi per lo stoccaggio permanente di CO<sub>2</sub> in rocce carbonatiche organogene potrebbe aver prodotto un "cappio a cui impiccarsi".

# Dolomiti, atolli del Permiano (250-300 Mio di anni fa)



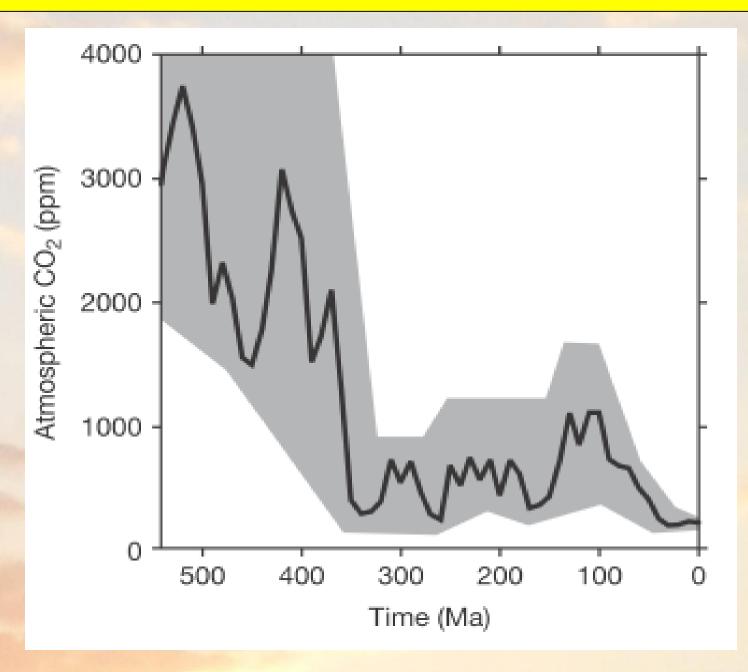
# Livelli di CO2 nel fanerozoico e temperature

Geological Timescale: Concentration of CO<sub>2</sub> and Temperature fluctuations



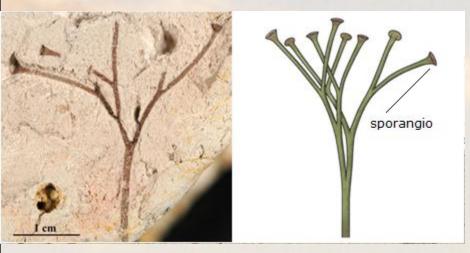
Moore, 2016. "THE POSITIVE IMPACT OF HUMAN CO2 EMISSIONS ON THE SURVIVAL OF LIFE ON EARTH", https://www.fcpp.org/ - https://en.wikipedia.org/wiki/Frontier\_Centre\_for\_Public\_Policy

# CO2 negli ultimi 500 milioni di anni (fonte: Royer, 2011)



# CO<sub>2</sub> come forzante evolutiva per gli ecosistemi

## Dalle prime piante vascolari alla comparsa delle foglie



Cooksonia paranensis

(https://treasurecoastnatives.wordpress.com/2014/12/19/psilotum-looks-like-a-fossil/)

430-390 milioni di anni fa (siluriano - primo devoniano): prime piante vascolari con tessuti xilematici e floematici (Cooksonia) in coincidenza con altissimi livelli di CO<sub>2</sub> -> assenza di stomi e di foglie.



Archeopteris

(http://www.ucmp.berkeley.edu/devonian/devonian.php)

360 milioni di anni fa (fine devoniano – inizio carbonifero): crollo del 90% dei livelli di CO<sub>2</sub> stimola la comparsa delle foglie planari ad alta densità di stomi (Beerling et al., 2005).

### Bassi livelli atmosferici di CO<sub>2</sub> problema per le piante C3

**Meccanismo C3 di fotosintesi delle piante terrestri**: nasce 500 milioni di anni orsono, con livelli di CO<sub>2</sub> altissimi (oggi interessa tutte le piante forestali e molte delle piante coltivate - frumento, riso, soia, girasole, patata, ecc).

Nel carbonifero i livelli  $CO_2$  (400 ppmv) si portano per la prima volta su valori simili a quelli odierni -> in tali condizioni le piante C3 nonostante sviluppino foglie con stomi, faticano ad assorbire  $CO_2$ .

La soluzione viene trovata molto tempo dopo con al genesi delle piante C4 e dalle piante CAM.

### La comparsa delle piante C4

- Si ha nel tardo miocene (9-6 milioni di anni fa), epoca segnata da un'imponente aridificazione che provoca:
- totale evaporazione del Mediterraneo (gessi evaporitici del Messiniano - Brisighella, Oltrepò Pavese).
- savanizzazione delle aree tropicali africane ->influssi sui nostri progenitori



Ricostruzione del Mediterraneo nel periodo di massima contrazione messiniana (https://it.wikipedia.org/wiki/Crisi\_di\_salinit%C3%A0\_del\_Messiniano)

### Savana in Namibia - le C4 dominano nettamente sulle C3



Prateria di graminacee C4 e rade piante arboree C3 (Acacia tortilis) nel Pro-Namib plain a ovest delle Naukluft Mountains. http://www.biodiversityexplorer.org/plants/fabaceae/acacia/acacia\_tortilis.htm

## Importanza delle savane a C4 per l'evoluzione umana

Il passaggio dalla foresta alla savana (fra 3,5 e 1,5 milioni di anni fa) è fra i fenomeni più densi di conseguenze nella storia evolutiva degli ominidi (es: specializzazioni per la statura completamente eretta e per la corsa in H. erectus)\*.

La nostra capacità intellettiva, la nostra prudenza, il nostro stesso pessimismo (il paradiso terreste è guard'a caso una foresta...) sono evoluti in questo ambiente peculiare in cui trasformarsi da predatore in preda dei grandi carnivori era questione di un istante.

Se al posto delle praterie vi fossero state fitte foreste di piante C4, forse non saremmo qui oggi a parlare...

Homo abilis: per la prima volta nella Savana http://pikaia.eu/homo-abilis-per-la-prima-volta-nella-savana/

# **Ambiente mediterraneo a Cipro (quasi unicamente C3)**



## Taiga - solo C3



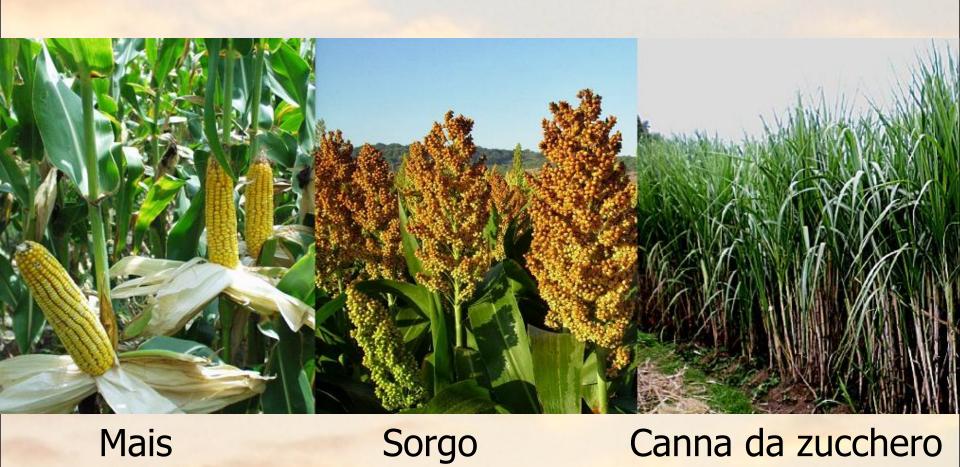
Bosco rado di Picea glauca in ambiente di taiga (Alaska) http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Taiga

# **Ecosistemi agricoli – C4 in grande espansione**



http://www.kezarphoto.com/agriculture-photos

# Piante C4 che nutrono il mondo



# **Importanza odierna delle C4**

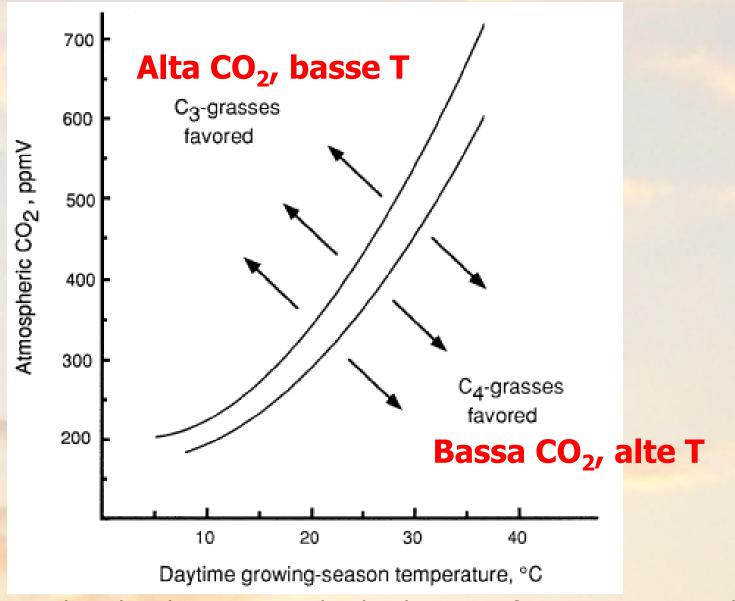
Le C4 sono oggi responsabili del 23% dell'assimilazione fotosintetica degli ecosistemi terresti\* e sono presenti in ambienti a alta luminosità, caldi, a volte aridi.

La importanza delle C4 cresce nelle epoche glaciali, quando le C3 sono al limite della morte per fame e cala.

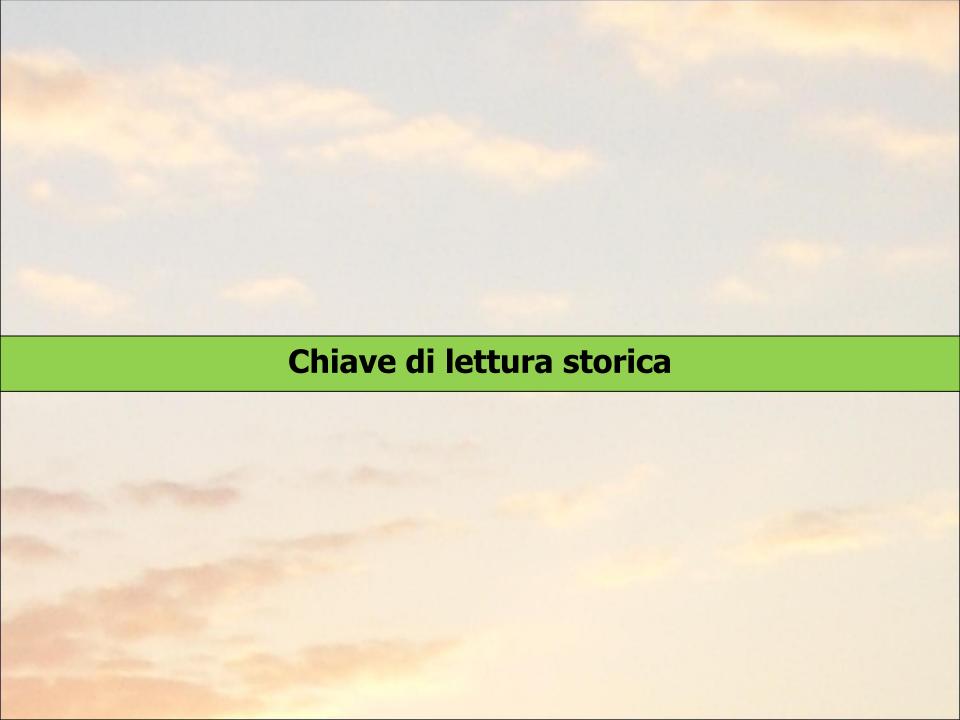
(\*) The gross primary production (GPP) of C4 plants is 35.3 Pg C yr-1, or ~23% of total GPP, while that of C3 plants is 114.7 Pg C yr-1. C3 crops cover 11.8 million km² while C4 crops cover 2.3 million km² ~16% of total surface (Still et al., 2003).

Still etal 2003. Global distribution of C3 and C4 vegetation: Carbon cycle implications, Global Biogeochemical Cycles 17(1):6-1, DOI:10.1029/2001GB001807

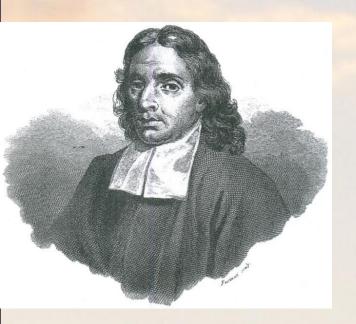
# Il futuro del rapporto fra C3 e C4



Cerling etal 1998 Carbon dioxide starvation, the development of C4 ecosystems, and mammalian evolution, Phil. Trans. R. Soc. Lond. B (1998)



### Se il tema vi interessa vi esorto ad una prospettiva storica



Logica di tipo vichiano (non si può pretendere di analizzare e comprendere il fenomeno se non se ne indagano le origini e l'evoluzione nel tempo).

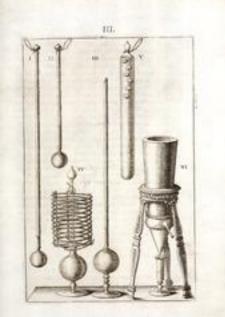
### **Galileo Galilei (1564-1642)**

Vengono formalizzati i canoni della scienza sperimentale



### Lettera a Pietro Dini del 21 maggio 1611:

"i primi inventori trovarono et aqquistarono le cognizioni più eccellenti delle cose naturali e divine con gli studii e contemplazioni fatte sopra questo gradissimo libro, che essa natura continuamente tiene aperto innanzi a quelli che hanno occhi nella fronte e nel cervello"; "occhi sulla fronte" per osservare e "occhi nel cervello" per interpretare.



In agricoltura tutto ciò non accade!

Immagini di strumenti tratte da Lorenzo Magalotti, Saggi di naturali esperienze fatte nell'Accademia del Cimento, In Firenze, per Giuseppe Cocchini, 1667 In 16°, pp. CCLXIX [17], ill.; 35,7x25,7 cm, Firenze, Istituto e Museo di Storia della Scienza, MED 2144, p. III

# L'agronomia e la teoria del vitalismo



Statua di Thaer a Lipsia



Statua di Thaer a Berlino

L'agronomia tarda a recepire i portati della rivoluzione galileiana e resta ancorata alla teoria del vitalismo, (in agricoltura noto come umismo). Tale teoria risale al grande filosofo greco Aristotile e sostiene che la materia vivente sarebbe animata dalla cosiddetta "vis vitalis" che le rende impossibile "dialogare" con il mondo inorganico, per cui le piante si nutrono dell'humus del terreno e morendo tornano a essere humus per cui il ciclo riprende.

Uno dei massimi propugnatori di tale teoria fu l'agronomo Albrecht Thaer (1752-1828), secondo il quale i minerali assorbiti con l'humus non hanno rilevanza ed è la "vis vitalis" a consentire alle piante

di produrre le sostanze mancanti.

### La rivoluzione scientifica in agricoltura (fra XVIII e XIX secolo)



**Antoine Laurent de Lavoisier** – legge di conservazione della massa nelle reazioni chimiche (Traité élémentaire de Chemie-1789) -> Per ottenere 80 q di granella di frumento si devono apportare 24 t di CO<sub>2</sub> e 160 kg di N, 70 kg di P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 50 kg di K<sub>2</sub>O



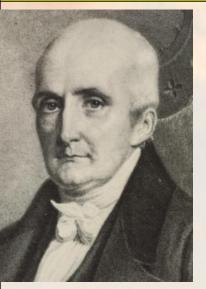
N. Theodore de Saussure (1767-1845) – dimostra che la nutrizione carbonica dei vegetali si fonda sulla CO<sub>2</sub> atmosferica (Recherches chimiques sur la végétation - 1804)



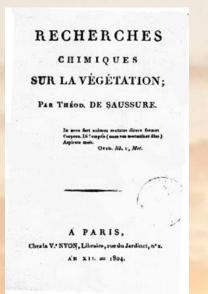
Friedrich Wöhler (1800-1882) — Nel 1828 sintetizza l'Urea. Nasce la chimica organica.

### La scoperta chiave per il ciclo del carbonio

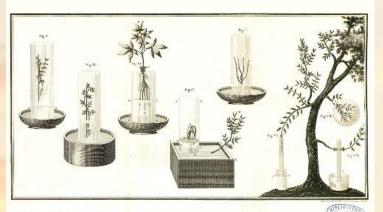
Nicolas Theodore De Saussure (Ginevra, 1767-1845)



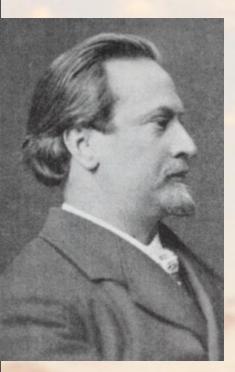
N.T. dDe saussure (in Egerton, 2012)



Il nostro debito culturale è enorme. Nel 1804, a Parigi, pubblica Recherches chimiques sur la végétation, in cui riassume e verifica le ricerche compiute da vari botanici e chimici nel XVIII secolo (Priestley e altri, che correttamente cita). Vi dimostra in modo rigoroso che il carbonio non è assorbito dalle piante tramite le radici (come sostenevano gli umisti) ma tramite gli stomi fogliari in forma di anidride carbonica. E' la rivoluzione fisiologica e agronomica più importante di tutti i tempi e che cambia (o dovrebbe cambiare) per sempre il nostro modo di ragionare.



### **De Saussure**



Julius Sachs. Magnin-Gonze 2004:194 (in Egerton, 2012)

- 1. l'introduzione del testo di De Saussure è magistrale (è un piccolo trattato sul metodo scientifico) -> assolutamente da leggere per intero anche perché è molto conciso
- 2. De Saussure arricchisce di CO<sub>2</sub> l'aria creando un "mélange" artificiale (credo non avesse mezzi analitici per misurare la CO<sub>2</sub> ai livelli ambientali naturali)
- 3. De Saussure non sa nulla di fotosintesi (la biosintesi di amido sottesa al processo è idimostrata solo nella seconda metà del XIX secolo da **Julius Sacks** (1832–1897), e il termine "fotosintesi" sarà poi coniato da Charles Barnes nel 1893 (Egerton, 2012).

De Saussure, 1804. Recherches chimiques sur la végétation , https://books.google.it/books/about/Recherches\_chimiques\_sur\_la\_v%C3%A9g%C3%A9tation.html?id=xXFwyAgAQn8C2

Egerton 2012 History of Ecological Sciences, Part 43 Plant Physiology

### **De Saussure - Alcune citazioni**

Rechèrches pag. 47: "Les plantes alimentées avec de l'eau pure à l'air libre puisent du carbone dans la petite quantité de gaz acide carbonique qui existe naturellement dans notre atmosphère" -> "piante alimentate con acqua pura in aria libera estraggono carbonio dalla piccola quantità di CO<sub>2</sub> naturalmente presente nella nostra atmosfera."

Rechèrches - introduzione (pp. VII e VIII): "La route que je me suis prescrite est sans doute ardie et fatigante mais si l'on considère que le perfectionnement de l'agriculture est le but vers lequel elle est dirigée on supportera ses difficultés et l'on excusera ses défauts" -> "Il percorso che mi sono imposto è senza dubbio arduo e faticoso, ma se si considera che il miglioramento dell'agricoltura è l'obiettivo verso cui è diretto, se ne sopporteranno le difficoltà e se ne scuseranno le mancanze."

De Saussure, 1804. Recherches chimiques sur la végétation <a href="https://books.google.it/books/about/Recherches\_chimiques\_sur\_la\_v%C3%A9g%C3%A9tation.html?id=xXFwyAgAQn8C">https://books.google.it/books/about/Recherches\_chimiques\_sur\_la\_v%C3%A9g%C3%A9tation.html?id=xXFwyAgAQn8C</a>

### De Saussure - Alcune citazioni

### Sempre dalla introduzione:

"Le ricerche di cui mi occupo in quest'opera hanno per oggetto l'influenza dell'acqua, dell'aria e del suolo sulla vegetazione [...]. Le mie ricerche hanno portato a dimostrare che, per piante che crescono su un terreno fertile, l'acqua e l'aria contribuiscono maggiormente alla formazione della sostanza secca rispetto alla materia del suolo disciolta in acqua e che le piante assorbono tramite le radici.

Questo lavoro mi ha portato a raccogliere molte nuove osservazioni che provano che tutti i problemi che ho enunciato possono essere risolti senza attribuire ai vegetali particolari forze creatici o trasmutazioni in contrasto con le osservazioni note [...]."

De Saussure, 1804. Recherches chimiques sur la végétation https://books.google.it/books/about/Recherches\_chimiques\_sur\_la\_v%C3%A9g%C3%A9tation.html?id=xXFwyAgAQn8C

### Per inciso...



"In Italia sotto i Borgia, per trent'anni, hanno avuto assassinii, guerre, terrore e massacri, ma hanno prodotto Michelangelo, Leonardo da Vinci e il Rinascimento. In Svizzera hanno avuto amore fraterno, cinquecento anni di pace e democrazia, e che cos'hanno prodotto? Gli orologi a cucù."

E' una delle battute a effetto più stupide della storia del cinema e la pronuncia il "cattivo" de Il terzo uomo (Harry Lime - Orson Welles).

La stupidità della battuta si coglie pensando che erano svizzeri Borromini, Le Corbusier, Eulero, Bernouilli, la famiglia De Saussure (compreso il padre, Orace Benedict, grande naturalista), Paracelso, Muller, Cavour da parte di madre, ecc.

## Il vitalismo come freno all'agricoltura scientifica

Il vitalismo (in agricoltura "umismo") rivive oggi nell'agricoltura biodinamica, per la quale le energie cosmiche sono una riedizione della "vis vitalis" e in quella biologica, allorché afferma che l'urea prodotta dalle "pance" dei mammiferi è "buona" e quella prodotta per sintesi è "cattiva" e che i fitofarmaci di sintesi sono cattivi e quelli naturali (ammesso che zolfo e solfato di rame lo siano...) sono buoni.

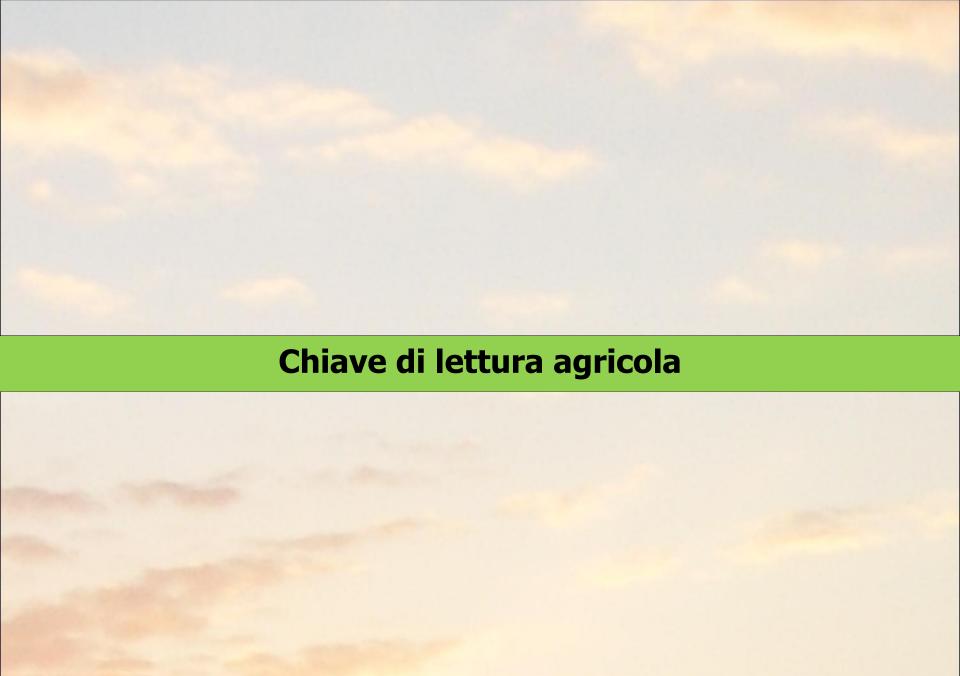
### Le ricerche sulla nutrizione carbonica dei vegetali

Dalla seconda metà dell'800 c'è un fervore di ricerche su nutrizione e concimazione carbonica. Alcuni riferimenti:

- **Reinau** riflette sull'emissione di CO2 da parte del terreno (effetto Reinau) e di cui le piante si nutrono (il fatto che il terreno emetta CO<sub>2</sub> è strutturale e se ciò non si verificasse non si chiuderebbero i cicli degli elementi)
- Angelo Menozzi e Ugo Pratolongo eseguono varie sperimentazioni che riportano nel loro testo di chimica agraria.
- Sergio Tonzig sviluppa una sintesi delle conoscenze (Tonzig e marré, 1968).
- Raffaele Ciferri arriva addirittura a proporre di attaccare con acidi la dolomia per aumentare deliberatamente i livelli di CO<sub>2</sub> atmosferici migliorando così la nutrizione dei vegetali

Tonzig e Marré, 1968. Elementi di botanica, volume 1, parte 2, p. 1138 e seguenti.

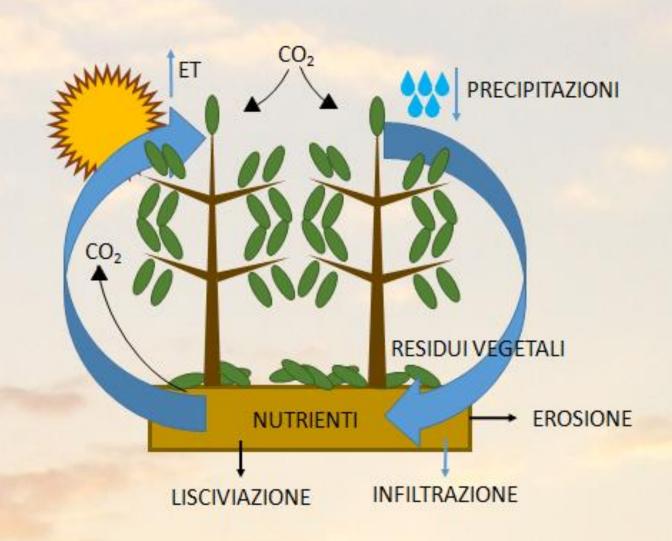
Mariani L., 2014. Carbon dioxide from problem to resource, The challenge for the intensification of agricultural production, Agrarian sciences, https://www.agrariansciences.it/2014/09/carbon-dioxide-from-problem-to-resource.html?m=1



# I diversi significati dell'agricoltura

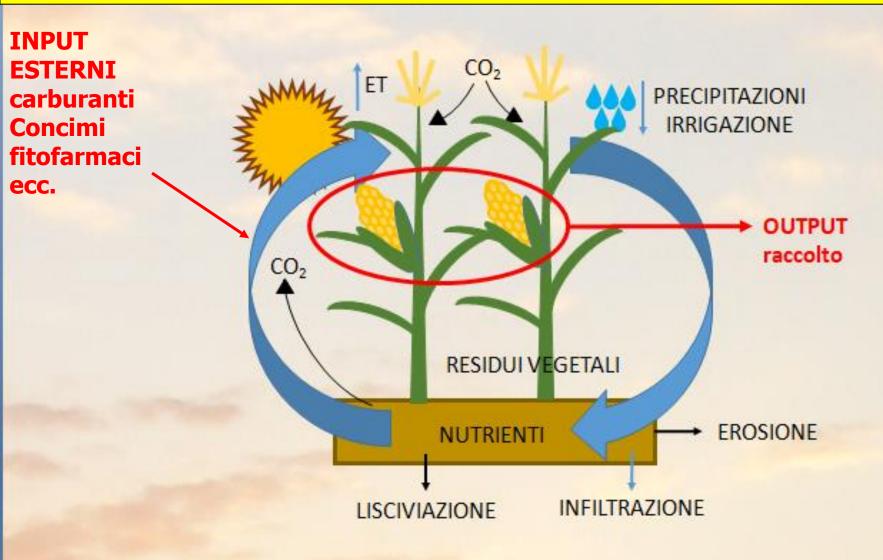
- coltivazione e allevamento che ha luogo in un ecosistema antropizzato (agroecosistema) con lo scopo di per produrre cibo e beni di consumo
- -simbiosi fra uomo e piante/animali: come in tutte le simbiosi i simbionti subiscono profonde modifiche, che per l'uomo sono fisiologiche e cultuali.
- forma di governo e potenziamento del ciclo del carbonio nelle fasi di fotosintesi e respirazione

# Flussi di materia ed energia Negli ecosistemi naturali



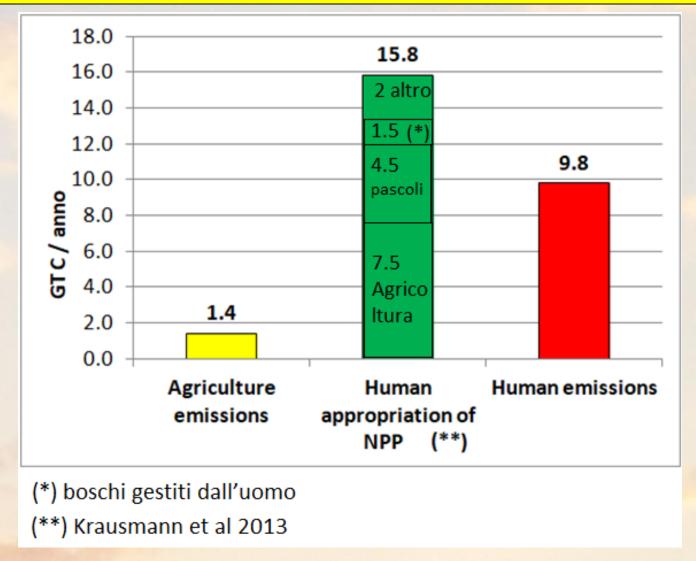
Fonte: Gabriele Cola

# Flussi di materia ed energia Nell'agroecosistema



Fonte: Gabriele Cola

### Bilancio del carbonio in agricoltura (dati in GT C equiv. / anno)



### **BIBLIOGRAFIA**

**Assorbimento colture**: dati da Krausmann etal 2013 Global human appropriation of net primary production doubled in the 20th century, PNAS, June 18, 2013 vol. 110 no. 25

**Emissioni agricole**: dati da Tubiello et al., 2015. Global greenhouse gas emissions from agriculture, forestry and other land use activities: recent trends and updates Agriregionieuropa anno 11 n°41, Giu 2015

### **Alcune evidenze**

Le emissioni agricole di di gas serra (CO<sub>2</sub>, metano, protossido d'azoto) interessano carbonio in precedenza assimilato con la fotosintesi.

### Deduzioni:

- 1) l'agricoltura emette sono una piccola parte di quanto ha in precedenza assorbito. Con ciò si rivela del tutto peculiare rispetto agli altri settori socio-economici (la pubblicità di una casa automobilistica non potrà mai dire questo!).
- 2) l'agricoltura è in grado di contenere l'aumento dei livelli atmosferici di CO2, in primis potenziando la funzione fotosintetica.

#### Non dobbiamo mai scordare la fotosintesi!

La fotosintesi è trascurata in moltissime analisi sulle emissioni di gas serra da parte dell'agricoltura.

Ad esempio John Linch et al., 2021 scrivono un lavoro dal titolo assai promettente: "Agriculture's Contribution to Climate Change and Role in Mitigation Is Distinct From Predominantly Fossil CO<sub>2</sub>-Emitting Sectors".

Purtroppo però il termine "fotosintesi" viene incredibilmente citato una sola volta (in una nota a piè di pagina) mentre l'attenzione degli autori si incentra sul fatto che l'agricoltura emette in prevalenza metano e protossimo d'azoto che hanno una "impronta sull'effetto serra" assai differente da quella della CO<sub>2</sub>, per cui la raccomandazione di Linch et al 2021 è quella di usare il concetto di "CO<sub>2</sub> equivalenti" in modo meno rozzo di quanto oggi non venga fatto.

## "State ben attenti a quel che mettete in quelle teste...

...perché poi sarà ben difficile levarlo" (appello del cardinale Thomas Wolsey agli educatori).

In tal senso poche cose dovrebbero preoccuparci più della deformazione operata ignorando la rilevanza della fotosintesi e la centralità dell'agricoltura come gestore del ciclo del carbonio.



Thomas Wolsey, Ritratto conservato al Trinity college dell'Università di Cambridge (Wikipedia)

Su questo mi preme segnalare la lezione di coerenza che ci viene dallo storico dell'agricoltura professor **Gaetano Forni**, il quale è andato costantemente contro corrente richiamando tale aspetto in molti suoi lavori apparsi ad esempio sulla Rivista di storia dell'agricoltura.



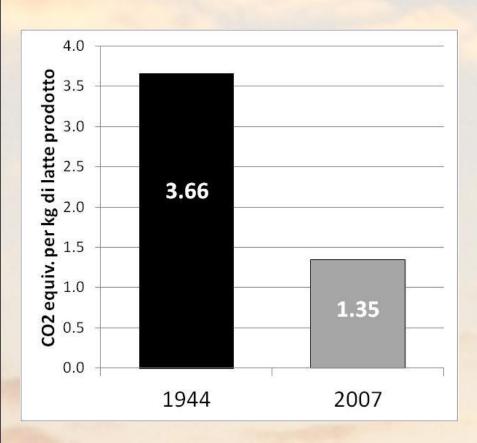
Gaetano Forni https://sito.libero.it/gaetanoforni/

#### Per una gestione razionale del ciclo del carbonio in azienda

Quanto detto in precedenza non significa che gli agricoltori non debbano condurre una gestione oculata del ciclo del carbonio in azienda, ad esempio:

- mantenendo colture (comprese le cover crops) per intercettare la CO<sub>2</sub> emessa dal terreno (effetto Reinau)
- moderando le emissioni dal terreno con tecniche di agricoltura conservativa
- **gestendo** razionalmente i sottoprodotti e le biomasse non direttamente utilizzabili ai fini produttivi (es. residui di potatura, residui colturali, residui di processi produttivi vari).
- -**Evitando** che l'eccessiva asportazione dei residui colturali vada ad impoverire la sostanza organica dei suoli (es per gli stocchi di mais in cui converrebbe lasciare in campo i primi 80 cm...).

## Sostenibilità e intensificazione in zootecnia Emissioni di CO2 da allevamenti estensivi e intensivi



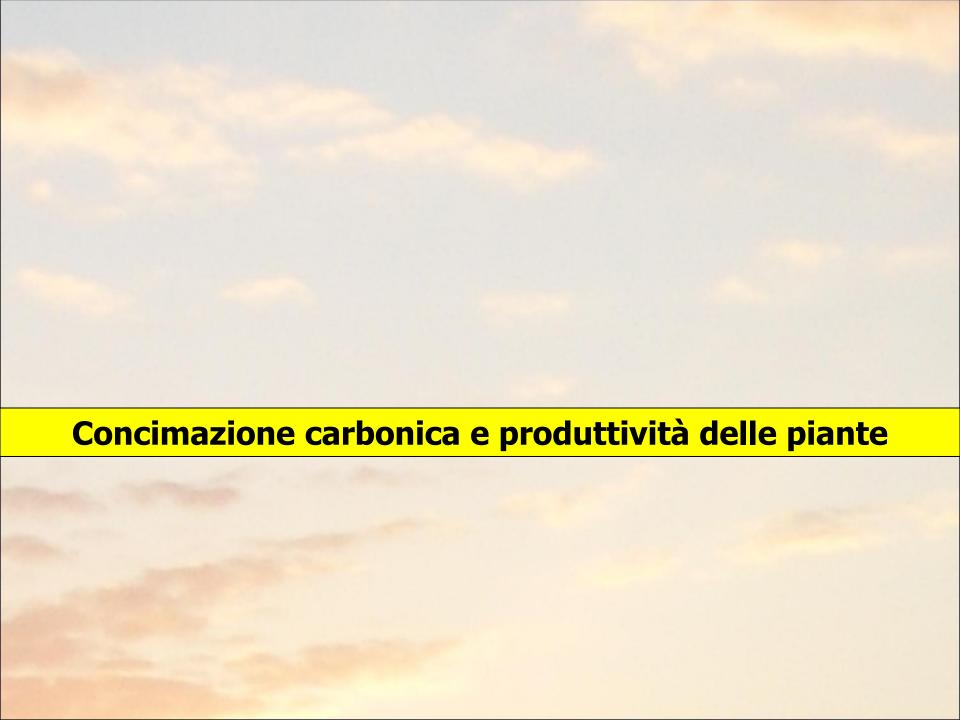
Emissioni di CO2 per chilogrammo di latte prodotto nel 1944 e nel 2007 da parte del sistema produttivo lattiero-caseario USA.

Capper et al., 2009. The environmental impact of dairy production: 1944 compared with 2007, J Anim Sci. 2009 Jun;87(6):2160-7

## **Agricoltura - Non solo cibo**

L'agricoltura produce polimeri (lignina, cellulosa) che sono alternativi ai polimeri di origine fossile per la produzione di materie plastiche, combustibili e altro. Tali produzioni possono derivare ad esempio da:

- colture specificamente orientate a tale scopo
- eccessi di produzione (le rese sono programmabili solo entro certi limiti per cui in annate di eccesso produttivo il prodotto può essere destinato alla produzione di combustibili o altro).
- -prodotti non idonei al consumo umano o animale (es: mais con fumonisine a aflatossine destinato ai digestori anaerobici).
- -Sottoprodotti aziendali (liquami, residui di potatura, ecc.).



## **Esempi**

Per aumentare la produzione in serra si ricorre da decenni alla concimazione carbonica (Moschini, 1960).

Per ottenere 8 t di granella di frumento si devono apportare 24 t di  $CO_2$ , 160 kg di N, 70 kg di  $P_2O_5$  e 50 kg di  $K_2O$ 

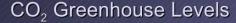
Per ottenere 1 t di legname vengono assorbite 1,5 t di CO<sub>2</sub>.

#### Concimazione carbonica in serra



Producing CO<sub>2</sub> for Commercial Greenhouse Production

- Natural Gas
- Propane
- Flue gases from hot water boiler
- Compressed CO<sub>2</sub>



- 1,000 ppm or more have shown to increase tomato yields economically
- However, you must adjust based on plant maturity and environmental conditions
- Bright, sunny weather 1000 ppm
- Cloudy weather 750 ppm
- Young plants 700 ppm
- During moderate ventilation 350-400 ppm
- Less needed as temperature and ventilation rates increase





#### Other Impacts

- Increased sugars (fruit crops)
- Reduced acid:sugar ratio (fruit crops)
- Taste improvement noticeable by consumers (fruit crops)
- Improved growth rates (fruit and ornamental)
- Shorter times to flowering for certain ornamental crops.

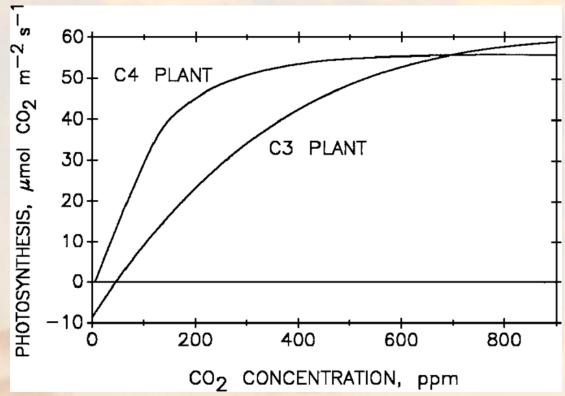
http://www.slideshare.net/buddy.tignor/carbon-dioxide-fertilization-181933

Moschini E., 1960. Ricerche sulla concimazione carbonica del pomodoro coltivato in serra, Rivista di ortoflorofrutticoltura italiana, Vol. 44, No. 11/12 (Novembre-Dicembre 1960), pp. 436-458

#### Concimazione carbonica in serra

In tema ci rimanda immediatamente alle serre ove la pratica è

in uso da decenni.



Fotosintesi netta di C3 e C4 in funzione dei livelli atmosferici di CO2.

(Encyclopedia of Plant and Crop Science (pp.346-348.) Publisher: Marcel Dekker, New York, USA. Editors: R.M. Goodman)

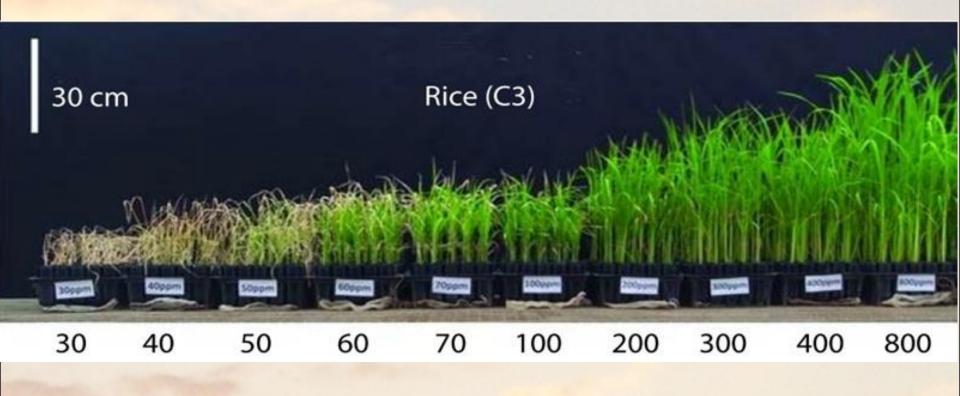


Generatore di CO2



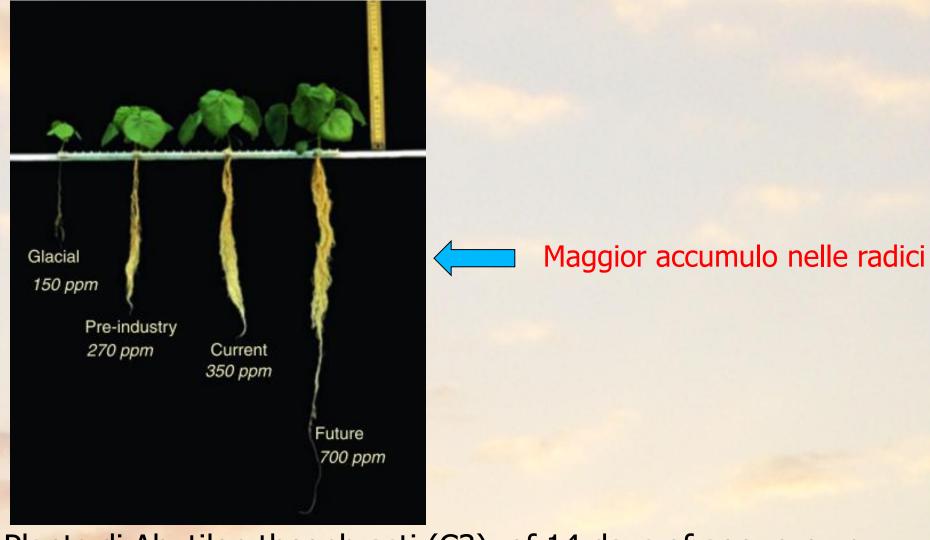
Serbatoio di CO2

## Effetti di CO2 su riso (C3)



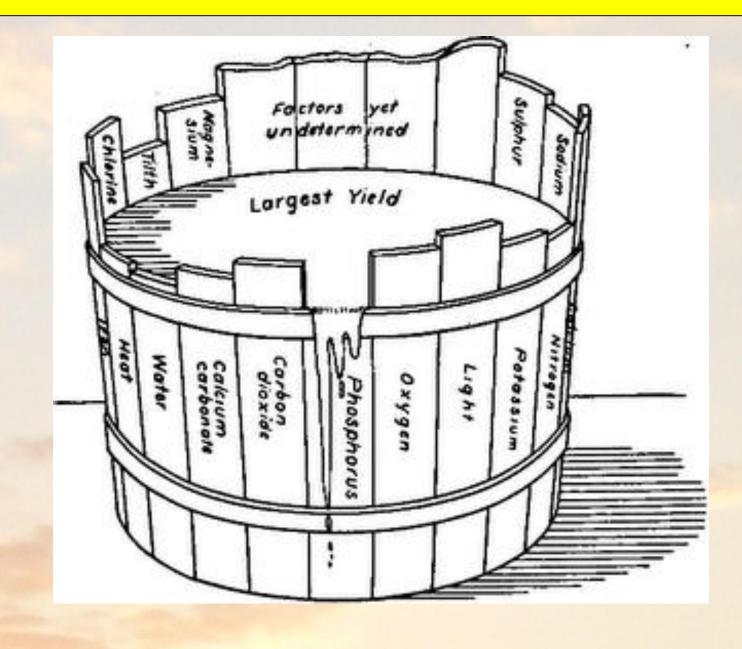
von Caemmerer S, Quick WP, and Furbank RT (2012). The development of C4 rice: Current progress and future challenges. Science 336 (6089): 1671–1672.

#### Effetti di CO2 su una malerba C3 (Abutilon theophrasti Medicus)

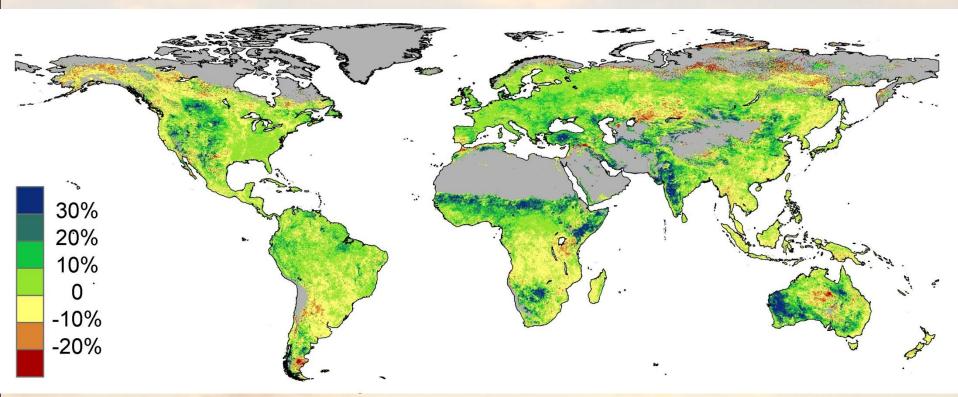


Plants di Abutilon theophrasti (C3) of 14 days of age, grown the same conditions of light, waer and nutrients. Photo Dippery et al. (1995), shown in Gerhart e Ward, 2010.

## La legge del minimo e le altre limitazioni



## Global greening da Concimazione carbonica aumento della biomassa vegetale globale 1981 – 2010



Donohue et al., 2013 Geophisical Research Letters
<a href="https://www.drroyspencer.com/2014/05/greening-of-planet-earth-a-little-crowdsourcing-project/">https://www.drroyspencer.com/2014/05/greening-of-planet-earth-a-little-crowdsourcing-project/</a>

#### Effetto dell'aumento di CO<sub>2</sub> nel XX secolo (Campbell etal 2017)

In un secolo la produzione delle piante spontanee e coltivate è aumentata del 31% per concimazione carbonica (dati ottenuti analizzando i sedimenti di Solfuro di carbonile)

-> se togliessimo dall'atmosfera l'eccesso di  $CO_2$  accumulatosi dal periodo pre-industriale avremmo un calo delle rese delle colture del 31%.

Campbell, J. E., Berry, J. A., Seibt, U., Smith, S. J., Montzka, S. A., Launois, T., Laine, M. (2017). Large historical growth in global terrestrial gross primary productio

#### **LETTER**

doi:10.1038/nature22030

## Large historical growth in global terrestrial gross primary production

J. E. Campbell<sup>1</sup>, J. A. Berry<sup>2</sup>, U. Seibt<sup>3</sup>, S. J. Smith<sup>4</sup>, S. A. Montzka<sup>5</sup>, T. Launois<sup>6</sup>†, S. Belviso<sup>6</sup>, L. Bopp<sup>6</sup>† & M. Laine<sup>7</sup>

Growth in terrestrial gross primary production (GPP)—the amount of carbon dioxide that is 'fixed' into organic material through the photosynthesis of land plants-may provide a negative feedback for climate change<sup>1,2</sup>. It remains uncertain, however, to what extent biogeochemical processes can suppress global GPP growth<sup>3</sup>. As a consequence, modelling estimates of terrestrial carbon storage, and of feedbacks between the carbon cycle and climate, remain poorly constrained4. Here we present a global, measurement-based estimate of GPP growth during the twentieth century that is based on long-term atmospheric carbonyl sulfide (COS) records, derived from ice-core, firn and ambient air samples5. We interpret these records using a model that simulates changes in COS concentration according to changes in its sources and sinks-including a large sink that is related to GPP. We find that the observation-based COS record is most consistent with simulations of climate and the carbon cycle that assume large GPP growth during the twentieth century (31% ± 5% growth; mean ± 95% confidence interval). Although this COS analysis does not directly constrain models of future GPP growth, it does provide a global-scale benchmark for historical carbon-cycle simulations.

Climate change can be accelerated or dampened by feedbacks with terrestrial ecosystems. The largest and most uncertain of these ecosystem feedbacks is enhanced photosynthetic CO<sub>2</sub> uptake resulting from increasing atmospheric CO<sub>2</sub> levels. Clear evidence has been obtained from archived leaf material that increasing CO<sub>2</sub> levels do increase photosynthetic metabolism, and much has been learnt about this feedback and about other influences on photosynthesis (for example, nitrogen deposition) from short-term and small-scale studies<sup>1,3,7</sup>. However, we lack global-scale, measurement-based estimates of the historical growth in photosynthetic CO<sub>2</sub> uptake (that is, growth in GPP). This knowledge gap leads to a wide spread of GPP growth estimates from different carbon/climate models, ranging from +5% to +34% over the past century, and from +10% to +52% over the next century.

Here we seek to address this knowledge gap by using COS measurements to estimate historical growth of global GPP. This approach is based on the knowledge that the dominant global sink of atmospheric COS is uptake by terrestrial plant leaves, through a process that is related to photosynthesis<sup>8-11</sup>. While other terrestrial ecosystem fluxes can be substantial at times<sup>13-14</sup>, the COS plant sink appears to be dominant at annual and continental scales<sup>15-17</sup>. The plant COS uptake is primarily compensating changes in other sources or sinks, a conces<sup>18-21</sup>. Without compensating changes in other sources or sinks, a concentration with a relaxation time of about two years. This is the basis for our present analysis.

Our analysis focuses on the long-term record of atmospheric COS concentrations from Antarctica (Fig. 1a)<sup>5,22</sup>, which is a good proxy

for the total atmospheric burden of COS. The Antarctic record—derived from measurements of air trapped in Antarctic ice and firm (granular snow deposited in previous years), and from ambient air samples—is consistent with independent long-term data from ground-based infrared solar spectra and global flask sampling (Fig. 1b)<sup>23–25</sup>. The Antarctic record shows stability of COS concentrations in the preindustrial era, indicating that the natural sources and sinks were relatively stable over this time. However, the industrial period shows an increase in COS levels (Fig. 1a) that is unprecedented in the 54,300-year COS record. This increase in Antarctic COS concentrations in the industrial period is clear evidence of a global industrial source<sup>5</sup>. In a separate study, we used economic data to construct the history of COS industrial sources <sup>18</sup>. While the magnitude of the industrial source is uncertain (Fig. 2a), the relative change in the industrial source in time is well constrained by economic data (Fig. 2b)<sup>18</sup>.

In addition to the industrial source, we also consider here the potential for other global sources and sinks to explain the trends in the Antarctic COS record. We analyse a wide range of source and sink estimates, including plant COS uptake linked to GPP (Fig. 2c, d), with GPP growth obtained from 11 different global carbon/climate models<sup>3</sup>. With these data sets in hand, we seek to identify the most plausible combination of source and sink simulations that explain the Antarctic COS record.

These simulations are based on a Monte Carlo, two-box, global modelling approach. The model outputs are historical time series of atmospheric COS mixing ratios ([COS]) for the years 1900 through to 2013, which we compare to the Antarctic COS record. The model inputs are time-series estimates of global sources and sinks, which are a function of their magnitude scalars (F) and normalized time-trend vectors (<del>P</del>) as follows:

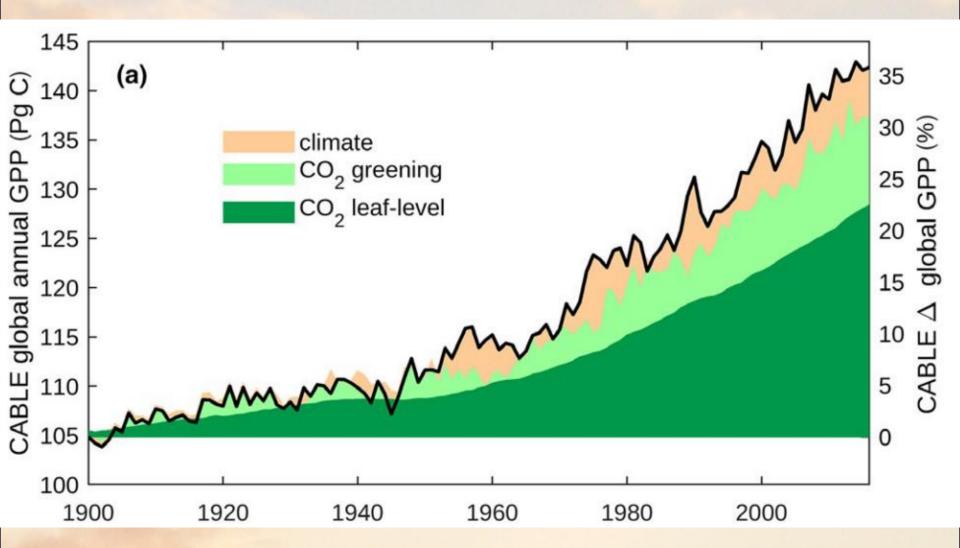
$$\frac{\text{d[COS]}}{\text{d}t} = F_{\text{AN}} \boldsymbol{\Phi}_{\text{AN}} + F_{\text{BB}} \boldsymbol{\Phi}_{\text{BB}} + F_{\text{OC}} \boldsymbol{\Phi}_{\text{OC}} + F_{\text{SS}} \boldsymbol{\Phi}_{\text{SS}} - F_{\text{P}} \boldsymbol{\Phi}_{\text{P}} [\text{COS}] - F_{\text{I}} \boldsymbol{\Phi}_{\text{I}} [\text{COS}] - F_{\text{S}} \boldsymbol{\Phi}_{\text{S}} [\text{COS}] + \frac{1}{\tau} \Delta [\text{COS}]$$
(1)

including sources from industry (AN, anthropogenic), biomass burning (BB), oceans (OC), and soils (SS), and sinks from terrestrial plants (P), atmospheric oxidation (I), and soils (S), and a transport rate ( $\tau$ ) scaled by the inter-hemispheric gradient ( $\Delta$ [COS]). The sources include direct emissions as well as indirect sources from emissions of short-lived precursors that are rapidly oxidized to COS in the atmosphere. Other sources and sinks may be important locally but were not included in our analysis because of their small contributions to global budgets.

The plant uptake was further divided into parameters for GPP ( $F_{\text{GPP}}$ )  $\Phi_{\text{GPP}}$ ) and the normalized ratio of plant COS uptake to GPP ( $F_{\text{LRU}}$ )  $\Phi_{\text{LRU}}$ ) where LRU is leaf-scale relative uptake). For the normalized ratio

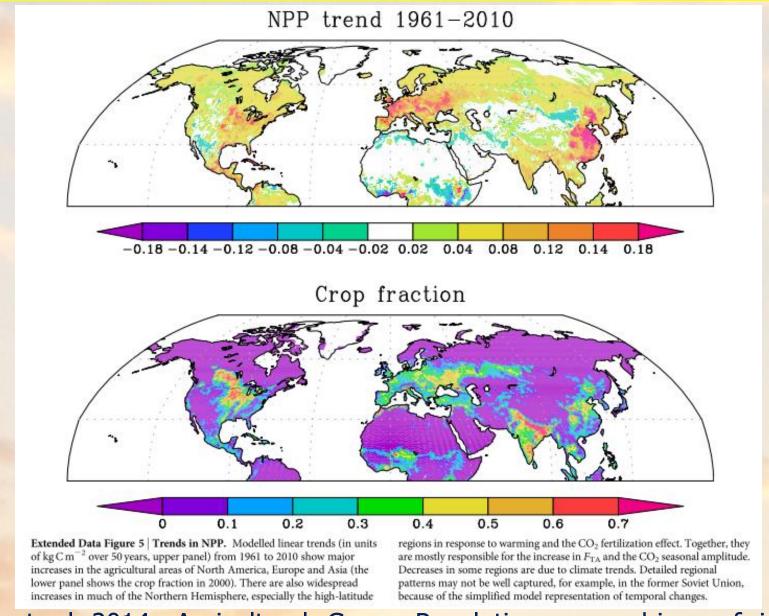
Sierra Nieuda Research Institute, University of California, Marced, California 95434, USA. "Department of Global Ecology, Carnegie Institution for Science, Stanford, California 94056, USA." Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, University of California, Los Angeles, California 90095, USA. "Elori Global Change Research Institute, Pacific Northwest National Losance, California 90095, USA." Maryland 20740, USA." Earth System Research Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration, Boulder, Colorado 80305, USA. "Laborationide des Sciences du Climat et de l'Emrironnement, IPSL, CNRS/CEA/UNSQ, 91191. Gif sur "vette, France." Finnist Meteorological Institute, Helsinki 00560, Finland. "Present address: INRA, UMR 1391 ISPA, 33140 Villenave d'Ornon, France (LL); Laboratorie de Météologie pyramique, IPSL, CMRS/ENS/UMPSC/Y, 50005 Paris, France (LB).

## Concimazione carbonica e global greening



Haverd V., Smith B., Canadell J.D., Cuntz M., Mikaloff-Fletcher S., Farquhar G., Woodgate W., Briggs P.R., Trudinger C.M., 2020. Higher than expected CO2 fertilization inferred from leaf to global observations, Global change biology, 2020;26:2390–2402.

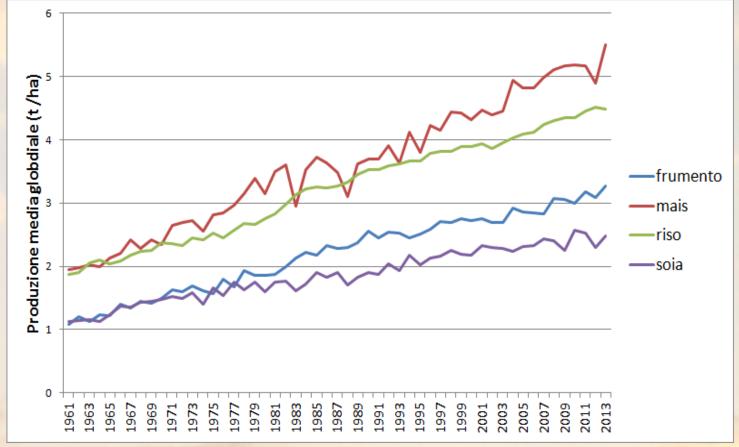
## Crop fraction of the global greening



Zeng et al 2014. Agricultural Green Revolution as a driver of increasing atmospheric CO2 seasonal amplitude, Nature, vol 5015, 20 nov. 2014,

#### La produzione delle 4 colture che nutrono il mondo

(fonte: faostat3 - http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/E)



#### Resa media ettariale del 2013 rispetto al 1961:

**Frumento**: triplicata (da 1.24 a 3.26 t/ha = +200% = +3.8% l'anno)

**Mais**: quasi triplicata (da 1.9 a 5.5 t/ha =+183% = +3.5% l'anno)

**Riso**: più che raddoppiata (da 1.9 a 4.5 t/ha = +140% = +2.6% l'anno)

**Soia**: più che raddoppiata (da 1.2 a 2.5 t/ha =+119%=+2.3% l'anno)

## Alcuni conti colturali su emissioni e assorbimenti di CO2 (L. Mariani – dati non pubblicati)

Sistemi colturali considerati: Rotazione quinquennale (mais, frumento, medica, medica, frumento); Riso in monosuccessione

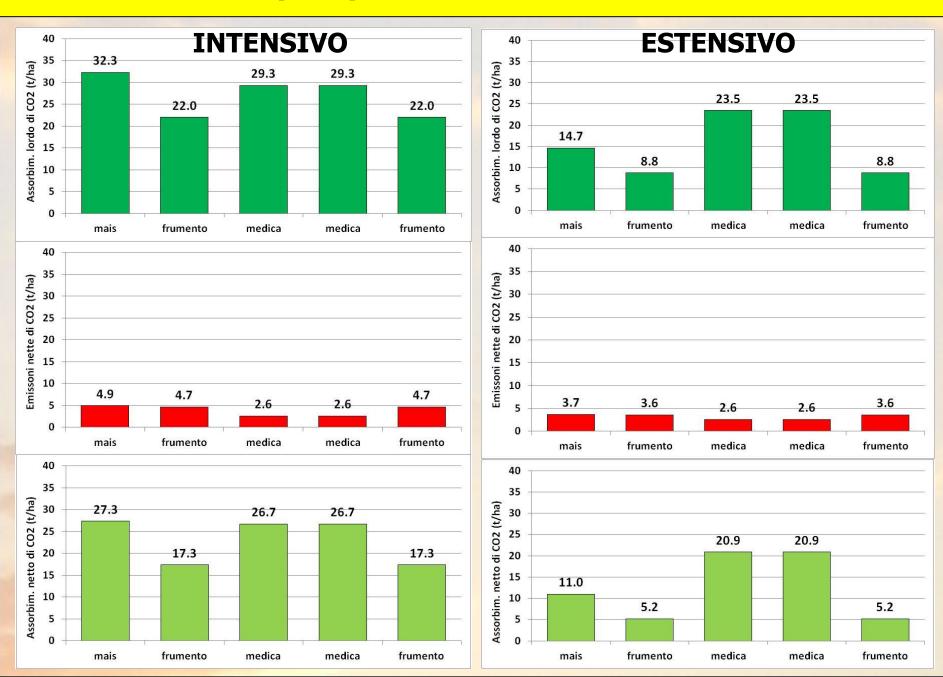
#### **Emissioni considerate**

Aratura **Erpicatura** Distribuzione erbicidi Rincalzatura **Irrigazione** Mietitrebbiatura Essicazione urea production P2O5 production **K20** production erbicide production insecticide production seed production Emissioni CO2 del terreno ecc.

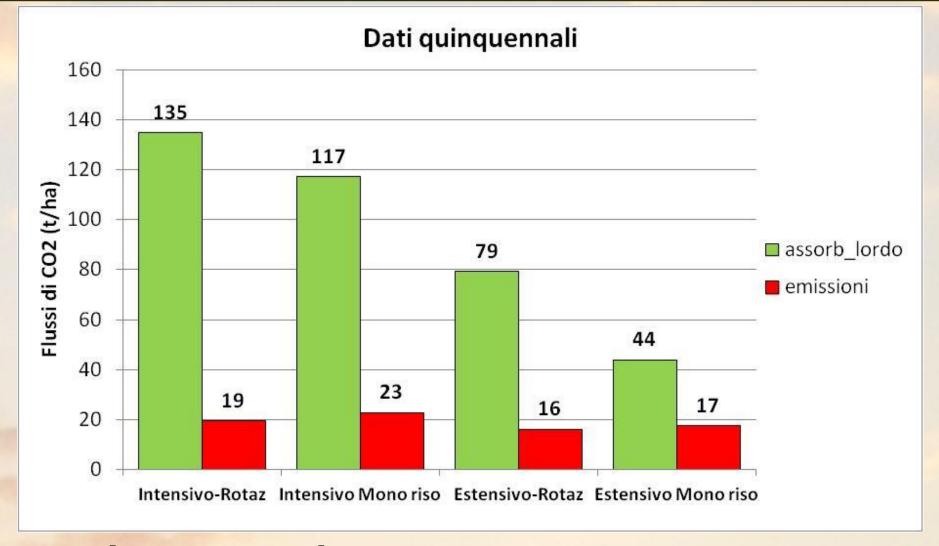
	Intensivo	Estensivo rese
coltura	rese (t/ha)	(t/ha)
mais	11	5
frumento	7.5	3
medica	10	8
medica	10	8
frumento	7.5	3
totale	46	27

coltura	Intensivo rese (t/ha)	Estensivo rese (t/ha)
riso	8	3
totale	40	15

## Rotazione quinquennale – intensivo e estensivo

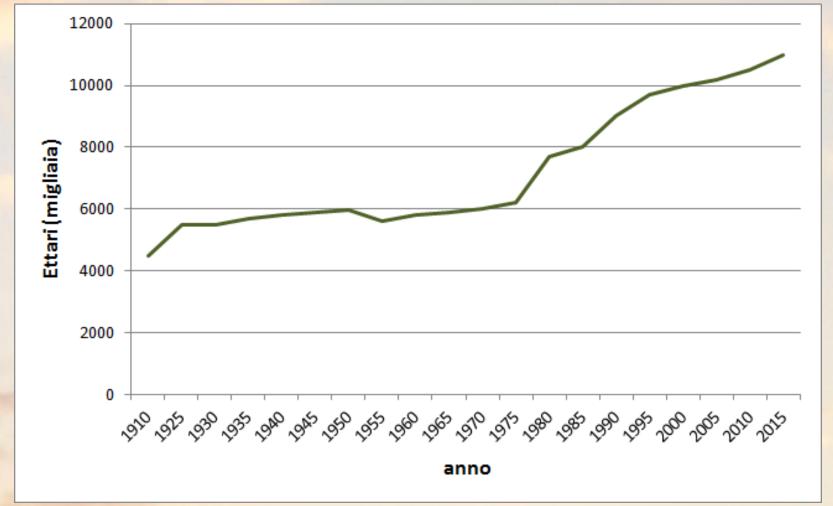


## Sintesi - Assorbimento netto e emissioni nel quinquennio



Intensivo su estensivo assorbimento di  $CO_2 = +70\%$  per rotazione; +167% per riso Emissione di  $CO_2 = +21\%$  per rotazione; +30% per riso

# Altri segnali del greening — Trend dei boschi in Italia Superficie forestale italiana — 2015 su 1910 (+144%)



Dati 1910-1985: Conti G, Fagarazzi L., 2005. Avanzamento del bosco in ecosistemi montani: "sogno degli ambientalisti o incubo per la società"?

Dati 1990-2015: http://blog.zonageografia.scuola.com/2015/litalia-diventa-sempre-piu-verde-oltre-200-alberi-testa

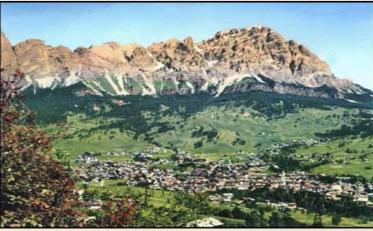
## **Cortina d'Ampezzo**

1903



Fonte: Conti G, Fagarazzi L., 2005. Avanzamento del bosco in ecosistemi montani: "sogno degli ambientalisti o incubo per la società"?

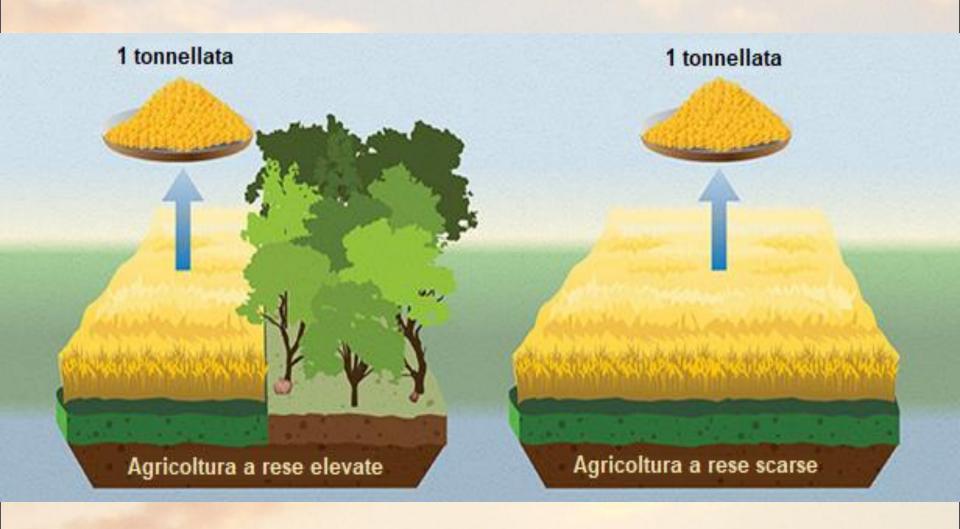
1958



2004



### Inntesificare per un minore impatto ambientale



Fonte: https://www.chalmers.se/en/departments/see/news/Pages/Organic-food-worse-for-the-climate.aspx (intervista al prof. Wirsenius della Chalmers University of Technology, Sweden in merito al lavoro Searchinger R.D., Wirsenius S., Beringer T., Dumas P., 2018. Assessing the efficiency of changes in land use for mitigating climate change, Nature, Vol. 564, pp. 249–253.

#### Verso un futuro veramente verde

Sostituire le catene carboniose provenienti dal fossile con catene carboniose di origine vegetale (agricola o forestale) ai fini di:

- Ridurre la crescita dei livelli di CO2 in atmosfera
- conservare le risorse fossili per il futuro (il fossile è una fonte di idrocarburi a catena lunga, è un peccato bruciarlo)

L'agricoltura non può fare tutto da sola (es: un ruolo importante dovrebbe giocarlo il nucleare).