

Mesosfera

Strat. Sup

Strat. Inf.

Zona UTLS · 8–12 km

Troposfera Sup.

Superficie

THE BURNING RIM
theburningrim.com

IL BURNING RIM



Gruppo Misto Ind. Aeronautico 3°/4° anno
Istituto Tecnico F. Scarpellini – Foligno

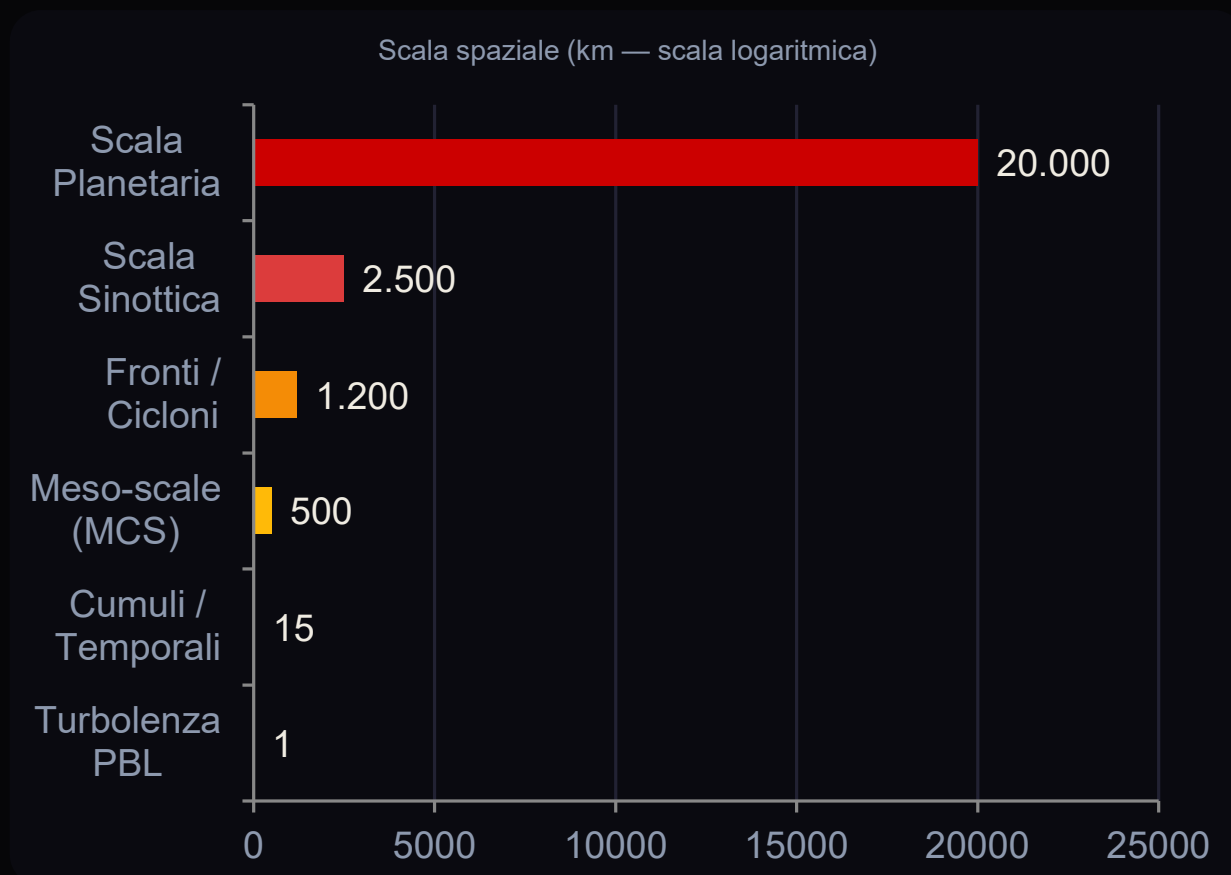
Cambiamenti Climatici nell'Alta Troposfera
e nella Bassa Stratosfera — 2000/2025

Analisi Scientifica · Focus Mediterraneo · Zona UTLS

Strato	Quota (km)	T profilo	Caratteristiche principali
Troposfera	0–10-18	Diminuisce $-6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$	Fenomeni meteo, 80% massa atm., vapore acqueo
Tropopausa	~10-18	-56°C (costante)	Discontinuità termica, jet stream — ZONA UTLS
Stratosfera	12–50	Aumenta fino a 0°C	Strato di ozono (15–35 km), circolazione zonale, QBO
Stratopausa	~50	Max $\sim 0^{\circ}\text{C}$	Limite superiore stratosfera
Mesosfera	50–80	Diminuisce (min. -130°C)	Nubi nottilucenti, meteore, moti convettivi
Termosfera	> 80	Aumenta ($1000^{\circ}\text{C}+$)	Ionosfera, aurora boreale, fotodissociazione O_2/N_2

Gas	Concentrazione	Tempo residenza	Ruolo climatico
H₂O	0–5% (variabile)	~2 settimane	Gas serra n.1, feedback positivo
CO₂	~422 ppm (+50% preindustriale)	Secoli–millenni	ERF $+1.82 \text{ W}/\text{m}^2$, principale driver
CH₄	~1.92 ppm	~9–12 anni	GWP 27–30×, ERF $+0.54 \text{ W}/\text{m}^2$
O ₃ strat.	max 15–35 km	Settimane	Assorbe UV, protegge vita

Scale Spazio-Temporali dei Fenomeni Atmosferici



Fonte: Davolio – Fisica dell'Atmosfera; Stull (1988) Meteorology for Scientists

Micro (< 2 km)

Turbolenza, moti convettivi locali, PBL (0–1.5 km). Tempi: secondi–ore.

Meso-scale (2–2000 km)

Fronti, MCS, temporali, brezze. Tempi: ore–giorni. Fenomeni UTLS locali.

Sinottica (~2000 km)

Cicloni, anticicloni. Il jet stream opera a questa scala. Tempi: 2–7 giorni.

Planetaria (> 20.000 km)

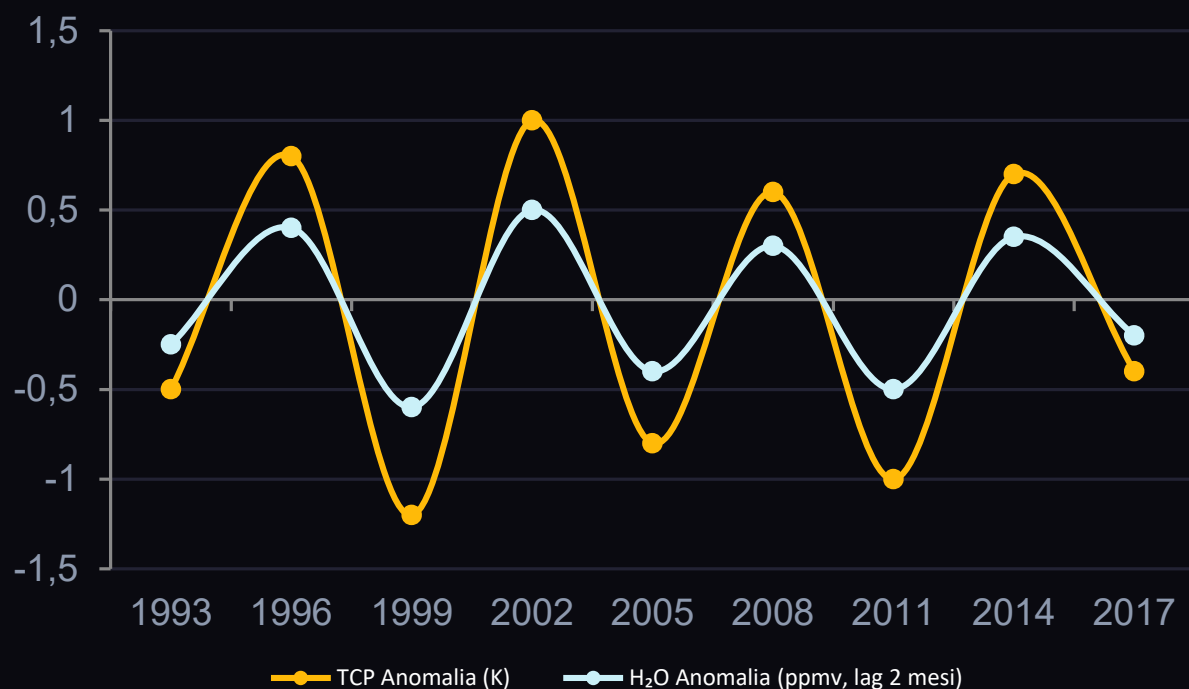
Onde di Rossby, circolazione generale. QBO, vortice polare. Tempi: settimane–mesi.

Nota UTLS

I fenomeni stratosferici (SSW, QBO, vortice polare) operano a scale planetarie con impatti sinottici — il collegamento UTLS→superficie è una scala cross-multipla.

Vapore Acqueo Stratosferico e Cold Point Tropopause

Anomalie destagionalizzate TCP e H₂O a 83 hPa (1993–2017)



Meccanismo principale

Freeze-drying alla tropopausa tropicale fredda (TCP). La circolazione ascendente di Brewer-Dobson trasporta l'aria verso la stratosfera, dove l'umidità si congela.

Correlazione osservata

Forti correlazioni ($r > 0.8$) tra anomalie interannuali di H₂O e TCP su dati HALOE+MLS 1993–2017. La relazione segue Clausius-Clapeyron (~ 0.5 ppmv/K).

Tape recorder

Le anomalie di H₂O si propagano verticalmente (~ 8 km/anno) e lateralmente a tutte le latitudini, tracciando la circolazione Brewer-Dobson con lag stagionali precisi.

Residui e incertezze

I residui (10–20% della varianza) sono correlati a eventi ENSO, monsoni estivi boreali e possibili drift strumentali nel dataset MLS post-2010.

Fonte: Randel W. & Park M. (2019) — JGR Atmospheres 124, 7018–7033. HALOE + MLS satellite, GPS radiosondes.

Vorticità in Meteorologia



Vorticità relativa

Rotazione di una massa d'aria rispetto alla Terra. Positiva (+) antioraria nei cicloni/saccature, negativa (-) oraria negli anticloni/promontori. Fondamentale per la descrizione dei moti sinottici.

Vorticità assoluta

Somma della vorticità relativa e della vorticità terrestre ($f = 2\Omega \sin\varphi$). La vorticità terrestre aumenta verso i poli. La vorticità assoluta si conserva in assenza di forze dissipative.

Wind shear orizzontale

Variazione orizzontale della velocità del vento genera vorticità indipendentemente dalla curvatura. Le correnti a getto (jet stream) sono regioni di intensa produzione di vorticità.

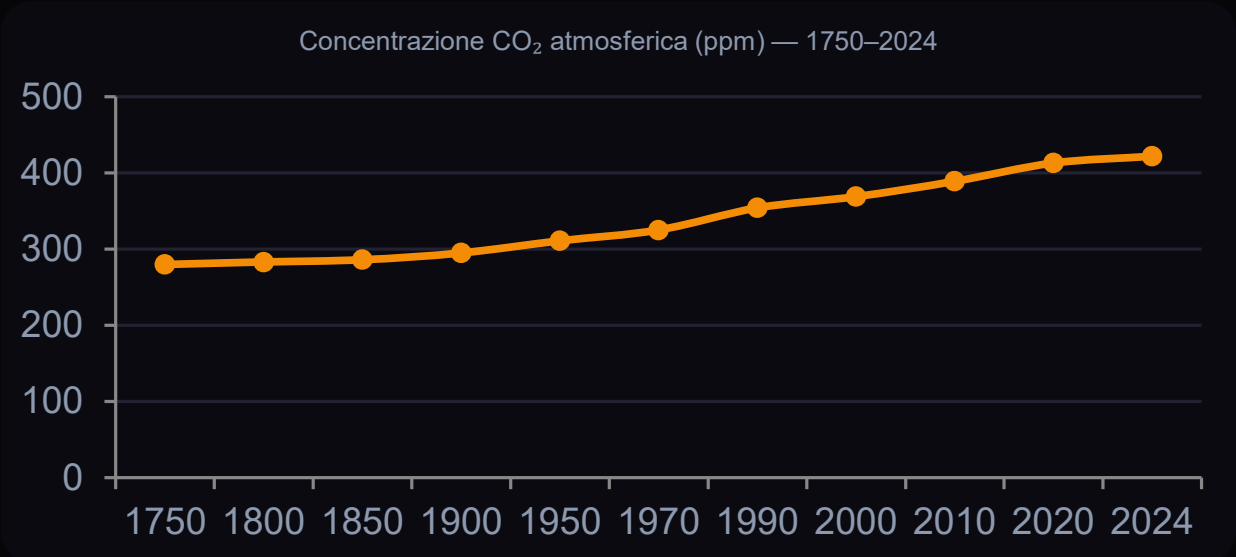
Conservazione e spostamento

Le saccature (nuclei di vorticità ciclonica) si muovono lungo le correnti portanti a 500 hPa come mulinelli in un fiume. Una massa d'aria diretta verso il polo deve assumere rotazione anticiclonica per compensare.

Fonte: A. Giuliacci — Meteo Expert, Mondadori Education · Davolio – Fisica dell'Atmosfera

Gas Serra — CO₂, CH₄, N₂O: Trend e Feedback

Fonte: IPCC AR6 (2021) · Davolio – Fisica dell'Atmosfera · Randel & Park (2019)



Feedback H₂O

Il riscaldamento aumenta il vapore acqueo in atmosfera, che amplifica ulteriormente l'effetto serra (feedback positivo). Può raddoppiare l'effetto del solo CO₂.

Feedback Albedo

Lo scioglimento delle calotte polari riduce l'albedo (superficie più scura assorbe più calore), amplificando il riscaldamento artico — direttamente legato alla UTLS.

Feedback CH₄–Permafrost

Il riscaldamento accelera la decomposizione del permafrost, rilasciando CH₄ (GWP 27–30×). Tipping point non lineare previsto tra 1.5–2°C di riscaldamento globale.

Gas serra	Pre-ind. (ppm)	Attuale (ppm)	GWP ₁₀₀	ERF (W/m ²)
CO ₂	280	~422	1	1.82
CH ₄	0.722	~1.92	27–30	0.54
N ₂ O	0.270	~0.336	273	0.21
Vapore H ₂ O	Variabile	Feedback	—	~1.0 (indiretto)

Indice



01

La Zona UTLS — Perché È Importante



02

25 Anni di Dati — Tappe Fondamentali



03

Anomalie di Temperatura 2000–2025



04

Alterazione del Jet Stream



05

Rialzo Tropopausa e Espansione Cella Hadley



06

Vortice Polare e Riscaldamenti Stratosf.



07

Accoppiamento Troposfera–Stratosfera



08

Piattaforme Stratosferiche



09

Emissioni Aviazione nella UTLS



10

Il Bacino del Mediterraneo in Fiamme



11

Profili Paese — Il Bordo



12

Soluzioni e Percorsi di Mitigazione



13

Consenso Scientifico e Proiezioni



14

Conclusioni e Chiamata all'Azione



15

Fonti e Bibliografia



THE BURNING RIM

theburningrim.com

La Zona UTLS — Perché l'Altitudine di Crociera Cambia Tutto

Mesosfera
> 50 km

Stratosfera
12–50 km

Zona UTLS
8–12 km

Trop. Sup.
6–8 km

Trop. Inf.
0–6 km

Superficie
0 km



Nessuna “pulizia” aria di tipo naturale

La UTLS non ha pioggia, assorbimento biologico né deposizione superficiale. Le emissioni persistono per settimane–mesi.



Amplificazione 40–50×

La stessa molecola emessa a 10 km di quota è 40–50× più nociva per il clima rispetto alla superficie (Starik 2008).



Trasporto emisferico

I venti stratosferici distribuiscono gli inquinanti a livello globale in 2–4 settimane. Emissione locale = problema planetario.



Nucleo di forzatura radiativa

NO_x, H₂O, SO_x e aerosol di fuliggine alterano il bilancio radiativo della Terra quando immessi a questa quota.

25 Anni di Dati — Tappe Fondamentali

Fonti: NOAA · Copernicus ERA5 · NASA MERRA-2 · IPCC AR6 · MedECC 2020

2000

Base di riferimento

NOAA/ESA espandono le reti di monitoraggio UTLS. Radiosonde e dati satellitari stabiliscono la base pre-cambiamento.

2003

Rialzo Tropopausa

Prime prove peer-reviewed dell'aumento dell'altezza della tropopausa al ritmo di 50–80 m/decade a livello globale.

2010

Siccità 900 anni

Siccità nel Mediterraneo-Levante collegata ad anomalie di circolazione UTLS — la peggiore in 900 anni (dati paleoclimatici).

2017

Conferma Scientifica

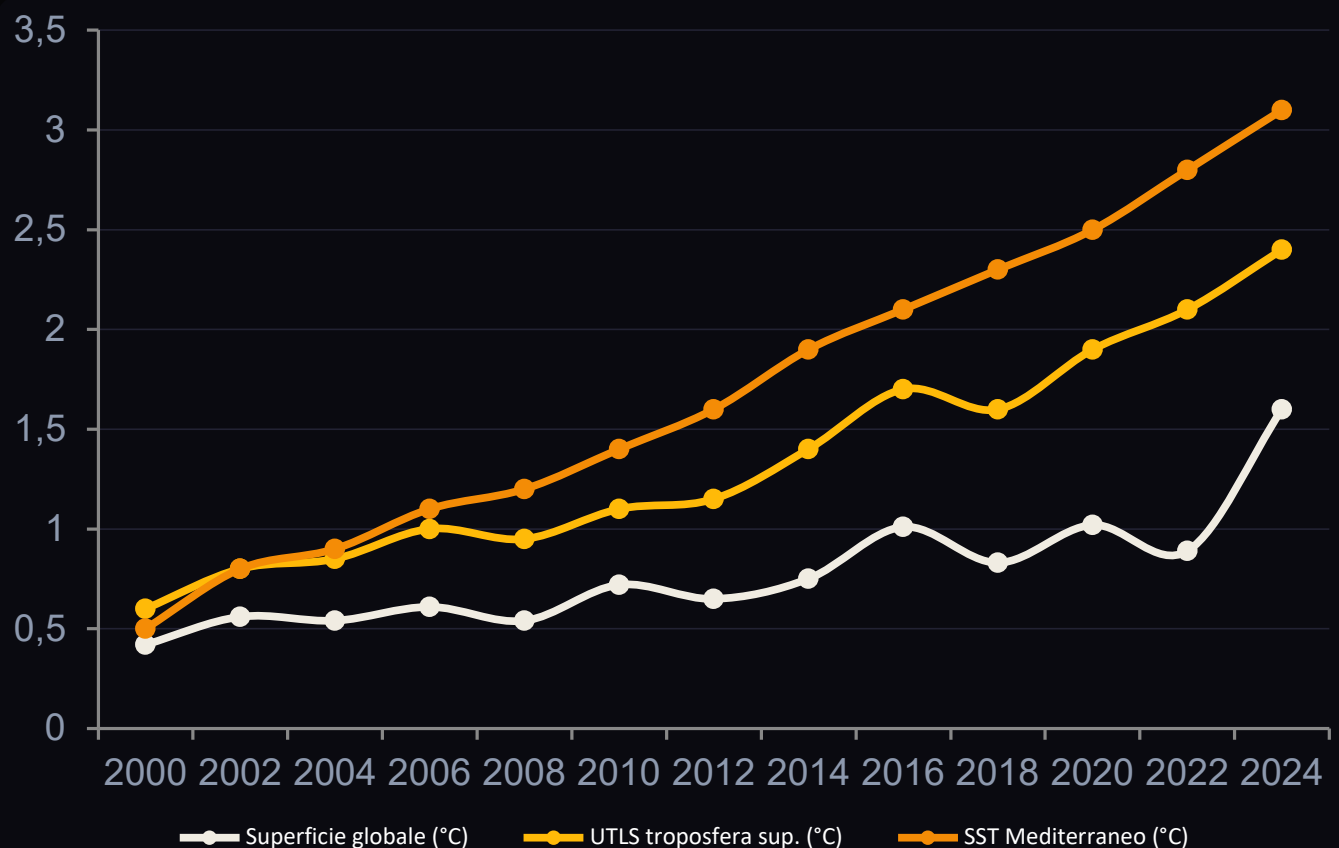
Studio su “Nature” conferma che l'aumento dell'altezza troposferica è senza precedenti nel registro osservativo.

2023–25

Il Bordo Brucia

Grecia, Libia, Algeria, Marocco: incendi record, 48°C, SST +3°C nel Mediterraneo. Nuova base climatica definita.

Anomalie di Temperatura 2000–2025



Dati: Copernicus ERA5 · NASA MERRA-2 · IPCC AR6 · Mediterranean Expert Group (MedECC)

+1,6°C

Anomalia superficiale globale — 2024
Periodo di 12 mesi più caldo mai registrato
(Copernicus 2024)

+2,4°C

Anomalia UTLS troposfera superiore
Riscaldamento UT 40% più rapido della
superficie dal 2000 (NASA MERRA-2)

+3,1°C

Anomalia SST Mediterraneo
Temperatura superficiale marina 2× media
oceanica globale — record estate 2023 (MedECC)

Alterazione del Jet Stream

JET STREAM STABILE

Base 2000 — forte e confinato



INDEBOLITO E ONDULANTE

2020+ — lento, tortuoso , bloccante



Amplificazione Artica

Il riscaldamento artico più rapido dei tropici riduce il gradiente di temperatura equatore-polo. Risultato: jet più lenti e sinuosi con loop più ampi.

Blocchi Atmosferici

Sistemi anticiclonici persistenti (blocchi) che arrestano la progressione meteorologica sono aumentati in frequenza e durata dal 2005.

Formazione Cupole di Calore

Un jet stream stazionario crea cupole di calore — regioni di calore estremo e prolungato. Il blocco estivo 2023 ha portato oltre 45°C.

Spostamento Precipitazioni

I percorsi instabili del jet alterano dove le tempeste portano pioggia: siccità simultanea in Europa meridionale e alluvioni al nord.

Rialzo Tropopausa ed Espansione Cella di Hadley

50–80m

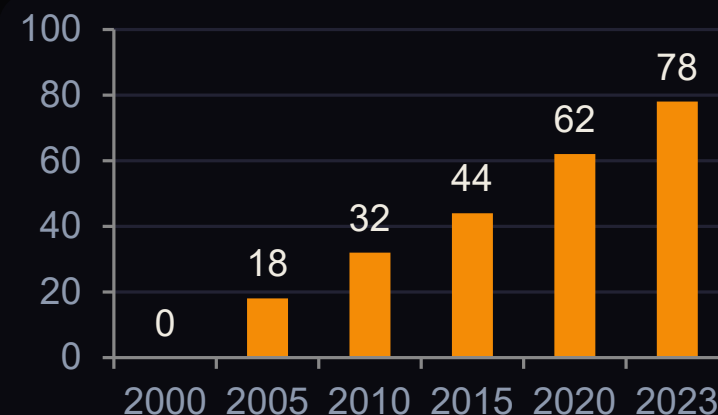
per decade — tasso di rialzo tropopausa

La tropopausa sale di 50–80 m/decade. Espande lo «strato meteorologico» del pianeta e modifica la circolazione globale. Menzel et al. 2023: confermato dall'accelerazione della Brewer-Dobson circulation.

~2°

spostamento polare bordo cella di Hadley

Le celle di circolazione tropicale si espandono verso i poli dal 2000, spingendo zone aride subtropicali verso l'Europa meridionale. Il Sahara si sposta a ~50 km/decade.



Cambiamenti Strutturali nell'Atmosfera

Conseguenza chiave (Menzel et al. 2023): man mano che la UTLS si alza, le emissioni aeronautiche iniettate ad altitudini fisse penetrano sempre più nella stratosfera, amplificando il loro impatto climatico. Ogni 100 m di rialzo della tropopausa estende la vita stratosferica degli inquinanti dell'aviazione di circa il 15%. La Brewer-Dobson circulation si accelera: il raffreddamento stratosferico da CO₂ e il rialzo della tropopausa si auto-amplificano.

Fonti: Nature (2003, 2017) — Menzel, Waugh & Orbe (J. Climate 2023) — Copernicus C3S — IPCC AR6

Vortice Polare e Riscaldamenti Stratosferici Improvvisi

VORTICE STABILE

Inverno normale

SSW VORTICE DIVISO

Riscaldamento improvviso stratosfera



Stratospheric Sudden Warming (SSW)

Il vortice polare stratosferico si indebolisce: i venti occidentali rallentano o invertono. La temperatura del vortice aumenta di decine di gradi in pochi giorni. (Bove, Riv. Met. Aer.)



North Annular Mode (NAM) e AO

NAM è l'indice predittivo dello stato del vortice polare. Fase negativa (NAM < -3): riscaldamento stratosferico, irruzioni fredde in Europa. (Baldwin & Dunkerton 2001)



Quasi-Biennial Oscillation (QBO)

Fenomeno biennale (24–36 mesi) che descrive i venti stratosferici equatoriali. La fase negativa QBO + minimo solare può destabilizzare il vortice polare. (Bove, Riv. Met. Aer.)



Impatti sul Mediterraneo

Gli SSW invernali influenzano l'atmosfera fino al suolo con ondate fredde continentali per periodi fino a 2 mesi dopo l'evento. Spostamento del jet atlantico con effetti documentati.

Fonte: Bove R. — Riv. Met. Aer. · Baldwin & Dunkerton (2001) · Statnaia et al. (2018)

Accoppiamento Troposfera–Stratosfera con l'Aumento di CO₂

40–50 anni

scala temporale risposta STJ

Il jet subtropicale (STJ) risponde all'aumento di CO₂ in 40–50 anni nell'Emisfero Nord DJF, ridotto a 13 anni nell'Emisfero Sud JJA. Strettamente accoppiato all'upwelling troposferico superiore.

10–30 anni

risposta circolazione stratosferica

Le metriche stratosferiche (U₂₅, ϕU_0 , ϕUP_STRAT) rispondono in 10–30 anni — più rapidamente delle metriche troposferiche in NH DJF, più lentamente in SH JJA.

~2°

spostamento equatoriale latit. critica

L'aumento dei venti stratosferici subtropicali sposta equatorialmente la latitudine critica per il breaking delle onde — restringendo e rafforzando l'upwelling nella bassa stratosfera (Brewer–Dobson).

Troposfera superiore

Restringimento e rafforzamento dell'upwelling tropicale con CO₂. Fortemente accoppiato al STJ. Stagionalità pronunciata: risposta maggiore in inverno/primavera. Asimmetria emisferica: NH risponde ~2× rispetto a SH.

Bassa stratosfera

Restringimento e rafforzamento dell'upwelling Brewer–Dobson. Spostamento equatoriale della latitudine critica. Limitata stagionalità, risposta coerente tra emisferi. Risposta lineare al forcing CO₂ (2×→8×CO₂).

Interazione UTLS

La cella di Hadley si espande verso i poli ma il STJ si rafforza — risposta contraddittoria. Meccanismi separati controllano le due risposte nonostante il comune riscaldamento UTLS.

Fonte: Menzel M.E., Waugh D.W., Orbe C. (2023) — J. Climate 36, 4101–4112. NASA GISS · Johns Hopkins University. Modello GISS E2.1-G (CMIP6).

Piattaforme Stratosferiche — Pseudo-Satelliti

Fonte: Bove R. — Riv. Met. Aer. · Bucchignani E. (2022), CIRA · Baldwin & Dunkerton (2001)

HAPS

High Altitude Platform Station

Quota operativa: 18–22 km
Zona UTLS

Autonomia: settimane/mesi
Energia: solare · idrogeno

Cos'è una Piattaforma Stratosferica

Velivoli o palloni stratosferici che operano nella UTLS (18–22 km) come pseudo-satelliti. Più economici dei satelliti, più persistenti degli aerei. Applicazioni: telecomunicazioni, osservazione della Terra, monitoraggio ambientale.

Sfida Meteo Principale: I Venti

Il vento zonale nella UTLS è la principale sfida operativa. Al di sopra di 18 km i venti possono superare i 30–60 m/s. La previsione del NAM, del vortice polare e della QBO è essenziale per pianificare le rotte.

Stratospheric Sudden Warming — Impatto

Un SSW può alterare radicalmente i regimi dei venti stratosferici in pochi giorni. L'inversione dei venti (da occidentali a orientali) è l'evento più critico per le piattaforme stratosferiche.

QBO e Previsioni Stagionali

La QBO (24–36 mesi) determina la direzione dei venti stratosferici equatoriali. Fase negativa + minimo solare: perturbazioni del vortice. Critica per la pianificazione operativa a lungo termine.

Monitoraggio Ambientale e Clima

Le piattaforme stratosferiche possono riempire il gap osservativo tra aerei (< 12 km) e satelliti (> 200 km), fornendo misurazioni in situ della composizione chimica UTLS, cruciali per la validazione dei modelli climatici.

Emissioni dell'Aviazione nella Zona UTLS

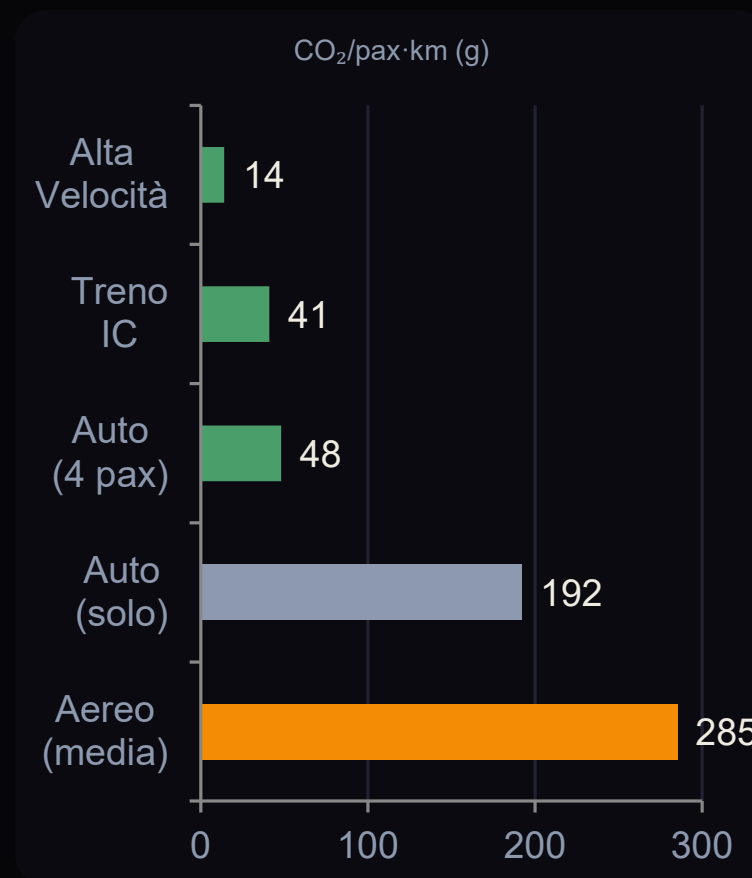
Potenza Motore	EI NO _x g/kg	EI CO g/kg	EI CO ₂ g/kg
100% — Crociera	36,4	0,72	3.156
85% — Salita	29,2	11,3	3.149
30% — Avvicinamento	12,0	76,7	3.074
7% — Rullaggio	8,7	105	3.081

EI = Indice di Emissione (g per kg di carburante). Fonte: Starik A.M., NATO/RTO-EN-AVT-150, 2008

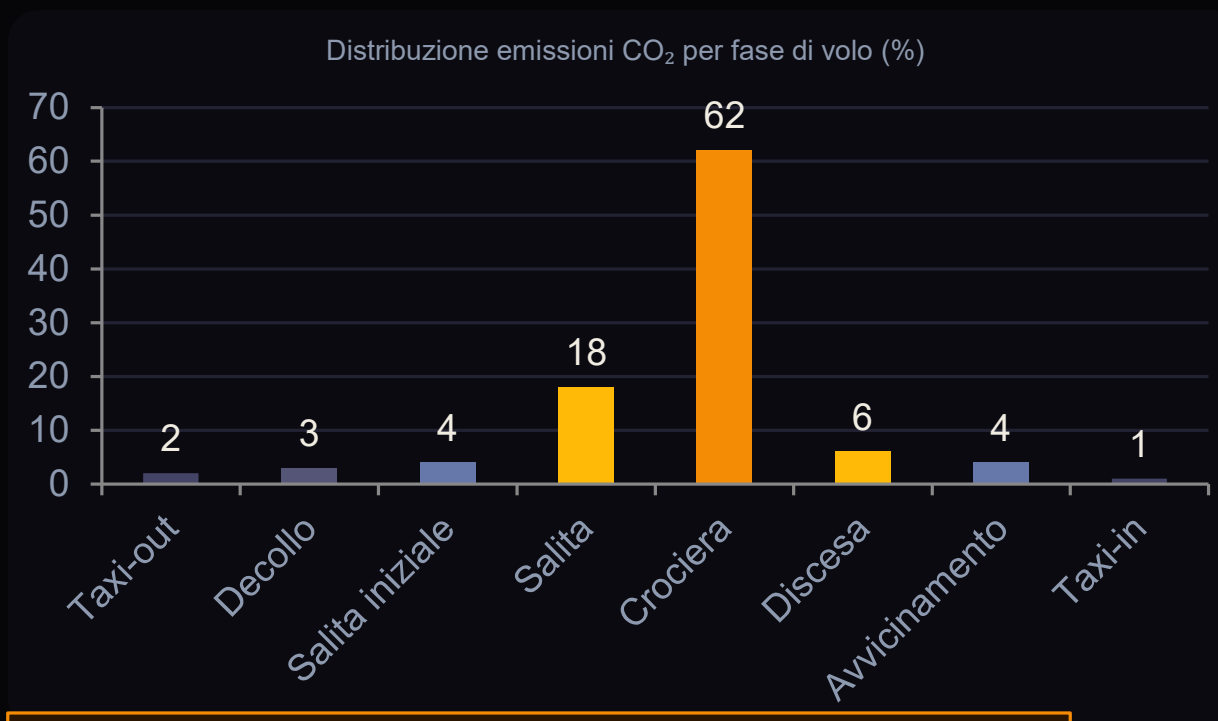
40–50×

fattore di amplificazione climatica all'altitudine UTLS

Le emissioni a 10 km di quota sono 40–50× più dannose per il clima rispetto alle stesse emissioni in superficie — la UTLS non ha meccanismi di rimozione. (Starik 2008 — Istituto Centrale dei Motori Aeronautici, Mosca)



Impatto Ambientale dell'Aviazione — Emissioni Dettagliate



Ciclo CCD (>3000 ft): ~90% emissioni totali | Ciclo LTO (<3000 ft): ~10% ma qualità aria aeroportuale | Crociera da sola: 60%+

Fonte: Lee et al. (2021) *Atm. Env.* 244; Pham et al. (2010); Starik (2008); Antonacci (2023)

Forzante (ERF mW/m ²)	Best estimate	Segno
Scie cirri	57.4	+ (riscaldamento)
CO ₂	34.3	+ (riscaldamento)
NO _x netto	17.5	+ (riscaldamento)
H ₂ O stratosfera	2.0	+ (riscaldamento)
SO _x aerosol	-7.4	- (raffreddamento)
ERF TOTALE	~100 mW/m²	Non-CO₂ = 2 × CO₂

SAF e Carburanti Alternativi — Stato e Proiezioni

< 1%

del carburante globale nel 2022

Solo 300 milioni di litri prodotti nel 2022 (+200% su 2021). Obiettivo IATA: 10% entro il 2030. 65% del net-zero 2050 secondo IATA.

-80%

riduzione GHG ciclo di vita

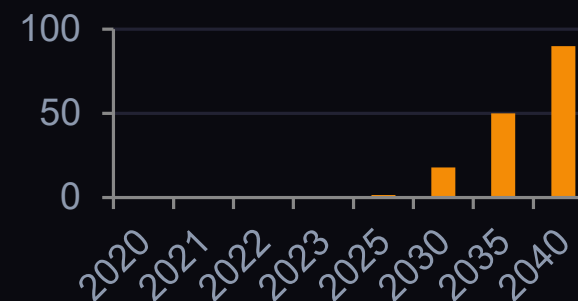
I SAF riducono le emissioni di carbonio fino all'80% rispetto al cherosene convenzionale (well-to-wake). Nessuna modifica motori necessaria (drop-in).

2-8×

costo vs cherosene

Il costo dei SAF varia da 2 a 8 volte il cherosene convenzionale. Principale barriera all'adozione di massa. Incentivi politici necessari per la transizione.

Produzione SAF (mld litri)



Definizione ICAO

Carburanti da fonti alternative al petrolio che soddisfino criteri di sostenibilità CORSIA. Standard ASTM D7566 — 7 metodi di produzione approvati. Drop-in: usabili senza modifiche ai motori.

Fonti principali

Oli da cucina usati, grassi animali, piante oleaginose, rifiuti agricoli, legname, rifiuti solidi urbani, CO₂ atmosferica (e-fuels). Produzione sostenibile in tutte le fasi dalla coltivazione alla raffinazione.

Politiche incentivanti

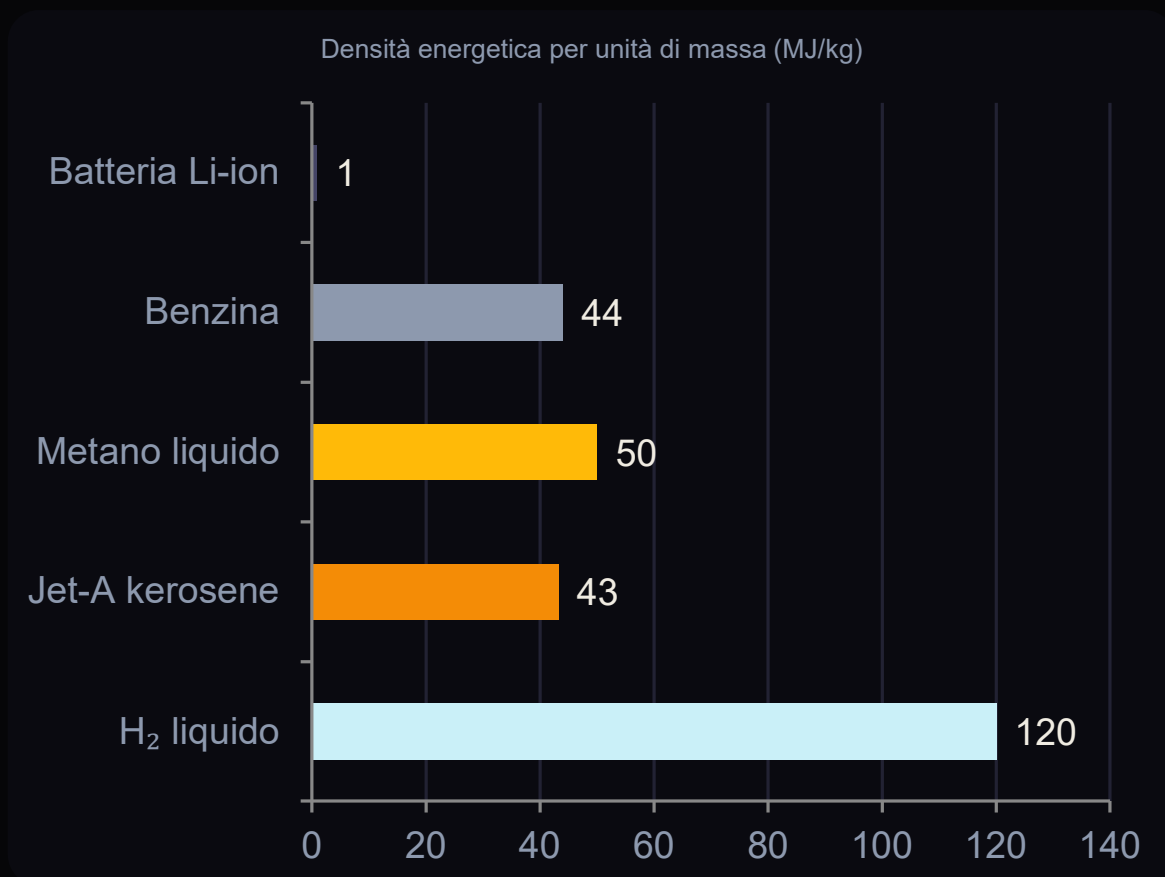
EU: ReFuelEU Aviation (mandate SAF). USA: credito fiscale SAF. Norvegia: tariffe atterraggio ridotte. Indonesia: obbligo 2% SAF. CORSIA: SAF come crediti di compensazione ammissibili.

Barriere residue

Disponibilità materie prime, scalabilità della produzione, costi infrastrutturali di raffinazione e distribuzione, integrità della certificazione della catena di approvvigionamento.

Fonte: IATA (2023) · IEA (2019) · ICAO CORSIA · Antonacci (2023) · Carrer (2022)

Propulsione a Idrogeno — ZEROe e Futuro



Fonte: Airbus ZEROe (2021) · Baroutaji et al. (2019) · Yusaf et al. (2022) · Antonacci (2023)

H₂ Verde ✓

Elettrolisi + rinnovabili. Zero emissioni well-to-wake. Costo ancora elevato (~4–6 €/kg). Necessita di massiccia espansione delle rinnovabili. Unica opzione veramente sostenibile.

H₂ Blu ●

Steam methane reforming + CCS. Emissioni ridotte ma non nulle. Costo ~2–3 €/kg. Soluzione di transizione mentre si scala il verde. 90% della produzione attuale è grigio.

ZEROe (Airbus)

3 concetti: turboelica (fino a 100 pax), turbofan (fino a 200 pax), blended-wing body. Servizio commerciale obiettivo: 2035. L'H₂ liquido a -253°C richiede serbatoi criogenici in fusoliera.

Sfide operative

Volume serbatoi 4× il cherosene. Necessità di certificazione EASA/FAA nuova. Infrastrutture aeroportuali di liquefazione e rifornimento. Costi operativi ancora elevati 2025–2035.

Aviazione Elettrica — Architetture e Sfide

TURBOELETTRICO

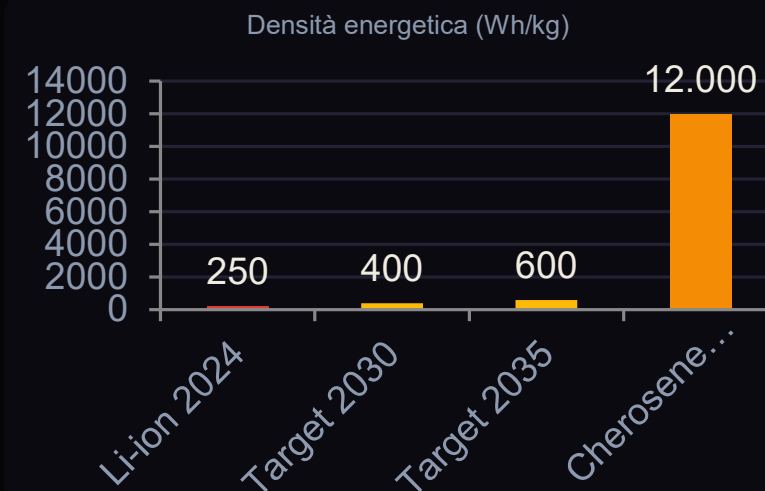
Turbina a gas → generatore → motore elettrico + elica. Nessuna batteria. Risparmio carburante per efficienza motore elettrico, ma emissioni ancora presenti. Buon candidato per breve-medio termine.

IBRIDO-ELETTRICO

Batteria + turbina a gas in parallelo o serie. Gestione ottimizzata per fase del volo. Efficace solo per voli brevi (< 500 km). Studio Adu-Gyamfi & Good 2022: configurazione serie più efficiente.

FULL ELECTRIC

Batteria ricaricabile → motore elettrico. Zero emissioni in volo. Ricarica necessaria a terra. Autonomia limitata dalle batterie attuali. 92% della flotta attuale non fattibile con tecnologia corrente.

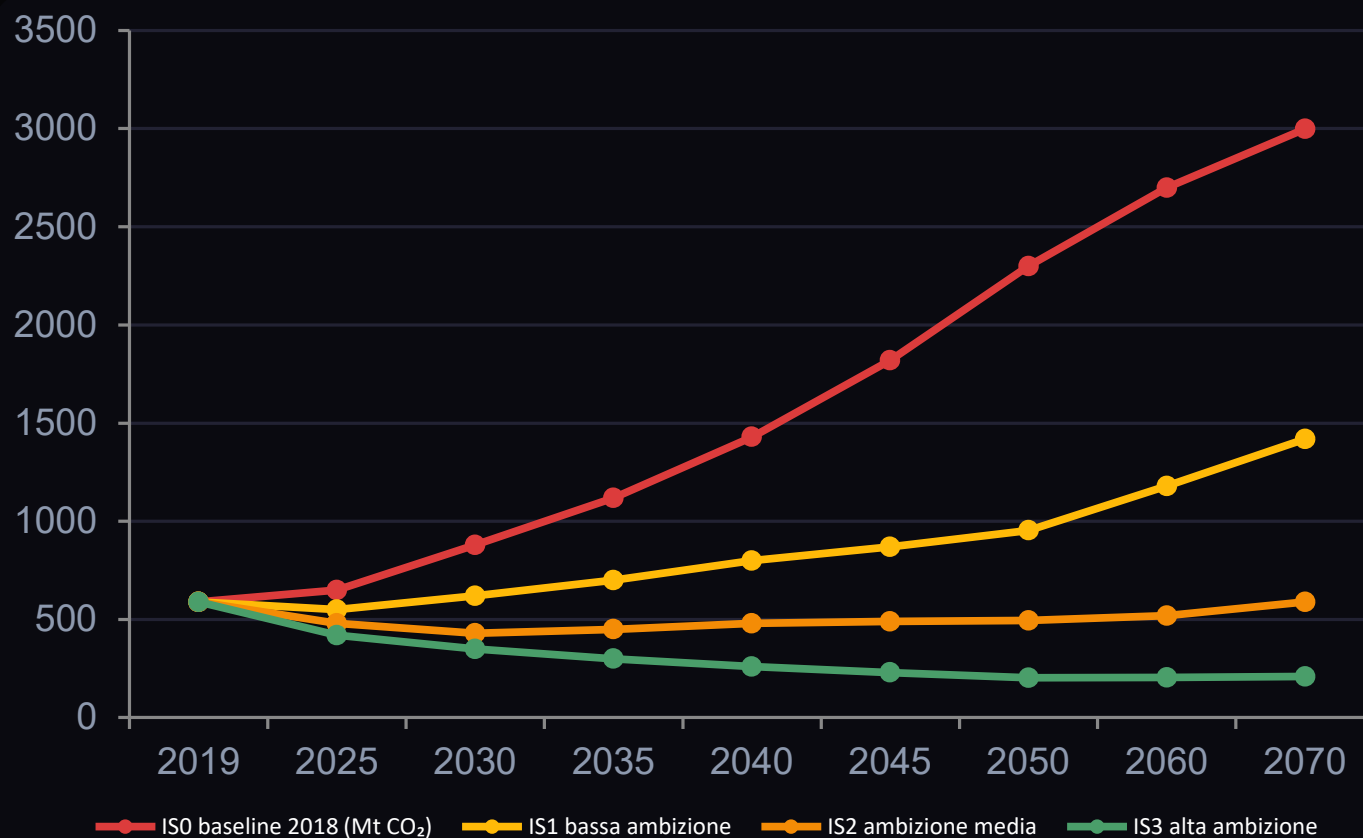


Sfida chiave

Li-ion attuali: ~250 Wh/kg vs 12.000 Wh/kg del cherosene (rapporto 1:48). Target per viabilità commerciale: 600 Wh/kg (rapporto 1:1.5 considerando efficienza motore elettrico).

Fonte: Adu-Gyamfi & Good (2022) · IPCC AR6 (2022) · Antonacci (2023)

Scenari Futuri ICAO LTAG 2022



Fonte: ICAO LTAG (2022) · Antonacci (2023) · IEA (2023)

IS1

~950 Mt a 2050 (+60% vs 2019). -39% su ISO.
Bassa ambizione senza riforme strutturali.

IS2

~495 Mt a 2050 (-20% vs 2019). -68% su ISO.
Richiede SAF > 30%, nuova tecnologia.

IS3

~203 Mt a 2050 (-67% vs 2019). -87% su ISO.
Alta ambizione: H₂ + SAF + elettrico.

NOT A

Nessuno scenario raggiunge il net-zero 2050.
Emissioni residue necessitano compensazione
esterna o CCS.

Il Bacino del Mediterraneo in Fiamme

2×

tasso di riscaldamento globale
bacino Mediterraneo 2000–2025

MedECC (2020): Senza rapida mitigazione, il Mediterraneo affronta fino a +4°C entro il 2100. Il 40% delle specie vegetali a rischio estinzione. 250M persone a grave rischio idrico.

+3°

Espansione Anticiclone
Azzorre

Spostamento verso nord
riduce le precipitazioni
invernali in Europa
meridionale e Nord Africa.
Collegato ai cambiamenti di
circolazione UTLS.

+180%

Aumento Area Incendi
Boschivi

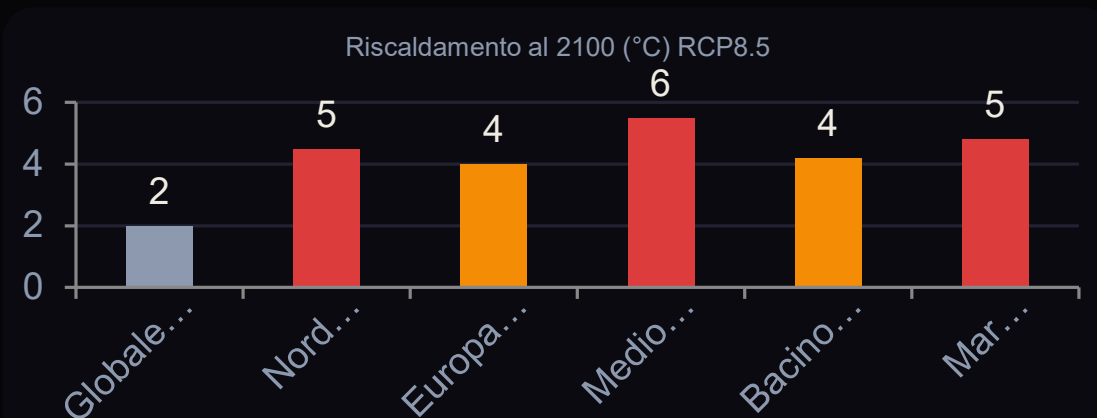
Area incendi Spagna 2000–
2025 vs base pre-2000.
Grecia 2023: 96.000 ha
bruciati — il più grande
incendio UE mai registrato.
Libia 2023: alluvioni lampo
estreme.

+67

Giorni di Ondate Calde
Marine

Giorni aggiuntivi an
Mediterraneo (2023
2000). Anomalia SS
raggiunto il picco di
nel Mar Egeo nell'ag
2023.

Il Mediterraneo: Dati, Proiezioni e Vulnerabilità al 2100



Espansione Anticiclone Azzorre

Lo spostamento verso nord dell'Anticiclone delle Azzorre riduce le precipitazioni invernali in Europa meridionale del 20–30%. Collegato direttamente all'espansione della cella di Hadley guidata dalla UTLS.

SST e Cicloni

L'aumento della temperatura superficiale marina (SST) alimenta l'intensificazione di sistemi ciclonici mediterranei (Medicanes) e genera eventi alluvionali estremi come in Libia (Derna, settembre 2023: 11.000 vittime).

Intensificazione Incendi

Combinazione di caldo estremo, siccità prolungata e venti secchi da est (Sirocco più frequente) aumenta drasticamente la probabilità di mega-incendi. Grecia 2023 come nuovo standard climatico.

+4°C

Riscaldamento medio bacino Mediterraneo entro 2100 (RCP8.5). Il 40% delle specie vegetali a rischio estinzione.

250M

Persone a grave rischio di stress idrico entro il 2100 senza rapida mitigazione (MedECC 2020).

+50%

Aumento previsto dei giorni di siccità estrema nell'Europa meridionale e Nord Africa entro il 2100.

Profili Paese — Il Bordo

ES Spagna

- +2,1°C anomalia media
- Siccità eccezionale D4
- +180% area incendi

IT Italia

- Valle del Po in secca
- -42% ghiacciai alpini
- +67 giorni caldo/anno

GR Grecia

- 96.000 ha bruciati 2023
- Più grande incendio UE
- +3,4°C SST Egeo

TR Turchia

- 48,8°C record 2021
- 185.000 ha incendi 2021
- -25% piogge costa sud

MA Marocco

- -60% neve sull'Atlante
- Siccità cronica 2018+
- Desertificazione NE

LY Libia

- Alluvione Derna 11k+
- Ciclone Daniel 2023
- +34% intensità cicloni

Fonti: Copernicus EFFIS · MedECC 2020 · ENSO/NAO · Servizi meteorologici nazionali

Soluzioni e Percorsi di Mitigazione

SAF — Carburanti Aviazione Sostenibili

I SAF riducono le emissioni GHG del ciclo di vita fino all'80%. Prodotti da oli di scarto, residui agricoli. Compatibili con i motori esistenti. 100M litri nel 2023 — < 1% del fabbisogno. Obiettivo IATA: 10% SAF entro il 2030.

IATA 2023 · Carrer 2022

EU Emission Trading System (ETS)

Aviazione inclusa dall'ETS UE dal 2012. Tutti i vettori nell'area UE monitorano e cedono quote per la CO₂ emessa. Contribuisce a >17 Mt/anno di riduzione carbonio. Prezzo ETS ~60–90 €/t CO₂ nel 2023–24.

Commissione Europea · EASA

CORSIA — Compensazione Globale

Schema ICAO di Compensazione per l'Aviazione Internazionale. Stabilizza la CO₂ netta ai livelli del 2020. Le compagnie partecipanti compensano la crescita. Si stima copra l'80% delle emissioni sopra la base nel 2021–2035.

ICAO 2021 · Carrer 2022

Propulsione a Idrogeno — ZEROe

Programma ZEROe Airbus: 3 concetti a idrogeno (turboelica, turbofan, blended-wing). L'H₂ liquido immagazzina 3× energia/kg vs cherosene ma occupa 4× volume. Servizio commerciale obiettivo: 2035.

Airbus 2021 · Carrer 2022

Aviazione Solare ed Elettrica

Solar Impulse 2: circumnavigazione globale a energia solare (2015–16). L'attuale densità energetica delle batterie limita l'aviazione elettrica commerciale a < 200 km. Rapidi miglioramenti attesi 2025–2035.

Solar Impulse · Carrer 2022

Ottimizzazione delle Rotte di Volo

Il routing di evitamento delle scie di condensazione potrebbe ridurre la forzatura radiativa delle scie del 50–70% a un aumento del costo carburante dello 0,1–0,5%. Dati umidità UTLS in tempo reale sono l'elemento chiave abilitante.

Google/American Airlines 2024 · EUROCONTROL

Politiche Climatiche — CORSIA, ETS, Accordo di Parigi

Fonte: Antonacci (2023) · ICAO · European Commission · UNFCCC

1997/2005

Protocollo di Kyoto

Obiettivi vincolanti GHG per Paesi industrializzati (−5% vs 1990 nel 2008–12). I voli internazionali esclusi per difficoltà di attribuzione. EU: −8%, USA non ratificato.

2003/2012

EU ETS

Sistema cap-and-trade CO₂. Aviazione inclusa dal 1° gen 2012 (Direttiva 2008/101/CE). ~600 operatori. >17 Mt/anno riduzione carbonio. Prezzo ETS ~60–90 €/t CO₂ (2023–24).

2015

Accordo di Parigi

Limite riscaldamento < 2°C (aspirazione 1.5°C). Non specifica misure per aviazione ma fornisce il quadro per ICAO. NDC nazionali obbligatori ogni 5 anni.

2016/2021

CORSIA (ICAO)

Schema di Compensazione per l'Aviazione Internazionale. Stabilizza CO₂ netta ai livelli del 2020. Fase pilota volontaria 2021–2026. Obbligatorio dal 2027. Copre ~80% emissioni sopra baseline.

2011/2050

Flightpath 2050 (EU)

−75% CO₂, −90% NO_x, −65% rumore vs base 2000. Zero emissioni in taxiing. Ampio uso SAF. Roadmap con tappe tecnologiche decennali.

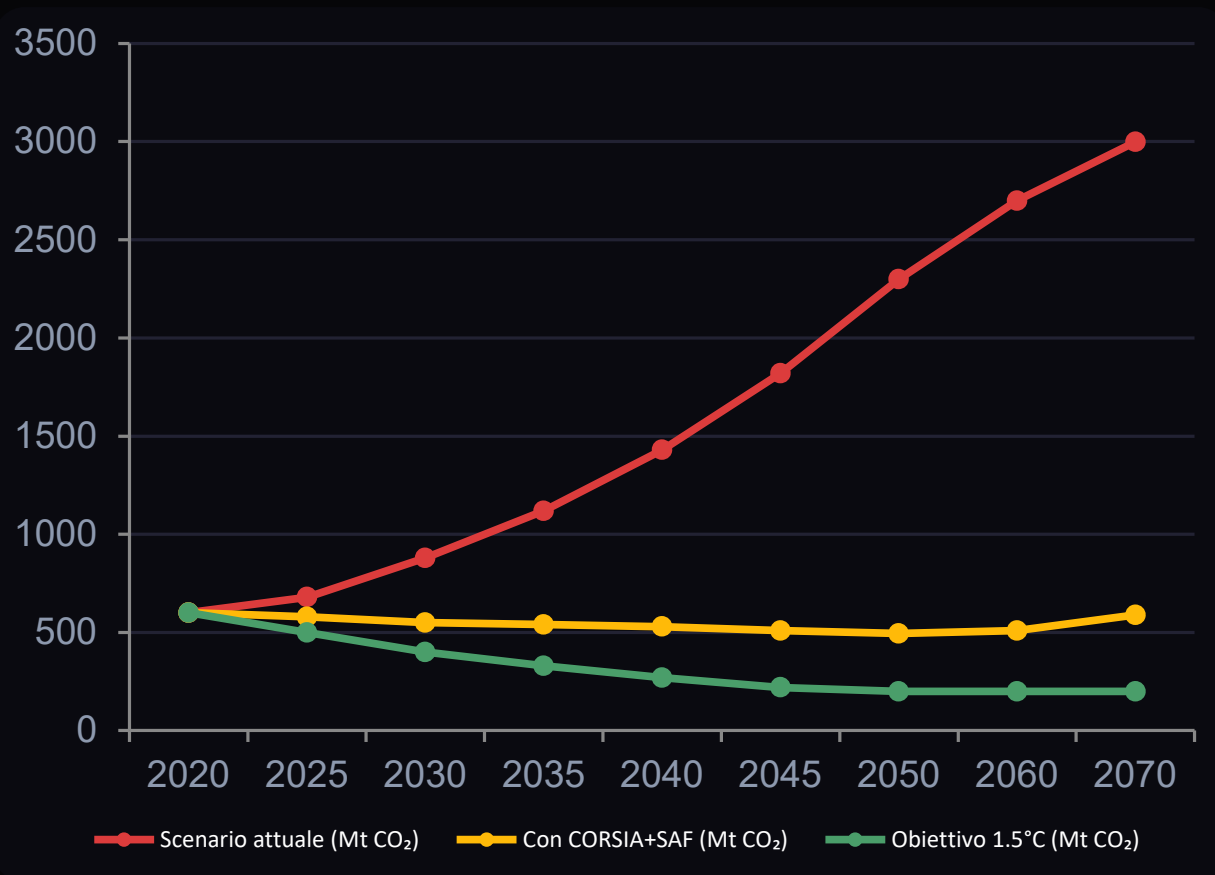
Compatibilità con l'Accordo di Parigi (Grewe et al. 2021)

Scenario	Descrizione	ΔT al 2100	vs Obiettivo Parigi
CurTec	Tecnologia attuale, nessun miglioramento	Riferimento max	✗ Superamento certo
BAU	Miglioramenti tecnologici usuali	-25% vs CurTec	✗ Insufficiente
CORSIA	SAF + mezzi alternativi + compensazione	-35-40%	⚠ Superamento 2025-2064 (90%)
FP2050	Obiettivi Flightpath 2050 standard	-55-60%	⚠ Allineato 2°C (inerzia)
FP2050-cont	FP2050 con ritmo più rapido	-65-70%	✓ Allineato 1.5°C (inerzia)

In tutti gli scenari, gli effetti non-CO₂ (non inclusi nell'obiettivo ICAO e in Flightpath 2050) contribuiscono significativamente al riscaldamento — sono la parte non regolamentata e in rapida crescita.

Fonte: Grewe V. et al. (2021) Nature Communications 12 · Antonacci (2023)

Consenso Scientifico e Proiezioni Future



IPCC AR6 (2021) · MedECC (2020) · Nature Climate Change · Copernicus C3S · Menzel et al. 2023

UTLS > Superficie

La zona UTLS sta cambiando più rapidamente del clima superficiale — i modelli attuali sottostimano i feedback tra i cambiamenti UTLS e le condizioni meteorologiche regionali. (Menzel, Waugh & Orbe 2023)

Med: +4°C entro 2100

Il Mediterraneo è il punto critico più esposto. MedECC proietta +3°C/+4°C entro il 2100. 250M persone a grave rischio idrico. Riscaldamento 2× media globale.

Effetti non-CO₂ 2–4×

Gli effetti non-CO₂ dell'aviazione (scie, NO_x, H₂O) all'altitudine di crociera possono essere responsabili di 2–4× l'impatto di riscaldamento della sola CO₂. Non attualmente regolamentati.

Gap attuativo critico

Il ritmo di attuazione delle soluzioni (SAF, ETS, CORSIA, H₂) è criticamente insufficiente rispetto al ritmo del cambiamento climatico in atto nella UTLS.

Conclusioni

La Scienza, non il panico.

01

La zona UTLS sta cambiando più rapidamente del clima superficiale — i modelli attuali sottostimano i feedback tra i cambiamenti UTLS e le condizioni meteorologiche regionali estreme.

02

Il Mediterraneo è la regione più esposta sulla Terra ai cambiamenti climatici guidati dalla UTLS — si riscalda a $2\times$ la media globale, con 250 milioni di persone a grave rischio idrico entro il 2100.

03

Le emissioni aeronautiche all'altitudine di crociera portano un fattore di amplificazione climatica di $40-50\times$. Gli effetti non- CO_2 (scie, NO_x , aerosol) non sono attualmente regolamentati a livello internazionale.

04

Il percorso di soluzione esiste: SAF, ETS, CORSIA, propulsione a idrogeno e l'evitamento delle scie. Ma il ritmo di attuazione è criticamente insufficiente rispetto al ritmo del cambiamento.

05

Capire la UTLS non è opzionale — è la chiave per capire perché il Mediterraneo brucia. La scienza deve guidare la risposta politica.

Fonti e Bibliografia Completa

Articoli Scientifici

- Starik A.M. (2008) — Gaseous and Particulate Emissions with Jet Engine Exhaust. NATO/RTO-EN-AVT-150. Istituto Centrale Motori Aeronautici, Mosca.
- Menzel M.E., Waugh D.W., Orbe C. (2023) — Connections between UTLS and Lower Stratospheric Circulation Responses to Increased CO₂. J. Climate 36, 4101–4112.
- Randel W. & Park M. (2019) — Diagnosing Observed Stratospheric Water Vapor Relationships to the Cold Point Tropical Tropopause. JGR Atmospheres 124, 7018–7033.
- Lee D.S. et al. (2021) — The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. Atm. Environment 244, 117834.
- Grewe V. et al. (2021) — Evaluating the climate impact of aviation emission scenarios towards the Paris agreement including COVID-19 effects. Nature Communications 12.
- Bove R. — Le Piattaforme Stratosferiche e il loro Ambiente, Parte II. Rivista di Meteorologia Aeronautica.
- Baldwin M.P. & Dunkerton T.J. (2001) — Stratospheric Harbingers of Anomalous Weather Regimes. Science 294, 581–584.

Rapporti Istituzionali

- IPCC (1999) — Aviation and the Global Atmosphere. Rapporto Speciale. Cambridge University Press.
- IPCC AR6 (2021) — Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press.
- MedECC (2020) — 1° Rapporto di Valutazione sui Cambiamenti Climatici nel Mediterraneo. Unione per il Mediterraneo.
- ICAO (2022) — Report on the feasibility of a Long-Term Aspirational Goal (LTAG) for CO₂ reductions.
- IEA (2023) — Aviation Energy Outlook. International Energy Agency.
- IATA (2023) — Annual Review 2023. International Air Transport Association.
- Copernicus C3S — Dataset di Rianalisi ERA5 2000–2025. ECMWF.

Dati e Monitoraggio

- NASA — MERRA-2 Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. NASA GSFC.
- NOAA — NOAA GlobalTemp v5.0 — Analisi della Temperatura Superficiale Globale.
- EEA (2020) — Transport and Environment Report — Train or Plane? European Environment Agency.
- Carrer A. (2022) — Inquinamento Atmosferico e Esercizio Aeroportuale. Univ. di Padova, ICEA.
- Antonacci C. (2023) — Impatto ambientale del settore dell'aviazione. Tesi di Laurea, Univ. di Padova.
- Davolio S. — Fisica dell'Atmosfera: Struttura e composizione. Dispensa universitaria, Bologna.
- Giuliani A. — Il concetto di vorticità in meteorologia. Mondadori Education – Meteo Expert.