Scienze dell'atmosfera e del clima > Vol.14 No.4, Ottobre 2024

CO_2 Studi di sensibilità alle radiazioni posteriori in condizioni di laboratorio e sul campo

Traduzione in Italiano con il sostegno di deepl.com

https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=136478

Ernst Hammel, Martin Steiner, Christoph Marvan, Matthias Marvan, Klaus Retzlaff, Werner Bergholz, Axel Jacquine
International Climate Research, A Citizen Research Group, Vienna, Austria.
DOI: 10.4236/acs.2024.144025 **PDF** **HTML** **XML** **84** Downloads **508** Views

Astratto

Abbiamo misurato la retro-radiazione IR utilizzando un setup sperimentale relativamente economico e una camera di prova con concentrazioni crescenti di CO_2 partendo da un'atmosfera pura di N_2 contro un fondo nero di riferimento a temperatura controllata. I risultati confermano le stime di questo lavoro e le precedenti scoperte sulla saturazione della radiazione infrarossa indotta dal CO_2 in condizioni atmosferiche realistiche. Abbiamo utilizzato questa configurazione anche per studiare gli effetti di forzatura termica con gas serra più forti e rari su un cielo notturno chiaro. I nostri risultati e la loro interpretazione sono un'altra indicazione per avere un approccio più critico nella modellazione del clima e contro l'interpretazione monocausale degli indici climatici causati solo dalle emissioni antropogeniche di gas serra. La fisica di base, combinata con misure e dati tratti dalla letteratura, ci permette di concludere che la retro-radiazione infrarossa indotta dal CO_2 deve seguire un comportamento asintotico di tipo logaritmico, che è anche ampiamente accettato nella comunità dei cambiamenti climatici. L'importante questione della sensibilità climatica con il raddoppio delle attuali concentrazioni di CO_2 è stimata al di sotto di 1˚C. Questo valore è importante quando le Nazioni Unite considerano il cambiamento climatico come una minaccia esistenziale e molti governi intendono ridurre rigorosamente le emissioni nette di gas serra, guidati da un'ambiziosa Unione Europea che, ispirandosi alle valutazioni dell'IPCC, punta a più del 55% nel 2030 e fino al 100% nel 2050 [1]. Ma probabilmente dovrebbero ascoltare anche gli esperti [2] [3] che hanno rilevato che tutte queste previsioni presentano notevoli difetti nei modelli di base, nei dati e negli scenari di impatto.

Parole chiave

Cambiamento climatico, gas serra, retrodiffusione di CO_2, radiazione IR

Condividi e cita:

Hammel, E. , Steiner, M. , Marvan, C. , Marvan, M. , Retzlaff, K. , Bergholz, W. e Jacquine, A. (2024) CO_2 Back-Radiation Sensitivity Studies under Laboratory and Field Conditions. *Atmospheric and Climate Sciences*, **14**, 407-428. doi: 10.4236/acs.2024.144025.

1. Introduzione

La nostra atmosfera è composta principalmente da molecole biatomiche inattive dal punto di vista radiativo N_2 78,08% e O_2 20,95% in volume. Il restante 0,97% è costituito principalmente da Ar con lo 0,93%, CO_2 con lo 0,04% in volume e tracce di idrogeno, elio e altri gas nobili, metano, protossido di azoto e ozono. Una parte variabile ma dominante dal punto di vista radiativo è il vapore acqueo, che in media è circa l'1% in volume al livello del mare. Le molecole ad effetto serra (GH) assorbono la radiazione IR terrestre emessa dalla superficie

come risultato del riscaldamento causato dalla radiazione solare in entrata. Le loro caratteristiche di assorbimento consentono loro di agire nella ritenzione del calore all'interno dell'atmosfera e di garantire che la temperatura media globale dell'atmosfera sostenga la vita biologica. Questo è comunemente noto come effetto serra. Pertanto, i componenti IR attivi sono il vapore acqueo, l'anidride carbonica, il metano, il monossido di azoto e l'ozono, in ordine decrescente di efficacia in base alle loro concentrazioni.

Lo spettro di trasmissione nell'infrarosso IR di CO_2 su un percorso di 100 metri è mostrato nella **Figura 1** in funzione del numero d'onda, $1/\lambda = \nu/c$ (λ = lunghezza d'onda, ν = frequenza, c = velocità della luce). La trasmissione T o trasmittanza è la misura in cui la radiazione incidente a qualsiasi numero d'onda viene trasmessa dal campione. Per i mezzi opachi T = 0 e per i mezzi completamente trasparenti T = 1.

Nei mezzi privi di riflessione l'assorbanza, A = 1 - T (trasmittanza) secondo la legge di Kirchhoff, che permette anche di propagare l'uguaglianza tra l'emissività ε e l'assorbenza a onde lunghe .$_{lw}$

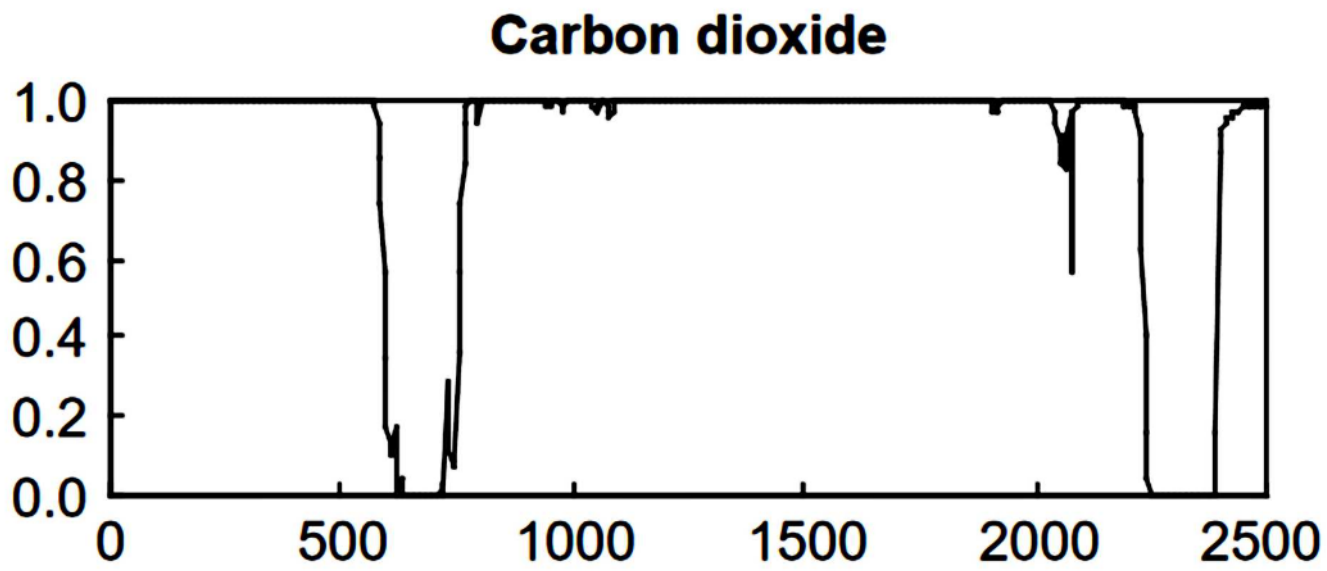


Figura 1. CO_2 Trasmittanza IR su 100 metri in funzione del numero d'onda da HITRAN [4].

Lo spettro del CO_2 è dominato dalla vibrazione di bending, centrata a 667 $^{cm-1}$ equivalente a una lunghezza d'onda di 14,992 µm, e dal modo di stretching asimmetrico a 2349 $^{cm-1}$ equivalente a 4,257 µm. Le bande extra e molto deboli derivano da ulteriori eccitazioni e rappresentano assorbimenti molto piccoli che molto spesso vengono dichiarati come calcoli significativamente imprecisi dell'effetto GH.

La superficie ha una temperatura media globale di 288˚K e la sua emissione è approssimata da un corpo nero a questa temperatura, che consiste in uno spettro di radiazione continuo, a differenza di quello dei gas GH che è specifico per ogni molecola-specie e costituito da bande discrete di rotazione-vibrazione. La radianza superficiale continua di Planck o del corpo nero è mostrata dalla curva grigia in **Figura 2** rispetto ai limiti delle bande di assorbimento del CO_2 in arancione e rosso del gas GH principale di CO . $_2$

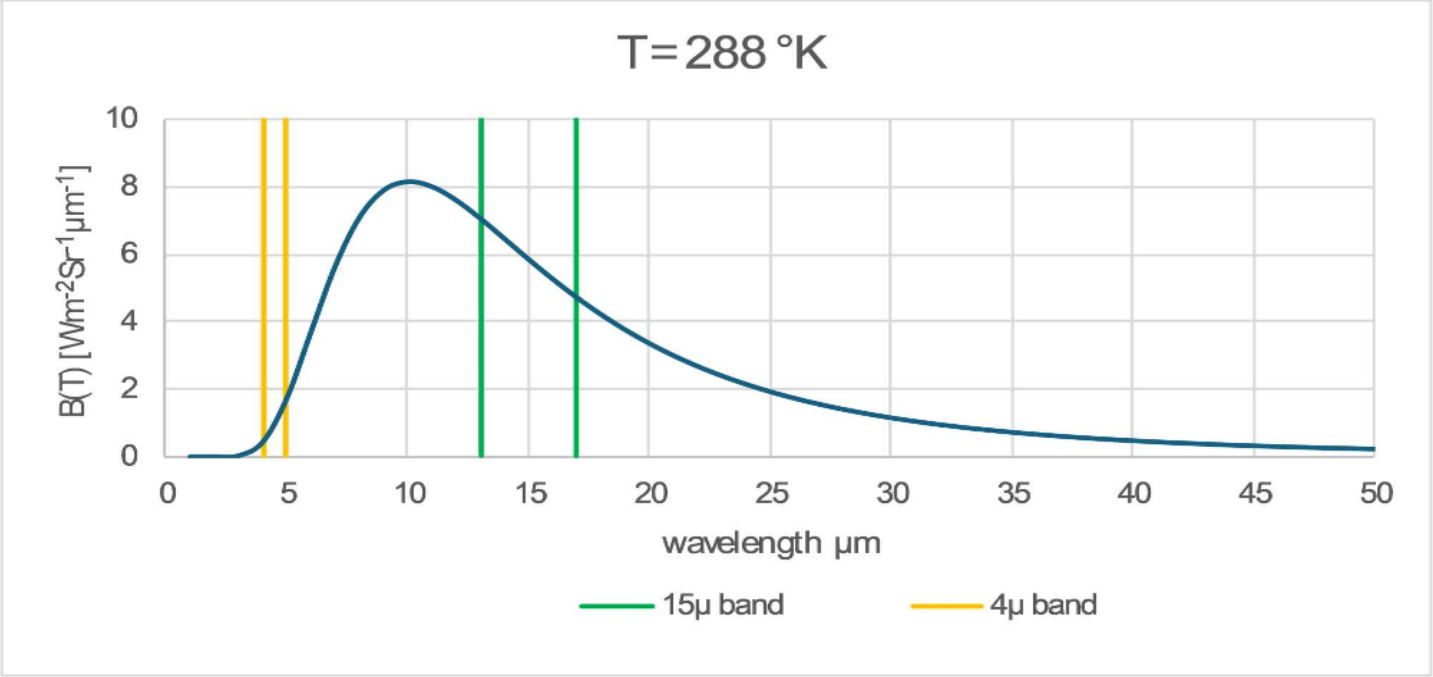


Figura 2. Radiatore del corpo nero a T = 288˚K e principali bande di assorbimento del CO_2 .

Il contributo della banda 15 µm e della banda 4 µm del CO_2 all'assorbimento IR totale del corpo nero può essere stimato per integrazione della **figura 1** con un massimo approssimativo del 25%, dove il contributo maggiore proviene dalla banda 15 µm.

L'irradianza solare intercettata dalla nostra atmosfera è $\pi\, a^2\, S_0$, dove α è il raggio terrestre. Una frazione α, chiamata albedo planetario, viene riflessa nello spazio. La parte restante viene assorbita. Facendo una media a lungo termine sull'area totale del globo, la radiazione solare assorbita deve essere in equilibrio con la radiazione emessa dall'atmosfera. In un modello 2D molto semplificato otteniamo, secondo Stefan-Boltzmann

$$(1 - \alpha)\, S /4 =_0 \sigma\, T^4\, E$$

$$(1-\alpha)\frac{S_0}{4} = \sigma T_E^4$$

(1)

dove T_E è la temperatura teorica di emissione senza alcun effetto serra atmosferico. Assumendo in media α = 0,3, troviamo T_E = 255˚K, una temperatura molto inferiore alla temperatura superficiale media globale osservata di T_S = 288˚K. Ciò significa che l'effetto serra naturale si traduce in un ulteriore ΔT_{GH} = 33˚K, che corrisponde a

$$\sigma\, T^4_S - \sigma\, T =^4_E 150\ \mathrm{W} / m\ 2$$

$$\sigma T_S^4 - \sigma T_E^4 = 150 \mathrm{W/m^2}$$

(2)

La valutazione dettagliata della funzione di Planck per T_S = 15˚C o 288˚K, risulta nelle rispettive bande di assorbimento.

13,26 - 17,07 µm (banda 15 µ), con densità energetiche di $9{,}22 \times 10^{-7}$ J/m^3 o 17,6% dell'emissione totale o $6{,}95 \times 10^{13}$ fotoni per m^3.

4,19 - 4,38 µm (banda 4 µ), con densità energetiche di $5,72 \times 10^{-9}$ J/m^3, pari allo 0,11% dell'emissione totale o a $1,22 \times 10^{11}$ fotoni per m^3.

Dalle considerazioni precedenti, vediamo che solo la banda dei 15 µ è significativa, con un assorbimento IR limitato a $0,176 \times 391$ W/m^2 = 69 W/m^2 e una retro-radiazione di 69/2 = 34,5 W/m^2. Le considerazioni semplificate sul bilancio energetico in un singolo strato atmosferico sono schematizzate nel disegno seguente. Si veda la **Figura 3**.

Con $\varepsilon = 1$ si ottiene

$$\sigma T =^4_S U = 2\ \sigma T = 2^4_A\ \sigma T^4_E$$

$$\sigma T_S^4 = U = 2\sigma T_A^4 = 2\sigma T_E^4$$

(3)

e

$$_ST =^4 \bar{}\sqrt{}\ 4 \cdot T_E$$

$$T_S = \sqrt[4]{2} \cdot T_E$$

(4)

Con T_E = 255˚K otteniamo quindi T_S = 303˚K. Questo valore è notevolmente superiore ai 288˚K osservati. La discrepanza tra teoria e osservazione si spiega con il fatto che l'atmosfera non è totalmente opaca alla radiazione a onde lunghe. La presenza dell'atmosfera aumenta notevolmente la temperatura della superficie terrestre. È noto che questo effetto viene definito effetto serra. Assumiamo ora che l'atmosfera sia semi-grigia, *cioè* assorba una frazione costante ε della radiazione a onde lunghe, ma sia ancora trasparente alla radiazione solare ed emetta verso l'alto e verso il basso a un tasso dato da

$$B = \varepsilon\ \sigma\ T =^4_A \varepsilon\ /(2 - \epsilon\ )\sigma\ T^4_E$$

$$B = \varepsilon\sigma T_A^4 = \frac{\varepsilon}{2-\epsilon}\sigma T_E^4$$

(5)

dove $\sigma\ T^4_A$

è il contenuto di energia radiante dell'atmosfera. Questo porta a

$$_ST =^4 \sqrt{2}\ /(2 - \epsilon) \cdot T_E$$

$$T_S = \sqrt[4]{\frac{2}{2-\epsilon}} \cdot T_E$$

(6)

Con ε = 0,78, otteniamo T_S = 288˚K. Possiamo concludere che in questo modello semplificato solo il 22% o 42,8 W/m^2 della radiazione IR arriva direttamente nello spazio e un bilancio di potenza netto di 152 W/m^2 - come previsto dalla (2) - viene riciclato in modo permanente come parte della radiazione retrodiffusa.

Per atmosfere multistrato più appropriate, possiamo riprendere il quadro dell'American Chemical Society (**Figura 4**).

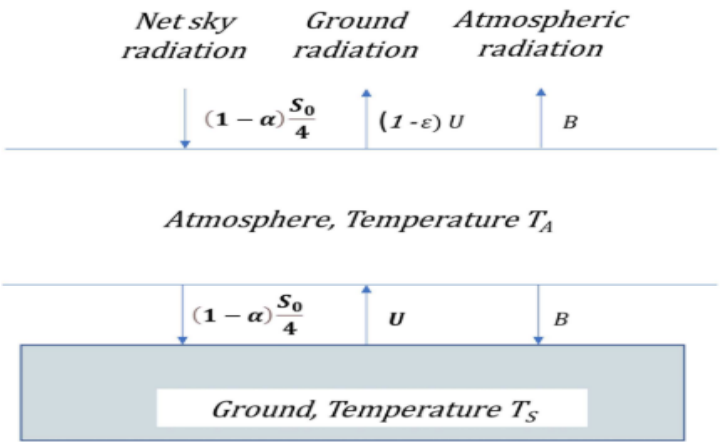


Figura 3. Un modello a singolo strato dell'atmosfera, dove *S* è l'irradianza solare, *α* è l'albedo delle nubi e *β* l'assorbanza superficiale. *U* è la radiazione terrestre, di cui una frazione (1 - *ε*) penetra direttamente nello spazio attraverso l'atmosfera e *B* è la radiazione emessa dall'atmosfera [5].

Invece di utilizzare modelli stratificati dell'atmosfera, esistono eccellenti formule semi-empiriche da utilizzare. I cieli notturni sono schermati dalle nuvole e dall'umidità contro la perdita di radiazione, mentre le condizioni di cielo sereno e asciutto non possono compensare le forti perdite di radiazione. Questo aspetto è stato studiato, ad esempio, con il modello di Swinbank modificato [7] [8].

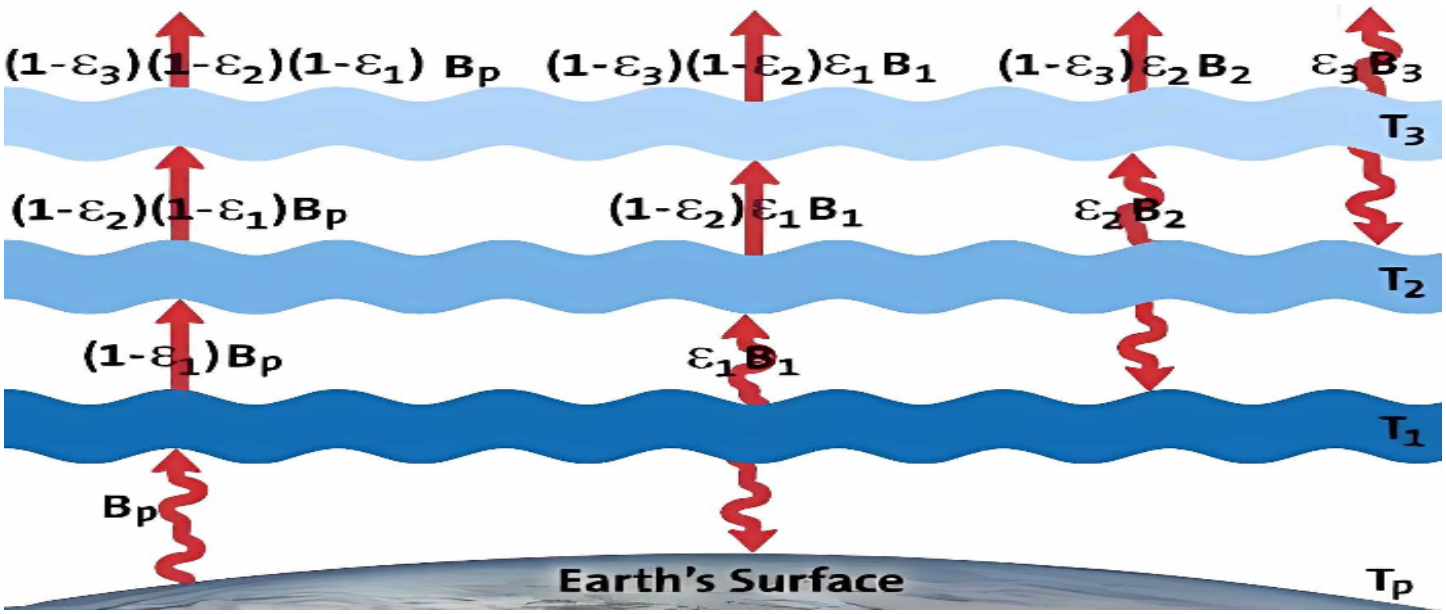


Figura 4. Un modello di atmosfera multistrato, qui illustrato con tre strati [6].

$$_{SB}P = (\,1\ + K\,C\,)^2 \cdot 8{,}78 \cdot 10^{-13} \cdot T_S^{5.852} \cdot R\,H^{0.07195}$$

$$P_{SB} = \left(1 + KC^2\right) \cdot 8.78 \cdot 10^{-13} \cdot T_S^{\,5.852} \cdot RH^{0.07195}$$

(7)

con

P_{SB} radiazione atmosferica diretta verso l'alto e verso il basso in $^{W/m2}$

K 0,34 nuvole < 2 km, 0,18 per 2 km < altitudine < 5 km, 0,06 per > 5

km

C Copertura nuvolosa (0 cielo sereno, 1 cielo coperto)

T temperatura in ˚K

RH umidità relativa in %

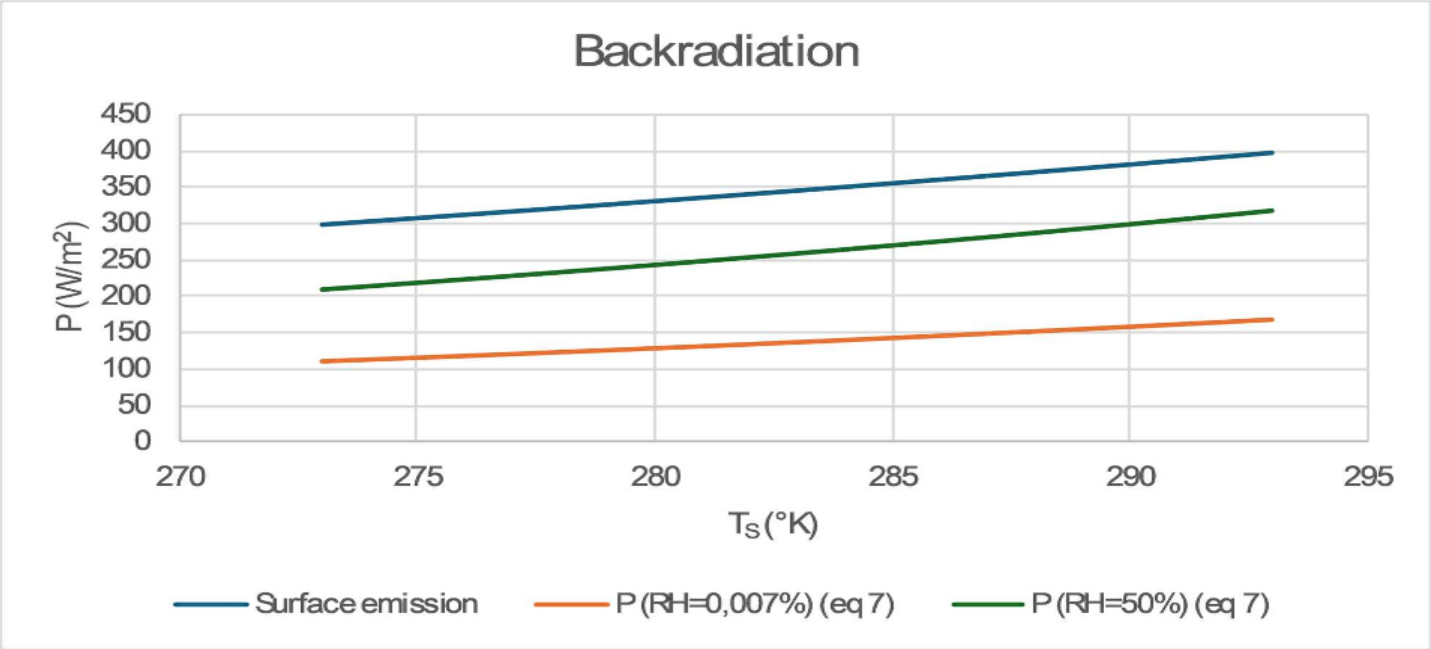


Figura 5. L'effetto dell'umidità sulla radiazione all'indietro confrontata tra RH = 0,007% e RH = 50%. La linea blu rappresenta la radiazione superficiale con emissività $\varepsilon_S \cong 0{,}95$ secondo Stefan-Boltzmann.

Come si può vedere nella **Figura 5**, l'umidità ha un forte impatto e la copertura nuvolosa ha un impatto ancora più forte sulla retro-radiazione.

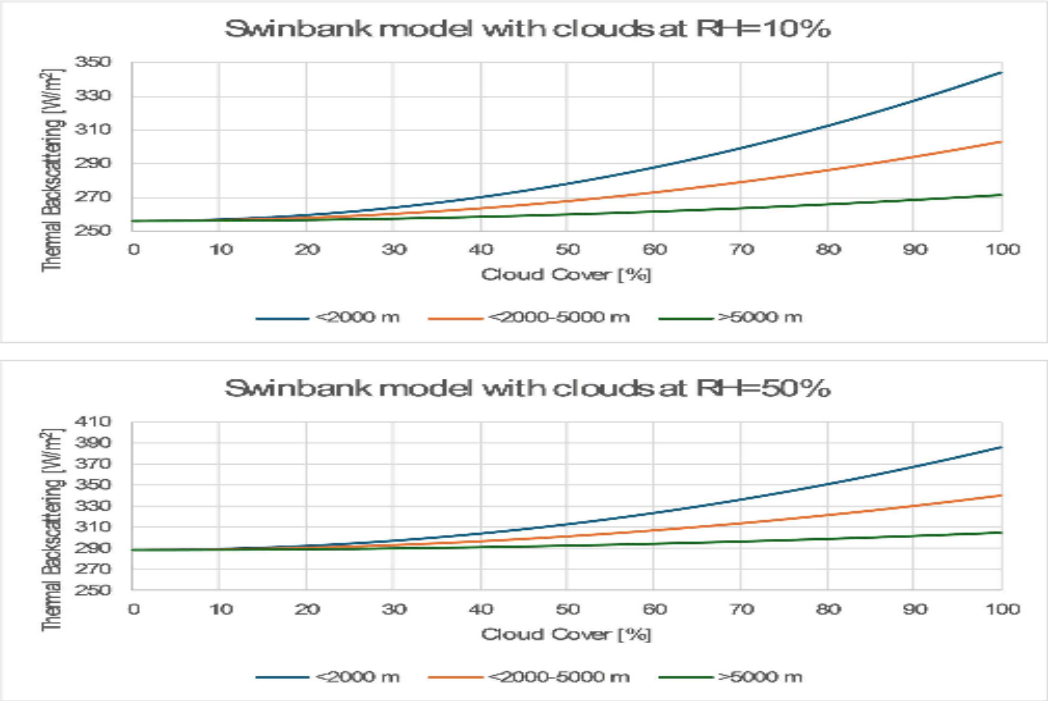


Figura 6. Caratteristiche di retro-irraggiamento termico di un cielo nuvoloso con UR = 10% e UR = 50%.

Le ultime figure (**Figura 6**) suggeriscono in effetti che le previsioni climatiche dipendono in modo critico da valori come l'umidità relativa media, la copertura nuvolosa e l'albedo. Questi valori variano notevolmente sulla superficie, a seconda della temperatura locale e dei dettagli geografici. I modelli grigliati possono tener conto di questi valori solo in una certa misura, sulla base di anni di osservazioni. Sono evidenti le instabilità e i rischi dovuti a una modellazione errata dell'anello di feedback positivo e/o alla negligenza delle influenze geo- o astrofisiche esterne.

I dati delle misurazioni al suolo (**Figura 7**) indicano che la radiazione verso il basso (all'indietro) dell'atmosfera mostra in effetti una saturazione completa delle bande IR CO_2 e non supporta un'ulteriore forzatura termica (TF) di rilievo attraverso l'aumento del CO_2 nella bassa atmosfera. Mostra una saturazione quasi completa del picco centrale di 15 µ e una quasi saturazione dei bordi delle bande di 15 µ circostanti. Anche i primi studi [10] hanno concluso che la TF non sarà significativamente influenzata da un ulteriore aumento della CO_2 atmosferica (**Figura 8**). D'altra parte, è noto che concentrazioni inferiori al 50% del livello attuale sarebbero dannose per la crescita delle piante e per il clima.

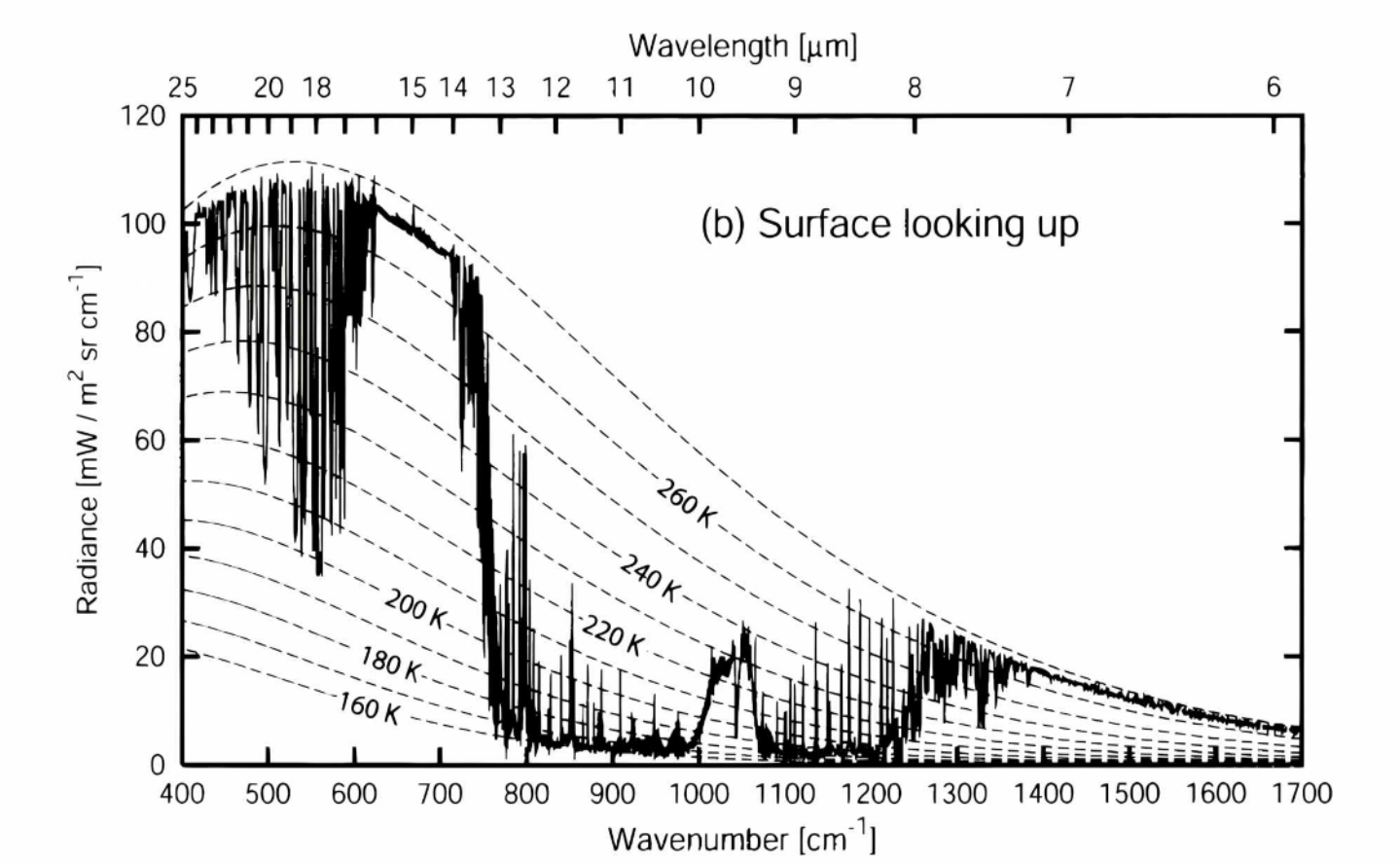


Figura 7. Misure [9] dello spettro di emissione infrarosso dell'atmosfera priva di nubi alla superficie artica, guardando verso l'alto.

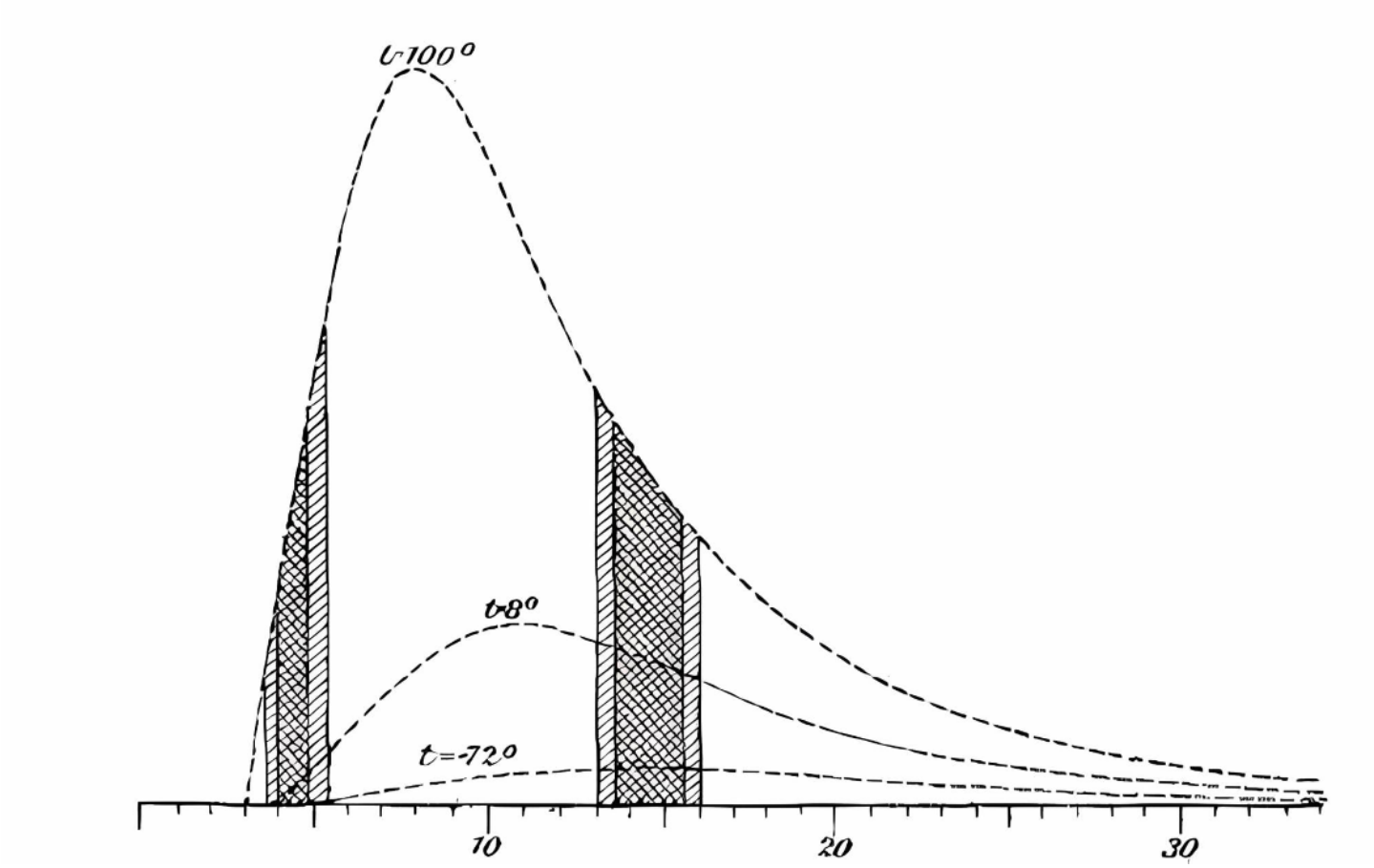


Figura 8. Studi di J. Koch presso il Dipartimento di Fisica di Knut Angström [10].

L'assorbimento dipendente dalla lunghezza d'onda $a\,\lambda$

e la riemissione è calcolata in base alla legge di Beers, dove la trasmissione si riduce esponenzialmente con l'aumento dello spessore dell'assorbitore L

$$_{\lambda}a\,(\,L\,) = \;1\text{-}\;t\,(_{\lambda}\,L\,) = \;1\text{-}\;I\,(_{\lambda}\,L\,)\,/I\,(\,0\,) =_{\lambda}\;1\text{-}\;e^{-k(\lambda,L)}$$

$$a_{\lambda}\left(L\right)=1-t_{\lambda}\left(L\right)=1-\frac{I_{\lambda}\left(L\right)}{I_{\lambda}\left(0\right)}=1-e^{-k(\lambda,L)}$$

(8)

La legge di Kirchhoff prevede che la radiazione assorbita venga nuovamente emessa, o in altri termini che l'assorbibilità sia uguale all'emissività. Per una finestra di lunghezza d'onda limitata, $\Delta\lambda$ l'emissività specifica $\varepsilon_{\Delta\lambda}\,(L)$ si ottiene quindi da

$$\varepsilon_{\Delta\lambda}\left(L\right)=\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}I_{\lambda}\left(0\right)\cdot a_{\lambda}\left(L\right)d\lambda}{\int_{0}^{\infty}I_{\lambda}\left(0\right)d\lambda}$$

(9)

dove il coefficiente di estinzione spettrale a_{λ} è ottenuto da HITRAN o da banche dati simili.

L'importanza dei bordi insaturi nella banda dei 15 µ è molto sovrastimata, in quanto si può facilmente dimostrare che con un'estinzione < 3 essi contribuiscono solo per lo 0,17% all'intera banda quando si considerano i rispettivi integrali (**Figura 9**). Ciò è stato dimostrato anche da Howard [11], utilizzato anche in questo studio.

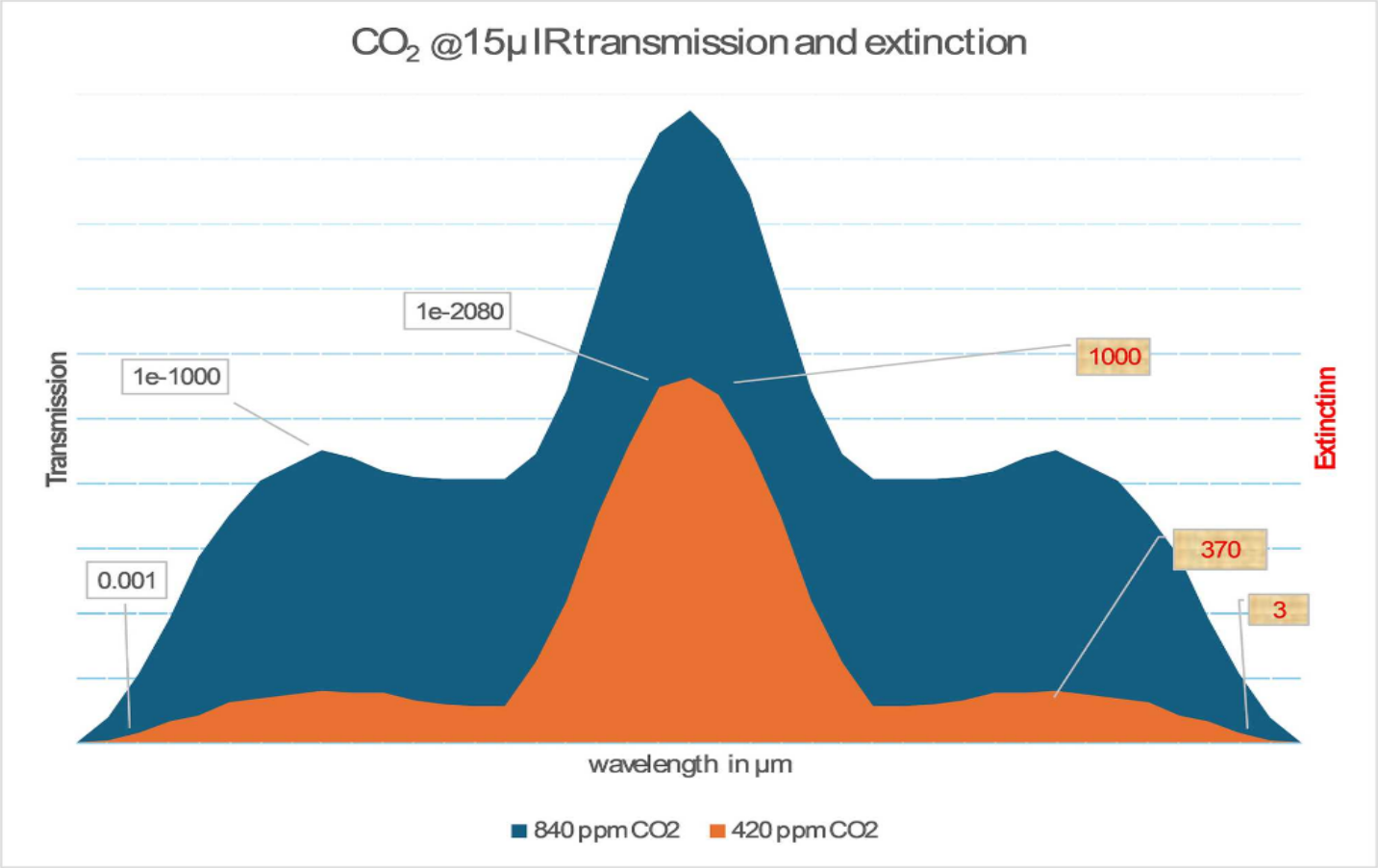


Figura 9. Rapporti di trasmissione ed estinzione nella banda dei 15 µ.

Gli spettri infrarossi (IR) dei quattro principali gas GH su un percorso di 100 metri sono presentati nella **Figura 10**; le loro concentrazioni sono quelle relative all'atmosfera al livello del mare con un'umidità relativa del 45%.

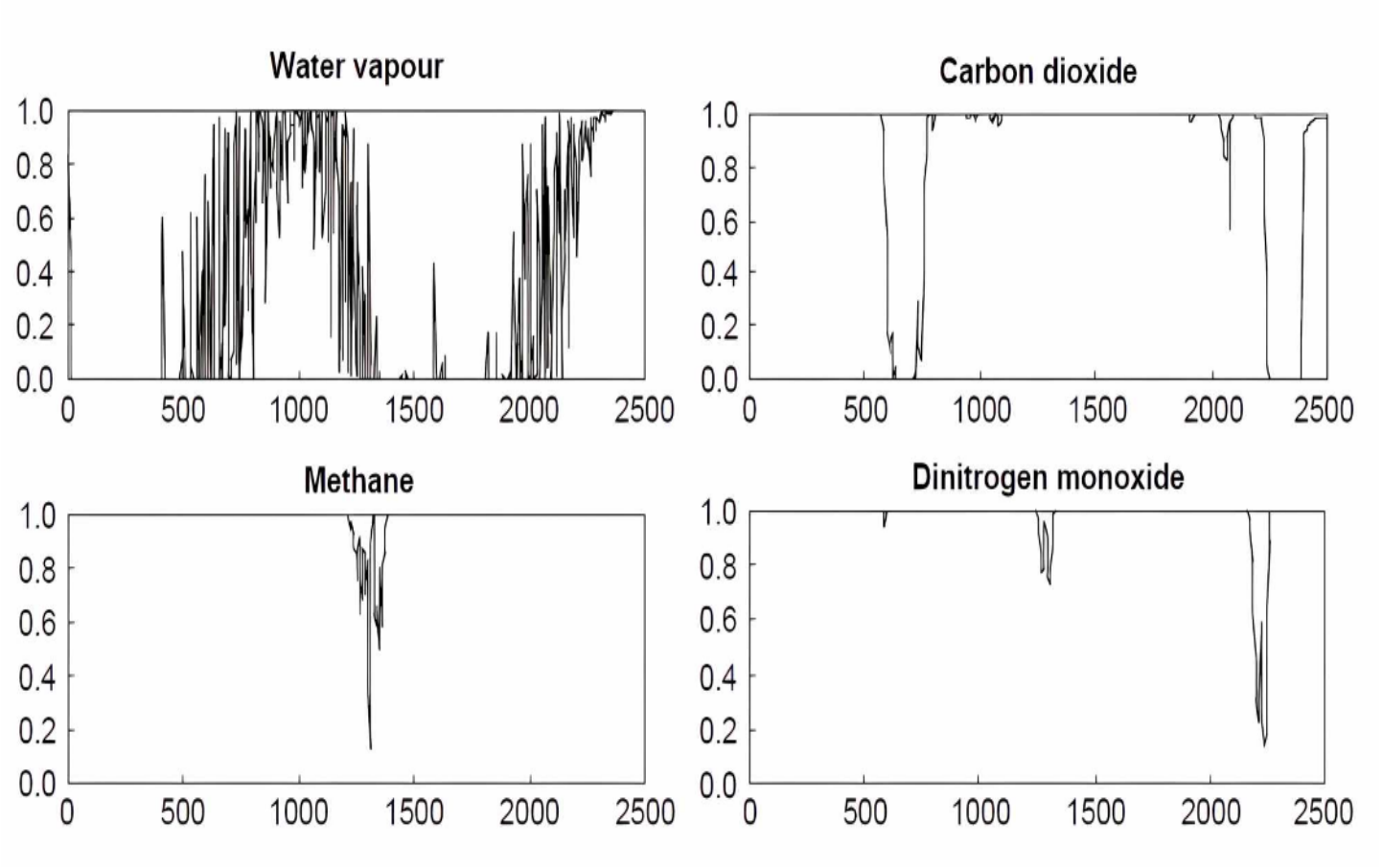


Figura 10. Spettri infrarossi dei principali gas a effetto serra calcolati con il database HITRAN; la trasmissione è tracciata rispetto al numero d'onda ($^{cm-1}$) [4].

La banda 0 - 500 $^{cm-1}$ di H_2O al 45% di UR assorbe il 66% della radiazione IR superficiale. La banda 1300 - 1800 $^{cm-1}$ assorbe un altro 1%.

Un'atmosfera a 1 bar di pressione avrebbe uno spessore teorico di 8,2 km. Per visualizzare l'effettiva altezza di colonna dell'attuale CO_2 a diverse altitudini, otteniamo la seguente **Tabella 1**.

Tabella 1. Equivalente di 400 ppm di CO atmosferico$_2$ in metri a 1 bar di pressione atmosferica.

H [m]	**M(z)/M**	**1-M(z)/M**	**L_{CO2}^{up} [cm]**	**L_{CO2}^{down} [cm]**
0	0	1	344,83	0
500	0,06893722	0,93106278	321,06	23,77
1.000	0,1331221	0,8668779	298,93	45,9
5.000	0,51045834	0,48954166	168,81	176,02
10.000	0,76034896	0,23965104	82,64	262,19
20.000	0,94256738	0,05743262	19,8	325,03
30.000	0,98623621	0,01376379	4,75	340,08
40.000	0,99670149	0,00329851	1,14	343,69
¥	1	0	0	344,83

dove abbiamo ricavato la massa *M* dipendente dall'altitudine dalla formula barometrica

$$M\,[\,z\,]\,/M = 1 - e^{\,-z/H}$$

$$\frac{M[z]}{M} = 1 - e^{-\frac{z}{H}}$$

(10)

con H = 7 km. La massa totale al di sotto della quota z è calcolata come

$$M(z) = \int_0^z \rho(z')\,dz' = \rho(0)H(1 - e)^{-zH}$$

$$M(z) = \int_0^z \rho(z')dz' = \rho(0)H\left(1 - e^{-\frac{z}{H}}\right)$$

(11)

Lo spessore dello strato di CO $_2$ L_{CO2} è un valore calcolato per un'atmosfera standard a 1013,25 hPa e un peso totale di 5,13 × ^{1015} tonnellate di 8,21 km di aria a 400 ppm attuali. La tabella aiuta a capire l'ordine di grandezza quando si studiano gli effetti di serramento atmosferico della CO_2 . Illustra inoltre che il 75% della CO_2 totale è contenuta nella troposfera al di sotto dei 10 km di altitudine e il 95% al di sotto dei 20 km. Se dovessimo concentrare tutta la CO_2 (a 400 ppm) di un'atmosfera di 8,2 km di spessore con una pressione di 1 bar in un'unica colonna, l'altezza della colonna sarebbe di circa 3,5 m. La lunghezza del cammino ottico della radiazione IR della CO_2 a queste condizioni è inferiore a 1 cm e quindi possiamo aspettarci la piena saturazione già alle concentrazioni attuali.

Dalla termodinamica si ottiene

$$dT/dz = (\gamma - 1)/\gamma\, m\, g / R$$

$$\frac{dT}{dz} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} mg \Big/ R$$

(12)

dove $\gamma = c_P / c_v$ (ad esempio 7/5 per l'aria secca), m = 29 g/mol e R è la costante dei gas. Per l'Atmosfera Standard Internazionale con γ = 1,26 otteniamo dT/dz = - 6,5 dK / km . Utilizzando questa formula, possiamo stimare la retro-radiazione LW ad altitudini più elevate (**Figura 11**), sostituendo i valori $Ts \rightarrow Ts - dT/dz \times \Delta z$.

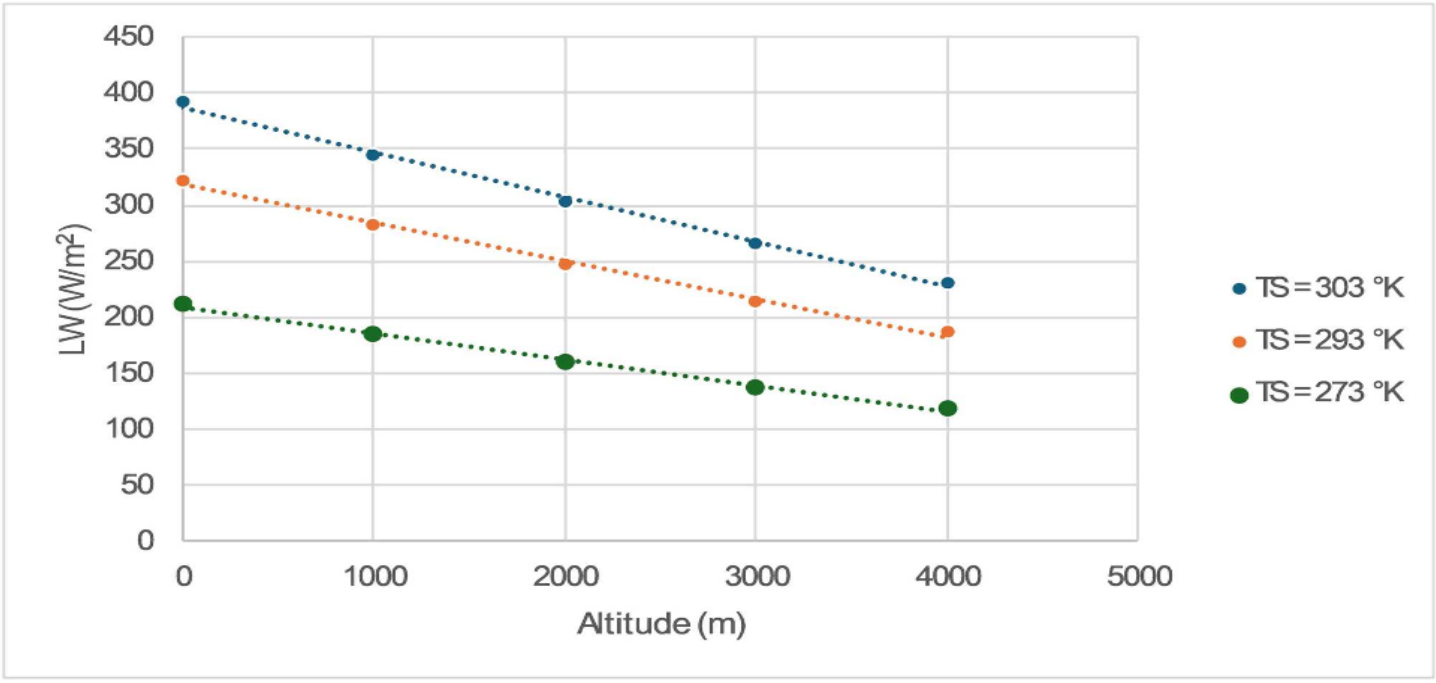


Figura 11. Retro-radiazione stimata in un'atmosfera standard a tre diverse temperature superficiali.

Questo dato può essere confrontato con le misurazioni effettuate da un gruppo del Politecnico di Zurigo nel 1998 (**Figura 12**).

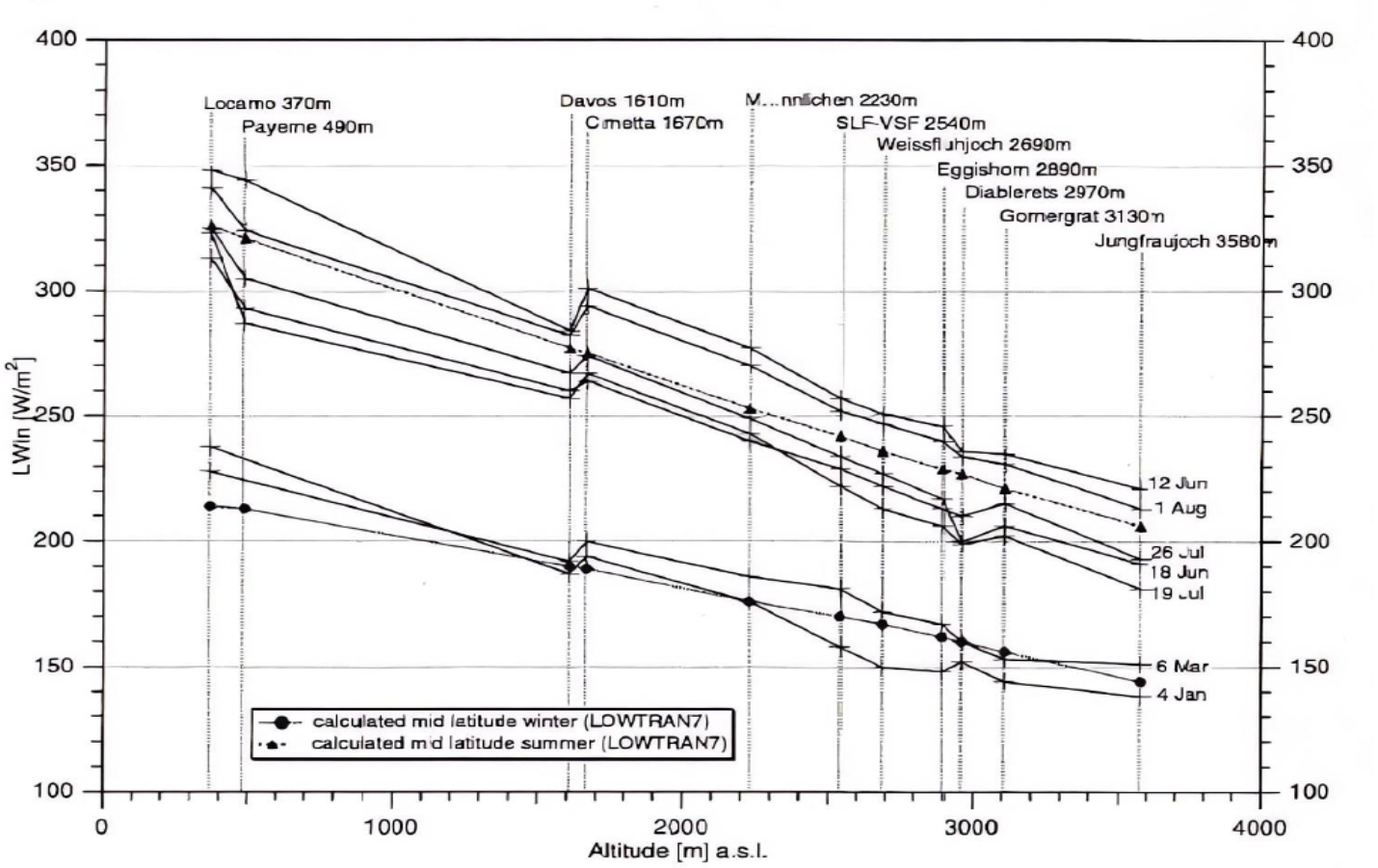


Figura 12. Dipendenza dall'altitudine della retro-radiazione per gentile concessione di C. Fröhlich [12].

L'assorbanza *a* può essere calcolata utilizzando la legge di Beer per un radiatore a infrarossi dall'equazione (8) in una forma più generalizzata.

$$^{-k.c.L}a\,(\,c\,,\,L\,) = \;1\text{-}\;t\,(\,c\,,\,L\,) = \;1\text{-}\;I\,(\,c\,,\,L\,)\,/I\,(\,c\,,\,0\,) = \;1\text{-}\;e\;\text{xml-ph-0033@deepl.inte}$$

$$a\left(c,L\right)=1-t\left(c,L\right)=1-\frac{I\left(c,L\right)}{I\left(c,0\right)}=1-e^{-k.c.L}$$

(13)

Da Akram [13] possiamo ricavare k = 1,82 × $^{10\text{-}6\ \text{ppm-}1\text{cm-}1}$ per calcolare *a in* funzione di *L*.

La Figura 13 mostra la saturazione dell'assorbimento IR agli attuali livelli di CO_2 già a una lunghezza della colonna d'aria inferiore a 20 m. Da questo semplice modello, dobbiamo concludere che meccanismi diversi dall'aumento di CO_2 devono spiegare un significativo aumento termico atmosferico (ATE) nel bilancio energetico totale.

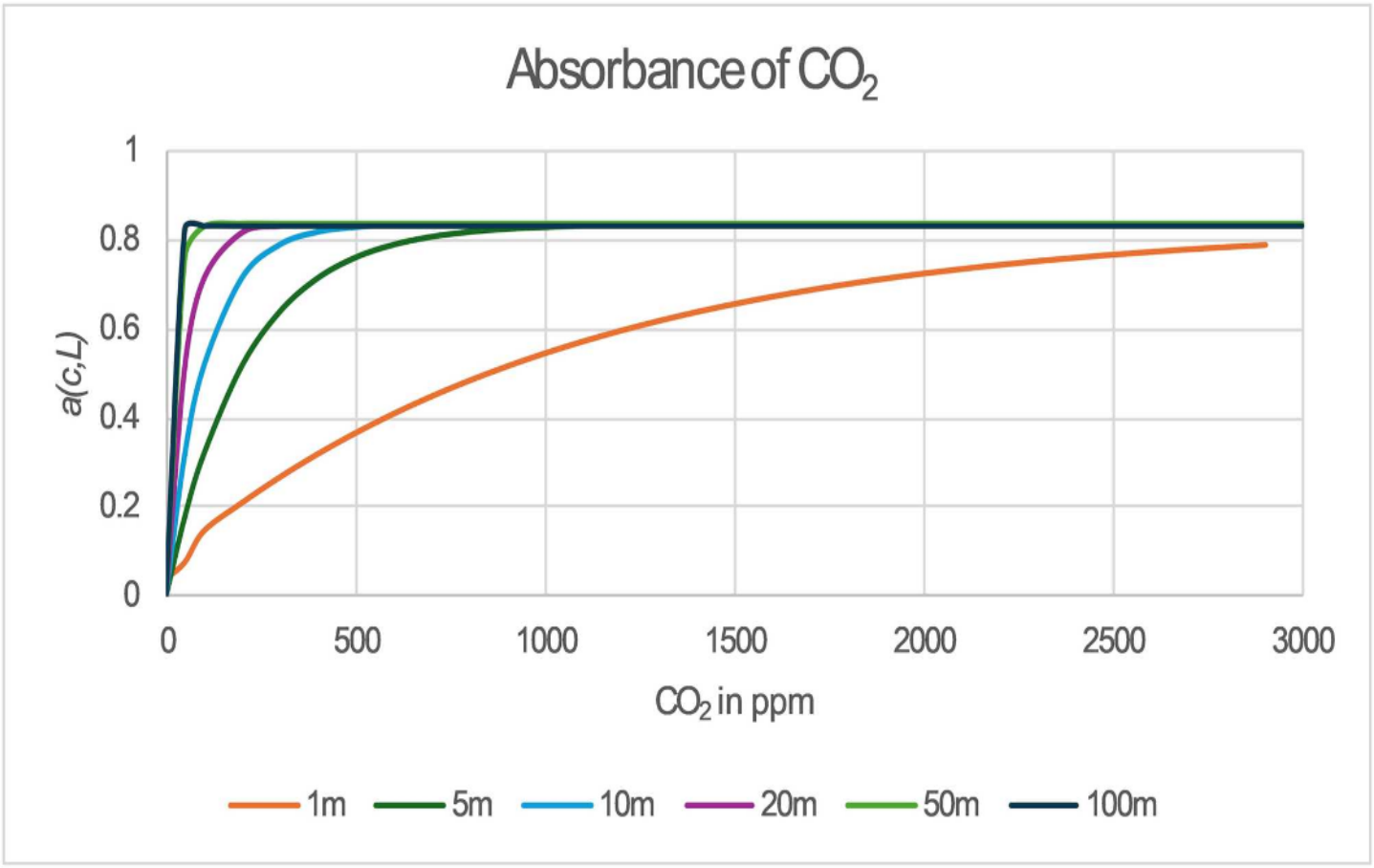


Figura 13. Assorbanza della sorgente di luce IR EMIRS200 in CO_2 da [13].

Howards [11] parametrizza l'assorbimento totale delle linee forti a 15 µm e 4,3 µm secondo la formula

$$\int A_\nu \, d\nu = C + D \log w + K \log (p + P)$$

$$\int A_\nu d\nu = C + D \log w + K \log \left(p + P \right)$$

(14)

e

$$A = \int A_\nu \, d\nu \, / (\nu_2 - \nu)_1$$

$$\overline{A} = \frac{\int A_\nu d\nu}{\nu_2 - \nu_1}$$

(15)

Sostituendo questi valori per $\nu_2 - \nu =_1 250$ cm^{-1} nella banda dei 15 µm e $\nu_2 - \nu = 340_1$ cm^{-1} per la banda dei 4,3 µm otteniamo per uno strato atmosferico standard di 1 km di spessore (**Figura 14**) e per un'atmosfera di 8,2 km di spessore (**Figura 15**) quanto utilizzato per la **Tabella 2**.

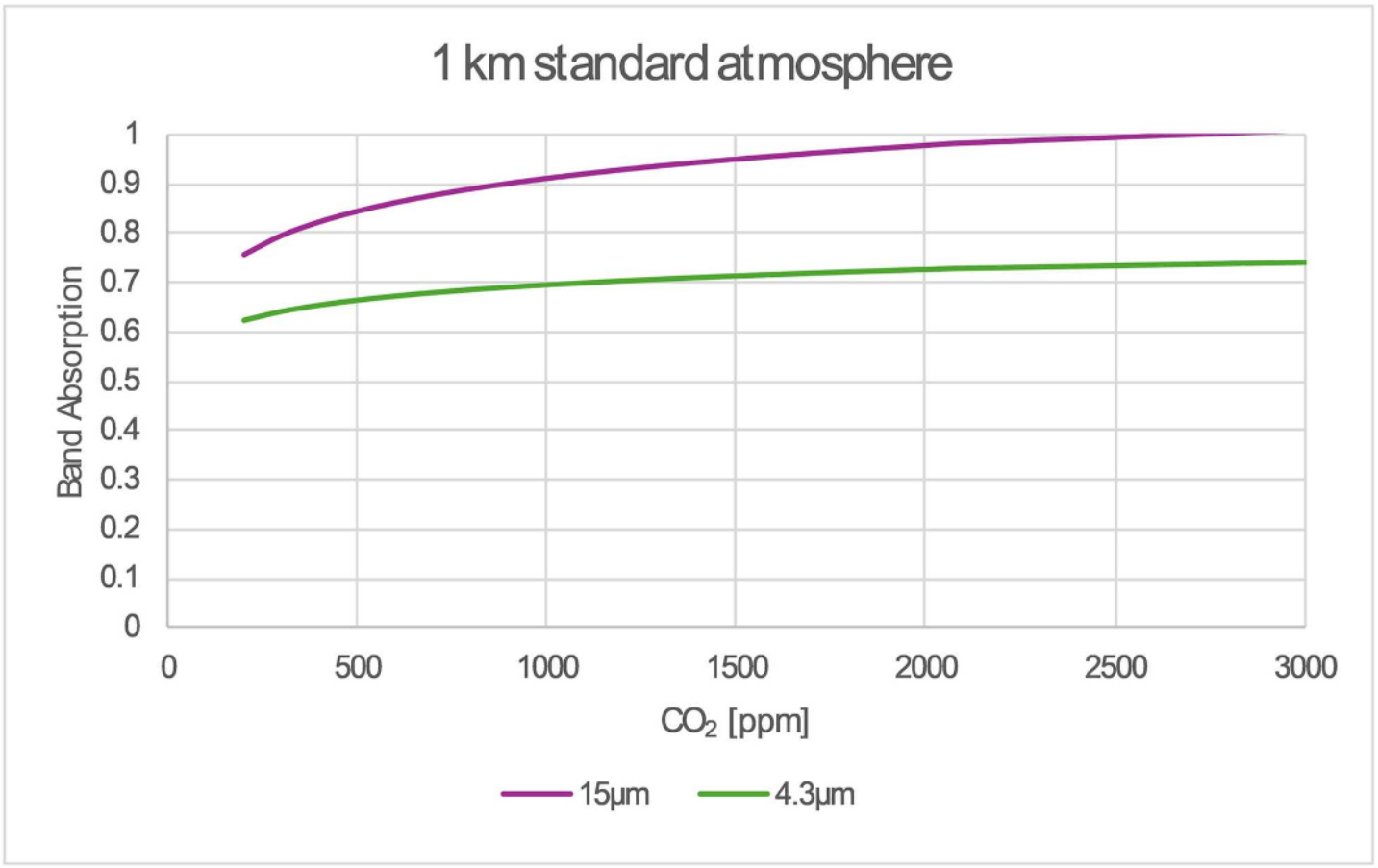


Figura 14. Banda di assorbimento entro 1 km di atmosfera standard [11].

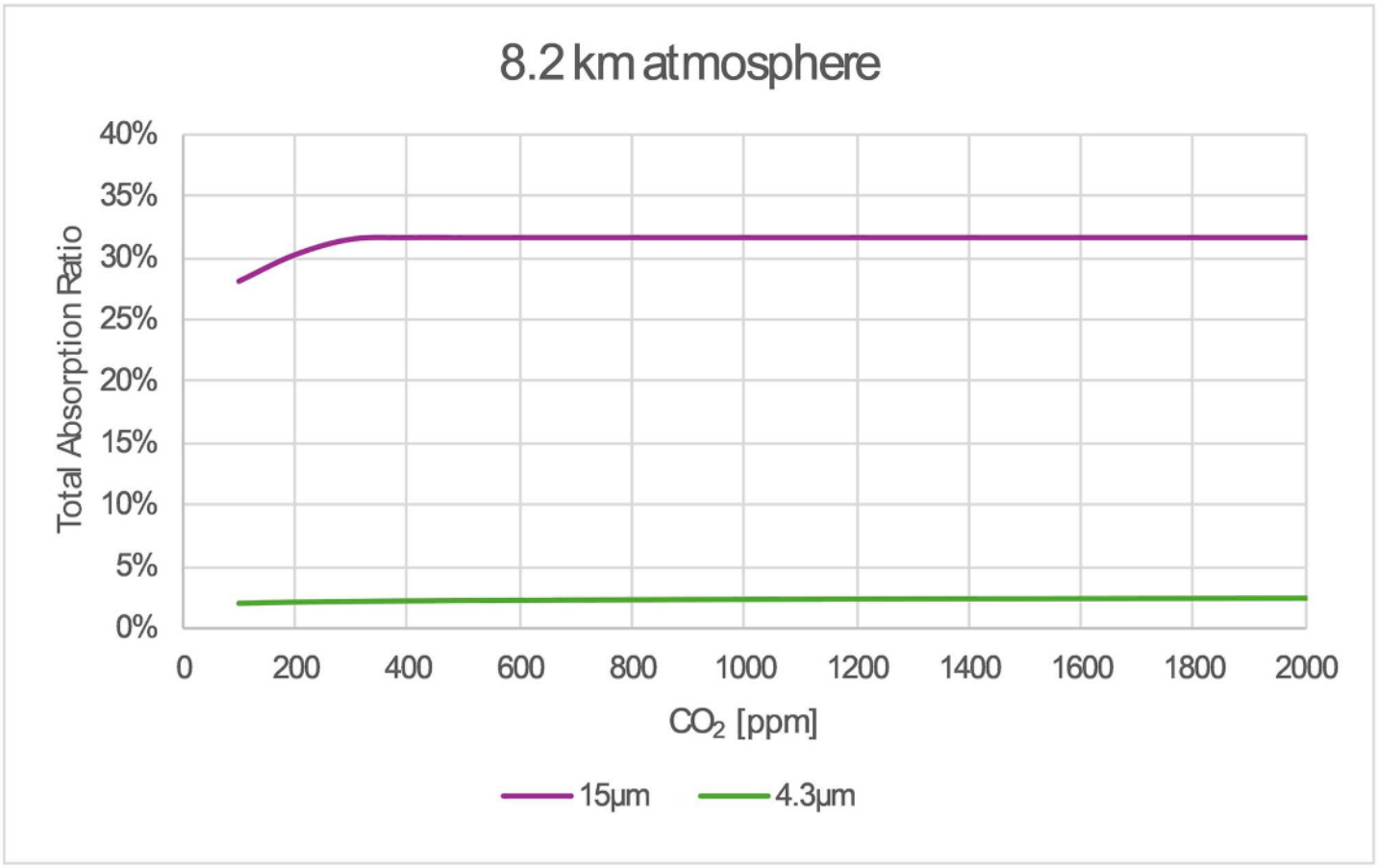


Figura 15. Rapporti di assorbimento per le due forti bande di assorbimento del CO_2[11].

Un aumento da 400 a 800 ppm di CO_2 non mostra alcun aumento misurabile dell'assorbimento IR per le bande 15 µ e 4,3 µ e quindi una saturazione totale. Altri studi elaborati [14] stimano l'assorbenza totale terrestre a lunghezze d'onda .LW

$$a(L) = \int_0^\infty I(0_\lambda) \cdot a(_\lambda L)\, d_\lambda / (\int_0^\infty I(0_\lambda)\, d\lambda) \times 100\ \%$$

$$a(L) = \frac{\int_0^\infty I_\lambda(0) \cdot a_\lambda(L)\, d\lambda}{\int_0^\infty I_\lambda(0)\, d\lambda} \times 100\%$$

(16)

e otteniamo i seguenti risultati per diverse latitudini.

Tabella 2. Calcolo di a_{LW} da Harde [14] per varie concentrazioni di CO_2 .

	absorptivities ε (%)				
CO_2 (ppm)	tropics	mid-latitudes	high-latitudes	average 3 zones	global mean
0	81,90	69,44	58,98	74,68	77,02
35	83,80	74,48	67,04	78,43	80,08
70	84,18	75,35	68,32	79,10	80,62
140	84,65	76,31	69,80	79,86	81,29
210	84,99	77,00	70,77	80,40	81,76
280	85,28	77,51	71,52	80,83	82,14
350	85,53	77,95	72,14	81,19	82,45
380	85,65	78,12	72,38	81,34	82,58
420	85,76	78,33	72,68	81,51	82,74
490	85,91	78,67	73,16	81,80	83,00
560	86,16	78,98	73,61	82,06	83,24
630	86,35	79,29	74,02	82,32	83,46
700	86,52	79,58	74,41	82,56	83,68
770	86,69	79,85	74,78	82,79	83,88

La figura successiva (**Figura 16**) mostra i valori medi globali della tabella precedente. Mentre il nostro modello precedente trascurava la struttura a strati assumendo un'atmosfera isobara, Harde [14] teneva conto degli effetti barometrici.

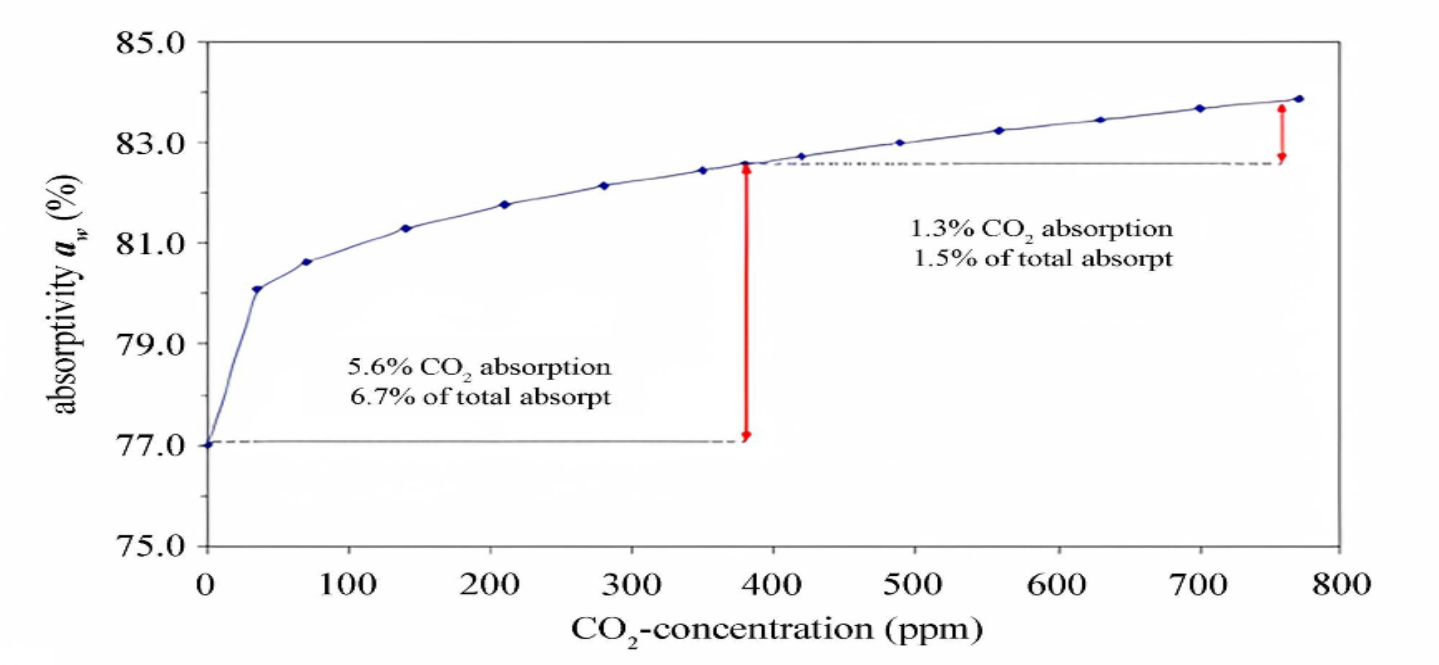


Figura 16. Influenza del raddoppio della concentrazione di CO_2 sull'assorbenza totale [14].

Questo studio mostra un limite superiore di ATE aggiuntivo dell'1,5%. Temperature superficiali medie di T_S = 288˚K corrispondono a 390 Wm^{-2} di radiazione di corpo nero. Dalle considerazioni precedenti, abbiamo appreso che il raddoppio delle concentrazioni atmosferiche di CO_2 da 400 a 800 ppm equivale a una variazione massima dell'1,5% dell'energia assorbita nell'atmosfera, *cioè* a un aumento massimo di 3 Wm^{-2} della retro-radiazione. Utilizzando la formula di Stefan-Boltzmann, otteniamo una prima stima di un corrispondente aumento di temperatura o contributo di GH di 0,5˚K con un contenuto atmosferico di 800 ppm rispetto agli attuali 400 ppm. Questo corrisponde molto bene ai risultati di Wijngaarden e Happer [2].

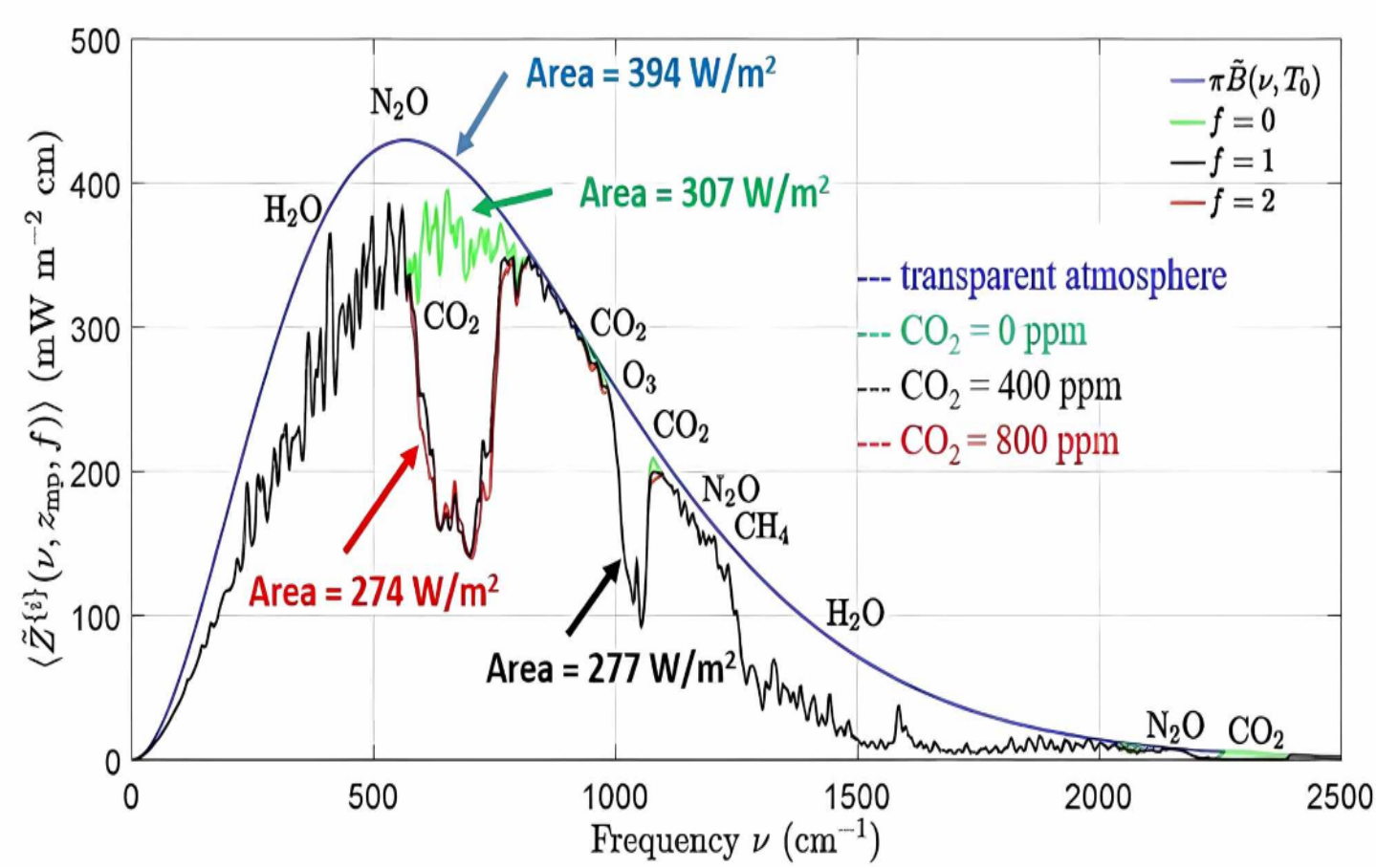


Figura 17. Variazioni dell'assorbenza atmosferica totale in seguito all'aumento di CO_2 calcolate da Wijngaarden e Happer [2].

Le misure al suolo sono in linea con la **Figura 17** e indicano una saturazione quasi completa dell'assorbimento IR nella nostra atmosfera. Eravamo quindi interessati a progettare una configurazione sperimentale semplice e indipendente a basso costo per dimostrare questo comportamento di saturazione. Questo setup e i risultati ottenuti saranno descritti nella sezione seguente.

2. Metodi sperimentali

Lo scopo di questo lavoro era quindi dimostrare in modo semplice che un gas IR-attivo può effettivamente influenzare la radiazione termica di un corpo. Un altro obiettivo era dimostrare che la retro-radiazione del CO_2 è limitata dalla saturazione dell'assorbanza. Ciò è stato possibile grazie a due diverse configurazioni sperimentali.

Le misurazioni dovrebbero permetterci di capire se i comportamenti di saturazione misurati da altri e discussi nelle sezioni precedenti di questo lavoro sono effettivamente corretti e di trarre conclusioni sulla questione del riscaldamento globale indotto dalla CO_2 .

Secondo la seconda legge della termodinamica, il calore fluisce dagli oggetti più caldi a quelli più freddi ("in discesa"), a meno che non venga fornita energia in qualche forma per invertire la direzione del flusso di calore o vi sia un mezzo che assorba parte dell'energia e la rimandi in modo isotropo, come i modelli di serra descrivono la radiazione domestica all'interno della nostra atmosfera. Le nostre atmosfere di prova sono state studiate rispetto a un disco nero raffreddato a -25˚C ("Modalità laboratorio") o a un cielo notturno senza nuvole ("Modalità campo o esterno"), utilizzando la sorgente IR naturale della superficie e la retro-radiazione atmosferica.

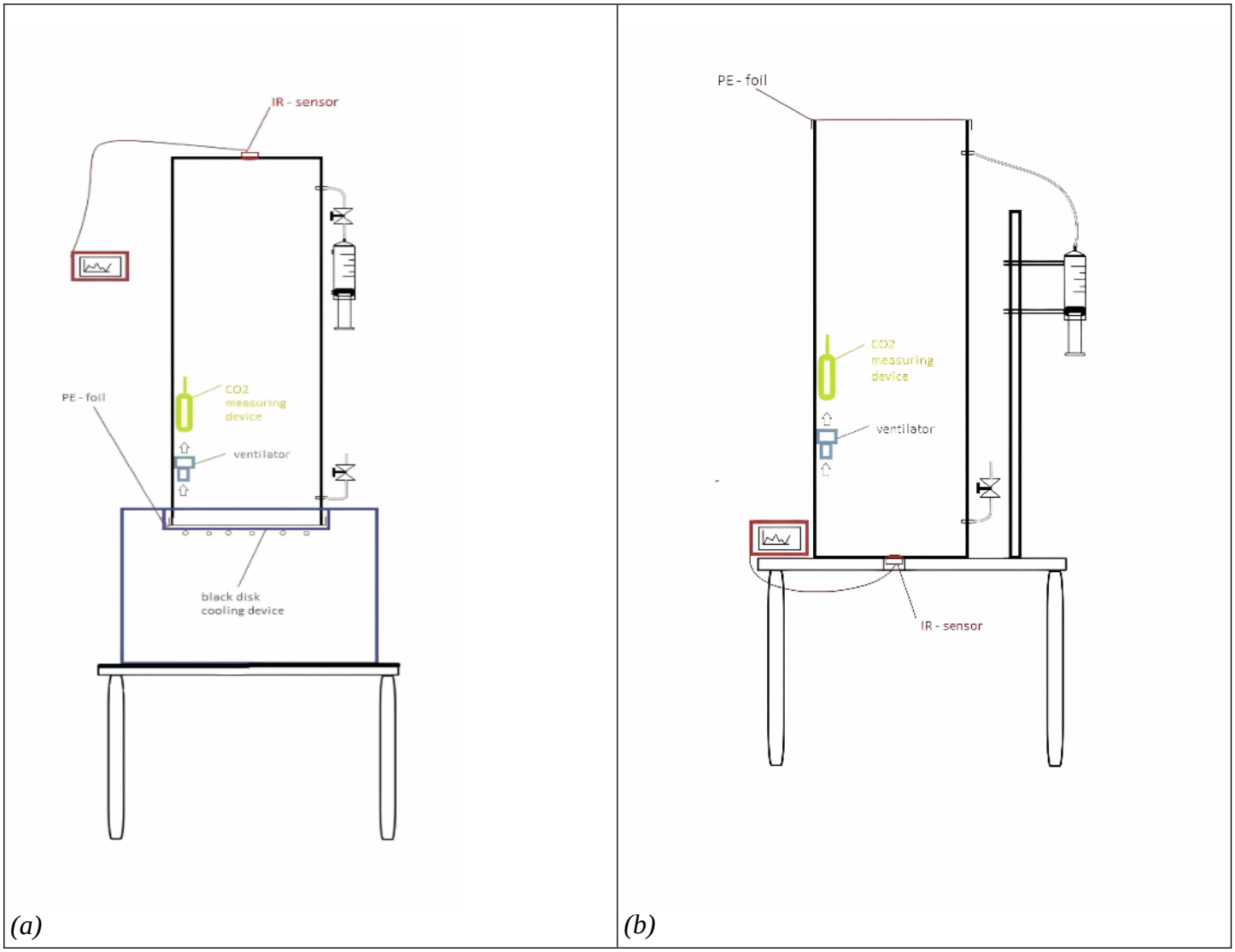


Figura 18. Configurazione sperimentale per (a) la "modalità laboratorio" utilizzando un compressore di raffreddamento e (b) la "modalità campo".

Traducendo queste configurazioni in diagrammi di flusso energetico come nella **Figura 3** e nella **Figura 4**, analizziamo innanzitutto la **Figura 18(a)**.

Come mostrato nella **Figura 19**, la risposta del sensore IR in "modalità laboratorio" è determinata esclusivamente dalla retro-radiazione proveniente dall'atmosfera di prova 2 con l'aumento delle concentrazioni di CO_2 . La piastra fredda sull'altro lato del cilindro di prova consente il flusso termico secondo la seconda legge della termodinamica. All'interno del volume del cilindro di prova sono montati un rilevatore di CO_2 e un ventilatore a bassa potenza, alimentati da una centralina combinata. La comunicazione con il rilevatore di CO_2 avviene tramite Bluetooth. β è il rapporto di intensità $\beta = A_D \sin^2 \theta$ per un rilevatore IR con apertura numerica θ all'interno della colonna di prova cilindrica e area del rilevatore A_D di 1 ^{cm2}. ε_2 dipende esclusivamente dalle concentrazioni di gas GH nella provetta e l'intensità β /2 ε_1 ε_2 σ T_1^4 è misurata da un rivelatore IR a termopila di Thorlabs®.

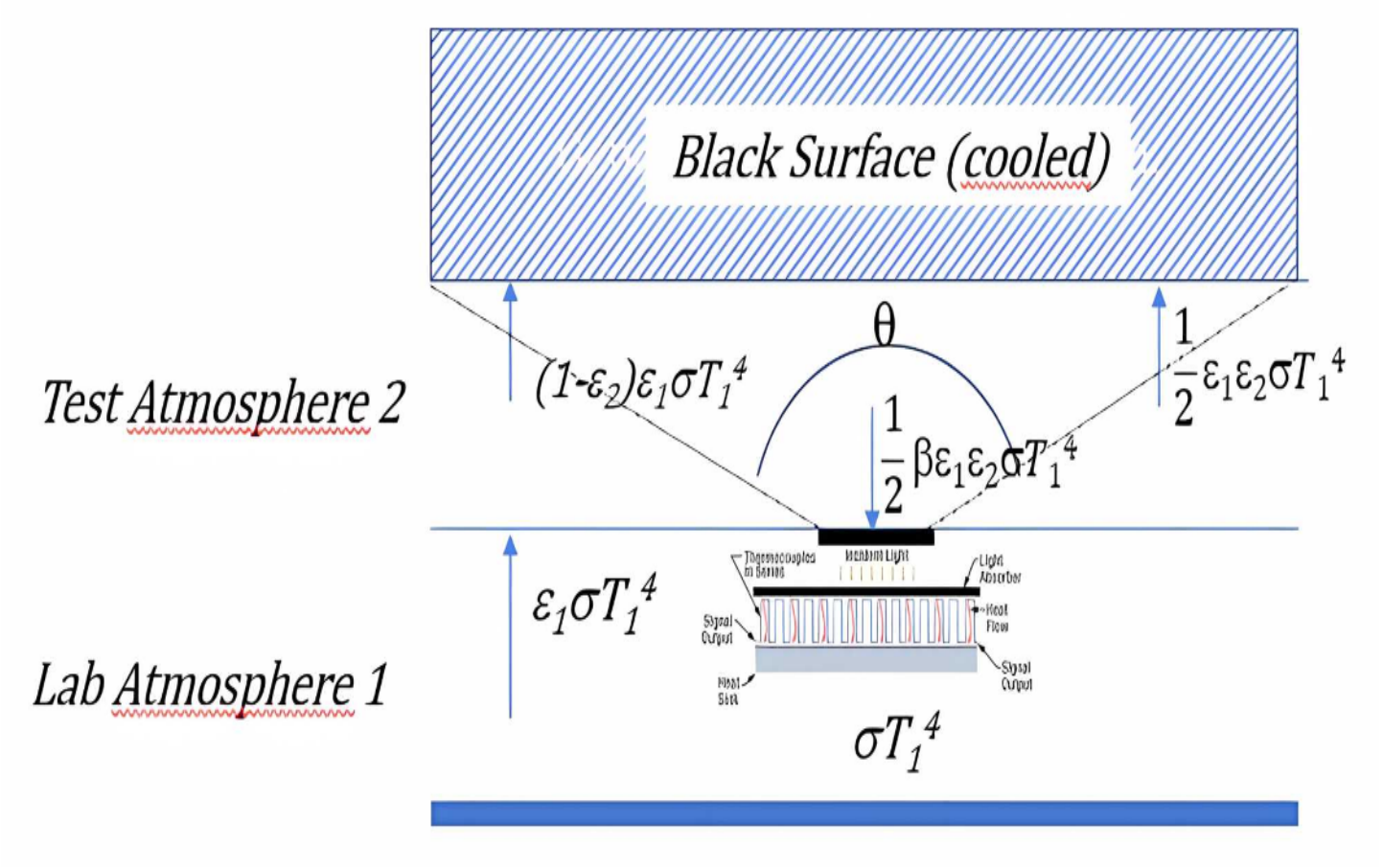


Figura 19. Banco di prova "Lab Mode" con disco nero raffreddato.

Nella modalità "Campo" (**Figura 18(b)**) il cilindro di prova viene ruotato di 180˚, il compressore di raffreddamento viene rimosso e sostituito dal cielo sereno. Il gradiente di temperatura in questo caso è la differenza tra $T\ S$

e T_E , dove T_E è derivato dalla (7)

$$T_E = 4\sqrt{\frac{\left(1+KC^2\right)\cdot 8.78\cdot 10^{-13}\cdot T_S^{\,5.852}\cdot RH^{0.07195}}{\sigma}}$$

(17)

La radiazione diffusa attraverso la camera di prova nel rivelatore IR è determinata da

$$P = \beta\ e_1\ e_2\ s\ T_E^{\,4}$$

$$P = \beta e_1 e_2 s T_E^4$$

(18)

Utilizzando la parametrizzazione di Howard [11] otteniamo per le atmosfere di prova di CO_2 densità di potenza inferiori al limite di rilevamento del sensore IR di 10 µW/cm^2 in questa configurazione. L'utilizzo di gas GH più forti aumenterebbe significativamente ε_1 come abbiamo testato nella nostra serie sperimentale. Questo dimostrerebbe che il CO_2 è un gas serra relativamente debole anche quando la sua concentrazione aumenta nella regione percentuale, rispetto ad altri gas GH, che sarebbero rilevabili già a concentrazioni relativamente basse.

3. I risultati

Il cilindro di prova da 7 litri della **Figura 18(a)** è stato riempito con azoto puro. Il CO_2 è stato aggiunto a passi di 50 ml. Contemporaneamente è stato utilizzato il rilevatore di CO_2 per misurare la concentrazione mentre il ventilatore cercava di omogeneizzare la miscela di gas. Nella **Figura 20** sono riportati i valori di potenza ottenuti dal rivelatore IR.

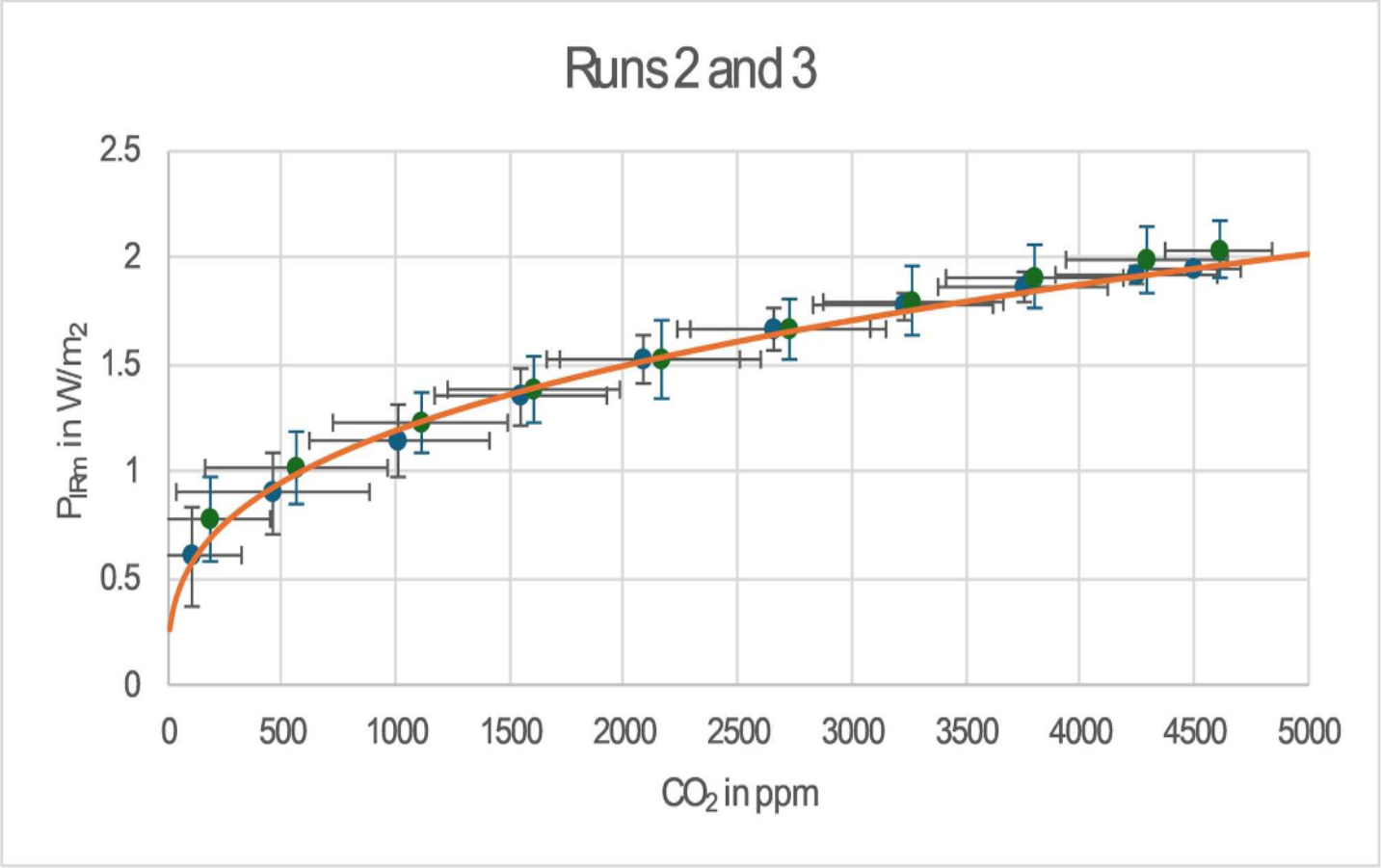


Figura 20. Esecuzione 2.2 e Esecuzione 2.3 in modalità laboratorio con miscelazione di CO_2 in un'atmosfera di azoto puro.

Dalle considerazioni precedenti, possiamo stimare la retro-radiazione attraverso la parametrizzazione di Howard [11] (equazioni (14)-(15)).

I valori bassi della lunghezza di assorbimento sono al di fuori dell'intervallo di adattamento e di misurazione di Howard, ma servono come estrapolazioni per stimare gli ordini di grandezza. L'andamento della **Figura 21** è effettivamente molto simile ai valori misurati nella **Figura 20** e conferma il comportamento logaritmico dell'assorbimento.

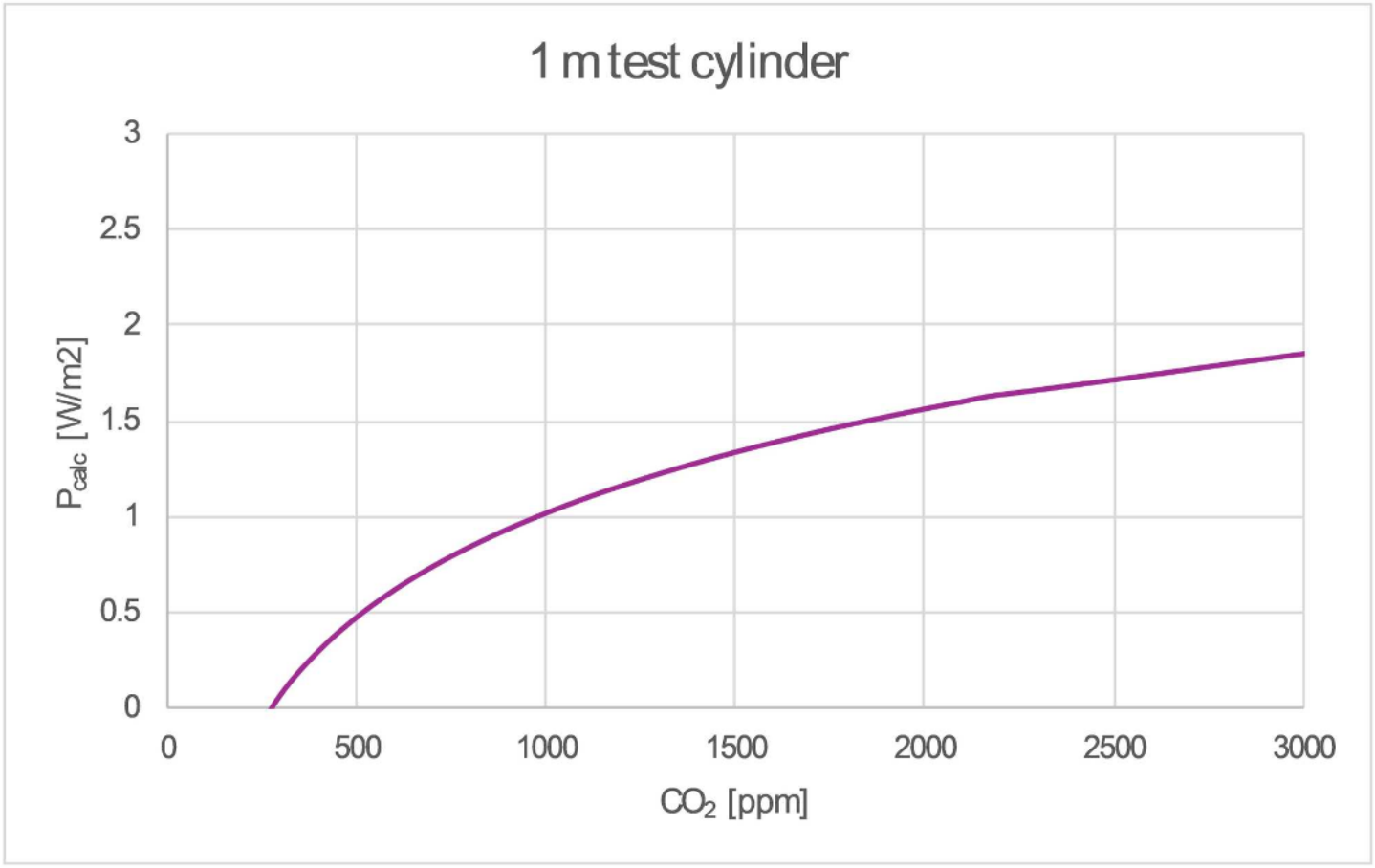


Figura 21. P calcolato da Howard [11].

Utilizzando i valori tracciati nella **Figura 20** possiamo stimare l'assorbanza frazionaria A_f per diverse concentrazioni di CO_2 in atmosfere di N_2

$$\ln (I_0 / I) =_1 \varepsilon \cdot c \cdot d$$

$$\ln\left(\frac{I_0}{I_1}\right) = \varepsilon \cdot c \cdot d$$

(19)

dove c è la concentrazione molare ($mol \cdot m^{-3}$) e d la lunghezza della colonna d'aria (m). Utilizziamo la funzione della legge di Beer-Lambert (13), dove ε. è il coefficiente di assorbimento della nostra atmosfera di prova per ottenere

$$_fA = (I_o - I)/I = (1- e)^{-\varepsilon \cdot c.d}$$

$$A_f = \frac{I_o - I}{I} = \left(1 - e^{-\varepsilon \cdot c.d}\right)$$

(20)

Utilizzando la (20) è possibile calcolare la retro-radiazione per una data lunghezza della colonna d'aria (**Figura 22**) in condizioni di saturazione a livello del suolo con un dato ppm di CO_2.

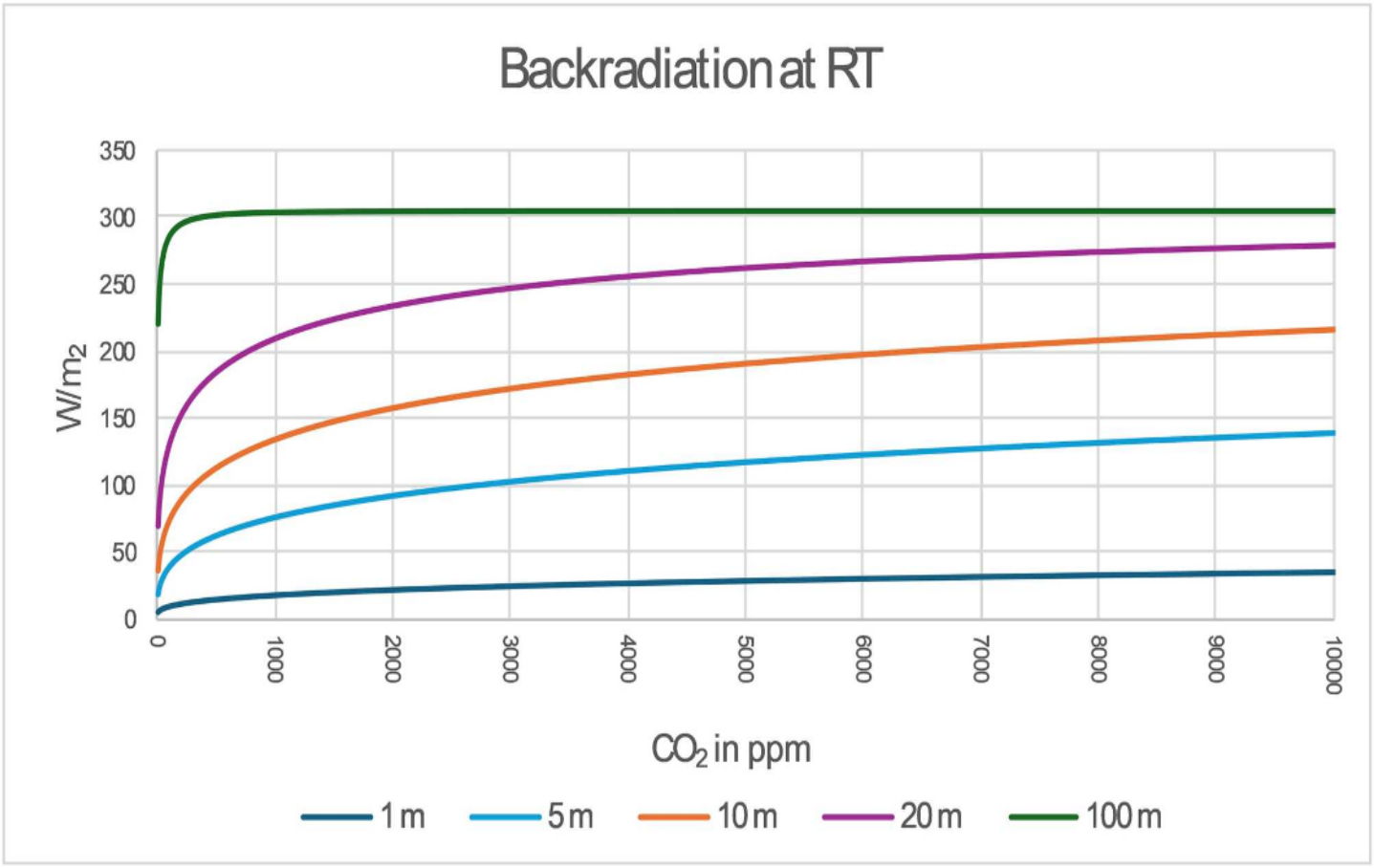


Figura 22. Retro-radiazione calcolata per diverse colonne d'aria lunghe a temperatura ambiente (RT).

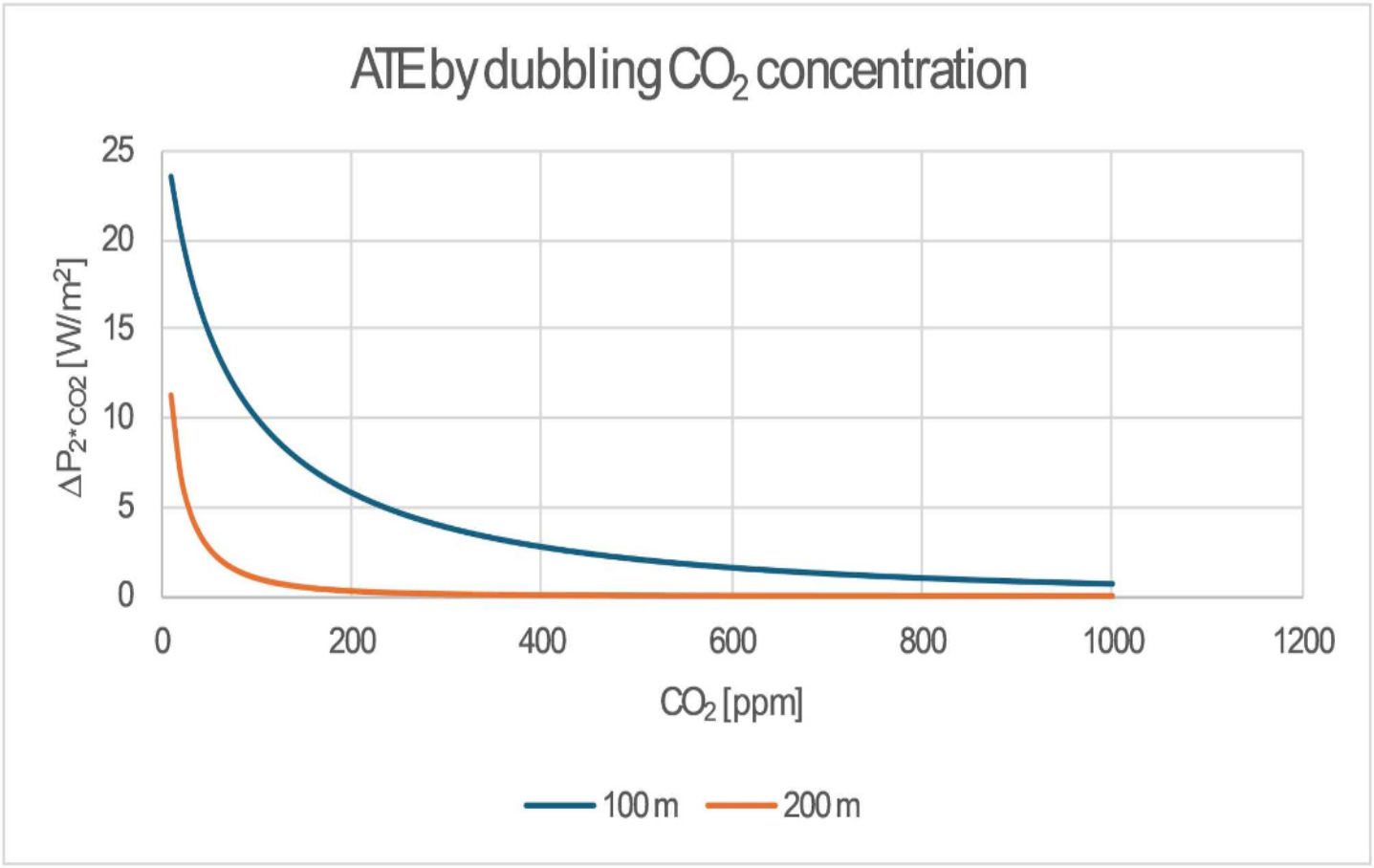


Figura 23. Effetto calcolato del raddoppio del CO_2 sulla potenza di retrodiffusione in due colonne d'aria.

Nella **Figura 23** abbiamo calcolato il corrispondente incremento termico atmosferico (ATE) quando si raddoppia la concentrazione effettiva di CO_2 per un'atmosfera omogenea di 100 m di spessore a 1 bar. Il risultato mostra una rapida riduzione dell'ATE con l'aumento della lunghezza delle colonne d'aria. Applicare questo risultato al mondo reale significa saturare la concentrazione di CO_2 rispetto agli effetti termici misurabili. Questo aspetto sarà discusso più dettagliatamente nel prossimo capitolo.

La Figura 24 è il risultato ottenuto nelle cosiddette misure di campo in un cielo notturno nero e senza nuvole. È evidente che non si osserva alcuna retrodiffusione misurabile quando si aggiunge al sistema CO_2 da 0 a 5000 ppm. L'equazione (9) con ε_1 -0,2, $\varepsilon_2 < 0,2$ e β-0,02 dà $\beta\varepsilon_1\ \varepsilon_2 < 0,0004$ e quindi $P = \beta\varepsilon_1\ \varepsilon_2\ \sigma T_E\ 4 < 3 \times 10^{-2}$ W/m^2 = 3 µW/cm^2. La potenza di lavoro del rivelatore Thermopile Thorlabs utilizzato con un'area attiva di 1 ^{cm2} parte da 10 µW. Per i gas GH più forti è possibile superare i limiti di rilevamento e ottenere una risposta. Ciò è stato dimostrato utilizzando il gas Freon C H F_{224} come mostrato nella figura successiva.

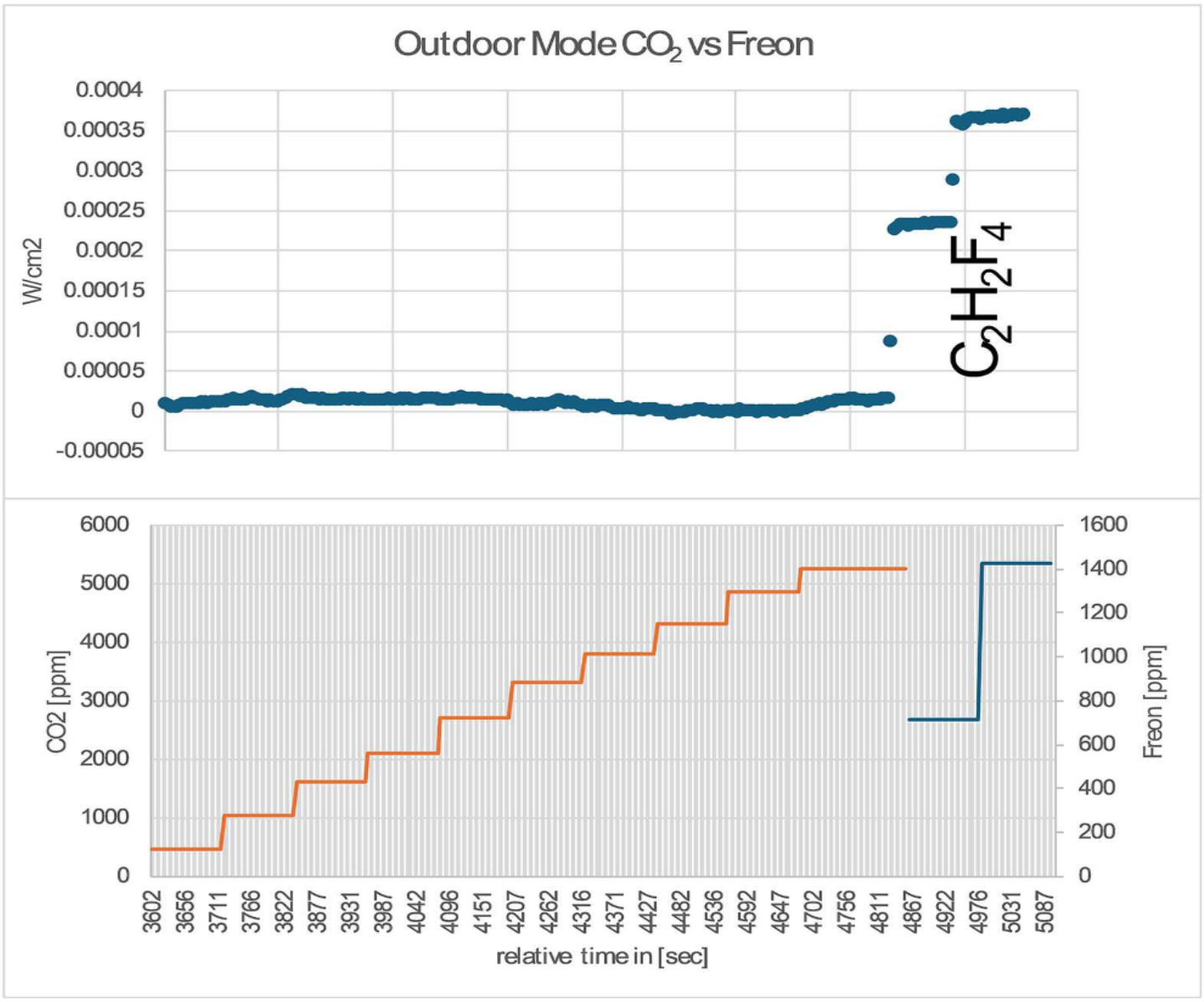


Figura 24. Misura comparativa in modalità campo di CO_2 e Freon (C H F_{224}).

Il rivelatore ha effettivamente reagito quando il freon C H F_{224} è stato aggiunto fino a 1400 ppm. L'assorbanza del C H F_{224} misurata dal NIST [15] (**Figura 25**) è infatti fino a 100 volte più forte di quella del CO_2 misurata dallo stesso istituto [16] (**Figura 26**).

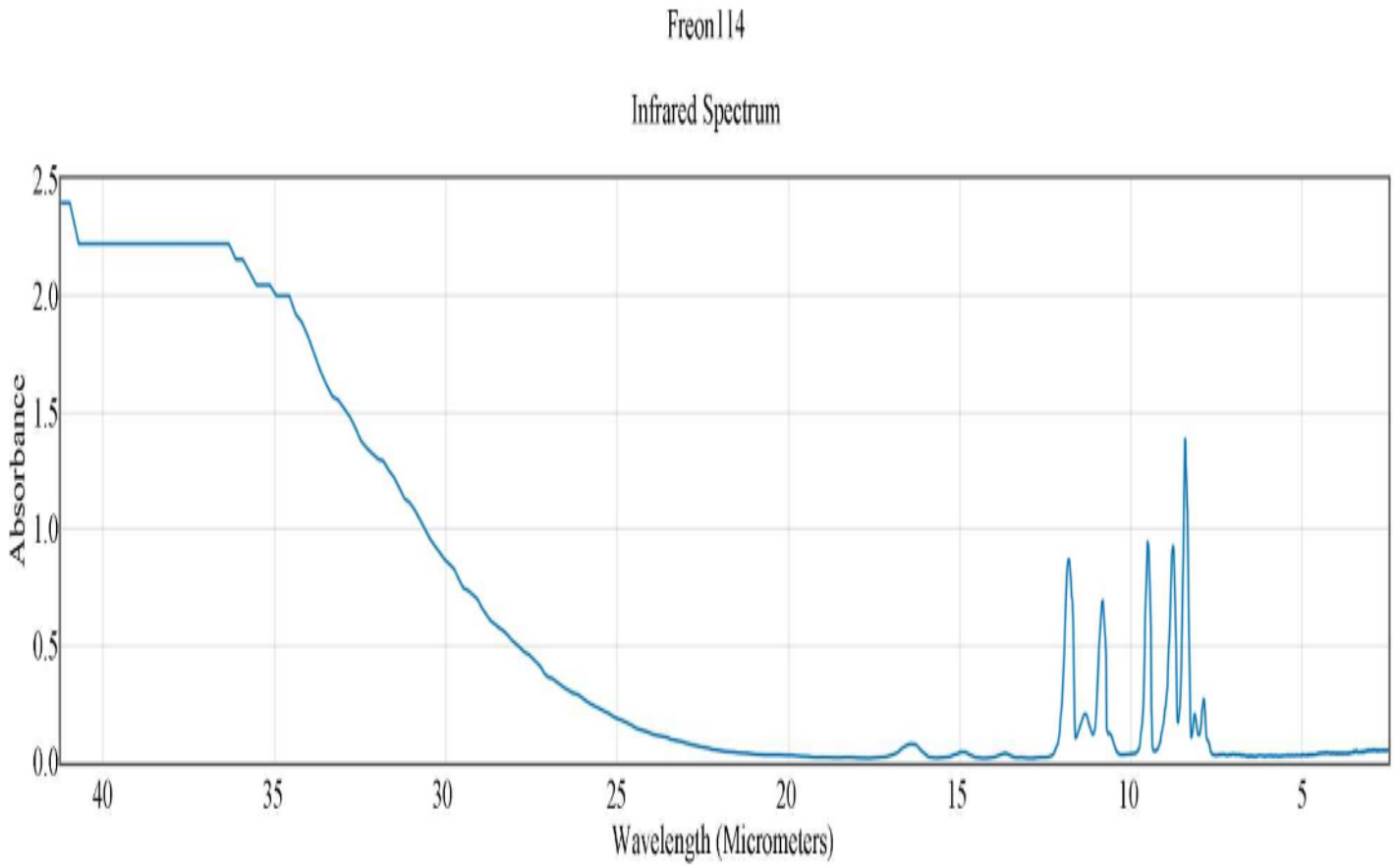


Figura 25. Assorbanza del freon (C H F_{224}) [15].

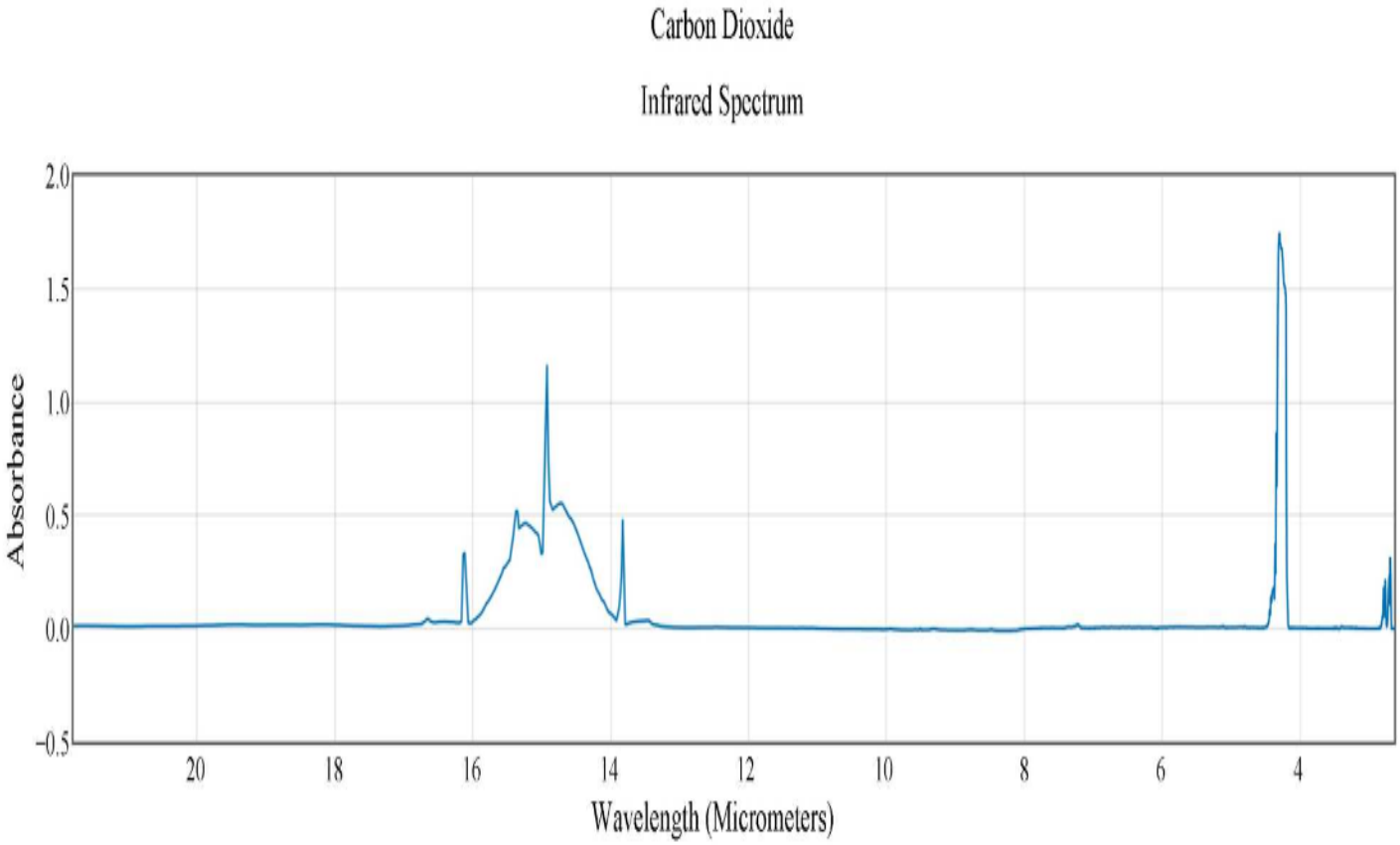


Figura 26. Assorbanza del biossido di carbonio (CO_2)[16].

4. Discussione

Le finestre atmosferiche, soprattutto quelle ottiche e infrarosse, influenzano la distribuzione dei flussi di energia e delle temperature all'interno del bilancio energetico della Terra. Le finestre dipendono da nuvole, vapore acqueo, tracce di gas serra e altri componenti dell'atmosfera.

Di una media di 341 watt per metro quadrato (W/m^2) di irraggiamento solare nella parte superiore dell'atmosfera, circa 161 W/m^2 raggiungono la superficie attraverso le finestre atmosferiche e le nuvole (albedo). L'assorbimento di IR da parte dell'atmosfera e il corrispondente riscaldamento atmosferico portano a un equilibrio di 333 W/m^2 di retro-radiazione e di radiazione superficiale LW in uscita di 396 W/m^2 di calore latente da evaporazione (80 W/m^2) e altre perdite termiche (17 W/m^2). Le nostre misurazioni sono in linea con i limiti di un aumento massimo di 3 W/m^2 di retro-radiazione raddoppiando il contenuto di CO_2 da 400 a 800 ppm. Questo contributo minore non dovrebbe superare un aumento di temperatura di oltre 0,5˚K, un valore che non rientra nell'intervallo di impatto significativo per i cambiamenti climatici e che è molto inferiore alle variazioni annuali di temperatura in tutte le regioni della Terra.

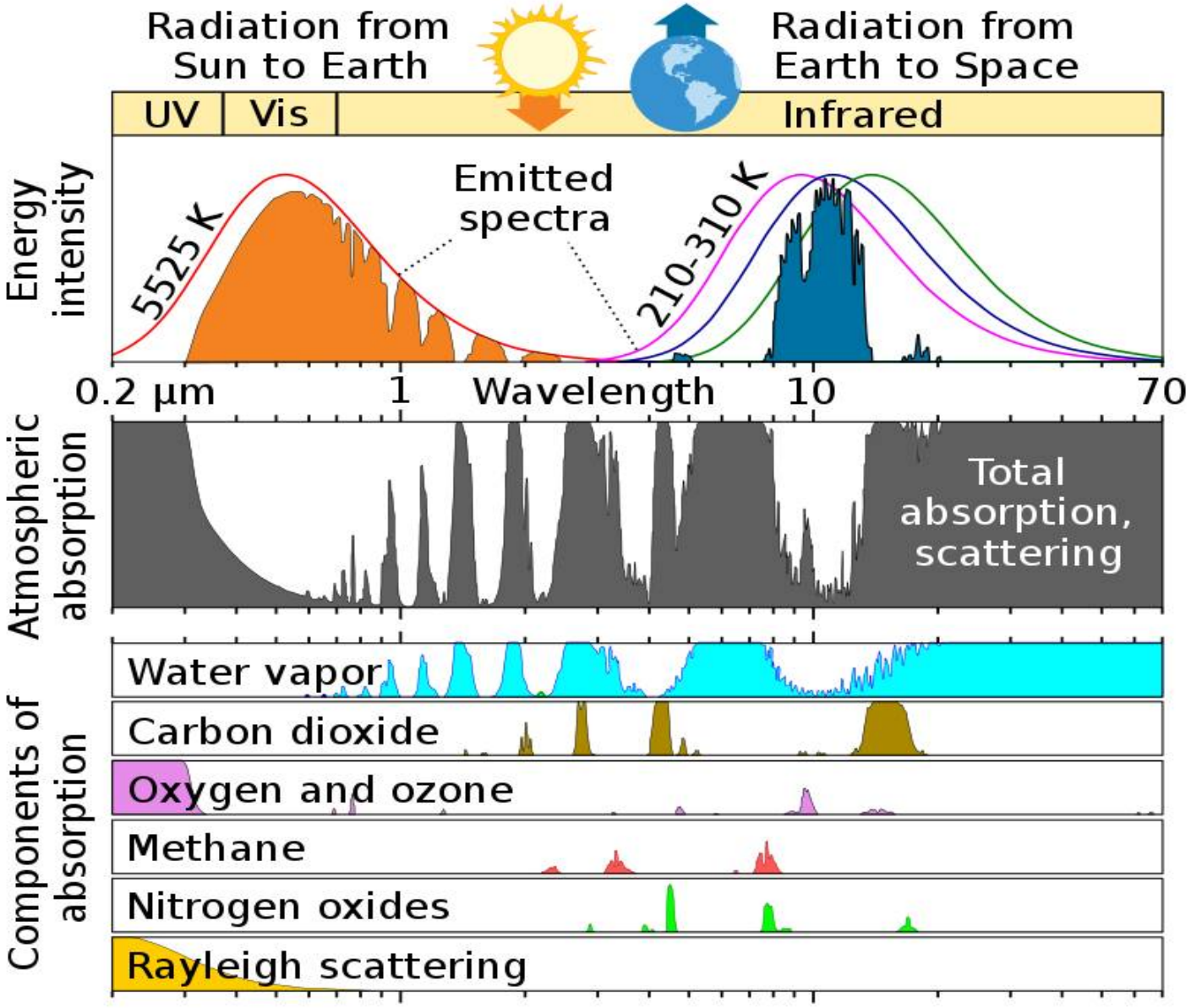


Figura 27. "The Atmospheric Window", NOAA [17] [18].

Dalla **Figura 27** dovrebbe essere evidente che solo contributi minori possono essere ottenuti dai bordi delle due finestre prominenti di CO_2 . Il vapore acqueo è infatti il principale assorbitore e gli altri gas GH non sono rilevanti alle loro attuali concentrazioni. L'aumento del vapore acqueo dovrebbe anche portare a una copertura nuvolosa a concentrazioni costanti di aerosol. Lievi variazioni delle costanti solari e dei raggi cosmici, grazie a cicli di feedback bilanciati, dovrebbero consentire un equilibrio termico a lungo termine. Le fluttuazioni sono spesso dovute a scale temporali innaturali, a costanti di lunga durata e al rumore statistico. In un quadro semplificato, in cui consideriamo un'atmosfera con densità uniforme corrispondente alla densità superficiale ρ = 1,2225 kg·m^{-3}, otteniamo un peso della colonna d'aria atmosferica di 10.300 kg·m^{-2} a una lunghezza di 8425 m. Dalle nostre misurazioni e da un semplice modello di Beer-Lambert di tale colonna d'aria, abbiamo trovato (**Figura 13**) già a 200 m la completa saturazione alle attuali concentrazioni di CO_2 , senza contributi significativi a ulteriori ATE. Schildknecht [19], utilizzando argomenti simili, trova che il raddoppio del contenuto di CO_2 nell'aria da 380 ppm a 760 ppm in un secolo comporta un aumento di $\Delta T \approx 0{,}5^{\circ}C$, che corrisponde bene ai valori previsti da questo e altri lavori.

I nostri risultati dovrebbero quindi contribuire alle scoperte già accettate in precedenza, che non indicano alcun motivo per causare fughe climatiche a causa dell'aumento del contenuto di CO_2 . Ekholm [20] ha introdotto l'idea di livelli di radiazione atmosferica fittizi dovuti all'aumento di CO_2 . Secondo lui il raffreddamento secolare della Terra è la causa principale della variazione della quantità di anidride carbonica nell'atmosfera. Spiegò come l'anidride carbonica sia un elemento chiave dell'effetto serra e come la sua conclusione si basasse sui precedenti lavori di Fourier, Pouillet, Tyndall e altri. Secondo le loro stime, una triplicazione dei livelli di anidride carbonica aumenterà le temperature globali di 7˚C-9˚C. Un aumento dell'anidride carbonica dovrebbe riscaldare le alte latitudini più dei tropici e creare un clima più caldo e uniforme su tutta la Terra. Hansen [21] ha testimoniato questo fatto davanti al Congresso e ha sensibilizzato l'opinione pubblica sul cambiamento climatico. Hansen affermava: "Il feedback più potente è fornito dal vapore acqueo". Sebbene questa argomentazione sembri forte, deve essere messa in discussione considerando i fatti paleoclimatici, ad esempio le temperature più elevate nel periodo interglaciale Eemiano di 120.000 anni fa e nel periodo interglaciale Holstein di 5.000-15.000 anni fa non hanno innescato un punto di svolta o un effetto serra galoppante. Sarker [22] afferma correttamente che 0,24 gigatoni di carbonio sono stati emessi nell'atmosfera per 50.000 anni per causare il grave riscaldamento noto come *PETM*. In confronto, gli esseri umani emettono nell'atmosfera 10 gigatoni, ovvero circa cinquanta volte quella quantità di carbonio all'anno. Non c'è dubbio che il riscaldamento del clima abbia un impatto negativo su diverse proprietà importanti, come l'indice di aridità dei fiumi [23]. Anche solo studiando i fiumi, ci sono molti altri impatti antropici non legati alla CO_2 che influenzano drammaticamente la loro integrità ambientale attuale e futura [24] [25]. L'attuale riscaldamento globale può essere naturale e/o antropogenico. Di sicuro, dobbiamo capire come sia stato possibile ottenere livelli del mare più alti di 100 m o finire con una glaciazione su vaste aree di terre emerse senza l'innesco di emissioni antropogeniche di CO_2 . L'energia aggiuntiva o la perdita di energia erano dovute a forze naturali che devono essere pienamente comprese prima di trarre conclusioni errate. I dati delle carote di ghiaccio non indicano variazioni fondamentali della temperatura negli ultimi 10.000 anni. Dobbiamo anche comprendere meglio la validità dei diagrammi di flusso di energia pubblicati dall'IPCC. Sarebbe un grande successo per i nostri sforzi se tali questioni potessero essere riconsiderate considerando anche i risultati presentati in questo lavoro.

5. Conclusione

Le prove sperimentali di questo lavoro confermano quelle precedenti, secondo cui l'aumento dei livelli di CO_2 ai livelli attuali nell'atmosfera non può contribuire in modo significativo al riscaldamento attraverso una maggiore retro-radiazione. Abbiamo anche dimostrato che l'aumento dei gas serra spuri, come il freon, mostra una forte risposta in termini di retro-radiazione quando viene aggiunto alla nostra camera di prova atmosferica. I modelli climatici e i loro forzanti di CO_2 dovrebbero essere rivisti e dovrebbero essere raccolte molte più

prove sperimentali sulla risposta alla radiazione IR dei gas serra prima di considerare le attuali tendenze al riscaldamento e i meccanismi di cambiamento climatico come monocausali alle teorie sui gas serra.

Conflitti di interesse

Gli autori dichiarano di non avere conflitti di interesse in merito alla pubblicazione di questo articolo.

Riferimenti

[1] Parlamento Europeo (2023) Fortschritte der EU bei der Verwirklichung ihrer Klimaziele für 2020 (Infografik). https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20180706STO07407/fortschritte-der-eu-bei-der-verwirklichung-ihrer-klimaziele-infografik?at_campaign=20234-Green&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=DSA&at_goal=TR_G&at_audience=&at_t

[2] van Wijngaarden, W.A. e Happer, W. (2020) Dependence of Earth's Thermal Radiation on Five Most Abundant Greenhouse Gases. arXiv: 2006.03098. https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.03098

[3] Happer, W. e Lindzen, R. (2022) Commento e dichiarazione sulla proposta di regolamento della SEC "Miglioramento e standardizzazione delle informazioni sul clima per gli investitori", fascicolo n. S7-10-22, 87 Fed. Reg. 21334. https://www.sec.gov/comments/s7-10-22/s71022-20132171-302668.pdf

[4] Barrett, J. (2005) Molecole dell'effetto serra, loro spettri e funzione nell'atmosfera. *Energia e ambiente*, 16, 1037-1045. https://doi.org/10.1260/095830505775221542

[5] James, I.N. (1994). Introduzione alle atmosfere circolanti. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/cbo9780511622977

[6] https://web.archive.org/web/20230329191117/www.acs.org/climatescience/atmosphericwarming/multilayermodel.html

[7] Swinbank, W.C. (1963) Long-Wave Radiation from Clear Skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 89, 339-348. https://doi.org/10.1002/qj.49708938105

[8] Goforth, M.A., Gilchrist, G.W. e Sirianni, J.D. (2002) Cloud Effects on Thermal Downwelling Sky Radiance. *Atti di SPIE-Società internazionale di ingegneria ottica* 4710, Orlando, 15 marzo 2002. https://doi.org/10.1117/12.459570

[9] Petty, G.W. (2006) A First Course in Atmospheric Radiation. Sundog Publishing, 223.

[10] Angström, A. (1918) Smithsonian Inst., Misc. Coll., 65, 3. https://www.realclimate.org/images/Angstrom.pdf

[11] Howard, J.N., Burch, D.E. e Williams, D. (1956) Infrared Transmission of Synthetic Atmospheres II Absorption by Carbon Dioxide. *Journal of the Optical Society of America*, 46, 237-241. https://doi.org/10.1364/josa.46.000237

[12] Fröhlich, C., Philipona, R. e Marty, C. (1998) Untersuchung des Oberflächenstrahlungshaushaltes in den Alpen und im Vergleich zum schweizerischen Mittelland. VDF Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.

[13] Makhdoumi Akram, M., Nikfarjam, A., Hajghassem, H., Ramezannezhad, M. e Iraj, M. (2020) Low Cost and Miniaturized NDIR System for CO_2 Detection Applications. *Sensor Review*, 40, 637-646. https://doi.org/10.1108/sr-06-2019-0140

[14] Harde, H. (2014) Advanced Two-Layer Climatemodel for the Assessment of Global Warming by CO_2 . *Open Journal of Atmospheric and Climate Change*, 1, 1-51.

[15] C_2 Cl F_{24} . https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C76142&Type=IR-SPEC&Index=2

[16] CO_2 . https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C124389&Units=SI&Type=IR-SPEC&Index=1#IR-SPEC

[17] Amministrazione nazionale oceanica e atmosferica (2023) La finestra atmosferica. https://www.noaa.gov/jetstream/satellites/absorb

[18] Dipartimento del Commercio degli Stati Uniti, NOAA. Il bilancio energetico Terra-Atmosfera. https://www.weather.gov/

[19] Schildknecht, D. (2020) Saturazione dell'assorbimento infrarosso da parte dell'anidride carbonica nell'atmosfera. *Rivista internazionale di fisica moderna B*, 34, articolo 2050293. https://doi.org/10.1142/s0217979220502938
[20] Ekholm, N. (1901) Sulle variazioni del clima del passato geologico e storico e sulle loro cause. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 27, 1-62. https://doi.org/10.1002/qj.49702711702
[21] Hansen, J., Johnson, D., Lacis, A., Lebedeff, S., Lee, P., Rind, D., *et al*. (1981) Climate Impact of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide. *Science*, 213, 957-966. https://doi.org/10.1126/science.213.4511.957
[22] Sarker, S. (2022) Fondamenti di climatologia per ingegneri: Lecture Note. *Eng*, 3, 573-595. https://doi.org/10.3390/eng3040040
[23] Sarker, S. (2021) Investigating Topologic and Geometric Properties of Synthetic and Natural River Networks under Changing Climate. https://stars.library.ucf.edu/etd2020/965
[24] Gao, Y., Sarker, S., Sarker, T. e Leta, O.T. (2022) Analizzare i punti critici nella risposta delle dighe costruite e pianificate nel bacino del fiume Mekong per l'integrità ambientale. *Environmental Research Communications*, 4, articolo 101001. https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac9459
[25] Sarker, S., Veremyev, A., Boginski, V. e Singh, A. (2019) Critical Nodes in River Networks. *Scientific Reports*, 9, articolo n. 11178. https://doi.org/10.1038/s41598-019-47292-4