

## Premessa

La concentrazione di Gas Serra nell'atmosfera (in particolar modo di anidride carbonica) è velocemente aumentata nell'ultimo secolo principalmente a causa dell'impiego di combustibili fossili per la produzione di energia elettrica. Una conseguenza diretta di questo fenomeno è la crescita della temperatura media del pianeta. Il quarto rapporto elaborato dall'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) presagisce che la continua crescita di gas serra nell'atmosfera causerà, da qui alla fine del 21° secolo, un incremento medio della temperatura della Terra tra 1,8 e 4°C.

L'unico tentativo significativo di ridurre l'immissione di gas serra nell'atmosfera è rappresentato dal Protocollo di Kyoto. I limiti di emissione fissati dal Protocollo stesso non sono tuttavia sufficienti a risolvere il problema del global warming. D'altra parte soluzioni più efficienti come la cattura dell'anidride carbonica per mezzo di processi di assorbimento chimico o fisico sono molto costosi e tecnicamente complessi da realizzare.

**Nel presente lavoro è stato affrontato lo studio teorico di un metodo semplice ed innovativo per il controllo del global warming basato sulla modifica dell'albedo terrestre per mezzo di superfici bianco riflettenti.** In particolare il lavoro presenta una innovativa relazione (brevetto n. PG 2006 A 0086) tra la quantità di gas serra (espressi in CO<sub>2</sub> equivalente) emessi in atmosfera e l'estensione della superficie bianco riflettente in grado di annullare l'incremento di temperatura da questi causato. Sono infine proposte alcune soluzioni per realizzare le superfici bianco riflettenti: la pittura dei tetti, il trattamento sbiancante di strade e di aree a basso pregio, la realizzazione di isole galleggianti bianche, la creazione di saline e di vasche di colmata, etc.. Anche le normali abitudini delle persone e il loro atteggiamento possono contribuire a variare l'albedo della Terra: l'uso di ombrelli e di vestitari di colore bianco, etc..

## La proposta

L'energia solare è trasportata tramite onde elettromagnetiche corte (0,2 - 4 μm); quando l'energia solare colpisce la Terra si divide nei seguenti contributi:

- 22% viene riflessa dalle nubi e da altri gas e particelle presenti nell'atmosfera;
- 20% è assorbita dalle nubi e da altri gas e particelle presenti nell'atmosfera;
- 58% raggiunge la superficie terrestre e di questa porzione solo circa il 15 % è riflesso dalla superficie terrestre di nuovo nello spazio.

In media quindi, circa il 43 % della radiazione solare raggiunge la superficie terrestre dove viene assorbita dal terreno producendo il riscaldamento della superficie terrestre e dello strato di atmosfera terrestre più basso. La radiazione solare assorbita dalla superficie terrestre viene riemessa come calore sotto forma di radiazione con lunghezza d'onda (4-25 μm). Tale radiazione è diretta generalmente verso lo spazio: una parte di questa energia esce dall'atmosfera, mentre un'altra parte viene assorbita/riflessa di nuovo verso la terra dai gas serra presenti nell'atmosfera terrestre.

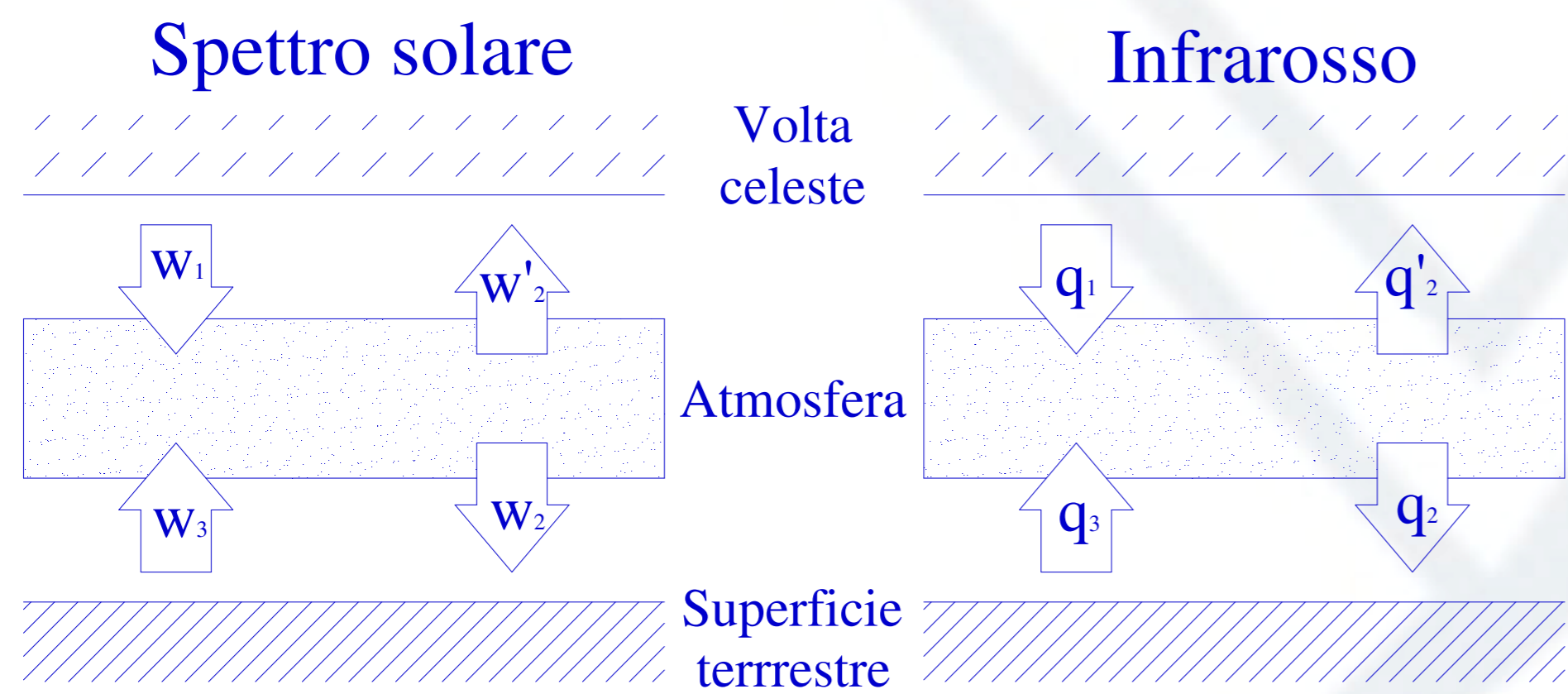
L'aumento della concentrazione di gas serra nell'aria accresce la quantità di radiazione assorbita/riflessa verso la Terra producendo un incremento di temperatura media globale della stessa. La tecnica proposta prevede l'incremento dell'energia ad onda corta riflessa dalla superficie terrestre e l'incremento dell'emissività per temperatura della superficie terrestre stessa al fine di diminuire l'energia termica assorbita dalla Terra e quindi il suo riscaldamento.

Tale fenomeno può essere conseguito attraverso la posa in opera od il rivestimento di superfici con materiali ad emissività selettiva caratterizzati da eccellenti proprietà di riflessione nelle lunghezze d'onda del visibile ed eventualmente eccellenti proprietà di emissione nell'infrarosso per consentire un'efficace reirraggiamento del calore assorbito.

## Il modello matematico

Nel presente lavoro viene proposto un innovativo modello matematico basato sul bilancio energetico tra volta celeste, atmosfera e superficie terrestre che individua il legame tra le caratteristiche radiative nello spettro solare e nell'infrarosso della superficie terrestre e la temperatura media globale. Tale relazione costituisce uno strumento versatile e di rapido impiego per valutare l'influenza delle variazioni delle proprietà di assorbimento della superficie della Terra sulla temperatura atmosferica e conseguentemente per quantificare l'estensione delle superfici bianco riflettenti necessarie a compensare il riscaldamento indotto dall'aumento della concentrazione di anidride carbonica e degli altri gas serra in atmosfera. La relazione proposta consente altresì di valutare la risposta nel tempo, in termini di variazione di temperatura, dell'installazione di quantità note di tali superfici.

In Figura 1 è riportato lo schema di riferimento degli scambi di calore per irraggiamento tra superficie terrestre, atmosfera e volta celeste nello spettro visibile e nell'infrarosso. Per i tre corpi sono state ipotizzate caratteristiche di emissività selettive ovvero con valori delle proprietà fotometriche differenti negli intervalli dello spettro solare e dell'infrarosso; in ciascuno di questi due intervalli talune proprietà si considerano costanti seppur diverse tra di loro. L'atmosfera ad esempio, è stata considerata come un corpo condensato di spessore infinitesimo e di temperatura pari alla sua temperatura media radiante. A tale proposito i flussi energetici sono caratterizzati attraverso la grandezza radiosità (indicata con  $w$  nello spettro solare e con  $q$  nell'infrarosso) che esprime la quantità di energia radiante complessivamente uscente da ciascun corpo per unità di superficie in termini di energia emessa, riflessa e trasmessa.



**Figura 1:** schema dei flussi energetici tra volta celeste, atmosfera e superficie terrestre nello spettro solare e nell'infrarosso.

Considerando i flussi energetici emessi dai tre corpi nello spettro solare e nell'infrarosso si ottiene un sistema di 8 equazioni in 8 incognite:

$$\begin{cases} w_2 = w_1 \cdot r_2 + w_3 \cdot t_2 & \text{Flusso termico dall'atmosfera verso la volta celeste nello spettro solare} \\ w_2 = w_1 \cdot t_2 + w_3 \cdot r_2 & \text{Flusso termico dall'atmosfera verso la Terra nello spettro solare} \\ w_3 = w_2 \cdot r_3 & \text{Flusso termico dalla Terra verso l'atmosfera nello spettro solare} \\ q_2' = \sigma_0 \cdot \alpha_2 \cdot T_2^4 + q_3 \cdot \tau_2 & \text{Flusso termico dall'atmosfera verso la volta celeste nell'infrarosso} \\ q_2 = \sigma_0 \cdot \alpha_2 \cdot T_2^4 + q_3 \cdot \rho_2 & \text{Flusso termico dall'atmosfera verso la Terra nell'infrarosso} \\ q_3 = \sigma_0 \cdot \alpha_3 \cdot T_3^4 + q_2 \cdot \rho_3 & \text{Flusso termico dalla Terra verso l'atmosfera nell'infrarosso} \\ w_3 + w_1 + q_3 - w_2 - w_2' - q_2' - q_2 = C_{am} \cdot \frac{T_{2,i+\Delta\tau} - T_{2,i}}{\Delta\tau} & \text{Bilancio energetico complessivo (spettro solare più infrarosso) dell'atmosfera in regime variabile} \\ w_2 + q_2 - w_3 - q_3 = C_{Terra} \cdot \frac{T_{3,i+\Delta\tau} - T_{3,i}}{\Delta\tau} & \text{Bilancio energetico complessivo (spettro solare più infrarosso) della superficie terrestre in regime var.} \end{cases}$$

dove  $a$ ,  $r$ ,  $t$  sono rispettivamente i coefficienti medi di assorbimento, riflessione e trasparenza nello spettro solare  $\alpha$ ,  $\rho$ ,  $\tau$  sono rispettivamente i coefficienti medi di assorbimento, riflessione e trasparenza nell'infrarosso,  $T_{2,i}$  è la temperatura dell'atmosfera all'istante  $i$ -esimo,  $T_{3,i}$  è la temperatura della superficie terrestre all'istante  $i$ -esimo e  $\Delta\tau$  è l'intervallo di tempo che intercorre tra i due istanti successivi  $i$  ed  $i + \Delta\tau$ .

Sostituendo espressioni che forniscono il bilancio complessivo dell'atmosfera e della superficie terrestre i valori delle radiosità dei singoli corpi in funzione della radiosità della volta celeste  $w_1$  delle due temperature  $T_2$  e  $T_3$  si ottiene un sistema di due equazioni di quarto grado nelle due sole incognite  $T_{2,i+\Delta\tau}$  e  $T_{3,i+\Delta\tau}$ .

$$\begin{cases} \left( \frac{\rho_3 \sigma_0 \alpha_2}{1 - \rho_2 \rho_3} - \sigma_0 \alpha_2 - \frac{\tau_2 \rho_3 \sigma_0 \alpha_2}{1 - \rho_2 \rho_3} - \frac{\sigma_0 \alpha_2}{1 - \rho_2 \rho_3} \right) \cdot T_{2,i+\Delta\tau}^4 + \left( \frac{\sigma_0 \alpha_3}{1 - \rho_2 \rho_3} - \frac{\tau_2 \sigma_0 \alpha_3}{1 - \rho_2 \rho_3} - \frac{\rho_2 \sigma_0 \alpha_3}{1 - \rho_2 \rho_3} \right) \cdot T_{3,i+\Delta\tau}^4 + \\ - \left( \frac{w_1 t_2}{1 - r_2 r_3} + w_1 r_2 + \frac{w_1 t_2^2 r_3}{1 - r_2 r_3} - w_1 - \frac{w_1 t_2 r_3}{1 - r_2 r_3} \right) = C_{am} \cdot \frac{T_{2,i+\Delta\tau} - T_{2,i}}{\Delta\tau} \\ \left( \frac{\sigma_0 \alpha_2 (1 - \rho_3)}{1 - \rho_2 \rho_3} \right) \cdot T_{2,i+\Delta\tau}^4 + \left( \frac{\sigma_0 \alpha_3 (\rho_2 - 1)}{1 - \rho_2 \rho_3} \right) \cdot T_{3,i+\Delta\tau}^4 - \frac{w_1 t_2 (r_3 - 1)}{1 - r_2 r_3} = C_{Terra} \cdot \frac{T_{3,i+\Delta\tau} - T_{3,i}}{\Delta\tau} \end{cases}$$

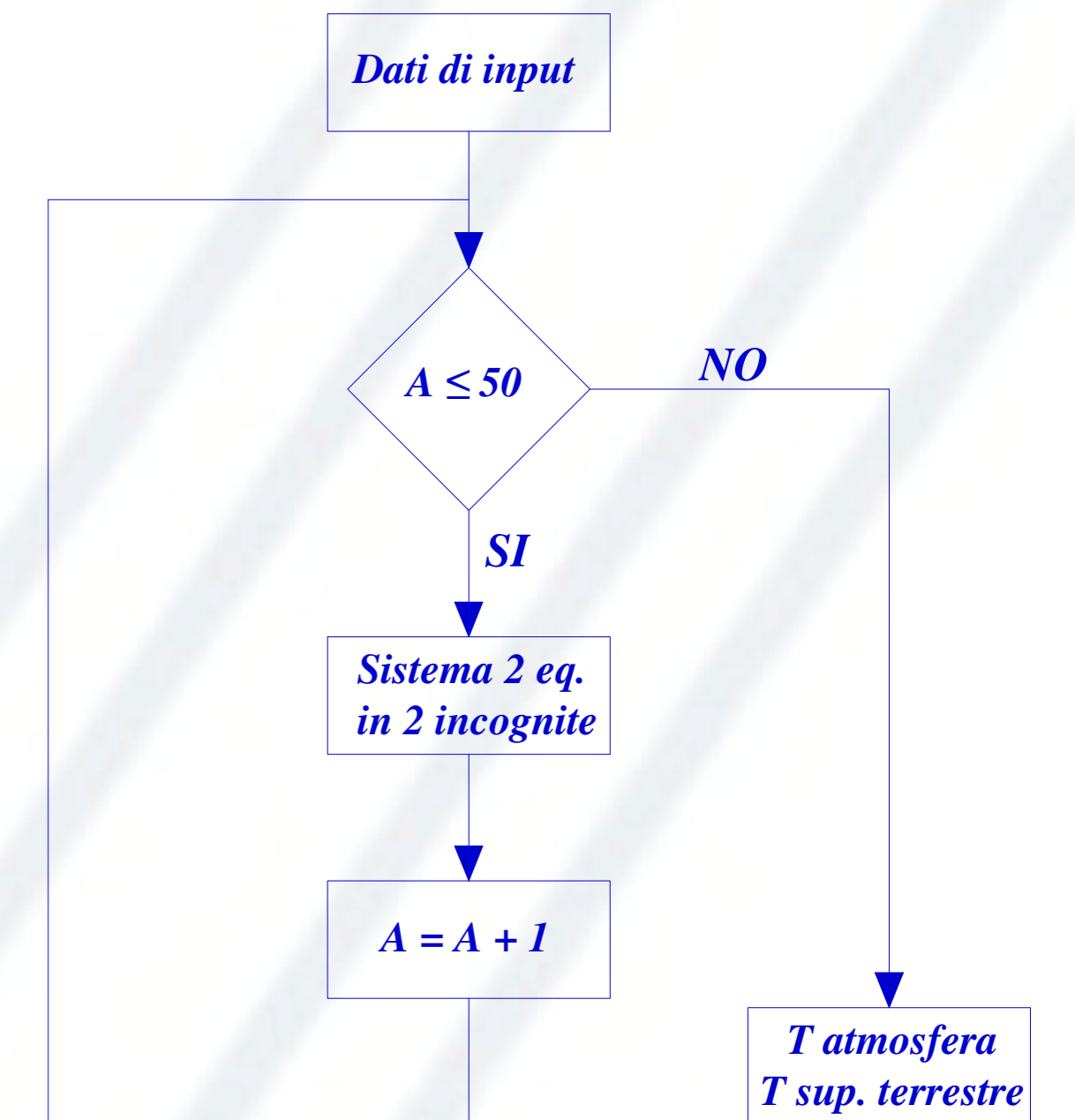
Introducendo la seguente ipotesi semplificativa:

$$f(T) = T^4 \quad \frac{df(T)}{dT} \Big|_{T=T_i} = 4 \cdot T_i^3 \cong \frac{T_{i+\Delta\tau}^4 - T_i^4}{T_{i+\Delta\tau} - T_i} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} T_{2,i+\Delta\tau}^4 \cong 4 \cdot T_{2,i}^3 \cdot (T_{2,i+\Delta\tau} - T_{2,i}) + T_{2,i}^4 \\ T_{3,i+\Delta\tau}^4 \cong 4 \cdot T_{3,i}^3 \cdot (T_{3,i+\Delta\tau} - T_{3,i}) + T_{3,i}^4 \end{cases}$$

si ottiene un sistema lineare che fornisce i valori della temperatura dell'atmosfera e della superficie terrestre all'istante di tempo  $i + \Delta\tau$ . Tali valori dipendono, oltre che dalle caratteristiche fotometriche medie dei corpi che prendono parte allo scambio energetico nello spettro solare e nell'infrarosso, dai valori delle medesime temperature all'istante di tempo  $i$  (noti all'interno del calcolo).

Per valutare l'effetto in termini di variazione della temperatura della modifica di una qualsiasi delle proprietà fotometriche suddette è sufficiente iterare il calcolo delle due temperature per un numero adeguato di intervalli temporali  $\Delta\tau$  mediante il procedimento ciclico schematizzato in figura 3.

Le capacità termiche della superficie terrestre  $C_{Terra}$  e della bassa atmosfera  $C_{am}$  che compaiono all'interno del modello sono da intendersi come *capacità termiche equivalenti* poiché solamente una porzione di tali corpi prende parte al bilancio energetico. Pertanto, al fine di ottenere stime della temperatura coerenti con i dati reali, la determinazione di  $C_{Terra}$  e  $C_{am}$  è stata effettuata calibrando il modello con i dati sperimentali contenuti nel *Fourth Assessment Report* (FAR) elaborato dall'IPCC. In particolare, prendendo a riferimento l'incremento della forzante radiativa (*Radiative Forcing*) prodotto negli ultimi 50 anni dall'aumento della concentrazione in atmosfera di gas serra, sono state determinate mediante il procedimento ciclico riportato a lato i valori delle capacità termiche che forniscono nel medesimo periodo temporale il corrispondente incremento della temperatura media globale. Le capacità termiche così trovate sono uguali tra loro e pari a  $1.67 \cdot 10^{13}$  J/K.



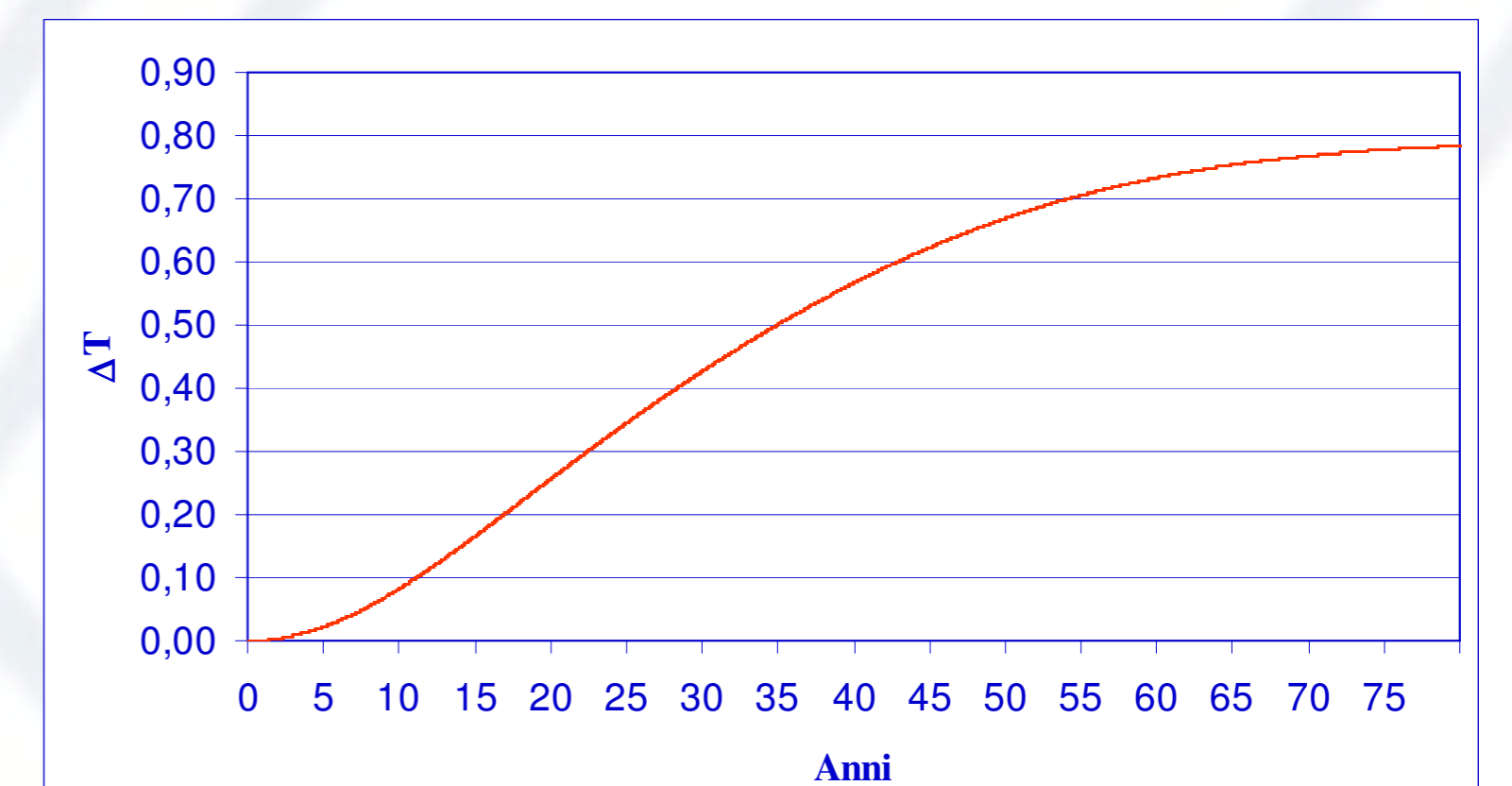
**Figura 2:** diagramma di flusso del procedimento per la risoluzione nel tempo della relazione proposta.

## Stima della superficie equivalente a quantità di gas serra

Per determinare una diminuzione della temperatura della Terra di 0,77 °C, corrispondente all'incremento dovuto all'aumento della concentrazione dell'anidride carbonica in atmosfera negli ultimi 50 anni, è necessario modificare il coefficiente di assorbimento medio della superficie terrestre nello spettro solare da 0,85 a 0,834. Nell'ipotesi di perseguire tale risultato mediante la posa in opera di superfici ad emissività selettiva con valore medio dell'emissività nello spettro solare è pari a 0,1, l'estensione di superficie che determina la modifica del coefficiente di assorbimento medio suddetto, risulta essere  $10,56 \cdot 10^6$  km<sup>2</sup>.

Nella realtà l'installazione di tale estensione di superficie riflettente non produce una riduzione istantanea della temperatura media globale ma la diminuzione di 0,77 °C viene raggiunta dopo un periodo di esposizione efficace il periodo temporale per il quale si verifica il 90 % della riduzione di temperatura massima teorica. Nel caso specifico, il tempo di esposizione efficace di  $10,56 \cdot 10^6$  km<sup>2</sup> di superficie bianca riflettente risulta pari a circa 52 anni e mezzo.

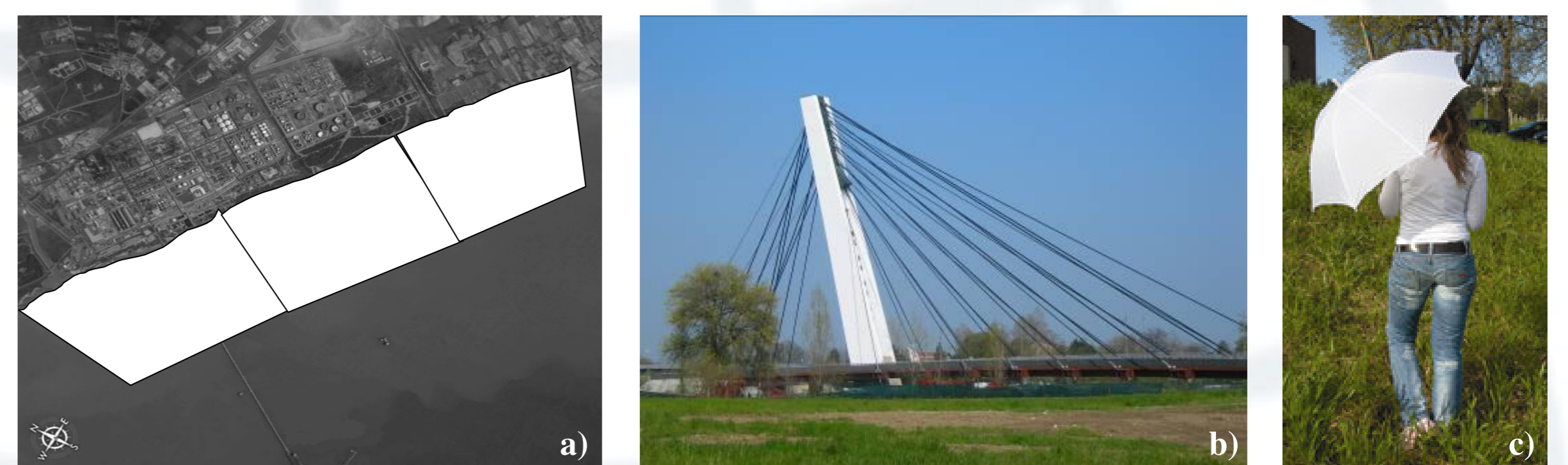
Facendo il rapporto tra l'area di superficie ad emissività selettiva necessaria a ridurre la temperatura della superficie terrestre di 0,77 °C e la variazione di concentrazione di anidride carbonica che determina tale incremento di temperatura si ottiene l'area di superficie ad emissività selettiva necessaria a compensare l'effetto dell'immissione in atmosfera di una tonnellata di CO<sub>2</sub>:  $S = 19 \text{ m}^2/\text{CO}_2$ .



**Figura 3:** variazione di temperatura prodotta dalla posa in opera di circa 10 milioni di km<sup>2</sup> di superficie riflettente (coefficiente di riflessione nello spettro solare pari a 0,9).

## Le applicazioni

L'applicazione di superfici riflettenti può essere attuata su piccola scala mediante la realizzazione e/o il rivestimento con materiali con coefficiente di riflessione quantomeno maggiore rispetto a quello medio della superficie terrestre nelle lunghezze d'onda dello spettro solare di oggetti quotidiani quali capi di abbigliamento, sistemi di schermatura della luce solare (ombrelli, ombrelloni, tende da sole, ecc.), mezzi di trasporto, ecc.. Su larga scala gli interventi possono riguardare: il trattamento sbiancante dei tetti di abitazioni e capannoni industriali (contributo di circa il 40% degli obiettivi del protocollo di Kyoto per l'Italia); il trattamento sbiancante sulle strade principali italiane (sarebbe sufficiente per raggiungere circa il 50% degli obiettivi del protocollo di Kyoto per l'Italia); la riattivazione delle saline dimesse (potrebbe permettere di raggiungere circa il 10% degli obiettivi del protocollo di Kyoto per l'Italia); la creazione di nuove saline artificiali in zone di basso pregio (siti industriali o petrolchimici lungo le coste); la coltivazione di specie vegetali con particolari proprietà cromatiche riflettenti; la formazione di isole galleggianti "bianco riflettenti" semisommerse anche con l'uso di strati di sale marino; ecc.. Nelle figure seguenti si riportano alcuni esempi di applicazioni di superfici riflettenti.



**Figura 4:** a) ipotesi di realizzazione di saline in siti a basso pregio ambientale, b) esempio di trattamento sbiancante delle infrastrutture di trasporto, c) esempio di impiego di oggettistica di colore bianco.