

Se le calotte polari si sciolgono...

Quali conseguenze climatiche dobbiamo attenderci?

Giuseppe D'Angelo*

DOI:10.30449/AS.v9n17.157

Ricevuto 20-06-2022 Approvato 11-07-2022 Pubblicato 31-07-2022



Sunto: *Il veloce innalzamento termico subito dal nostro pianeta, soprattutto a partire dalla metà del secolo scorso ha prodotto numerose conseguenze dal punto di vista climatico. Lo scioglimento dei ghiacciai, soprattutto quelli delle calotte polari, sta causando un progressivo lento innalzamento del livello medio dei mari. Ma la preoccupazione più grande sta nell'accumulo di energia termica nell'atmosfera. Il maggior calore dell'aria è causa di eventi climatici sempre più estremi quali uragani, alluvioni e siccità. È indispensabile ricorrere ad azioni decise in favore dell'ambiente attraverso una vera transizione ecologica.*

Parole Chiave: Cambiamenti climatici, calotte polari, temperatura media, innalzamento del livello, umidità.

Abstract: *The rapid rise in temperature suffered by our planet, especially since the middle of the last century, has produced numerous consequences from a climatic point of view. The melting of glaciers, especially those of the polar caps, is causing a progressive slow rise in the average sea level. But the biggest concern lies in the accumulation of thermal energy in the atmosphere. The greater heat in the air is the cause of increasingly extreme climatic events such as hurricanes, floods and droughts. It is essential to resort to decisive actions in favor of the environment through a true ecological transition.*

Keywords: Climate change, ice caps, average temperature, rise in level, humidity.

Citazione: D'Angelo G., *Se le calotte polari si sciolgono...*, «ArteScienza», Anno IX, N. 17, giugno 2022, pp. 33-54, DOI:10.30449/AS.v9n17.157.

*Laurea in Scienze Agrarie. Docente a tempo indeterminato presso il liceo Scientifico Statale "Leonardo" di Giarre (CT); sitdang010762@gmail.com

1 - Introduzione

Tante notizie, spesso anche piuttosto allarmanti, sull'andamento climatico generale del nostro pianeta vengono diffuse quasi quotidianamente da innumerevoli fonti informative. Andamento climatico certamente alterato a causa dell'eccessivo aumento della temperatura media atmosferica che ha, peraltro, causato anche il fenomeno dello scioglimento delle coltri glaciali polari. Ghiacciai dall'insostituibile funzione di regolatori termici planetari in grado di garantire l'indispensabile equilibrio climatico di cui ancora parzialmente godiamo. In questo breve lavoro si prendono in riesame alcuni dati climatici di facile accesso mediatico con lo scopo di fare delle puntualizzazioni sui reali pericoli legati alla concreta variazione del livello medio dei nostri mari. Verrà anche preso in considerazione il ruolo di vólano idrico ricoperto dall'atmosfera terrestre. Lo scopo è quello di facilitare la comprensione, anche a chi non è del mestiere, di come vengono fatte certe previsioni sull'andamento climatico e soprattutto far percepire il reale rischio che corriamo ogni giorno che passa non disponendo di un efficace e relativamente rapido rimedio agli evidenti cambiamenti climatici che caratterizzano la nostra epoca.

2 - La temperatura della Terra è aumentata

Non è facile affermare con certezza che la temperatura media del nostro pianeta è realmente aumentata¹. Le ragioni risiedono principalmente nel fatto che le relative misurazioni termiche sistematiche e accettabili sono iniziate nel 1860 ma quelle realmente affidabili iniziano a partire dal 1950. Questo perché gli strumenti utilizzati non erano qualitativamente eccelsi. Non si sono sempre seguiti gli stessi criteri di osservazione, c'è stata una certa discontinuità nelle misurazioni ecc. Le osservazioni effettuate alcuni decenni fa presentano inoltre diverse lacune a livello di copertura geografica, considerando che non c'erano allora i mezzi tecnici che garantissero un'attendibi-

1 https://it.wikipedia.org/wiki/Riscaldamento_globale, <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/200907> e <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202105>

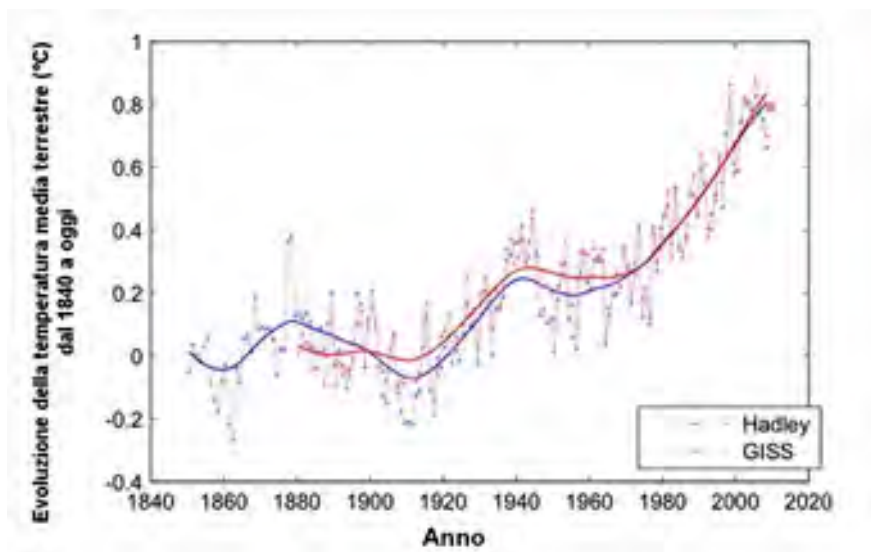


Fig. 1- Fonte: Copenaghen Diagnosis 2009) (Allison, Bindoff, Bindschadler, Cox, de Noblet-Ducoudre, England, et. al., 2009).

le misurazione delle temperature in determinate zone della Terra: deserti, calotte polari, oceani. Il problema è stato poi risolto con le osservazioni satellitari, ma si sono dovuti attendere i primi anni '70. È stato possibile però fornire, grazie a tecniche alquanto sofisticate e a opportune correzioni, delle medie di provata affidabilità. Certo, permangono ancora alcune differenze fra i risultati ottenuti dai diversi gruppi deputati alle osservazioni. In figura 1 si riportano i dati forniti da due importanti istituzioni in materia di climatologia (Hadley Center e NASA/GISS). Oggi si parla di riscaldamento globale e s'intende un incremento delle temperature medie sulla superficie della Terra che si è verificato principalmente a partire dalla metà del XX secolo. Il quarto rapporto dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC),² nei suoi studi di detection del 2007 stima che la temperatura media della superficie terrestre è aumentata di 0.74 ± 0.18 °C durante il XX secolo. La maggior parte degli incrementi di temperatura sono stati osservati a partire dalla metà del XX secolo e sono stati attribuiti all'incremento di concentrazione dei gas serra.

² https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_full_report.pdf

3 - Di quanto aumenterebbe il livello del mare

Come sarà possibile comprendere chiaramente tra breve, il disgelo totale delle calotte polari è un evento del tutto ipotetico ed eventualmente verificabile in un lungo arco di tempo. Tuttavia, è possibile prevedere facilmente la quantità d'acqua che si otterrebbe dallo scioglimento delle attuali calotte polari (Groenlandia ed Antartide, essenzialmente) ed il conseguente aumento del livello medio dei mari. Un semplice calcolo che tiene conto della superficie terrestre ricoperta da ghiaccio in modo permanente e dello spessore medio della coltre glaciale ci permette di affermare che l'eventuale variazione del livello dei mari rispetto al momento attuale potrà essere poco più di 68 metri.

Anche se l'area della calotta glaciale attorno al Polo Nord si è ridotta a 4,1 milioni di chilometri quadrati - la dimensione più piccola misurata dal 1979³ - tuttavia questi dati non hanno molta inferenza sul problema dell'aumento del livello medio dei mari. Ciò in quanto lo scioglimento riguarda principalmente i ghiacci della banchisa polare. Il loro scioglimento, infatti, lascia inalterato il livello del mare, per ovvie ragioni fisiche.⁴ Ad influire sull'innalzamento del livello delle acque è invece il contributo dato dal disgelo della copertura glaciale di Groenlandia ed Antartide in quanto ghiacciai che si estendono sulla terraferma.⁵

Il livello medio globale del mare viene comunemente calcolato attraverso l'uso di strumenti detti mareometri. Queste apparecchiature misurano l'altezza della superficie del mare rispetto ad un riferimento fisso sulla costa. Tuttavia, l'altezza del terreno non è sempre costante. I movimenti tettonici e gli aggiustamenti glaciali isostatici⁶ possono

3 Quando iniziarono le osservazioni satellitari e la copertura di ghiaccio marino negli anni '70 e '80 era superiore di ben 7 milioni di chilometri quadrati

4 Il volume d'acqua spostato da una massa di ghiaccio equivale all'acqua prodotta dalla massa di ghiaccio quando fonde. Il ghiaccio infatti è più leggero dell'acqua, e quindi in essa galleggia, solo perché le molecole dell'acqua che lo costituiscono occupano un volume complessivo maggiore a temperatura ≤ 0 °C.

5 https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Space_for_our_climate/Clearest_evidence_yet_of_polar_ice_losses.

6 Movimenti verticali di innalzamento ed abbassamento di corpi densi (masse rocciose

determinare variazioni anche consistenti. Infatti, il terreno che era precedentemente compresso dai ghiacci, può sollevarsi quando questi si sciolgono. Per ricostruire l'andamento storico globale del livello marino i mareometri vengono installati in siti distanti dalle placche tettoniche in movimento ed anche su terreni poco soggetti al processo isostatico. Il livello delle acque del mare non è stato sempre lo stesso nel corso dei milioni di anni. Esso è sceso più volte portando alla luce parecchi chilometri quadrati di superficie, per poi risalire sommergendoli nuovamente. Queste variazioni prendono il nome di variazioni eustatiche del livello marino. Tali variazioni eustatiche sono ormai ben documentate ed accettate dagli studiosi, ma rimangono ancora poco chiare le cause e il meccanismo con cui queste variazioni avvenivano. Vi sono molte teorie e ipotesi a riguardo. Due le cause principali: una variazione del volume totale dell'acqua nei mari, o una variazione della capacità volumetrica dei bacini marini, cioè una variazione della loro forma. La prima ipotesi sembra quella più probabile. Secondo alcuni calcoli (effettuati anche in questo lavoro) la fusione totale dei ghiacci presenti nelle calotte polari provocherebbe un innalzamento del livello marino di circa 70 metri, ma l'abbassamento del fondo oceanico, a causa del maggior contenuto d'acqua, e quindi per il maggior peso, compenserebbe in parte l'innalzamento portandolo intorno ai 55 metri.

Recentemente Il gruppo guidato da Andrew Shepherd della Università di Leeds (Gran Bretagna) ha pubblicato sulla rivista *Science* i dati relativi ad uno studio che pone ordine ai contrastanti dati trentennali sullo scioglimento delle calotte polari artica ed antartica. Gli autori dello studio sostengono che tra il 1992 ed il 2011 le calotte groenlandese e antartica hanno contribuito, insieme, con almeno 11.1 millimetri alla risalita del livello marino.⁷ Si tratta dunque di un aumento di 11,1 mm in 19 anni (2011 - 1992). Un aumento di circa 11 millimetri in 19 anni corrisponde ad un volume d'acqua di fusione pari a circa 4019 Km³.⁸ Tale volume corrisponde poi ad una

regionali, calotte glaciali, sedimenti, ecc.) che rispondono al principio archimedeo.

7 https://en.wikipedia.org/wiki/Ice_Sheet_Mass_Balance_Inter-comparison_Exercise e <https://data.bas.ac.uk/full-record.php?id=GB/NERC/BAS/PDC/01477>

8 Il valore si ottiene moltiplicando la superficie riportata in colonna C6 della tab. 1 per

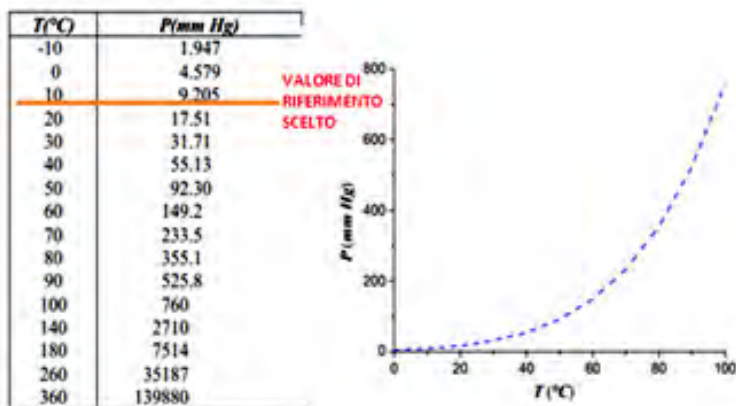


Fig.2 - Pressione di vapore in funzione della temperatura.

percentuale di acqua derivante da fusione di appena lo 0,0162% sul totale ricavabile dalla attuale estensione delle coltri glaciali.

Dati più recenti forniti dallo stesso Shepherd aggiornano il valore dell'innalzamento medio del livello dei mari a 17,8 mm nel periodo 1992 - 2017. Ciò significa che nei primi 19 anni (dal 1992 al 2011) il livello dei mari si innalzava mediamente di 0,584 mm/anno (11,1 mm/19 anni) mentre negli ultimi 6 anni (dal 2011 al 2017) l'innalzamento medio annuo subisce un aumento più che doppio pari a 1,12 (6,7 mm/6 anni). Ciò evidenzia una forte accelerazione del fenomeno del disgelo. L'innalzamento medio annuo del livello del mare è infatti quasi raddoppiato ($1,12/0,584 = 1,92$) in poco meno di un terzo del primo periodo considerato ($6_{\text{anni}}/19_{\text{anni}} = 0,316$).

4 - Atmosfera: un efficiente volano idrico?

Un aumento della temperatura media del pianeta comporta, peraltro, un aumento della quantità di vapore trattenuto dall'aria cioè ad una certa quantità d'acqua trattenuta dall'atmosfera allo stato aeriforme in equilibrio dinamico con lo stato liquido.

0,0000111 Km (11,1 mm)

Sappiamo infatti che la pressione di vapore di un liquido puro dipende solo dalla temperatura,⁹ e una simile dipendenza può essere diagrammata ponendo la pressione di vapore della sostanza contro la relativa temperatura. In questo modo si ottiene una curva esponenziale il cui andamento è riprodotto nel grafico di figura 2.

Nell'aria è sempre presente una piccola quantità di vapore d'acqua, indicativamente circa 1% in massa, per cui si può correttamente parlare di aria umida. L'aria atmosferica "secca", e cioè priva di vapore, è come noto una miscela di ossigeno e azoto ($O_2 \approx 23\%$ e $N_2 \approx 76\%$ in massa). L'aria umida viene considerata nella tecnica come una miscela di aria (gas) e di vapore acqueo (vapore surriscaldato), prescindendo dalla sua composizione in ossigeno e azoto. Si dice, quindi, che l'aria umida è una miscela d'aria secca e di vapore acqueo. Poiché lo stato del vapore può essere considerato sufficientemente rarefatto, il comportamento di questo e dell'aria secca, cioè nel complesso dell'aria umida, può essere descritto con buona approssimazione mediante l'equazione di stato dei gas perfetti.

Il gas perfetto o ideale costituisce un modello astratto del comportamento dei gas cui tendono molti gas reali a pressioni prossime a quella atmosferica. Questo modello di riferimento è costituito da un gas per il quale valgono le seguenti condizioni:

- le molecole sono immaginate come sfere di volume pressoché nullo e comunque trascurabile rispetto al volume del recipiente che contiene il gas;
- il moto delle molecole avviene in ogni direzione con le medesime probabilità;
- non esistono forze di attrazione e repulsione tra le molecole e gli urti tra le molecole e il recipiente e tra una molecola e l'altra sono elastici;
- ad ogni singola molecola possono essere applicate le leggi della meccanica classica.

Per un gas con queste proprietà si possono ricavare leggi semplici

9 <https://www.chimica-online.it/download/equazione-di-clapeyron.htm>

in grado di descriverne il comportamento al variare delle grandezze termodinamiche. In ogni stato termodinamico il comportamento di un gas perfetto segue la legge: $P V = n R T$, essendo P la pressione, V il volume specifico, R una costante caratteristica del gas in esame, T la temperatura assoluta ed n il numero di moli.

In particolare, indicando con P_t la complessiva pressione della miscela aria-vapore e con n_t il totale numero di moli¹⁰ presenti nel volume V , si può scrivere:

$$(1) \quad P_t V = n_t R T$$

ove è:

$$n_t = n_a + n_v$$

essendo n_a e n_v rispettivamente il numero di moli di aria e di vapore.

Si definisce umidità relativa il rapporto tra la densità del vapore ρ_v e la densità del vapore saturo ρ_s alla stessa temperatura:

$$(2) \quad i = \rho_v / \rho_s$$

È anche possibile esprimere i nella forma:¹¹

$$i = P_v / P_s$$

L'umidità relativa i esprime anche il rapporto tra la massa di vapore m_v presente in un qualunque volume V d'aria e la massa di vapore m_s a saturazione (massima possibile). È anche:

$$(3) \quad i = m_v / m_s = \rho_v / \rho_s$$

10 La mole è la fondamentale unità di misura usata dai chimici per indicare una precisa quantità di materia di una determinata sostanza. Essa corrisponde, per definizione, a quella quantità in grammi di una sostanza pari al suo peso atomico (se sostanza semplice, cioè un elemento) o molecolare (se si tratta di un composto).

11 L'umidità relativa i esprime anche il rapporto tra la massa di vapore m_v presente in un qualunque volume V d'aria e la massa di vapore m_s a saturazione (massima possibile).

Sempre considerando il vapore come un gas ideale dividendo per V ambo i membri della (1) e considerato che n/V indica anche la densità di un gas, si può scrivere:

$$P_v = \rho_v R_v T$$

$$P_s = \rho_s R_s T$$

per cui risulta anche:

$$(4) \quad i = P_v / P_s$$

L'umidità assoluta x è il rapporto tra la densità del vapore ρ_v e la densità dell'aria secca ρ_a :

$$(5) \quad x = \rho_v / \rho_a$$

Con opportune formule, una volta conosciuta la variazione di temperatura occorsa, è possibile calcolare la maggiore quantità di acqua trattenuta dall'atmosfera sotto forma di vapore. Ma non dobbiamo dimenticare che questo calcolo si riferisce ad una atmosfera termicamente uniforme ed in assenza di moti. In realtà questa è una condizione prettamente teorica mentre la realtà delle cose se ne discosta parecchio. La maggiore quantità di vapore trattenuto dall'atmosfera rappresenterebbe il volume idrico sottratto prevalentemente ai bacini idrici e bloccato allo stato di vapore nell'atmosfera. Tale volume non dovrebbe, quindi, essere considerato nel calcolo dell'aumento del livello medio dei mari. In che misura questo volume d'acqua trattenuta dall'atmosfera sotto forma di vapore potrà contribuire a contenere, almeno in parte, l'aumento del livello medio dei mari a causa del disgelo? Ma soprattutto cosa può fare l'energia termica associata al vapore acqueo quando si libera nel processo di condensazione? Sappiamo infatti che il calore latente di evaporazione dell'acqua rappresenta una notevole quantità di energia pari a 40680 J/mol.¹² Quando il vapore acqueo condensa nel passaggio di stato

12 Il calore latente di ebollizione (vaporizzazione, a 100 °C) è 2,26 * 10⁶ J/Kg. Un Kg d'acqua corrisponde a 55,555 moli. Pertanto, il calore latente per una mole corrisponde a 40680 J

inverso (come nel caso della formazione delle nubi e negli eventi temporaleschi) esso viene ceduto all'atmosfera innescando in essa forti variazioni bariche.

5 - Calcolo dell'incremento termico nel 2050

Utilizzando i dati termici presentati dall'IPCC negli ultimi 55 anni e negli ultimi 140 anni (in particolare gli scostamenti termici annuali non livellati)¹³ e ipotizzando un trend futuro stabile, è stato possibile determinare la retta di regressione¹⁴ dei valori della temperatura a partire dal 1965 (anno dal quale si è osservato un incremento più intenso e costante).

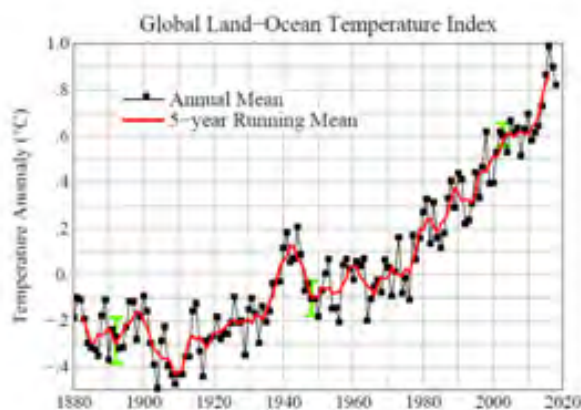


Fig. 3 – Andamento degli scostamenti termici fino al 2020.

Con i dati della retta di regressione è stato poi possibile realizzare il grafico Excel riportato nelle figure 4a e 4b, che riproduce l'andamento degli stessi. Nel grafico di figura 4a viene tracciata anche la

13 <https://climate.nasa.gov/embed/127/>.

14 https://www.matematicamente.it/esercizi/statistica-retta_di_regressione.pdf

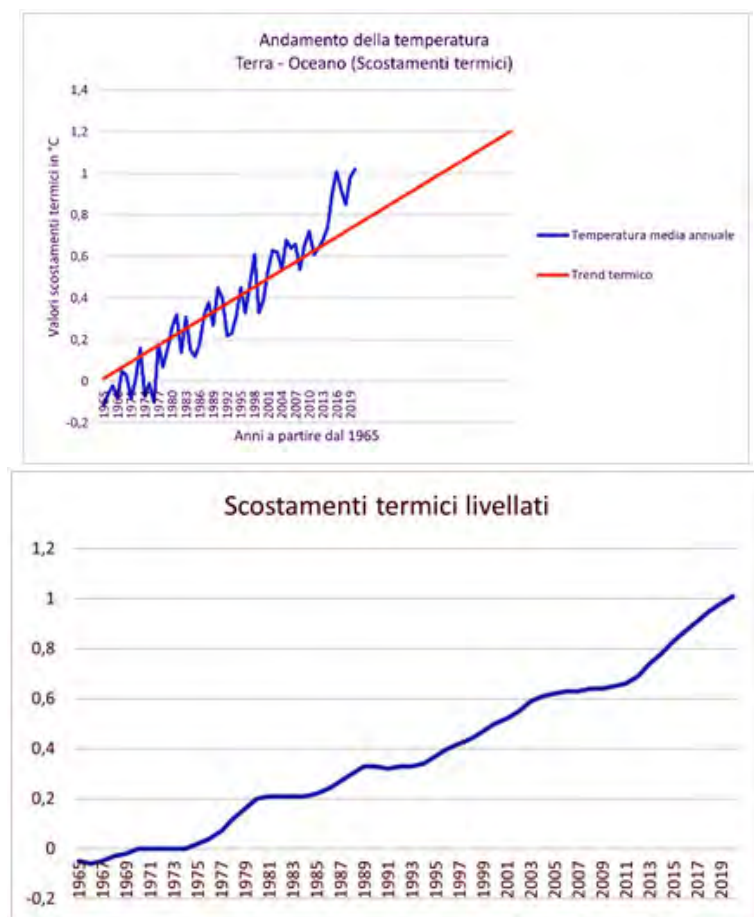


Fig. 4a e 4b – Andamento degli scostamenti termici dal 1965 al 2020.

suddetta retta di regressione. Prendendo come riferimento i valori dei punti di tale retta è stato calcolato il valore del rialzo termico prevedibile da oggi fino al 2050 ed oltre. Esso si aggira intorno a 0,45 °C. Prendendo poi come valore termico medio di riferimento per il nostro pianeta la media del XX secolo pari a 14,8 °C¹⁵ è possibile ipotizzare per il 2050 una temperatura media di circa 16 °C (14,8 °C + 1,2 °C). Sebbene si tratti di un dato di per sé non eccessivamente allarmante, tuttavia, presenta le caratteristiche di un andamento co-

15 <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202105>.

stante che diventa certamente preoccupante se si dovesse protrarre per diverse decine d'anni.

Va anche osservato che dal 1965 al 2020, secondo i valori della retta di regressione, la temperatura ha subito un incremento medio di 0,734 °C e che il trend termico non necessariamente deve restare costante. Anzi è probabile che assisteremo ad un suo ulteriore aumento in grado di modificare l'inclinazione della curva del grafico di figura 4a. La continua immissione nell'atmosfera di enormi quantità di gas serra ne è la causa principale. Il galoppante sviluppo economico e tecnologico di Paesi come Cina, India, ecc. non prelude certo ad una riduzione del fenomeno. È quindi ipotizzabile che anche il fenomeno del disgelo sia destinato ad incrementarsi. Con riferimento a quest'ultimo problema c'è anche da dire che in un sistema complesso è possibile che, in seguito alla modificazione delle condizioni iniziali, si inneschino meccanismi di retroazione¹⁶; catene causali circolari di fenomeni in cui le cause e gli effetti si influenzano a vicenda, alimentando e modificando l'evoluzione climatica. I feedback possono essere negativi, quando i fenomeni comparati variano reciprocamente in modo inverso (aumenta l'uno se diminuisce l'altro, o viceversa), oppure positivi, quando i fenomeni sono correlati in modo diretto (aumenta/diminuisce l'uno ed aumenta/diminuisce anche l'altro). In relazione allo scioglimento dei ghiacci polari un esempio di feedback negativo è dato dalla riduzione del fenomeno dell'albedo,¹⁷ cioè della quantità di luce riflessa dalle superfici bianche dei ghiacciai, come conseguenza dello scioglimento degli stessi. Infatti, la minore energia solare riemessa comporta un maggiore riscaldamento ambientale che determina una riduzione ulteriore della superficie della coltre glaciale, cioè un aumento del disgelo. Un esempio di feedback positivo è dato invece dalla relazione tra aumento della temperatura ed aumento del livello del mare a causa della maggior quantità di acqua presente derivante dalla fusione dei ghiacciai. Un altro evento in grado di accelerare notevolmente il

16 <https://ilbolive.unipd.it/it/news/ritiro-ghiacci-antartide-laumento-livello-mari>

17 L'albedo è la frazione di luce riflessa da un oggetto o da una superficie rispetto a quella che vi incide. Questo termine viene spesso utilizzato per indicare la riflettività dei corpi celesti che non brillano di luce propria, come pianeti e satelliti, ma anche in climatologia.



Fig. 5 – Innalzamento medio del livello dei mari previsto per il secolo in corso.

disgelo delle calotte polari è quello della frammentazione progressiva con formazione di giganteschi iceberg. Il fenomeno è frequente e si verifica lungo i bordi della distesa glaciale che ricopre le terre emerse polari, là dove essa comunica con il mare. La frammentazione, infatti, comporta un aumento della superficie di contatto con l'aria e quindi un maggiore scambio termico che accelera la fusione. Il distacco di grandi frammenti di calotta dai suoi margini priva quest'ultima del freno naturale che le impedisce di continuare il suo scivolamento verso il mare. Infatti, la parte già a contatto con l'acqua sostiene come un pilastro la restante parte continentale.¹⁸ Una volta che le piattaforme marine iniziano a sciogliersi, i ghiacciai continentali, privati della "protezione" fornita dalla bordura di ghiacci marini, vanno incontro a una fusione più rapida: si innesca così un meccanismo di retroazione positiva impossibile da arrestare. Questo fenomeno è ancora più accentuato se lo strato roccioso su cui giace il ghiacciaio va non in direzione dell'oceano, ma verso la terra ferma (reverse-sloped). In questo caso la porzione basale del ghiacciaio si trova sotto il livello del mare correndo un maggior rischio di scioglimento, dovuto alle possibili infiltrazioni di acque oceaniche calde.

Tenendo conto dell'incremento termico prevedibile da oggi al 2050 è corretto ipotizzare un aumento del ritmo di fusione delle ca-

¹⁸ <https://ilbolive.unipd.it/it/news/ritiro-ghiacci-antartide-laumento-livello-mari>.

lotte polari. Con i dati dell'innalzamento medio del livello dei mari a partire dal 1992 al 2017 sopra analizzati è possibile calcolare la relativa tendenza nel tempo e fare delle previsioni di quanto si potrà innalzare il livello dei mari da ora alla fine del secolo o anche più in là (figura 5). Con i dati in possesso è possibile prevedere per la fine del secolo in corso un aumento complessivo di circa 73 mm. Mentre per lo scioglimento dell'intera coltre glaciale del pianeta (considerando un costante ritmo di scioglimento, in verità poco plausibile) dovremmo attendere fino all'anno 108.390 circa.

Sebbene il grafico di figura 5 ci mostri un andamento regolare nel tempo bisogna però tenere in considerazione il fatto che il fenomeno del disgelo non sembra guidato da una legge di proporzionalità diretta in funzione del tempo, quindi a velocità costante. Al contrario esso sembra avere tutte le caratteristiche di un processo in accelerazione. Ciò a causa di tutti quei fenomeni di retroazione che abbiamo velocemente esaminato. Si verifica in pratica una sorta di circolo vizioso (figura 6).

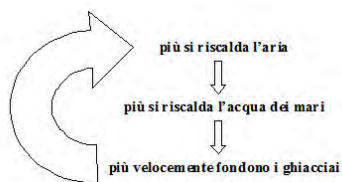


Fig. 6 - Circolo vizioso.

Se teniamo conto di ciò il tempo necessario per lo scioglimento totale delle calotte glaciali si potrebbe ridurre di molto. Ma i problemi nell'immediato non dipendono dallo scioglimento dell'intera coltre glaciale, che certamente stravolgerà la geografia mondiale in un tempo ancora lontano. Problemi molto seri giungeranno, in tempi a noi vicini o vicinissimi, già da un modesto scioglimento dei

ghiacci. Tali problemi non saranno correlati soltanto all'innalzamento del livello dei mari come conseguenza del disgelo e quindi non riguarderanno soltanto le aree abitate costiere ma coinvolgeranno nel complesso tutto il pianeta come conseguenza generale dei cambiamenti del clima, sempre più caratterizzato da fenomeni estremi capaci di disseminare morte e distruzione e in grado di creare gravi crisi economiche. Problematiche queste che già stiamo vivendo in ogni parte del mondo.

6 - Calcolo del volume d'acqua trattenuto dall'atmosfera

Con i dati in possesso, ipotizzando un valore medio di umidità relativa, è possibile calcolare l'umidità assoluta con riferimento ai valori termici medi degli anni 2020 e 2050. È possibile così fare un confronto delle quantità d'acqua trattenute dall'atmosfera sotto forma di vapore nei due anni di riferimento. Si consideri quindi la temperatura media dell'anno 2020 pari a 15,548 °C (14,8 + 0,748)¹⁹ e quella media prevista del 2050 pari a 15,96 °C (14,8 + 1,16).²⁰ Per questi due valori termici i rispettivi valori barici di saturazione espressi in Pascal sono: 1762 e 1814. Ipotizzando una umidità relativa²¹ i pari al 60% e ricordando la (4) avremo:

$$P_v = i * P_s = 60/100 * 1762 = 1057,2 \text{ (per } T = 15,548 \text{ °C)}$$

$$P_v = i * P_s = 60/100 * 1814 = 1088,4 \text{ (per } T = 15,96 \text{ °C)}$$

Valutando l'umidità assoluta per i due valori termici, attraverso un'apposita formula, e ponendo $P_i = 101300$ Pa si avrebbe, in riferimento ai due valori termici presi in considerazione, una differenza della stessa, esprimibile come quantità d'acqua in più per kg di aria, pari a: $\Delta K_g = 0,00434$ Kg di acqua (vapore) per Kg di aria.

Da questo valore tenendo conto dell'ampiezza della superficie terrestre e del valore della pressione atmosferica a livello del mare si può dedurre che l'acqua in più presente nell'atmosfera nel 2050 rispetto al 2020 sarà pari a $2,283 * 1016$ Kgv.²²

Se consideriamo il suo corrispondente volume come acqua liquida esso corrisponde a $2,283 * 1013$ m³. Circa 22834 Km³ d'acqua che potrebbero riempire un parallelepipedo quadro profondo 4 Km e con lato maggiore di 75,5 Km. Insomma, un bel tratto di mare!

Tale quantità d'acqua corrisponde a circa 5,7 volte il volume

19 Il valore 0,748 è stato ricavato dalla retta di regressione per l'anno 2020.

20 Il valore 1,16 è stato ricavato dalla retta di regressione per l'anno 2050.

21 Il valore di umidità relativa ipotizzato non è reale (troppo elevato) ma ci permette di fare un esempio di calcolo facendo emergere, peraltro, un paradosso numerico, come tra breve vedremo.

22 Kgv = Chilogrammi di vapore.

d'acqua ottenuta dalla fusione dei ghiacciai che si è verificata dal 1992 fino al 2011 (4019,31 Km³).

Questo volume d'acqua presente nell'aria compenserebbe quindi ampiamente gli 11,1 mm di innalzamento del livello dei mari causato dai 4019,31 Km³ liberati nel suddetto periodo.

Visto che nel 2050 è previsto un innalzamento medio (secondo il trend attuale) pari a 36,75 mm che corrisponderebbero ad un volume d'acqua da disgelo pari a: $36,75 / 11,1 * 4019,31 = 13307,2$ Km³ l'acqua trattenuta dall'atmosfera sarebbe maggiore di quella che andrebbe a finire in mare a causa del disgelo!

Sembra evidente che dobbiamo tenere conto di qualche altro fattore. Non possiamo pretendere che l'umidità relativa di tutta l'atmosfera sia uguale dappertutto! Le differenze termiche presenti da luogo a luogo, in base alla latitudine e all'altitudine, fanno sì che le masse d'aria a differente temperatura si mescolino permettendo all'umidità presente di condensarsi sotto forma di pioggia e sottrarsi in tal modo dall'aria stessa. Pertanto, l'umidità relativa media presa in considerazione va sicuramente abbassata. Nel nostro calcolo bisognerà quindi verificare quale potrebbe essere il valore reale medio planetario di i e di quanto esso si scosti realmente nei due periodi considerati (2020 e 2050). Non bisogna peraltro dimenticare che gli 11,1 mm di aumento del livello dei mari si sono verificati contestualmente all'aumento della temperatura dell'aria nel medesimo periodo di riferimento.

Comunque, la quantità d'acqua che è in grado di trattenere l'atmosfera è notevole. Se ammettiamo una presenza d'acqua nell'atmosfera pari a circa l'1% in peso dell'atmosfera stessa la sua massa ammonta a $5,26 * 10^{16}$ Kg. Una quantità pari a 2,3 volte il valore differenziale calcolato sopra ($2,283 * 10^{16}$ Kgv). Assumendo quindi un valore più basso dell'umidità relativa media dell'atmosfera ed ipotizzando tale valore costante nei due periodi presi in considerazione la stima verrebbe certamente ridimensionata. Ad esempio, rifacendo i calcoli con un valore di i del 45% la quantità di vapore in più trattenuta dall'atmosfera nel 2050 rispetto al 2020 si riduce a 765,5 Km³ (pari solo al 19% del volume d'acqua che ha determinato l'innalzamento del livello dei mari dal 1992 al 2011). Ma quale po-

trebbe essere un valore medio più probabile dell'umidità relativa del nostro pianeta?

Dai dati finora presentati non è difficile ricavarlo. Prendendo infatti come periodo di riferimento gli anni dal 1992 al 2011 ed assumendo che in quel periodo l'umidità relativa si sia mantenuta costante è possibile applicare una specifica formula in modo da ottenere per lo stesso periodo un valore differenziale dell'umidità assoluta (Δx) che corrisponda al volume d'acqua ottenuto dal disgelo delle coltri glaciali ($4019,31 \text{ Km}^3$). Tale equivalenza si basa sul principio che l'acqua presente nell'atmosfera è in equilibrio continuo con quella liquida presente in tutti i bacini idrici del mondo e questo vale anche per l'acqua derivante dal disgelo. Quindi affinché l'umidità relativa del periodo si mantenga costante è necessario che i $4019,31 \text{ Km}^3$ di acqua proveniente dal disgelo vengano costantemente scambiati dall'atmosfera in un ciclo continuo vapore/liquido andando a costituire l'incremento di umidità assoluta dell'aria nel periodo specificato. Pertanto, dell'acqua di disgelo che non può stare in forma di vapore nell'atmosfera si troverà in forma liquida nei mari contribuendo al loro innalzamento di livello. Tramutando quindi $4019,31 \text{ Km}^3$ in chilogrammi (prendendo come densità dell'acqua il valore di 1 g/cm^3) e dividendo tale valore ($4,01931 * 10^{15} \text{ Kgv}$) per la massa dell'atmosfera ($5,2611494 * 10^{18} \text{ Kga}$) si è ottenuto un Δx pari a: $0,00076339$. Da cui deriva, dopo un semplice calcolo, un valore dell'umidità relativa pari a $25,35\%$.

Il dato sembra ragionevole soprattutto se guardiamo all'atmosfera nel suo complesso, quindi, sia la bassa atmosfera, più ricca di umidità, che quella alta notoriamente più secca.

A questo punto ricalcolando il Δx per il periodo 2020 - 2050, tenendo conto del nuovo valore di umidità relativa appena trovato, il volume d'acqua aggiuntivo trattenuto sotto forma di vapore dall'atmosfera nel 2050 scende a $429,7 \text{ Km}^3$ (pari solo al $10,7\%$ del volume d'acqua che ha determinato l'innalzamento del livello dei mari dal 1992 al 2011). In tal caso i $36,75 \text{ mm}$ di innalzamento del livello del mare previsti per il 2050 verrebbero ridotti di pochissimo.²³ Va da

23 Di appena $1,19 \text{ mm}$ ($10,7\%$ di $11,1 \text{ mm}$).

sé però che l'attuale valore dell'umidità relativa media del pianeta sarà certamente cambiato e quello trovato per il periodo 1992 - 2011 può servire solo come dato orientativo per il calcolo dell'umidità assoluta dell'atmosfera nei periodi successivi.

Va poi ricordato che la progressiva riduzione delle superfici ghiacciate e la continua immissione di gas serra nell'atmosfera porteranno nel lungo periodo (decine o centinaia di anni) ad un sempre maggiore rialzo termico con un progressivo aumento dell'umidità assoluta dell'atmosfera. Essendo poi l'acqua sotto forma di vapore uno dei più importanti gas serra ciò determinerà un feed back positivo per l'innalzamento delle temperature medie. Più calda è l'aria più vapore essa conterrà ed ancora più calda essa diverrà per effetto serra. Quindi è difficile prevedere quanto l'ipotizzato aumento dell'umidità dell'aria possa contribuire a ridurre l'innalzamento del livello dei mari. Tuttavia, è ipotizzabile che variazioni significative nel tempo della temperatura dell'aria possano modificare lo stato igrometrico dell'atmosfera e ciò potrà contribuire, in una certa misura, a ridurre l'innalzamento del livello dei mari.

Tuttavia, il problema fondamentale in questo caso non è tanto il contenimento dell'innalzamento del livello dei mari quanto piuttosto gli effetti meteorologici dovuti alla maggior presenza di acqua sotto forma di vapore. Infatti, nel 2050 l'acqua da condensazione che si verrà a formare, nei numerosi eventi meteorologici, libererà una enorme quantità di energia sotto forma di calore latente di condensazione.²⁴ Solo a considerare l'eccedenza rispetto al 2020 la quantità di energia rilasciata sotto forma di calore latente di condensazione è enorme. Il suo valore è facilmente calcolabile:

$$4,297 * 10^{14} \text{ Kgv} = 2,387 * 10^{16} \text{ moli di acqua;}^{25}$$
$$2,387 * 10^{16} \text{ moli} * 40680 \text{ J/mol}^{26} = 9,71 * 10^{20} \text{ J} = 9,71 * 10^{17} \text{ KJ}$$

24 Calore emesso dalle molecole d'acqua durante il processo di condensazione.

25 $429,7 \text{ Km}^3 * 109 \text{ m}^3/\text{Km}^3 * 103\text{L}/\text{m}^3 = 4,297*10^{14} \text{ L}$.

$4,297*10^{14} \text{ L} * 1\text{Kg}/\text{L} = 4,297*10^{14} \text{ Kg}$.

26 Calore latente di evaporazione/condensazione dell'acqua.

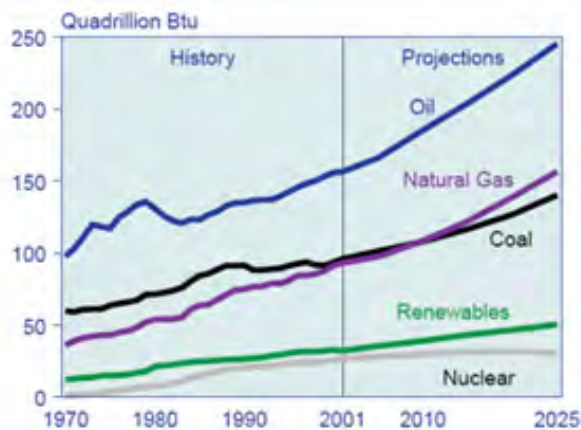


Fig. 7 – Consumi energetici mondiali.
(Fonte: International Energy Outlook – 2004).

L'International Energy Outlook²⁷ (figura 7) con i dati relativi al 2004 ha previsto, per il 2025, un consumo energetico complessivo pari a circa 625 quadrilioni di Btu/anno (British Thermal Unit)²⁸ corrispondenti a: $6,250 \cdot 10^{17} \text{ Btu} \cdot 1,055056 \text{ kJ/Btu} = 6,594 \cdot 10^{17} \text{ KJ}$.

Per il 2050 l'energia annua richiesta sarà certamente maggiore rispetto alla previsione per il 2025 ma certamente la sua entità sarà ancora dello stesso ordine di grandezza di quella messa in gioco costantemente dai processi di evaporazione e condensazione dell'intera atmosfera correlabili esclusivamente all'incremento termico subito dalla stessa. Questi numeri ci danno una più chiara percezione della problematica ambientale. Tutto il calore che immettiamo nell'ambiente verrà utilizzato dallo stesso per generare eventi climatici spesso estremi. Il messaggio sembra chiaro: non immettiamo calore supplementare in atmosfera e gli eventi estremi si ridurranno!

Sappiamo bene infatti che le quantità eccessive di calore trattenuto dall'atmosfera possono dare origine, localmente, a variazioni

²⁷ https://it.wikipedia.org/wiki/Consumo_di_energia_nel_mondo,
https://www.energieverbraucher.de/files_db/dl_mg_1084170436.pdf
e <http://www.et.byu.edu/~tom/classes/733/Biomass/2004-outlook-eia.pdf>.

²⁸ <https://it.wikipedia.org/wiki/Quadrilione> e https://it.wikipedia.org/wiki/British_thermal_unit

bariche di notevole intensità in grado di generare una fenomenologia meteorologica estrema (alluvioni, uragani, siccità prolungata, ecc.) che nel corso degli ultimi decenni è stata sempre più frequente ed in grado di squilibrare gravemente l'intero ecosistema globale.

Tutto questo, insieme a tutte le sostanze inquinanti sversate nell'ambiente, compromette sempre più le condizioni di vita di tantissime specie animali e vegetali influenzando poi pesantemente sull'economia globale tramite la penalizzazione del settore agricolo e quindi, in ultima analisi, rende difficili le condizioni di esistenza della nostra stessa specie.

7- Conclusioni

Dai dati sopra discussi si evidenzia chiaramente che l'aumento del livello medio dei mari (36,75 mm) previsto per il 2050 in base al trend degli ultimi anni anche se può essere ridotto in qualche misura dalla maggiore capacità idrica dell'atmosfera dovuta all'aumento termico previsto rimane un fenomeno, a lungo andare, preoccupante. Non si può tuttavia non far notare che il disgelo non produce un aumento del volume complessivo dei mari così veloce come spesso erroneamente immaginato. Una media di circa 34 mm circa fino al 2050 non rappresenta un grave pericolo per le nostre aree costiere, fino a quella data. Se a questa considerazione si aggiunge l'azione correttiva di alcuni fattori fisici quali gli assestamenti isostatici della crosta terrestre, le imprevedibili dinamiche sismiche, la già ricordata azione di contenimento operata dall'atmosfera, possiamo concludere che nel medio periodo non esiste rischio di imponenti trasgressioni marine. Il pericolo reale è rappresentato dai violenti fenomeni meteorologici legati all'abbondanza di vapore nell'atmosfera (alluvioni, tornado, uragani, gravi siccità, ecc.). Essi rappresentano un potente fattore di rischio difficilmente controllabile e prevedibile, in grado di determinare ingenti danni in termini economici e, purtroppo, di vite umane. La prevenzione a breve termine di siffatte sciagure climatiche è molto difficile o pressoché impossibile data l'entità dei fenomeni. Viene richiesta una programmazione di interventi strutturali ter-

ritoriali impostata su nuovi criteri di progettazione tecnica. Il vero problema, dunque, sarà quello di realizzare delle strategie operative per difenderci dalle sempre più frequenti “violenze climatiche” preoccupandoci un po’ meno delle superfici costiere potenzialmente a rischio di invasione marina. È davvero necessaria una vera transizione ecologica a livello mondiale. Ciò comporterà un impegno enorme da parte di tutta l’umanità, un reale cambiamento di mentalità e di stili di vita. Risparmio, riciclo e nuove tecnologie eco-compatibili dovranno costituire d’ora in poi il cardine di tutte le azioni umane!

Bibliografia

SILVESTRONI, P. (1980). *Fondamenti di Chimica*. Roma: Veschi.

ALLISON I., BINDOFF N., BINDSCHADLER R., COX P., DE NOBLET-DUCOUDRE N., ENGLAND, M., et. al. (2009). *The Copenhagen Diagnosis, 2009: Updating the World on the Latest Climate*. Retrieved September 19, 2021, from https://www.crc.unsw.edu.au/sites/default/files/Copenhagen_Diagnosis_FIGURES.pdf

ArteScienza

Rivista telematica semestrale

<http://www.assculturale-arte-scienza.it>

Direttore Responsabile: Luca Nicotra

Direttori onorari: Giordano Bruno, Pietro Nastasi

Redazione: Angela Ales Bello, Gian Italo Bischi, Luigi Campanella, Antonio Castellani, Isabella De Paz, Maurizio Lopa

Registrazione n.194/2014 del 23 luglio 2014 Tribunale di Roma - ISSN on-line 2385-1961