

Se le calotte polari si sciogliono ...

*Quali conseguenze climatiche dobbiamo
attenderci?*

Giuseppe D'Angelo*

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



DOI : 10.53159 /PdM(IV).v5n1.109

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 dei mari.*

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, sea level rise.*

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 volano 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 aumentata (https://it.wikipedia.org/wiki/Riscaldamento_globale, <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/200907>, <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202105>).

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 eccellenti. 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'attendibile 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. Nell'immagine sotto riportata (fonte: Copenhagen Diagnosis

2009) ¹ si riportano i dati forniti da due importanti istituzioni in materia di climatologia (Hadley Center e NASA/GISS).

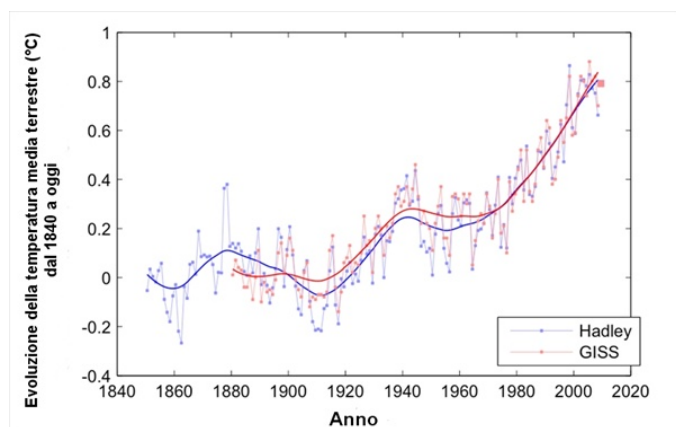


Grafico 1

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), consultabile al seguente link:

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

¹ Confronta con [2]

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. La tabella che segue riporta il semplice calcolo effettuato su un foglio Excel.

A	B	C	D	E	F	G	H
Continente/regione	Superficie complessiva km ²	Superficie ricoperta dalle acque (71%) km ²	Superficie ricoperta da ghiaccio permanentemente km ²	Spessore medio coltre di ghiaccio km	Volume medio coltre glaciali permanente (km ³) (d6*66)	Volume medio di acqua da fusione (d6*0,9)	Eventuale variazione di livello dei mari (m) (66/66)*1000
Antartide	14.000.000		12.300.000	1,6			
Groenlandia	2.166.086		1819512,24	2,3			
Terra	510.000.000	362100000	14.119.512	1,95	27.533.049	24779743,98	68,4334

Tab.1 – (dati tratti da: <http://it.wikipedia.org/wiki/Groenlandia>, <http://it.wikipedia.org/wiki/Antartide> e [Terra - Wikipedia](#))

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 1979, ² tuttavia questi dati non hanno

² 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

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.³ 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 ([https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/S
pace_for_our_climate/Clearest_evidence_yet_of_polar_ice_lo
sses](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Space_for_our_climate/Clearest_evidence_yet_of_polar_ice_losses)).

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 isostatici⁴ possono determinare variazioni anche consistenti. Infatti, il terreno che era precedentemente compresso dai ghiacci, può risollevarsi 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

³ 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 $\leq 0^\circ\text{C}$.

⁴ Movimenti verticali di innalzamento ed abbassamento di corpi densi (masse rocciose regionali, calotte glaciali, sedimenti, ecc.) che rispondono al principio archimedeo.

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 (come quello sopra riportato) 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.⁵ Si tratta dunque di un aumento di

⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/Ice_Sheet_Mass_Balance_Inter-comparison_Exercise; <https://data.bas.ac.uk/full-record.php?id=GB/NERC/BAS/PDC/01477>.

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 Km³.⁶ Tale volume corrisponde poi ad una percentuale di acqua derivante da fusione di appena lo 0,0162% sul totale ricavabile dalla attuale estensione delle coltri glaciali.

	A	B	C
1	VOLUME (Km3) ACQUA DI FUSIONE DAL 1992 AL 2011	VOLUME MEDIO DI ACQUA DA FUSIONE DEI GHIACCIAI POLARI (Km3)	% DI ACQUA DA FUSIONE SUL TOTALE
2			
3	4019,31	24779743,98	0,0162

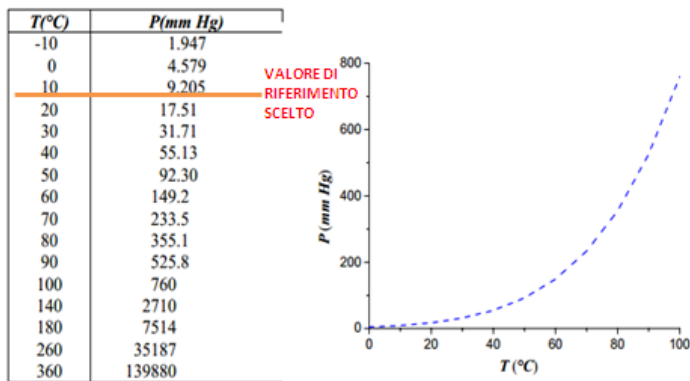
Tab.2

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 ($6_{\text{anni}}/19_{\text{anni}} = 0,316$).

⁶ Il valore si ottiene moltiplicando la superficie riportata in colonna C6 della tab. 1 per 0,0000111 Km (11,1 mm)

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. Sappiamo infatti che la pressione di vapore di un liquido puro dipende solo dalla temperatura (<https://www.chimica-online.it/download/equazione-di-clapeyron.htm>), 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 seguente:



Tab.3

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 gas ossigeno ed azoto ($\text{O}_2 \cong 23\%$ e $\text{N}_2 \cong 76\%$ 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 ed 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 e cioè, nel complesso, dell'aria umida può essere descritto con buona approssimazione mediante l'equazione di stato dei gas perfetti.⁷ In particolare, indicando con P_t la complessiva pressione della miscela aria-vapore e con n_t il totale numero di moli⁸ presenti nel volume V , si può scrivere:

⁷ 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 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.

⁸La 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

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

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:

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

È anche possibile esprimere i nella forma:

$$i = P_v / P_s \quad ^9$$

Nella seguente tabella sono riportati i valori di $P_s = f(T)$ espressi in *Pa*

t [C°]	t + 0,0	t + 0,1	t + 0,2	t + 0,3	t + 0,4	t + 0,5	t + 0,6	t + 0,7	t + 0,8	t + 0,9
24	2991	3009	3028	3046	3065	3083	3102	3121	3140	3159
23	2814	2831	2849	2866	2884	2901	2919	2937	2955	2973
22	2646	2663	2679	2696	2712	2729	2746	2763	2780	2797

pari al suo peso atomico (se sostanza semplice, cioè un elemento) o molecolare (se si tratta di un composto).

⁹ 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:

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

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:

$$P_v = \rho_v \cdot R_v T$$

$$P_s = \rho_s \cdot R_s T$$

per cui risulta anche:

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

21	2488	2503	2519	2534	2550	2566	2582	2598	2614	2630
20	2338	2352	2367	2382	2397	2412	2427	2442	2457	2472
19	2196	2209	2223	2237	2251	2266	2280	2294	2309	2323
18	2061	2074	2087	2101	2114	2127	2111	2154	2168	2182
17	1934	1947	1959	1972	1984	1997	2010	2022	2035	2048
16	1814	1826	1838	1850	1861	1873	1885	1898	1910	1922
15	1701	1712	1723	1734	1746	1757	1768	1780	1791	1803
14	1594	1605	1615	1626	1636	1647	1658	1668	1679	1690
13	1393	1503	1513	1523	1533	1543	1553	1563	1574	1584
12	1398	1408	1417	1426	1436	1445	1455	1464	1474	1484
11	1309	1317	1326	1335	1344	1353	1362	1371	1380	1389
10	1224	1232	1241	1249	1257	1266	1274	1283	1291	1300
9	1145	1152	1160	1168	1176	1184	1192	1200	1208	1216
8	1070	1077	1084	1092	1099	1107	1114	1122	1129	1137
7	999	1006	1013	1020	1027	1034	1041	1048	1055	1062
6	933	939	946	952	959	965	972	979	986	992
5	871	877	883	889	895	901	907	914	920	926
4	812	818	823	829	835	841	847	853	858	864
3	757	762	768	773	779	784	790	795	801	806
2	705	710	715	720	726	731	736	741	746	752
1	657	662	666	671	676	681	686	690	695	700
0	611	616	620	624	629	634	638	643	647	652

Tab. 4 – Densità di vapore saturo in relazione alla temperatura. ¹⁰

L'Umidità Assoluta è il rapporto tra la densità del vapore ρ_v e la densità dell'aria secca ρ_a :

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

L'umidità assoluta esprime il rapporto tra la massa del vapore m_v presente in un qualunque volume V d'aria e la massa di aria secca m_a presente nello stesso volume.

In genere per evidenziarne meglio il suo significato fisico si esprime in kg di vapore (kg_v) per kg di aria secca (kg_a) e cioè con le dimensioni [kg_v / kg_a].

Il legame tra x e la i può essere facilmente ottenuto. Risulta infatti: ¹¹

¹⁰ Cfr. Con:

<https://architettura.unige.it/did/12/architettura/terzo0708/fisicatecnica/capitoli/cap 5.pdf>

¹¹ Sulla base dell'equazione di stato dei gas perfetti può porsi:

$$\begin{aligned}
 X &= \frac{\delta_v}{\delta_a} = \frac{P_v R_a T}{P_a R_v T} = \frac{P_v P M_v}{P_a P M_a} = \frac{P_v}{(P_t - P_v)} * \frac{18}{29} = \\
 &= \frac{i * P_s}{(P_t - i * P_s)} * 0,622 \left[\frac{Kg_v}{Kg} \right]
 \end{aligned} \tag{6}$$

dove si è posto:

$$P_a = P_t - P_v$$

Da quanto esposto si intuisce che, 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

$$P_a = \rho_a \cdot R_a T$$

$$P_v = \rho_v R_v T$$

Si ricorda che la massa molecolare e la costante dei gas "aria secca" e "vapor d'acqua" sono rispettivamente:

$$\text{ARIA SECCA} \qquad \text{VAPOR D'ACQUA}$$

$$P M_a \cong 29 \qquad P M_v \cong 18 \text{ [kg/kmole]}$$

$$R_a \cong 0.287 \qquad R_v \cong 0.461 \text{ [kJ/kgK]}$$

Poiché

$$R_a / R_v = 0.287 / 0.461 = 0,622 \cong 18 / 29$$

si può quindi scrivere l'equazione (6)

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 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 dalla tabella 5 (in particolare gli scostamenti termici annuali non livellati)¹³ ed ipotizzando un trend futuro stabile, è stato possibile determinare la retta di regressione () dei valori della temperatura a partire dal 1965 (anno dal quale si è osservato un incremento più intenso e costante).¹⁴

¹² Il calore latente di ebollizione (vaporizzazione, a 100 °C) è $2,26 * 10^6$ J/Kg. Un Kg d'acqua corrisponde a 55,555 moli. Pertanto, il calore latente per una mole corrisponde a 40680 J

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

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

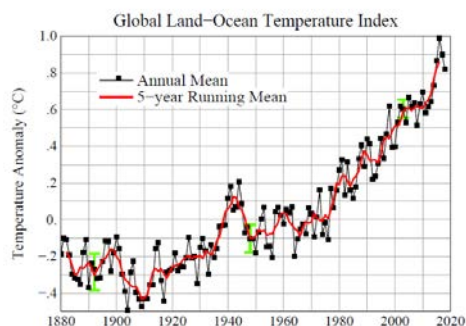


Grafico 2 – Andamento degli scostamenti termici fino al 2020

I valori riportati in tabella 5 rappresentano gli scarti delle temperature riferiti ad un valore medio di un periodo che non è stato specificato.

Con i dati relativi all'andamento termico medio mondiale estrapolati dalla Tab. 5 a partire dal 1965 è stato possibile ricavare l'equazione della relativa retta di regressione.

Tali dati sono stati poi utilizzati per realizzare il grafico Excel di seguito riportato che riproduce l'andamento degli stessi. Nel grafico 3 a viene tracciata anche la 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 °C 15 è pos-

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

sibile ipotizzare per il 2050 una temperatura media di circa 16 °C (14,8 °C + 1,2 °C).

Land-Ocean Temperature Index (C)

Year	No_Smoothing	Lowess	Year	No_Smoothing	Lowess	Year	No_Smoothing	Lowess	Year	No_Smoothing	Lowess
1965	-0,11	-0,05	1979	0,16	0,16	1993	0,23	0,33	2007	0,66	0,63
1966	-0,06	-0,06	1980	0,26	0,2	1994	0,31	0,34	2008	0,54	0,64
1967	-0,02	-0,05	1981	0,32	0,21	1995	0,45	0,37	2009	0,66	0,64
1968	-0,08	-0,03	1982	0,14	0,21	1996	0,33	0,4	2010	0,72	0,65
1969	0,05	-0,02	1983	0,31	0,21	1997	0,46	0,42	2011	0,61	0,66
1970	0,03	0	1984	0,15	0,21	1998	0,61	0,44	2012	0,64	0,69
1971	-0,08	0	1985	0,12	0,22	1999	0,33	0,47	2013	0,68	0,74
1972	0,01	0	1986	0,18	0,24	2000	0,39	0,5	2014	0,74	0,78
1973	0,16	0	1987	0,32	0,27	2001	0,54	0,52	2015	0,9	0,83
1974	-0,07	0	1988	0,38	0,3	2002	0,63	0,55	2016	1,01	0,87
1975	-0,01	0,02	1989	0,27	0,33	2003	0,62	0,59	2017	0,92	0,91
1976	-0,1	0,04	1990	0,45	0,33	2004	0,54	0,61	2018	0,85	0,95
1977	0,18	0,07	1991	0,4	0,32	2005	0,68	0,62	2019	0,98	0,98
1978	0,07	0,12	1992	0,22	0,33	2006	0,64	0,63	2020	1,02	1,01

Tab.5 – Scostamenti termici a partire dal 1965 ¹⁶

Anomalia media della temperatura atmosferica a terra e della superficie dei mari, così come ricostruita dall'IPCC, negli ultimi 55 anni (tabella) e negli ultimi 140 anni (grafico)

¹⁶ Confronta con: https://en.wikipedia.org/wiki/Local_regression. I dati in grassetto sono gli scostamenti termici tali e quali senza smussamento statistico (Smoothing). LOWESS (locally weighted scatterplot smoothing) è un metodo di regressione non parametrica spesso utilizzato in statistica.

Sebbene si tratti di un dato di per sé non eccessivamente allarmante, tuttavia, presenta le caratteristiche di un andamento costante 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 3. 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 retroazione;¹⁷ 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 correlate 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

¹⁷ <https://ilbolive.unipd.it/it/news/ritiro-ghiacci-antartide-laumento-livello-mari>.

fenomeno dell'albedo,¹⁸ cioè della quantità di luce riflessa dalle superfici bianche dei ghiacciai, come conseguenza dello scioglimento degli stessi.

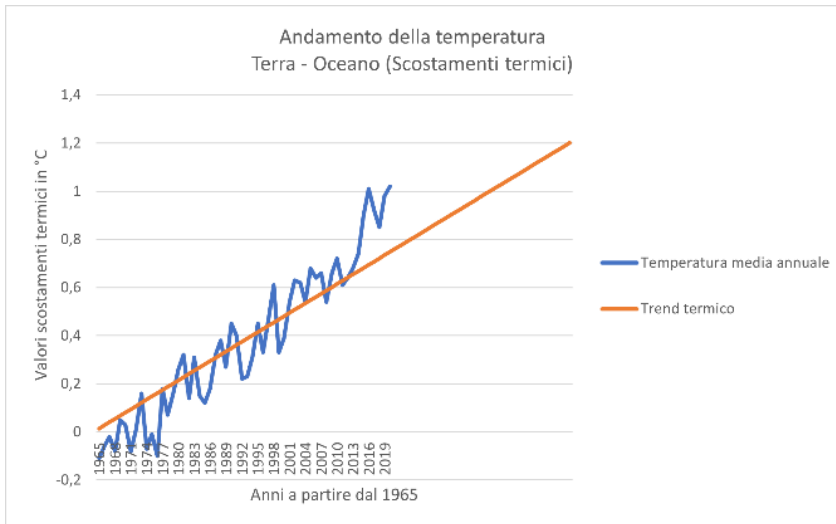
Infatti, la minore energia solare riemessa comporta un maggiore riscaldamento ambientale che determina una riduzione ulteriore della superficie della coltre glaciale, cioè un aumento del disgelo. Un esempio di feedback positivo è dato invece dalla relazione tra aumento della temperatura ed aumento del 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 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 ¹⁹.

Una volta che le piattaforme marine iniziano a sciogliersi, i ghiacciai continentali, privati della "protezione" fornita dalla

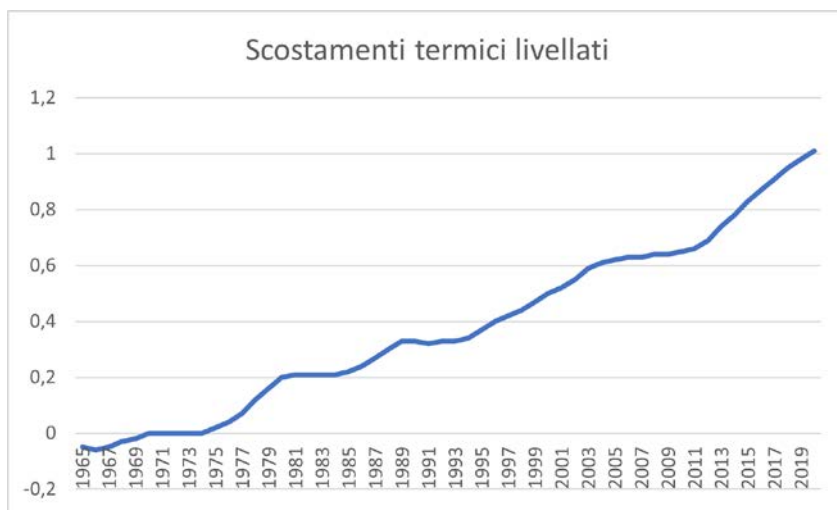
¹⁸ È la frazione di luce riflessa da un oggetto o da una superficie rispetto a quella che vi incide. Questo termine viene spesso utilizzato per indicare la riflettività dei corpi celesti che non brillano di luce propria, come pianeti e satelliti, ma anche in climatologia

¹⁹ Confronta con <https://ilbolive.unipd.it/it/news/ritiro-ghiacciai-antartide-laumento-livello-mari>

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.



a)



b)

Grafico 3 – Andamento degli scostamenti termici dal 1965 al 2020 secondo i valori di tab. 5

Tenendo conto dell'incremento termico prevedibile da oggi al 2050 è corretto ipotizzare un aumento del ritmo di fusione delle calotte 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. In tabella 6 la retta di regressione ci fornisce (nella terzultima colonna) i valori in mm di innalzamento del livello dei mari nel tempo. 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 4 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: più si riscalda l'aria → più si riscalda l'acqua dei mari → più velocemente fondono i ghiacciai → più si riscalda l'aria. 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.

Anno	Ind. (Xi)	Livello Medio asque (Yi)	Xi*Yi	Xi^2	\bar{X}	\bar{Y}	Codex. (Xi*Yi - 56* \bar{X} * \bar{Y})	Dev. (Xi^2 - 56* \bar{X} ^2)	bl = Codev./Dev.	$b0 = \bar{y} - bl * \bar{x}$	Y = bl*X + b0	Ind. (Xi)	Anno
1992	0	0	0	0	0,772	9,6333 53	-17,2239376	-1,380298944	12,16928027	0,238649	0,238648963	0	1992
2011	1	11,1	11,1	1			-6,1239376	-0,380298944			12,40792924	1	2011
2017	1,316	17,8	23,4248	1,731856			6,2008624	0,351557056			16,2534218	1,316	2017
		Totale	34,5248	2,731856		Σ	-17,1470128	-1,409040832			24,57720951	2	2030
	0 = anno 1992										36,74648978	3	2049
	1 = 19 anni dal 1992										48,91577005	4	2068
	1,316 = 25 anni dal 1992										61,08505033	5	2087
											73,2543306	6	2106
											85,42361087	7	2125
											170,6085728	14	2258
											340,9784966	28	2524
											681,7183442	56	3056
											1363,198039	112	4120
											2726,15743	224	6248
											5452,076211	448	10504
											6827,204882	561	12651
											10903,91377	896	19016
											21807,5889	1792	36040
											68148,20817	5600	108392

Tab. 6 – Il periodo 1992 – 2011 è stato posto come periodo unitario quindi in colonna B si passa da 0 a 1. Il periodo dal 2011 al 2017 risulta una frazione di periodo unitario.



Grafico 4 – Innalzamento medio del livello dei mari previsto per il secolo in corso

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

Con i dati in possesso e quelli della *tabella 4* ipotizzando un valore medio di umidità relativa è possibile calcolare l'umidità assoluta con riferimento ai valori termici medi dell'anno 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 $15,548\text{ °C}$ ($14,8 + 0,748$)²⁰ e quella media prevista del 2050 pari a $15,96\text{ °C}$ ($14,8 + 1,16$).²¹ Per questi due valori termici la *tabella 4* ci fornisce i rispettivi valori barici di saturazione espressi in Pascal: 1762 e 1814.

²⁰ Il valore 0,748 è stato ricavato dalla retta di regressione per l'anno 2020

²¹ Il valore 1,16 è stato ricavato dalla retta di regressione per l'anno 2050

Adesso ipotizzando una umidità relativa i pari al 60%²²e ricordando la (4) avremo:

per $T = 15,548$ °C

$$Pv = i * Ps = 60/100 * 1762 = 1057,2$$

per $T = 15,96$

$$Pv = i * Ps = 60/100 * 1814 = 1088,4.$$

Per valutare l'umidità assoluta si può utilizzare la (6) ponendo $Pt = 101300$ Pa:

per $T = 15,548$ °C

$$x = 0,622 * Pv/Pa = 0,622 * Pv/(Pt - Pv) = 0,622 * 1057,2/(101300-1057,2) = 0,00656 \text{ (Kgv/Kga)};$$

per $T = 15,96$

$$x = 0,622 * Pv/Pa = 0,622 * Pv/(Pt - Pv) = 0,622 * 1088,4/(101300-1088,4) = 0,0109 \text{ (Kgv/Kga)}$$

Si avrebbe quindi una differenza esprimibile come quantità d'acqua in più per kg di aria pari a:

$$\Delta Kg = 0,0109 - 0,00656 = 0,00434 \text{ Kg di acqua (vapore) per Kg di aria}$$

Essendo la superficie terrestre pari a: $5,094953216 \times 10^{14}$ m² e tenuto conto che $1 \text{ atm} = 101300 \text{ Pa} = 101300 \text{ N/m}^2$ il peso di tutta l'atmosfera risulta essere pari a:

$$101300 \text{ N/m}^2 * 5,094953216 \times 10^{14} \text{ m}^2 = 5,1611876 \times 10^{19} \text{ N.}$$

Tenuto conto, infine, che 1 Kg massa sulla superficie terrestre corrisponde a $9,81 \text{ N}$ (Kgp) la massa dell'atmosfera sarà:

$$5,1611876 \times 10^{19} / 9,81 = 5,2611494 * 10^{18} \text{ Kg}$$

²² 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.

Quindi l'acqua in più presente nell'atmosfera nel 2050 rispetto ad oggi sarà:

$$0,00434 \text{ Kgv/Kga} * 5,2611494 * 10^{18} \text{ Kga} = 2,283 * 10^{16} \text{ Kgv.}$$

Se consideriamo il suo corrispondente volume come acqua liquida esso corrisponde a $2,283 * 10^{13} \text{ m}^3$. Circa 22834 Km^3 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 d'acqua ottenuta dalla fusione dei ghiacciai che si è verificata dal 1992 fino al 2011 ($4019,31 \text{ Km}^3$).

Questo volume d'acqua presente nell'aria compenserebbe quindi ampiamente gli 11,1 mm di innalzamento del livello dei mari causato dai $4019,31 \text{ Km}^3$ liberati nel suddetto periodo.

Visto che nel 2050 è previsto un innalzamento medio (secondo il trend attuale) pari a 36,75 mm (vedi tabella 7) che corrisponderebbero ad un volume d'acqua da disgelo pari a: $36,75 / 11,1 * 4019,31 = 13307,2 \text{ Km}^3$ 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 $765,5 \text{ Km}^3$ (pari solo al 19% del volume d'acqua che ha determinato l'innalzamento del livello dei mari dal 1992 al 2011). Ma quale potrebbe 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 la (6) in modo specifico 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 Km³ 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, l'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 Km³ in chilogrammi (prendendo come densità dell'acqua il valore di 1 g/cm³) e dividendo tale valore (4,01931 * 10¹⁵ Kgv) per la massa dell'atmosfera (5,2611494 * 10¹⁸ Kga) si è ottenuto un Δx pari a: 0,00076339. Ed utilizzando ancora la (6) si è ottenuto un valore dell'umidità relativa pari a 25,35.²³

²³ È stata risolta la seguente uguaglianza basata sulla (6):

$$\left[0,622 * \frac{\left(\frac{x}{100} + Ps_2\right)}{101300 - \left(\frac{x}{100} + Ps_2\right)} \right] - \left[0,622 * \frac{\left(\frac{x}{100} + Ps_1\right)}{101300 - \left(\frac{x}{100} + Ps_1\right)} \right] = 0,00076339 \quad (7)$$

Dove l'incognita x rappresenta l'umidità relativa del periodo mentre Ps₂ e Ps₁ sono i valori ricavati dalla tabella 4 della pressione di saturazione degli anni 2011 e 1992, alle corrispondenti temperature (*). L'equazione (7) è un'equazione di secondo grado con due radici reali delle quali va presa solo quella che verifica l'uguaglianza. Nel nostro caso si è ottenuto un valore di x, cioè dell'umidità relativa espressa in percentuale, pari a 25,35.

(*) Per il 1992 lo scostamento termico secondo la tabella 5 è di 0,22 °C, quindi la temperatura da considerare è 14,8 + 0,22 = 15,02 °C. Per il 2011 lo scostamento termico era invece di 0,61 °C quindi la temperatura da considerare è di 14,8 + 0,61 = 15,41 °C. I valori di Ps diventano così: 17461 per il 2011 e 17012 per il 1992.

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 Km³ (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 mm di innalzamento del livello del mare previsti per il 2050 verrebbero ridotti di pochissimo.²⁴ Va da 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

²⁴ Di appena 1,19 mm (10,7 % di 11,1 mm).

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.²⁵ 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 facile calcolarlo:

$$4,297 * 10^{14} \text{ Kgv} = 2,387 * 10^{16} \text{ moli di acqua};$$

$$2,387 * 10^{16} \text{ moli} * 40680 \text{ J/mol}^{26} = 9,71 * 10^{20} \text{ J} = 9,71 * 10^{17} \text{ KJ}$$

L'International Energy Outlook ²⁷ (vedi il seguente grafico) 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: $6,250 * 10^{17} \text{ Btu} * 1,055056 \text{ kJ/Btu} = 6,594 * 10^{17} \text{ KJ}$.

²⁵ Calore emesso dalle molecole d'acqua durante il processo di condensazione.

²⁶ Calore latente di evaporazione/condensazione dell'acqua

²⁷ Confronta con

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 Confronta con https://it.wikipedia.org/wiki/Quadrilione_e
https://it.wikipedia.org/wiki/British_thermal_unit

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 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.

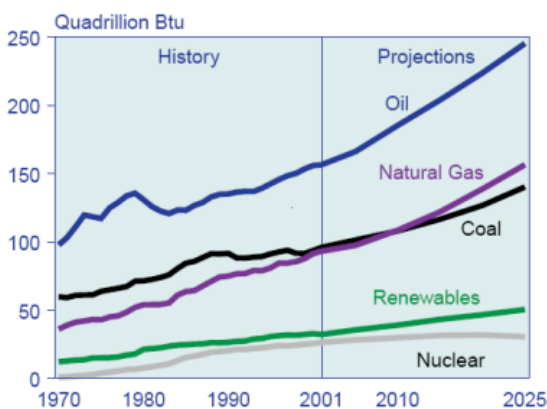


Grafico 5 – Consumi energetici mondiali. (Fonte: International Energy Outlook – 2004)

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 territoriali 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 il cardine di tutte le azioni umane presenti e future!

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.ccrcc.unsw.edu.au/sites/default/files/Copenhagen_Diagnosis_FIGURES.pdf