

# Astronomia, mutamenti climatici ed evoluzione delle civiltà

Elio Antonello

*INAF-Osservatorio Astronomico di Brera*

*elio.antonello@brera.inaf.it*

**Abstract.** There is increasing evidence that abrupt climate changes were responsible for the collapse and/or reorganization of ancient civilizations. In the present paper, we summarize the results of the studies of paleoclimatology and archaeology regarding some of those changes, and mention the discussions about the possible relation of such events with astronomical and astrophysical phenomena. It is very probable that similar climate changes will affect the Earth also in the future, so it would be worth to get a better understanding of the mechanisms behind such events.

## 1. Introduzione

E' assodata l'esistenza di un legame tra la variazione di parametri orbitali della Terra e l'andamento a lungo periodo del clima (*orbital forcing*). Diversi antropologi legano a queste oscillazioni climatiche anche l'adattamento evolutivo degli ominini negli ultimi milioni di anni, con l'estinzione e l'emergere di specie, fino ad arrivare al genere *Homo*, come abbiamo ricordato in un lavoro recente (Antonello 2016). In precedenza avevamo inoltre ricordato il legame tra astronomia, clima ed evoluzione della società umana, e avevamo concluso che per capire la nostra stessa storia non si può fare a meno dell'astronomia (Antonello 2012; Antonello 2013). Tuttavia, se gli effetti climatici dell'*orbital forcing* a lungo periodo possono essere invocati per giustificare l'emergenza dell'*Homo sapiens* (e i suoi caratteri sociali), e anche il complesso passaggio dalla fase della civiltà dei cacciatori-raccoglitori a quella agricola, i possibili effetti astronomici sul clima a più breve periodo, e quindi sull'evoluzione delle singole civiltà agricole, sono ancora argomento di discussione. Le variazioni climatiche comunque sono state prese in considerazione (un po' alla volta) da vari archeologi come un fattore importante nel collasso e/o riorganizzazione delle civiltà, questo almeno nei casi più acclarati (p.es.: Liverani 2011, p. 251). Cercheremo quindi di riassumere i risultati degli studi di preistoria e storia finalizzati a una comprensione delle fasi di crisi attraversate da varie civiltà del passato, e di fare il punto sulle discussioni in corso sul possibile legame tra parametri astronomico-astrofisici e

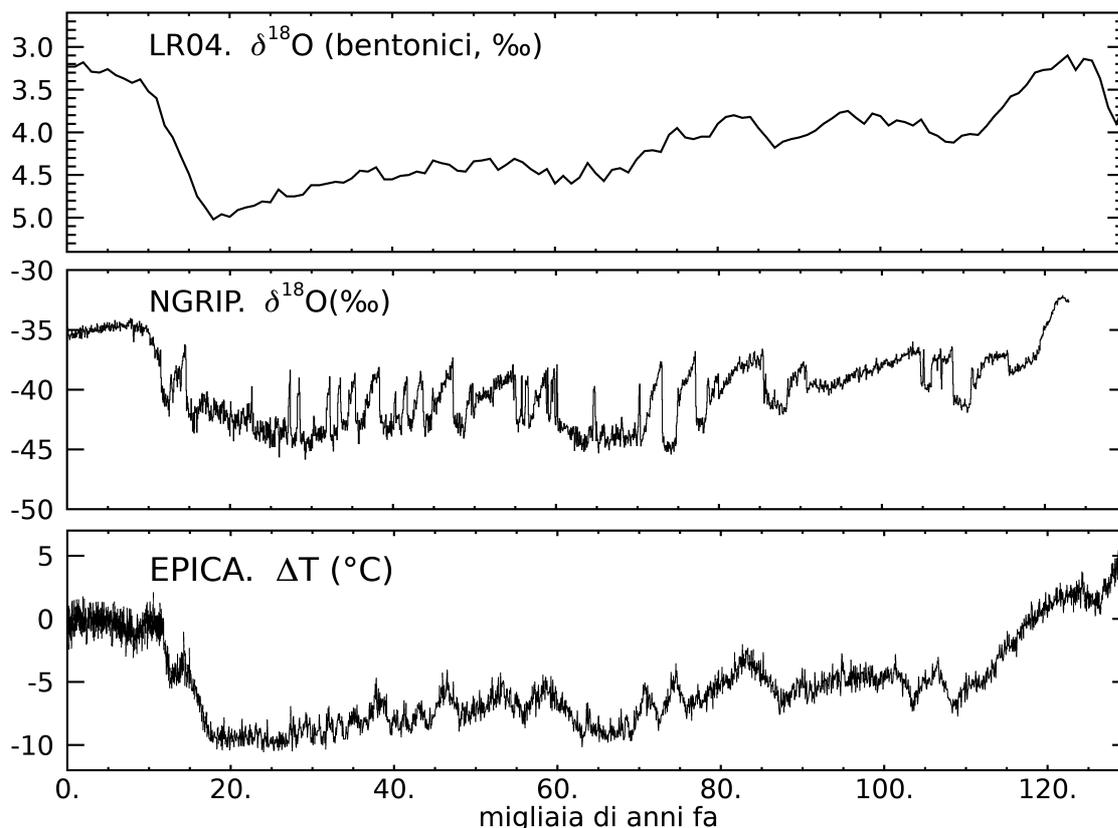
l'andamento del clima responsabile (almeno in parte, se non in tutto) di tali crisi. Nel presente lavoro ci limiteremo, per ragioni di spazio, a trattare dell'evoluzione dal Paleolitico fino al terzo millennio avanti Cristo, circa 5000 anni fa. In un altro lavoro tratteremo degli impatti del clima in epoca successiva fino ad oggi.

E' opportuno ricordare ancora una volta come, allorché si cerca di riassumere in poche pagine la realtà spaziale e temporale estremamente complessa del clima, dedotta dagli innumerevoli indicatori climatici, e di correlarla con i risultati degli scavi archeologici, il rischio che si corre è di essere superficiali o semplicisti, e di tendere a privilegiare eventuali preconcetti.

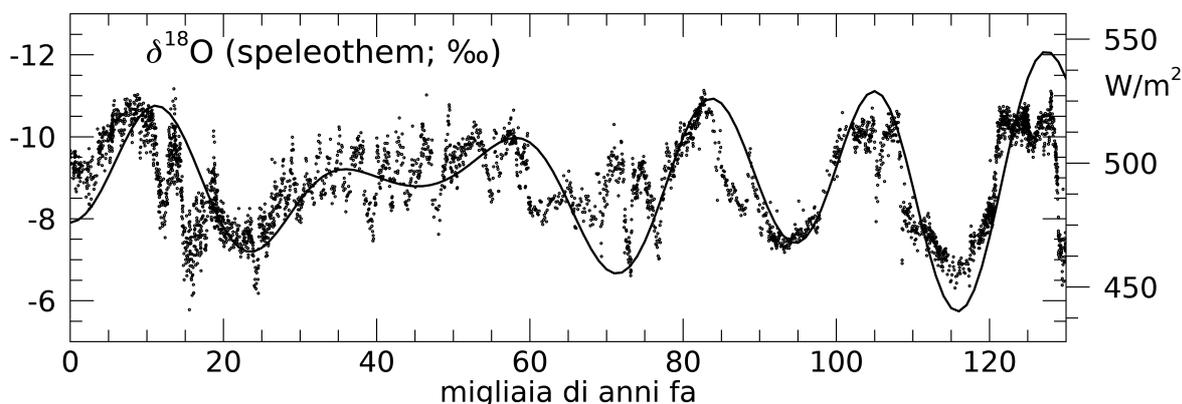
## **2. Indicazioni climatiche da stratigrafia e *proxies***

Negli ultimi decenni, dalla stratigrafia geologica e dei paleosuoli, dallo studio dei carotaggi di ghiacci e del fondo marino, delle stalagmiti, ecc., si è ricavata una descrizione coerente dell'andamento del paleoclima negli ultimi milioni di anni, per quanto riguarda temperatura e umidità o aridità, e, in base alle periodicità rilevate, si è arrivati a confermare l'esistenza dell'*orbital forcing*. In questa Sezione riassumiamo i dati relativi all'ultimo ciclo glaciale, compreso tra l'interglaciale (Eemiano) di circa 130 ka (ka = migliaia di anni) fa, e l'attuale interglaciale, Olocene, iniziato circa 11700 anni fa. La Figura 1 rappresenta l'andamento climatico (essenzialmente, ma non solo, la temperatura media) rilevato nei ghiacci e negli oceani, mentre la Figura 2 rappresenta l'andamento del clima monsonico (essenzialmente l'umidità/aridità), discusso nel precedente lavoro (Antonello 2016). La fase glaciale è stata segnata da episodi di freddo (stadiali) e di caldo (interstadiali), dell'ordine del migliaio di anni, chiamati eventi Dansgaard-Oeschger (DO.e.), con andamento quasi periodico; sono particolarmente evidenti nell'emisfero nord, essendo stati rilevati nei ghiacci della Groenlandia (Figura 1). Alcuni dei DO.e. risultano approssimativamente coincidenti con eventi Heinrich (H.e.), evidenziati da depositi di detriti trasportati da iceberg (IRD, *ice rafted debris*) nel Nord Atlantico. Successivamente, durante l'Olocene, ci sono stati altri eventi, rilevati dalla stratigrafia nel Nord Atlantico, che hanno mostrato una quasi-periodicità. Possibili differenze, similitudini, simultaneità, periodicità e soprattutto origini di tutti questi eventi sono argomento di molte discussioni in paleoclimatologia, anche per le incertezze nelle scale temporali relative a dati che sono ottenuti in località diverse e con metodologie diverse. Quest'ultima considerazione spiega

anche la molteplicità di denominazioni degli eventi riportata in letteratura (v. p.es.: Mogensen 2009).



**Fig. 1.** Andamento del clima negli ultimi 130 ka. Sono riportati, nell'ordine, dall'alto: LR04, eccesso di isotopo dell'ossigeno dai carotaggi oceanici (LR04 Benthic stack; Lisiecki, Raymo 2005); NGRIP, eccesso di isotopo dell'ossigeno dai ghiacci della Groenlandia (NGRIP 2004; si notino le evidenti variazioni dei DO.e.); EPICA, variazione rispetto alla temperatura media ricavata dall'eccesso di deuterio nei ghiacci dell'Antartide (Jouzel et al. 2007).



**Fig. 2.** Andamento del clima *monsonico* negli ultimi 130 ka; eccesso di isotopo dell'ossigeno misurato in stalagmiti di caverne cinesi (punti; Cheng et al. 2016). Per semplice confronto, abbiamo sovrapposto l'insolazione (60°N, giugno; curva continua; Berger, Loutre 1991).

## 2.1. *Eventi Dansgaard-Oeschger, Heinrich, e il clima della fase glaciale*

Dall'eccesso di  $^{18}\text{O}$  nei carotaggi in Groenlandia si ricava che i DO.e. sono stati caratterizzati da un riscaldamento molto rapido (20 – 50 anni) di 10 - 15°C rispetto al livello glaciale, ma senza raggiungere i valori di temperatura dell'Olocene. A questo aumento di temperatura ha fatto seguito un lento declino di qualche secolo o millennio, e quindi un rapido abbassamento ai livelli glaciali. Indicazioni di possibili fenomeni legati ai DO.e. sono state rilevate in varie località nel mondo, e in Antartide appaiono deboli. Ci sono state diverse discussioni su tempi e coincidenze, e alla fine si è generalmente accettata l'esistenza di un effetto ad altalena (*bipolar seesaw*), secondo il quale quando in Groenlandia (e Nord Atlantico) si osserva una fase tendente al riscaldamento, in Antartide (e Sud Atlantico) se ne osserva una tendente al raffreddamento, e viceversa.

Manca ancora una spiegazione sufficiente, e in particolare una giustificazione dei tempi di transizione molto rapidi, però generalmente i paleoclimatologi concordano sul legame degli eventi con le grandi scariche, relativamente improvvise, di iceberg (evidenziate da IRD) dalla calotta di Scandinavia, Islanda e Groenlandia. L'acqua dolce, derivante dallo scioglimento degli iceberg, altera o blocca la circolazione oceanica nel Nord Atlantico (*thermo-haline circulation*, THC; Weaver, Saenko 2009), causando un raffreddamento<sup>1</sup>. Era stata ipotizzata una periodicità dei DO.e. di 1470 anni, che, secondo un'analisi di Rahmstorf (2003), aveva caratteristiche di regolarità attribuibili a un fattore esterno (p.es. di tipo astronomico); ma un'altra analisi statistica sembrerebbe escludere la significatività del periodo (Ditlevsen et al. 2007).

Nella fase glaciale, mentre si segnalano circa 24 DO.e., si registrano solo sei H.e. della durata di alcuni secoli e intervallati da alcune migliaia di anni. Essi sono caratterizzati da enormi IRD, maggiori che nel caso dei DO.e. (“Heinrich events may in fact be just super Dansgaard-Oeschger events”; Maslin 2009), e derivati da scariche di iceberg nel Nord Atlantico provenienti in particolare dall'enorme calotta della Laurentide che copriva il Canada. Anche in questo caso si sarebbe trattato di una grande quantità di acqua dolce che avrebbe provocato la riorganizzazione della

---

<sup>1</sup> La corrente oceanica trasporta calore dalle zone tropicali verso Nord; raffreddandosi, scende in profondità e torna verso Sud. E' l'AMOC, Atlantic Meridional Overturning Circulation, dove per 'meridional' si intende 'meridiano'. La densità della corrente dipende dalla temperatura e dal grado di salinità, da qui il termine *thermo-haline*.

circolazione oceanica, e avrebbe quindi avuto un forte impatto sul clima (Hemming 2009; Mogensen 2009)<sup>2</sup>. Tuttavia, secondo uno studio accurato delle fasi degli eventi da parte di Barker et al. (2015), anche se le scariche di iceberg possono aver fornito un contributo al raffreddamento prolungato, non ne sarebbero però state la causa scatenante.

La fase di discesa al massimo glaciale, durata circa 100 ka, oltre a essere stata segnata dalla progressiva estensione delle calotte glaciali, appare quindi caratterizzata anche da una significativa instabilità climatica su scala del millennio, o di alcuni secoli, e con tempi di transizione anche rapidi<sup>3</sup>. Al proposito riportiamo una considerazione di Allen et al. (1999) sui pollini ottenuti da un carotaggio nel Lago Grande di Monticchio, sul Vulture in Basilicata, che copre questa fase e il successivo Olocene. Gli autori notano “a striking general feature”, cioè la rapida velocità di adeguamento della vegetazione al cambiamento climatico, “with which forest or wooded steppe biomes replace steppe biomes and vice versa” (in circa un secolo); in particolare, la diminuzione dei boschi è più rapida della loro crescita<sup>4</sup>. I dati più dettagliati relativi alla stessa località durante l’Olocene mostrano una vegetazione e un clima più stabili, con prevalenza di bosco temperato (Allen et al. 2002), ma con variazioni collegabili ad alcuni eventi nel Nord Atlantico, discussi nelle successive sotto-sezioni.

## ***2.2. Younger Dryas***

Dopo l’ultimo massimo glaciale, quando la temperatura media in Antartide aveva raggiunto i valori più bassi, il livello del mare era sceso oltre 120 m sotto il livello attuale, e l’accreciuta presenza di polveri nei ghiacci in Antartide e Groenlandia indicava un clima globalmente arido, è iniziata la

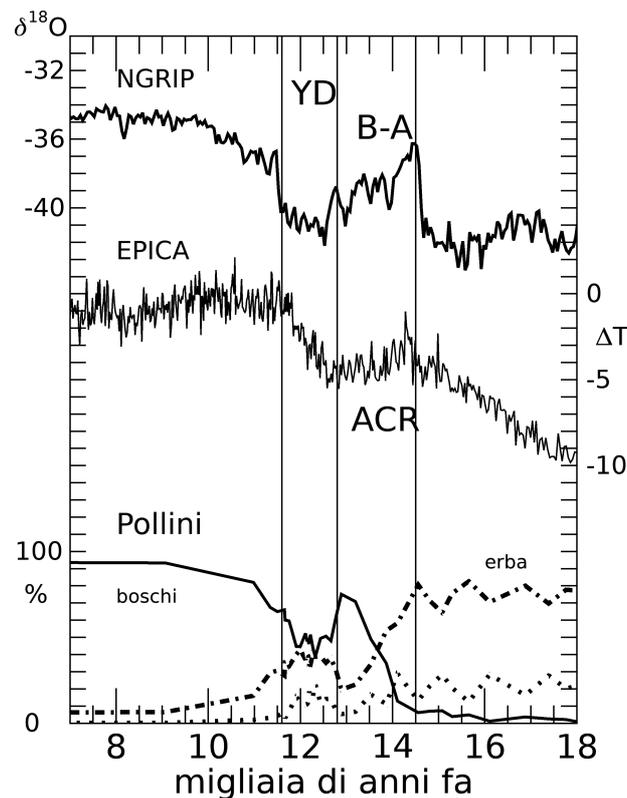
---

<sup>2</sup> Gerard Bond (2009) aveva accettato il termine “Bond cycle”, proposto da altri autori, che collegava la fase successiva dell’H.e. osservata nei carotaggi del fondo oceanico, alla contemporanea diminuzione di temperatura di uno (o più) DO.e. osservati nei ghiacci della Groenlandia.

<sup>3</sup> La durata dei DO.e. è maggiore quando la temperatura globale è più alta e l’AMOC è più stabile; è molto breve quando la temperatura globale è inferiore (cosa che si può già intuire dai grafici in Figura 1) e l’AMOC è più instabile (Brook, Buizert 2018).

<sup>4</sup> Le ricostruzioni delle condizioni climatiche suggeriscono una stagionalità caratterizzata da temperature estive poco inferiori e da temperature invernali molto più basse rispetto a quelle dell’Olocene; p.es. le conclusioni di Buizert et al. (2014) corroborano “the hypothesis that abrupt climate change is mostly a winter phenomenon”. Anche la temperatura dedotta dai pollini in Europa occidentale ha un andamento analogo: progressiva crescita della temperatura invernale nel corso dell’Olocene, a fronte della poca variazione di quella estiva (Davis et al. 2003).

rapida fase del disgelo. Tuttavia, circa 12800 anni fa si assiste a un improvviso ritorno del freddo, più evidente nell'emisfero nord, una fase durata circa 1200 anni chiamata *Younger Dryas* (YD)<sup>5</sup>; essa coincide con un DO.e. (GS-1, rilevato nei ghiacci della Groenlandia; include i periodi caldi *Bølling-Allerød* rilevati in precedenza in Danimarca; Mogensen 2009), e coincide con l'ultimo H.e. (che ha il numero 0; Weaver, Saenko 2009).



**Fig. 3.** Passaggio dalla fase glaciale al clima dell'Olocene. Sono riportati nell'ordine, dall'alto: NGRIP, eccesso dell'isotopo dell'ossigeno (in per mille) dai ghiacci della Groenlandia (NGRIP 2004); EPICA, variazione rispetto alla temperatura media (in °C) ricavata dall'eccesso di deuterio nei ghiacci dell'Antartide (Jouzel et al. 2007); Pollini, dal Lago Grande di Monticchio (in %; Allen et al. 1999) distinti per boschi (querce, abeti; curva continua), erbe (piante erbacee; curva tratteggiata) e alberi di alta montagna (pini, betulle; curva punteggiata). I dati dei pollini negli ultimi 10 ka sono in numero limitato, ma Allen et al. (2002) confermano l'andamento poco variabile durante l'Olocene. Nel grafico sono indicati gli eventi *Younger Dryas* (YD), il gruppo *Bølling-Allerød* (B-A), e l'*Antarctic cold reversal* (ACR). Nota: ci potrebbe essere qualche non uniformità delle scale temporali.

<sup>5</sup> Il nome deriva dalla *Dryas octopetala* (Camedrio alpino), piantina dei climi freddi (sulle Alpi si trova in media tra i 1500 e 2500 m), e il cui polline è stato trovato in grande quantità in carotaggi di laghi svedesi a questa epoca (chiamata *Younger* per distinguerla da una precedente, *Older*).

Peteet (2009) ricorda le centinaia di studi di pollini in Europa che concordano sulla diminuzione delle foreste (col disgelo avevano iniziato ad espandersi) e sulla nuova presenza della tundra durante questo evento. Molti risultati relativi anche ad altre aree geografiche si trovano riassunti nell'articolo di Carlson (2013). Nella Figura 3 abbiamo cercato di riassumere l'intervallo di alcune migliaia di anni del passaggio dalla glaciazione all'Olocene. E' interessante la corrispondenza tra il cambiamento climatico e quello della vegetazione in Europa meridionale, con l'oscillazione tra 15 ka e 11 ka fa. La preponderanza di piante erbacee unita ad alberi di alta montagna indica tundra alpina, mentre la preponderanza di bosco ceduo e abeti indica clima temperato. E' all'epoca di questa oscillazione climatica che avviene la prima forma di cultura organizzata nel Levante, con gli insediamenti natufiani di cacciatori-raccoglitori.

All'origine della YD generalmente si pensa ci sia l'alterazione della circolazione oceanica nel Nord Atlantico, questa volta a seguito del rilascio di una enorme quantità di acqua dolce nell'oceano dal grande Lago Agassiz, che si trovava al bordo della calotta della Laurentide canadese (Baker 2009; Murton et al. 2010). E' stato osservato come la YD sia stata preceduta a sud, in Antartide, da un ritorno al freddo tra circa 14500 a 13000 anni fa (*Antartic cold reversal*; Morgan 2009)<sup>6</sup>. Sono state comunque avanzate anche altre ipotesi all'origine dell'evento (Maslin 2009), tra cui le possibili conseguenze della caduta di un asteroide o di una cometa o sciame cometario, e ne daremo qualche dettaglio nella Sez. 3.2.

### ***2.3. Rapid climate changes***

Per cambiamenti climatici rapidi (*rapid climate changes, RCC*) si intendono generalmente variazioni climatiche su scala decennale-secolare. In letteratura sono talvolta chiamati in modo improprio *Bond events*, e generalmente stanno a indicare periodi di freddo e aridità, e, più precisamente, di instabilità climatica, avvenuti durante l'Olocene<sup>7</sup>. Bond et al. (1997) avevano rilevato in due carotaggi nel Nord Atlantico una serie di

---

<sup>6</sup> Un risultato più preciso di WAIS (2015) indica che il riscaldamento (raffreddamento) improvviso in Groenlandia precede il corrispondente raffreddamento (riscaldamento) in Antartide di circa 200 anni; per effetto altalena il trasferimento avverrebbe tramite correnti oceaniche (piuttosto che atmosferiche).

<sup>7</sup> Bond (2009) aveva distinto tra "event" e "cycle", dove ciclo è da intendersi come un processo che si ripete anche senza un periodo preciso. Aveva dichiarato che gli eventi nell'Olocene erano cicli "sometimes incorrectly called Bond cycles".

concentrazioni di granuli litici (alternata agli scheletri di foraminiferi) con particolari caratteristiche, che potevano essere spiegate solo con eventi di IRD, pur se molto meno accentuati rispetto a quelli rilevati nei H.e e DO.e. Tali eventi erano associati a raffreddamento climatico indicato dalla presenza di specifiche specie di foraminiferi planctonici; questo mostrava che la relativa stabilità climatica dell'Olocene, fino ad allora generalmente supposta, era in realtà un'idea sbagliata. Gli autori avevano concluso che si trattava di cicli con periodicità di circa 1470 anni, e gli estremi si erano avuti 1400, 2800, 4200, 5900, 8100, 9400, 10300 e 11100 anni fa. Discutendo la possibile origine, avevano escluso un legame con una oscillazione propria, specifica, della calotta glaciale. “Millennial-scale climate cycles may arise from harmonics and combination tones of the orbital periodicities, but cycles currently thought to fall within those bands are longer than the cycle we have identified. Forcing of millennial-scale climate variability by changes in solar output has also been suggested, but that mechanism is highly controversial [...] In any case, if we are correct that the 1470-year climate cycle is a pervasive component of Earth's climate system, it must be present in previous glacial-interglacial intervals. If that turns out to be true, the cycle may well be the pacemaker of rapid climate change”. Abbiamo riportato in dettaglio le considerazioni di Bond et al. (1997) perché sono argomenti tuttora dibattuti e non chiariti, anche se, a seguito di analisi, il periodo del ciclo non appare statisticamente significativo (Obrochta et al. 2012). Nella serie di date riportate manca la Piccola Era Glaciale<sup>8</sup>, durata alcuni secoli a partire dalla fine del Medioevo; essa è però segnalata da Bond et al. (2001), nel contesto della discussione della variabilità solare come *forcing mechanism* della *millennial-scale climate variability*. In tale lavoro erano stati studiati altri *proxy*, IRD nel Nord Atlantico, e gli isotopi <sup>14</sup>C e <sup>10</sup>Be (da raggi cosmici, v. sez. 3.1) in anelli di crescita degli alberi e in ghiacci della Groenlandia. I tempi del massimo di IRD e massimo di raggi cosmici (minimo di attività solare) appaiono corrispondere a quelli dei cicli sopra elencati, ma a volte solo grossolanamente. Una differenza è l'aggiunta di un possibile evento intorno a 7500 anni fa.

Anche Mayewski et al. (2004) parlano di RCC avvenuti durante l'Olocene. Sulla base di un'analisi di dati relativi a molti *proxy* (ghiacci, speleothem, pollini, varve, ecc.) di diverse località del pianeta, hanno

---

<sup>8</sup> Ciò si può spiegare con il limite osservativo dei carotaggi (“core top ages are less than 1000 years”; Bond et al. 1997).

identificato sei periodi durante i quali sono avvenuti degli eventi di RCC, 9000-8000, 6000-5000, 4200-3800, 3500, 2500 1200-1000 e 600-150 anni cal BP<sup>9</sup>. In questo caso l'interesse degli autori è incentrato sulle modifiche del clima più legate a quelle della circolazione atmosferica, e meno a ciò che avviene nell'oceano Nord Atlantico. Riassumono le caratteristiche dei RCC come un raffreddamento di origine polare che scende a influenzare anche le latitudini intermedie (Weninger et al. 2009), e come un'aridità a livello dei tropici (ma con aumento di umidità in alcune zone specifiche).

A conclusione di questa Sezione, riportiamo alcune considerazioni dell'ultimo Gerard Bond (2009). "Records of millennial climate variations have drawn widespread attention because they produced the first convincing evidence that Earth's climate system is much less stable than once thought and can shift suddenly on human time scales". I cicli mostrano tipicamente un comportamento a soglia, cioè una transizione improvvisa durante la quale cambiamenti di temperatura di diversi gradi avvengono in poche decadi se non pochi anni. Benché questi salti di temperatura appaiono aver avuto luogo soprattutto durante le glaciazioni (DO.e., H.e.), i risultati di alcuni modelli implicano che essi potrebbero essere indotti nel prossimo futuro dal riscaldamento globale continuo. "Even though the likelihood of that happening might be low, the impact on society is potentially so severe that understanding why the climate system is prone to such behavior has become a high priority" (Bond 2009).

### 3. Ipotesi

Sono state proposte diverse ipotesi astronomiche e astrofisiche per spiegare gli eventi climatici e le loro varie scale temporali. Certamente esiste l'effetto dell'*orbital forcing*, legato alla variazione di insolazione della superficie terrestre, con periodi dati dall'eccentricità dell'orbita terrestre (intorno a 100 ka e 400 ka); dall'obliquità dell'eclittica (inclinazione dell'asse di rotazione della Terra, 41 ka) e dalla precessione climatica (circa 19 - 23 ka). Poiché siamo interessati a discutere le ultime decine di migliaia di anni, dovremo tenere presente in particolare l'ultima oscillazione della precessione climatica (attualmente in corso) con i suoi

---

<sup>9</sup> Per 'cal BP' si intende anni prima del 1950, stimati con <sup>14</sup>C e sua calibrazione. Quando le date sono molto approssimate, noi useremo 'anni fa' anche nel senso: prima del 2000 circa. Wolbach et al. (2018b) mostrano che quando si va a risoluzioni temporali molto alte (decadi o addirittura anni), è indispensabile verificare quale sia stata la calibrazione usata per la datazione <sup>14</sup>C. In effetti, gli archeologi preferiscono fornire anche le date <sup>14</sup>C non calibrate.

effetti sul regime monsonico. Inoltre, il comportamento del clima, essendo una risposta non lineare, potrebbe mostrare fenomeni con periodi dati dalla combinazione di quelli sopra ricordati; si tratterebbe comunque di diverse migliaia di anni, e quindi non sarebbero in grado di spiegare gli eventi discussi (come già segnalato nella Sez. 2.3), per cui bisognerebbe pensare ad altri fattori oltre a quelli orbitali.

Fairbridge, Gornitz (2009) hanno proposto alcune ‘leggi fisiche’ della Terra, concludendo che “the Earth’s paleoclimate history is the consequence of a complex interplay of internal and external forcing through multiple feedback loops”. Anche se abbiamo alcuni dubbi sulla effettiva utilità/validità di tali ‘leggi’, ne riportiamo quattro perché ci serviranno come introduzione alla successiva discussione di alcune ipotesi. 1) Evoluzione del Sole, con le sue variabilità decennali e secolari dovute all’interazione gravitazionale con i pianeti maggiori, interazione che ha effetto sull’interno della stella, e di conseguenza su campi magnetici, macchie solari (attività solare), flusso di raggi cosmici, e clima terrestre. 2) Evoluzione del Sistema Solare nella Galassia: sua rivoluzione intorno al centro galattico in circa 250 milioni di anni, con attraversamento delle braccia spirale ricche di polveri, presenza di eventuali supernovae vicine e loro raggi cosmici, perturbazioni orbitali indotte nei corpi esterni del sistema (asteroidi). 3) Evoluzione fisica della Terra (geofisica) e del sistema Terra-Luna con i possibili effetti mareali legati ai cicli lunari. 4) Evoluzione biologica della Terra, nel contesto di tettonica, impatti di asteroidi, vulcanesimo.

### ***3.1. Isotopi cosmogenici e variabilità solare***

I raggi cosmici rilevati sulla Terra hanno soprattutto origine esterna al Sistema Solare (*galactic cosmic rays*, GCR), e tra i vari effetti della loro interazione con le molecole dei gas atmosferici c’è la produzione di isotopi utili per i problemi di datazione, il  $^{14}\text{C}$  (emivita 5.7 ka) e il  $^{10}\text{Be}$  (emivita 1.5 Ma)<sup>10</sup>. La maggior parte del  $^{14}\text{C}$  deriva dal decadimento del  $^{14}\text{N}$ , è rapidamente ossidata, e come  $^{14}\text{CO}_2$  è per lo più assorbita dagli oceani, ed entra in piccola quantità nel ciclo della fotosintesi, quindi in piante e

---

<sup>10</sup> Il picco maggiore nella produzione di  $^{10}\text{Be}$  negli ultimi 60 ka è datato intorno a 40 ka fa, è durato un millennio circa, ed è avvenuto in concomitanza con l’evento Laschamp, cioè l’indebolimento e l’inversione del campo magnetico terrestre. Secondo alcuni autori non pare ci sia associazione col clima dell’epoca (Almasi, Bond, 2009); ma Kirkby (2008) mostra che non si può concludere in modo definitivo pro o contro un possibile collegamento dell’eccesso di GCR con un DO.e.

animali terrestri (Ervin Taylor 2009). Poiché la quantità o flusso di raggi cosmici che raggiunge la Terra dipende dall'effetto schermante prodotto dal campo magnetico solare (e terrestre), gli isotopi risultano “among the best records of solar magnetic activity, as they are available for the entire Holocene at high resolution” (Almasi, Bond 2009). Diversi lavori hanno cercato di evidenziare le periodicità presenti nei *records*, cioè le variazioni di  $^{14}\text{C}$  negli anelli di crescita degli alberi (p.es.: Kocharov et al. 1995) e nei ghiacci, a seguito anche dell'osservazione che il minimo di Maunder dell'attività solare corrispondeva alla Piccola Era Glaciale (e a un massimo di  $^{14}\text{C}$ ). Sono stati registrati due cicli di circa 210 anni (“deVries-Suess”; Wagner et al. 2001) e 88 anni (“Gleissberg”; Peristykh, Damon 2003), e, per esempio, si è cercato di spiegare con la loro combinazione non lineare la periodicità di 1470 anni (Braun et al. 2005). Gupta et al. (2013) hanno dato un certo peso agli effetti dell'attività solare sull'andamento dei monsoni, rilevando la possibile presenza di una periodicità di circa 208 anni, e analogamente Xu et al. (2014) hanno attribuito al Sole la periodicità di circa 500 anni rilevata analizzando pollini. L'effetto climatico deriverebbe dalla diminuzione di radiazione in assenza di attività solare, perché c'è un ridotto numero di *facole* solari luminose, che sono legate al campo magnetico. Vieira et al. (2011) hanno cercato di ricostruire l'andamento della radiazione solare durante l'Olocene, ma l'esatta grandezza delle variazioni a lungo termine e la loro periodicità sono sempre oggetto di discussione (Solanki et al. 2013).

Si sono ipotizzati effetti diretti del flusso di GCR, modulato dall'attività solare, sul clima, cioè la formazione di nubi a causa dell'interazione con molecole e particelle nell'atmosfera. Che ci possa essere una relazione è suggerito per esempio dall'andamento piuttosto simile di IRD e isotopi rilevato da Bond et al. (2001; loro Figura 3); in questo caso però gli autori considerano i GCR solo come indicatori della variabilità (radiazione) solare, che è supposta essere il vero meccanismo, o *solar forcing*. Altri autori come Kirkby (2008) hanno sostenuto invece con argomenti plausibili che il raffreddamento del clima potrebbe essere stato indotto proprio dalla copertura nuvolosa prodotta dai GCR, anche perché la diminuzione di radiazione dovuta all'assenza di attività solare sarebbe di per sé molto piccola. I primi risultati ottenuti con l'esperimento CLOUD (Cosmics Leaving Outdoor Droplets), progettato al CERN appositamente per simulare le condizioni atmosferiche, mostrerebbero sì qualche effetto dei raggi cosmici sulla fisica-chimica dell'atmosfera (e quindi sul clima), ma esso è molto debole (Dunne et al. 2016; Gordon et al. 2017). Secondo

Kirkby (2008): “The key challenge is to establish a physical mechanism that could link solar or cosmic ray variability with the climate”, e la nostra conclusione preliminare è che questo meccanismo non è stato ancora trovato.

Secondo Charbonneau (2013), la prima ‘legge’ di Fairbridge, Gornitz (2009), che ipotizza un effetto gravitazionale dei pianeti sul Sole, non era stata solitamente presa in considerazione perché tale teoria non produceva risultati quantificabili. Il lavoro di Abreu et al. (2013), che hanno analizzato in dettaglio i piccoli effetti sulla struttura interna del Sole e quindi sul ciclo solare, l’ha ora finalmente innalzata al rango di teoria testabile; in particolare, gli autori ritrovano i periodi di Gleissberg e deVries-Suess, insieme ad altri possibili periodi che sono stati effettivamente identificati nei *records* osservati (p.es.: McCracken et al. 2013).

Fairbridge, Gornitz (2009) discutono anche i possibili effetti climatici a breve periodo (anni, decenni) che sarebbero legati in qualche modo al ciclo delle macchie solari e agli effetti mareali del Sole e della Luna. In generale, l’impressione è che in questi casi le incertezze statistiche precludano conclusioni affidabili. A supporto di questa conclusione si può citare il lavoro di Turner et al. (2016) in cui, mediante test statistici, gli autori mostrano come comportamenti ciclici a breve periodo (decadi) attribuiti a *solar forcing* si possano spiegare semplicemente come variazioni *random*.

### **3.2. Vulcanesimo, asteroidi e comete, cicli mareali**

Eruzioni o esplosioni di (super)vulcani possono avere un impatto sul clima; nei casi storicamente noti si tratta però di effetti con durata limitata di pochi anni; inoltre non sembrano essere fenomeni periodici, anche se in passato si è suggerito un qualche effetto mareale della Luna sulla crosta terrestre. Possiamo ricordare per esempio come nel 1816, l’anno successivo all’eruzione del Tambora, si ebbero difficoltà (carestie) in Europa a seguito dell’estate piuttosto fredda, e che oggi questa è ritenuta essere stata conseguenza delle polveri vulcaniche in sospensione nella stratosfera, che limitavano la radiazione solare. Un’esplosione maggiore per vari ordini di grandezza è avvenuta sempre in Indonesia a Toba, circa 74 ka fa, forse in corrispondenza di un minimo di temperatura precedente un DO.e. Si è supposto che essa possa avere avuto effetti anche per quanto riguarda la stessa evoluzione della specie umana; ma questi sono stati

messi in dubbio per esempio da Oppenheimer (2002)<sup>11</sup>. Un'altra forte eruzione si ebbe con l'Ignimbrite Campana circa 40 mila anni fa, in concomitanza con un H.e. (Giaccio et al. 2017).

La caduta di asteroidi e comete è stata a volte invocata per spiegare eventi climatici devastanti. E' ben noto il caso della transizione Cretacico-Paleogene di circa 66 Ma fa, popolarmente nota per l'estinzione dei dinosauri; è generalmente attribuita alle conseguenze climatiche successive alla caduta di un corpo celeste, e il cratere derivato dall'esplosione si troverebbe nello Yucatan (Chicxulub).

Un gran numero di dati (raccolti in varie località del pianeta) sono stati discussi recentemente in dettaglio da Wolbach et al. (2018a) e Wolbach et al. (2018b); essi confermerebbero un impatto cosmico avvenuto circa 12800 anni fa, all'inizio della YD, come già proposto da Firestone et al. (2007). Gli autori hanno verificato con cura le scale dei tempi, e hanno potuto così verificare la compresenza di fenomeni che nel complesso si potrebbero spiegare come conseguenze dell'impatto<sup>12</sup>. Si pensa alla caduta di uno sciame cometario, dato dalla disintegrazione di un corpo con diametro maggiore di 100 km; i detriti sarebbero esplosi in aria e/o caduti su terreno, calotte glaciali, oceani, in entrambi gli emisferi nord e sud. Questo spiegherebbe la presenza di elementi chimici specifici, nanodiamanti e microsferule nei ghiacci della Groenlandia (si escludono contributi di eruzioni vulcaniche). L'energia termica dalle esplosioni avrebbe innescato una serie di incendi coinvolgendo circa il 10% della biomassa; un eccesso di prodotti della combustione è stato trovato in strati di suoli, fondi marini e lacustri (carbone), e nei ghiacci (particolato carbonioso, concentrazioni di aerosol e molecole specifiche). Gli impatti avrebbero destabilizzato le calotte, prodotto il riversamento di acqua dolce nell'oceano con conseguente alterazione della THC, mentre la persistenza nell'atmosfera delle polveri avrebbe bloccato la radiazione solare contribuendo al clima freddo (*impact winter*). Tutto il complesso dei dati raccolti appare difficilmente spiegabile in altro modo. Se l'impatto cosmico fosse confermato, resterebbe da capire se si è trattato solo di una concomitanza (coincidenza) di eventi che ha prodotto una variazione

---

<sup>11</sup> Un lavoro molto recente di Smith et al. (2018) mostra che una popolazione di *Homo sapiens* ha continuato a prosperare in Sud Africa pur durante l'ipotetico *volcanic winter* di Toba.

<sup>12</sup> Non è chiaro però se gli autori hanno risposto in modo sufficiente alle critiche circostanziate, avanzate da Meltzer et al. (2014), e che riguardavano appunto la precisione delle scale temporali e la distribuzione delle conseguenze dell'impatto.

climatica (durata più di un millennio) particolarmente intensa, o se l'impatto cosmico ne è stato il fattore determinante.

Keeling, Whorf (2000) hanno avanzato l'ipotesi che la variazione della forza delle maree oceaniche causi il raffreddamento periodico delle acque di superficie dell'oceano, modulando l'intensità del mescolamento verticale che porta in superficie le acque più fredde sottostanti. Questo avrebbe potuto contribuire, almeno in parte, alle fluttuazioni del clima su scala del millennio. Gli autori individuano un ciclo di 1800 anni legato alla variazione di intensità delle maree, tenendo conto che essa è massima quando la Luna è al perigeo, la Terra al perielio, e i tre corpi Sole-Terra-Luna sono allineati (al novilunio o al plenilunio).

#### **4. Dal Paleolitico alla nascita dell'agricoltura**

I nostri antenati del Paleolitico superiore (dopo 40 ka fa) hanno vissuto di caccia, pesca e raccolta, e hanno dimostrato una certa creatività, espressa nelle incisioni e nei dipinti, anche splendidi, e nelle piccole sculture, trovati nelle grotte e nei ripari, in Francia, Spagna e altrove, e con i primi strumenti musicali. Molti antropologi ritengono che avessero le nostre stesse capacità intellettive. Ci si può allora meravigliare, e chiedersi, come ha fatto Renfrew (2007) parlando di paradosso del *sapiens*, perché i nostri antenati abbiano atteso così tanto tempo, fino a poche migliaia di anni fa, per creare le prime civiltà complesse. La spiegazione in apparenza più ovvia è che han dovuto aspettare un clima sufficientemente caldo e umido e, soprattutto, stabile, per inventare l'agricoltura (Antonello 2012). Se questo fosse vero, come mai gli umani anatomicamente moderni già presenti da 300 ka non hanno sfruttato gli interglaciali con clima mite in parte simili all'Olocene, o più caldi, come l'Eemiano?

Uno studio molto recente di Neubauer et al. (2018) suggerisce una possibile risposta. Gli umani moderni hanno “large and globular brains” che li distinguono dagli *Homo* estinti. La ‘globularità’ o ‘globosità’ è una caratteristica che si forma durante la rapida crescita del cervello nel periodo immediatamente prenatale e primo post-natale, un periodo critico per lo sviluppo delle connessioni neurali e cognitivo. Sulla base di uno studio dei crani fossili di *H. sapiens* di varie epoche, gli autori concludono che, mentre le dimensioni del cervello 300 ka fa erano già simili a quelle moderne, la forma ‘globosa’ invece è evoluta gradualmente fino a raggiungere le caratteristiche attuali solo tra 100 ka e 35 ka fa. Inoltre, gli autori, citando i lavori di genetica sugli *Homo*, ricordano che alcuni dei geni specifici per lo sviluppo delle funzionalità del cervello “were selected

and fixed at different times since the origin of our species and before the transition to the Upper Palaeolithic”. La variazione di forma è andata di pari passo con l’emergere delle caratteristiche comportamentali moderne durante il Paleolitico superiore, rilevate dagli archeologi. In altre parole, l’*H. sapiens* avrebbe acquisito queste ultime caratteristiche evolutive durante la fase del massimo glaciale, e poi, quando il clima lo ha permesso, avrebbe messo a frutto le sue nuove capacità. Come vedremo, in base alle conclusioni che stanno derivando vari antropologi, le varie forme di civiltà sarebbero prima di tutto (ma non solamente) una reazione o resilienza all’andamento del clima e delle condizioni ambientali.

#### **4.1. La cultura natufiana**

La cultura natufiana dell’Epipaleolitico finale è il primo esempio di stanzialità complessa avvenuta intorno a 13000 anni fa nella zona del Levante, che include Israele, Palestina, e Siria (ma è assente nell’Anatolia meridionale). Dai dati paleoclimatologici si deduce che in quell’area le precipitazioni avevano cominciato ad aumentare rapidamente circa 13500 anni fa (Bar-Yosef 1998). I cacciatori-raccoglitori erano diventati stanziali, dando origine a insediamenti relativamente grandi, con elaborate sepolture di gruppo e forme artistiche (Balter 2010; Bar-Yosef 1998). Le precipitazioni erano poi diminuite durante la YD, e in questa seconda fase più arida si notano insediamenti più piccoli e sepolture singole senza ornamenti. Le precipitazioni erano poi tornate alte dopo la fine della YD (circa 11600 anni fa), almeno nelle zone a nord del Levante<sup>13</sup>. In altre parole, all’inizio del disgelo la regione era stata essenzialmente una steppa, senza alberi e punteggiata di arbusti e praterie; con il rapido riscaldamento e le precipitazioni (fase B-A) c’era stata l’espansione di nuovi boschi e foreste che avevano fornito nuove risorse alimentari, favorendo così la stanzialità (Balter 2010). Secondo alcuni archeologi (p.es. Bar-Yosef 1998), è in questo ambito che ci sarebbero state le prime forme (esperimenti) di agricoltura con cereali selvatici; questa sarebbe diventata un’attività essenziale durante la fase arida della YD al fine di poter superare le difficoltà climatiche. Tuttavia molti archeologi lo escludono, e

---

<sup>13</sup> Un’indicazione temporale è fornita dall’andamento in sincronia del metano rilevato nei ghiacci in Antartide e in Groenlandia. Il gas si forma da attività biologica, in particolare ai tropici, nei periodi caldo-umidi, e si diffonde in tempi brevi. I dati mostrano la diminuzione ‘rapida’ verso la fase arida tra 12900 e 12600 anni fa, e la risalita alla fase umida tra 11800 e 11600 anni fa (EPICA 2006).

tendono a posticipare tale rivoluzione economica a quando le condizioni caldo-umide furono ristabilite, dopo circa 11600 anni fa (Balter 2010).

#### **4.2. Nascita dell'agricoltura**

La coltivazione di cereali *selvatici* è iniziata più o meno simultaneamente tra 11500 e 11000 anni fa (Willcox 2013) nella Mezzaluna Fertile, che include il Levante, la zona collinare-montagnosa dell'Anatolia meridionale, del nord Iraq, fino ai monti Zagros in Iran (Riehl et al. 2013); per qualche millennio sarà evitata la piana alluvionale del Tigri e dell'Eufrate perché paludosa. E' la fase epipaleolitica del Khiamiano (Cauvin 2000), successiva al Natufiano. A questo inizio delle coltivazioni ha fatto seguito la *domesticazione* dei cereali, un processo avvenuto tra 11000 e 10000 anni fa (si veda Willcox 2014, in particolare la Fig. 9 con il passaggio da cereali di climi freddi, come la segale, a quelli di clima più caldo). E' con la coltivazione delle varietà *domestiche*, selezionate un po' alla volta in base alla resa, alla facilità di semina, e soprattutto di raccolta e conservazione, che si può parlare di agricoltura, ed è quindi a quest'epoca che se ne fa generalmente risalire la nascita<sup>14</sup>. Secondo Weninger et al. (2009) “the earliest use of genetically changed cereals coincides” (entro  $\pm 100$  anni) “everywhere in these regions”, che coincide con l'aumento delle precipitazioni. Si tratta del Neolitico preceramico (pre-pottery, PPN), in particolare della transizione dalla fase A alla fase B (v. sez. 5.1). Secondo Cauvin (2000, p. 3) è realmente “in the Neolithic Revolution that we find the roots of the present state of the human race, not only in its domination and exploitation of the environment, but also [...] in the very foundations of our culture and mentality”.

Weninger et al. (2009) affermano: “There are good (ethnographically documented) reasons to link (archaeologists seldom say: correlate) the beginning of farming and herding in the Early Holocene in the Near East with major changes in social organisation”. Tuttavia “researchers have been reluctant to add the next link, i.e. that between social organisation, based on domesticated animals and plants, and the supporting climate

---

<sup>14</sup> Tanno, Willcox (2006) precisano che “indehiscence [cariossidi che non si aprono a maturazione, e quindi il seme non si perde] took over one millennium to become established. We argue that wild cereals could have been cultivated for over one millennium before the emergence of domestic varieties. Domestication was a series of events occurring at different places over thousands of years, during which wild wheat persisted in cultivated fields (it still occurs today as a weed in Turkey)”.

conditions”. Liverani (2011, p. 57) invece precisa che i mutamenti climatici “costituiscono lo scenario del mutamento tecnologico ed economico, più che la sua causa. Infatti ad uno stesso problema, varie comunità possono dare risposte diverse, e proprio in questa diversità di scelte e strategie consiste la storia umana”.

I primi millenni del Neolitico sono un intervallo di tempo relativamente felice per quanto riguarda il clima, un *optimum climatico* caldo-umido (a parte le interruzioni discusse nella Sez. 5), almeno nelle aree dove si assisterà al progressivo instaurarsi di civiltà sempre più complesse. Perfino in quello che oggi è pieno deserto del Sahara allora c'erano fiumi (Skonieczny et al. 2015) e grandi laghi (Drake, Bristow 2006), e deMenocal (2011) riassume la situazione affermando che tra 15 ka e 5 ka fa il ciclo precessionale aveva rinvigorito il monzone, con il risultato di avere più piogge in Africa, e un Sahara quasi completamente verde<sup>15</sup>. Si tratta della fase del ciclo precessionale di 23 kyr caratterizzata dal massimo di insolazione, cui corrisponde la fase climatica umida segnalata dal tipo di sedimenti marini (fangosi, *sapropels*) scaricati nel Mediterraneo, come discusso nel precedente lavoro (Antonello 2016). Superato il massimo, il clima globale ha poi iniziato a inaridire<sup>16</sup>; in particolare c'è il progressivo indebolimento del monzone: le piogge diminuiscono finché si raggiungono condizioni simili a quelle attuali, con aridità estrema nelle aree oggi occupate dai deserti (Brooks 2006).

## 5. Eventi climatici e archeologia

Sono le instabilità durate qualche secolo, spesso legate in qualche modo ai cambiamenti climatici che hanno punteggiato l'Olocene, ad aver creato i maggiori problemi alle società umane e/o le hanno costrette a riorganizzarsi. Riporteremo adesso i casi più evidenti avvenuti fino a circa 5000 anni fa, e nel prossimo lavoro discuteremo quelli successivi. Gli eventi climatici non hanno necessariamente avuto sempre la stessa

---

<sup>15</sup> Nella fase di massimo glaciale di alcuni millenni prima, il Sahara era stato invece un deserto anche più arido di oggi, e più esteso verso sud di circa 500 km (Cremaschi, di Lernia, 1998).

<sup>16</sup> Per esempio, Joannin et al. (2012), sulla base di uno studio dei pollini in Italia meridionale, concludono che “on a millennial scale, the records suggest increasing moisture from ca. 11000 to ca. 9400 cal BP, a maximum of humidity from ca. 9400 to ca. 6200 cal BP, before a general trend towards drier climate conditions that prevail up to the present.” I limiti temporali della fase *sapropel* vanno da 9920 a 6806 cal BP (Weninger et al. 2009).

intensità e lo stesso impatto a livello globale o locale. Si noti inoltre che ci possono essere discordanze di data a seconda del *proxy* utilizzato, legate alla natura del dato e alla calibrazione temporale usata.

Due *review* approfondite su questi argomenti sono state presentate da Brooks (2006, 2013). L'autore aveva considerato diverse aree del pianeta, particolarmente per il periodo del medio Olocene, e aveva concluso: “The archaeological and palaeoenvironmental evidence is consistent with the notion that the development of complex societies in the Middle Holocene was largely the consequence of the responses of the precursor societies to deteriorating environmental conditions” (Brooks 2006). Aveva messo in rilievo anche gli “environmental and societal changes that accommodate a variety of responses and outcomes, and that are much more nuanced than narratives of the proposed climate-induced collapse of individual societies” (Brooks 2013). In generale, cioè, le situazioni sono complesse e non sono riducibili a semplici collassi delle società.

### **5.1. 10300 anni fa**

Gli archeologi distinguono due fasi del Neolitico pre-ceramico nel contesto dell'optimum climatico, PPNA e PPNB. Nel Levante, rispetto alla fase A (circa 12000 – 10000 anni fa), la fase B (circa 10000-8000 anni fa) è caratterizzata dall'emergenza di villaggi più complessi, è associata a una accresciuta attività agricola e di allevamento, e a una espansione demografica.

Weninger et al. (2009), nel loro studio paleoclimatico delle aree adiacenti il Mediterraneo orientale (Sud-Est Europa, Mar Egeo, Turchia, Levante) avevano dedotto l'esistenza di un RCC con inverni estremamente freddi da 10200 a circa 10000 anni fa, e poi di una fase umida (*Levantine Moist Period*, LMP) durata circa 1400 anni, rilevata in particolare nella Valle del Giordano. Avevano anche sottolineato che a Gerico (in Cisgiordania) la transizione PPNA-PPNB avvenuta 10200 cal BP aveva forse coinciso con l'abbandono del sito (“Jericho deserted”), seguito dalla sua rioccupazione molti decenni dopo.

In base a uno studio archeologico e paleoclimatico relativo a diversi siti nel nord Levante<sup>17</sup>, Borrell et al. (2015) hanno suggerito un progressivo abbandono, e successiva / progressiva occupazione in località generalmente diverse, associati all'evento climatico caratterizzato da freddo e aridità. I nuovi insediamenti sono appunto quelli della fase PPNB.

---

<sup>17</sup> Si tratta di un'area che include Siria e Anatolia meridionale.

Gli autori concludono: “the temporal correspondence between global and regional climatic events and the archaeological signal indicates that environmental factors influenced cultural changes and had a regional impact resulting in the near abandonment of the region during the 11<sup>th</sup> to 10<sup>th</sup> millennium transition”. Rilevano inoltre come finora il potenziale impatto di questo RCC (e anche di uno successivo 9100 anni fa; Boch et al. 2009), sulle popolazioni umane all'alba dei sistemi agricoli sia stato poco esplorato<sup>18</sup>.

## **5.2. 8200 anni fa**

Le temperature stimate dai ghiacci in Groenlandia e altri dati ricavati da stalagmiti, anelli di crescita degli alberi, pollini, nell'emisfero nord mostrano una diminuzione (associata ad aridità) durata qualche secolo, con un minimo netto intorno a 8200 anni fa (Rohling, Pälike 2005). Dall'analisi di una stalagmite, Boch et al. (2009) confermano il solo minimo tra 8196 e 8100 anni fa (anni prima del 2000). Una stima ancora più puntuale di Kobashi et al. (2007), basata sul metano e azoto intrappolato nei ghiacci in Groenlandia, indica l'inizio dell'evento 8175 ( $\pm 30$ ) anni cal BP, e una durata di circa 150 anni. Ci sono molti studi in proposito, e Morrill, Jacobsen (2005) ne hanno effettuato un'analisi statistica omogenea per capire quanto diffusi siano stati gli effetti sul clima. Le anomalie associate all'evento 8.2 ka si osservano in molte zone dell'emisfero nord a latitudini medio-alte (raffreddamento), e solo in parte anche a livello tropicale (aridità), ma ciò sarebbe dovuto a una mancanza di rilievi (dati), rilievi necessari anche per l'emisfero Sud. Ricordiamo che il monzone asiatico (Figura 2) aveva raggiunto un massimo (precipitazioni) intorno a 9 ka fa, e poi aveva cominciato gradualmente a indebolirsi, cosa interpretata come effetto della diminuzione di insolazione, che sposta verso sud la zona di convergenza intertropicale, ITCZ<sup>19</sup> (Wang et al. 2005). Sovrapposti a tale andamento ci sono appunto

---

<sup>18</sup> Weninger et al. (2009) notano che il sito di Ain Ghazal (Giordania) intorno al 9000 cal BP si riduce drasticamente, continuando poi a diminuire di dimensioni. L'evento climatico è stato segnalato da Boch et al. (2009) intorno al 9100; Yu et al. (2010), in base ai dati, suggeriscono che intorno a 9300 anni fa ci fu il riversarsi di una grande quantità di acqua dolce dal Lago Superiore (anch'esso localizzato al bordo della Laurentide).

<sup>19</sup> L'ITCZ è la zona dove convergono gli alisei da nord e quelli da sud, in direzione dell'equatore. Essa varia stagionalmente, e sui continenti varia con la posizione del

degli intervalli di aridità (e raffreddamento) di qualche secolo legati ad un ulteriore indebolimento monsonico, e alcuni sono stati messi in relazione in particolare l'evento 8.2 ka (Wang et al 2005; Mohtadi et al. 2014)<sup>20</sup>.

La scomparsa dei grandi villaggi PPNB nel Levante meridionale e, talvolta, la rioccupazione più tardi ma solo come piccoli villaggi, è la dimostrazione del collasso di numerosi siti PPNB intorno all'epoca dell'evento di 8200 anni fa. Taylor, Bar-Yosef (2014; p. 212) concludono che “the phenomenon of Neolithic ‘mega-sites’ in the southern Levant was gone”. I rilievi archeologici non mostrano in quest'epoca una presenza continuata in Anatolia, dove è segnalato un significativo cambiamento di sito nella località di Çatalhöyük. Inoltre si riscontra l'abbandono totale (per 1500 anni) dell'isola di Cipro, e la diffusione dell'agricoltura dall'Anatolia verso il Sud-Est Europa: infatti per la prima volta sono presenti siti neolitici nella penisola balcanica (Weninger et al. 2006).

Weninger et al. (2009) discutono gli effetti dovuti a instabilità climatiche (siccità e inondazioni) che hanno comportato il collasso del Levante meridionale in un intervallo più ampio, 8600 – 8000 cal BP. Per spiegare la presenza di notevoli frane (detriti e fango) in diversi siti della Giordania, gli autori suggeriscono che i venti siberiani, incanalati dai Balcani, nel periodo inverno-primavera portavano gelo e siccità nella penisola, nel Mar Egeo e nelle terre intorno al Mediterraneo orientale. Alle basse latitudini, l'aria fredda interagiva con quella caldo-umida della ITCZ, producendo improvvise e violente precipitazioni. L'ambiente arido e forse già degradato dall'attività umana non poteva quindi resistere a tali piogge torrenziali<sup>21</sup>.

Ci sono comunque siti del Nord Levante che non mostrano una significativa discontinuità in quest'epoca. Sabi Abyad (Nord Siria) è stato studiato con cura da archeologi olandesi (p.es.: van der Plicht 2011; van der Horn et al. 2015). Gli indubbi cambiamenti sociali ed economici che sono stati osservati potrebbero essere semplicemente di origine culturale, umana, e non necessariamente legati a fattori ambientali come quelli

---

Sole allo zenit. Essa determina in modo fondamentale il clima umido o arido delle zone tropicali, in quanto definisce i limiti della circolazione monsonica.

<sup>20</sup> Da analisi di indicatori lacustri del Sahara del periodo ‘umido’, e di depositi lacustri e paleosuoli in Cina, Guo et al. (2000) segnalano, oltre a questo evento intorno a 8 ka fa, caratterizzato da aridità, anche un lungo periodo arido tra 7000 e 5700 anni fa.

<sup>21</sup> Gli autori non escludono altre possibili cause, come terremoti o degradazione ambientale (deforestazione, pascoli eccessivi), o una loro combinazione.

indotti da instabilità climatica. L'impatto climatico a livello locale dovrà essere verificato allora in altro modo, per esempio rilevando i possibili effetti su flora e fauna selvatiche. Il sito suggerisce quindi che forti cambiamenti climatici non implicano necessariamente un collasso di civiltà, e ci può essere capacità di adattamento (*resilience*).

### **5.3. 5900 anni fa**

Brooks (2006) menziona l'evento di aridità centrato attorno a 6 ka BP, seguito poi da un parziale recupero in alcune regioni, ma che segna lo stabilirsi di un periodo di siccità discontinua culminante nella creazione dell'attuale fascia desertica globale, dal Sahara al Gobi (si veda p.es. Lioubimtseva et al. 1998) e alla parte meridionale del Nord America<sup>22</sup>. In diverse regioni del Sahara le condizioni di iper-aridità si erano imposte molto rapidamente, mentre in altre era possibile trovare ancora acqua presso la superficie, anche molto dopo la cessazione delle piogge (Cremaschi, di Lernia 1998). Di conseguenza, parte della popolazione sahariana si era adattata a vivere di pastorizia (ove possibile), mentre un'altra parte si era spostata verso la Valle del Nilo, abbandonando la pastorizia per l'agricoltura. Diversi autori hanno messo in rilievo infatti che la civiltà dinastica dell'Egitto compare quando c'è stata la crescente aridità (Brooks 2006).

Weninger et al. (2009) rilevano nell'intervallo 6000 – 5200 cal BP nel Sud-Est Europa un diffuso cambiamento sociale con il collasso dell'Età del Rame, e, alla fine del RCC, lo stabilirsi dell'Età del Bronzo. In Mesopotamia, in questo intervallo di tempo si assiste alla transizione dalla cultura di Ubaid a quella di Uruk; si passa cioè dai molti villaggi sparsi dal Golfo Persico fino al Mediterraneo, e caratterizzati da una certa uniformità culturale, alle prime città (urbanizzazione; Lawler 2012). Tale transizione è associata tra l'altro con lo sviluppo di un sistema di contabilità, l'introduzione della scrittura, e con rappresentazioni esplicite di violenza (Brooks 2006)<sup>23</sup>. Come discusso in dettaglio da Brooks (2013) diversi autori parlano di migrazioni, o almeno spostamenti di popolazioni, legati

---

<sup>22</sup> Baker et al. (2001) da pollini nel Midwest USA trovano un cambiamento rapido di vegetazione da arborea a non arborea circa 6000 anni fa, che è stato collegato a un clima improvvisamente arido, originato dalla scomparsa della calotta della Laurentide, con conseguente modificazione della circolazione atmosferica.

<sup>23</sup> Brooks (2013) citando Pollock (2001) afferma che: “the social context in which southern Mesopotamian urbanism developed has been characterised as one of violence and repression”.

ad impoverimento dei territori, di abbandono di siti, cosa in qualche modo dipendente dall'impossibilità di far fronte all'aridità. Per tali popolazioni, le alternative per sopravvivere erano cercare una nuova forma di economia, o una nuova organizzazione sociale, o siti e strutture urbanistiche già esistenti che le permettessero. E' questo un quadro che si ripresenterà in modo drammaticamente evidente con la grande crisi globale che avverrà meno di 2000 anni dopo.

## **6. Conclusione**

Gli studi paleoclimatologici e archeologici continuano ad aggiungere nuovi dati che precisano sempre meglio la connessione tra i cambiamenti climatici e l'evoluzione delle società umane. E poiché le variazioni climatiche più forti appaiono seguire un andamento quasi periodico su scala del millennio, generalmente (o almeno, abbastanza spesso) si presume che a dare il via a tali cambiamenti sia un fattore esterno alla Terra, come la variabilità solare. Infatti, un meccanismo solo interno, legato al sistema oceano-atmosfera-calotte glaciali, non appare sufficientemente plausibile, perché esso non sarebbe in grado di spiegare la possibile periodicità.

Come ricordato nel nostro precedente lavoro, le ricostruzioni del passato non sono di interesse semplicemente culturale, scientifico e storico. Poiché gli eventi si ripresentano nel tempo, lo studio degli episodi di cambiamenti climatici rapidi e significativi avvenuti in passato può aiutarci a identificare gli esiti "to which we might be alert from a policy perspective". Infatti, le conseguenze dei cambiamenti includono: "out migration, in migration, population agglomeration in refugia, the emergence of new social forms as people adapt to new situations with respect to resource availability, and increased social stratification and inequality" (Brooks 2013).

Un'ulteriore difficoltà è capire gli effetti di origine antropica sul clima, che si aggiungono a quelli imposti dalla "natura". Nel prossimo lavoro cercheremo di inquadrare almeno in parte anche la complessità di questo problema.

## **Bibliografia**

Abreu J.A., Beer J., Ferriz-Mas A., K. McCracken K.G. et al. (2013) *Is there a planetary influence on solar activity?* Astronomy and Astrophysics, 548, A88.

Allen J.R.M., Brandt U., Brauer A., Hubberten H. et al. (1999), *Rapid Environmental Changes in Southern Europe during the Last Glacial Period*, Nature 400, 740.

- Allen J.R.M., Watts W.A., McGee E., Huntley B. (2002) *Holocene environmental variability—the record from Lago Grande di Monticchio, Italy*, Quaternary International 88, 69.
- Almasi P.F., Bond G. (2009) *Sun-Climate Connections*, in V. Gornitz (ed.), Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments, p. 929.
- Antonello E. (2012) *Su una possibile ‘astronomical perspective’ per lo studio dell’evoluzione umana*, in V.F. Polcaro (ed.) Atti del XII Convegno SIA, Albano Laziale 5-6 ottobre 2012, La Città del Sole, p. 25.
- Antonello E. (2013) *On the possibility of an astronomical perspective in the study of human evolution*, in I. Šprajc, P. Peani (eds.) Ancient cosmologies and modern prophets, Proceed. of the 20th ESAC Conference, Anthropological Notebooks, XIX Supplement, p. 41.
- Antonello E. (2016) *Astronomia, paleoclimatologia ed evoluzione umana*, Atti Convegno SIA 2016, in stampa.
- Baker R.G., Bettis E.A. III, Denniston R.F., Gonzalez L.A. (2001) Plant remains, alluvial chronology, and cave speleothem isotopes indicate abrupt Holocene climatic change at 6 ka in midwestern USA, Global and Planetary Change 28, 285
- Baker V.R. (2009) *Glacial megalakes*, in V. Gornitz (ed.), Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments, p. 380.
- Balter M. (2010) *The Tangled Roots of Agriculture*, Science 327, 404.
- Barker S., Chen J., Gong X., Jonkers L., Knorr G., Thornalley D. (2015) *Icebergs not the trigger for North Atlantic cold events*, Nature 520, 333.
- Bar-Yosef O. (1998) *The Natufian Culture in the Levant, Threshold to the Origins of Agriculture*, Evolutionary Anthropology 6, 159.
- Berger A., Loutre M.F (1991) *Insolation values for the climate of the last 10 million years*, Quaternary Sciences Review 10, 4, 297-317.
- Boch R., Spötl C., Kramers J. (2009) High-resolution isotope records of early Holocene rapid climate change from two coeval stalagmites of Katerloch Cave, Austria, Quaternary Science Reviews 28, 2527.
- Bond G. (2009) *Millennial climate variability*, in V. Gornitz (ed.), Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments, p. 568.
- Bond G., Showers W., Cheseby M., Lotti R., et al. (1997) A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates, Science 278, 1257.
- Bond G., Kromer B., Beer J., Muscheler R., Evans M.N. et al. (2001) *Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene*, Science 294, 2130.
- Borrell F., Junno A., Barcelò J.A. (2015) Synchronous environmental and cultural change in the emergence of agricultural economies 10,000 Years Ago in the Levant, PLOS One, DOI:10.1371/journal.pone.0134810.

- Braun H., Christl M., Rahmstorf S., Ganopolski A., Mangini A. et al. (2005) *Possible solar origin of the glacial 1,470-year climate cycle demonstrated in a coupled model*, Nature 438, 208.
- Brook E.J., Buizert C. (2018) Antarctic and global climate history viewed from ice cores, Nature 558, 200.
- Brooks N. (2006) Cultural responses to aridity in the Middle Holocene and increased social complexity, Quaternary International 151, 29.
- Brooks N. (2013) Beyond collapse: climate change and causality during the Middle Holocene Climatic Transition, 6400–5000 years before present, Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography, 112, No. 2, 93.
- Buizert C., Gkinis V., Severinghaus J.P. et al. (2014) Greenland temperature response to climate forcing during the last deglaciation, Science 345, 1177.
- Carlson A.E. (2013) *The Younger Dryas Climate Event*, in: Elias S.A. (ed.) The Encyclopedia of Quaternary Science, vol. 3, pp. 126-134, Elsevier.
- Cauvin J. (2000) The birth of the gods and the origins of agriculture, Cambridge Univ. Press.
- Charbonneau P. (2013) *The planetary hypothesis revived*, Nature 493, 613.
- Cheng H., Lawrence Edwards R., Sinha A., Spötl Ch., Yi L. et al. (2016) *The Asian monsoon over the past 640,000 years and ice age terminations*, Nature 534, 640.
- Cremaschi M., di Lernia S., 1998, *The geoarchaeological survey in central Tadrart Acacus and surroundings (Lybian Sahara): environment and cultures*, in Cremaschi M., di Lernia S. (Eds.), Wadi Teshuinat: Palaeoenvironment and prehistory in southwestern Fezzan (Lybian Sahara), Centro Interuniversitario di Ricerca per le Civiltà e l'Ambiente del Sahara Antico, p. 13.
- Davis B.A.S., Brewer S., Stevenson A.C., Guiot J., Data Contributors (2003) *The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data*, Quaternary Science Reviews 22, 1701.
- deMenocal P.B. (2011) *Climate and Human Evolution*, Science 331, 540.
- Ditlevsen P.D., Andersen K.K., Svensson A. (2007) The DO-climate events are probably noise induced: statistical investigation of the claimed 1470 years cycle, Climate of the Past 3, 129.
- Drake N., Bristow C. (2006) Shorelines in the Sahara: geomorphological evidence for an enhanced monsoon from palaeolake Megachad, The Holocene 16, 901.
- Dunne E.M., Gordon H., Kürten A., Almeida J., Duplissy J. et al. (2016) *Global atmospheric particle formation from CERN CLOUD measurements*, Science 354, 1119.
- EPICA (2006) *One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica*, Nature 444, 195.

- Ervin Taylor R. (2009) *Radiocarbon dating*, in V. Gornitz (ed.), *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*, p. 863.
- Fairbridge R.W., Gornitz V. (2009) *Earth Laws and Paleoclimatology*, in V. Gornitz (ed.), *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*, p. 294.
- Firestone R.B., West A., Kennett J.P., Becker L., Bunch T.E. et al. (2007) *Evidence for an extraterrestrial impact 12,900 years ago that contributed to the megafaunal extinctions and the Younger Dryas cooling*, PNAS 104, 16016.
- Giaccio B., Hajdas I., Isaia R., Deino A., Nomade S. (2017) *High-precision  $^{14}\text{C}$  and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of the Campanian Ignimbrite (Y-5) reconciles the time-scales of climatic-cultural processes at 40 ka*, Scientific Reports, 7:45940, DOI: 10.1038/srep45940
- Gordon H., Kirkby J., Baltensperger U., Bianchi F., Breitenlechner M. et al. (2017) *Causes and importance of new particle formation in the present-day and preindustrial atmospheres*, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, DOI: 10.1002/2017JD026844.
- Guo Z., Petit-Maire N., Kröpelin S. (2000) *Holocene non-orbital climatic events in present-day arid areas of northern Africa and China*, Global and Planetary Change 26, 97.
- Gupta A.K., Mohan K., Das M. Singh R.K. (2013) *Solar forcing of the Indian summer monsoon variability during the Allerød period*, Scientific Reports 3 : 2753, DOI: 10.1038/srep02753
- Hemming S. (2009) *Heinrich events*, in V. Gornitz (ed.), *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*, p. 409.
- Keeling C.D., Whorf T. P. (2000) *The 1,800-year oceanic tidal cycle: a possible cause of rapid climate change*, PNAS 97, 3814.
- Kirkby J. (2008) *Cosmic rays and climate*, arXiv:0804.1938; *Surveys in Geophysics* 28, 333.
- Kobashi T., Severinghaus J.P., Brook E.J., Barnola J.M., Grachev A.M. (2007) *Precise timing and characterization of abrupt climate change 8200 years ago from air trapped in polar ice*, Quaternary Science Reviews 26, 1212.
- Kocharov G.E., Ostryakov V.M., Peristykh A.N., Vasilev V.A. (1995) *Radiocarbon content variations and Maunder minimum of solar activity*, Solar Physics 159, 381.
- Joannin S., Brugiapaglia E., de Beaulieu J.L., Bernardo L., Magny M. et al. (2012) *Pollen-based reconstruction of Holocene vegetation and climate in southern Italy: the case of Lago Trifoglietti*, *Climate of the Past* 8, 1973.
- Jouzel, J., Masson-Delmotte V., Cattani O., Dreyfus G., Falourd S. et al. (2007) *Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years*, *Science* 317, 793.
- Lawler A. (2012) *Uncovering civilization's roots*, *Science* 335, 793.

- Lioubimtseva E., Simon B., Faure H., Faure-Denard L. Adams J.M. (1998) *Impacts of climatic change on carbon storage in the Sahara–Gobi desert belt since the Last Glacial Maximum*, *Global and Planetary Change*, 16–17, 95.
- Lisiecki, L.E., Raymo M.E. 2005, A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records, *Paleoceanography*, 20, PA1003.
- Liverani M. (2011) *Antico oriente. Storia società economia*. Editori Laterza, Roma-Bari.
- Maslin M. (2009) *Quaternary climate transitions and cycles*, in V. Gornitz (ed.), *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*, p. 840.
- Mayewski P.A., Rohling E.E., Stager J.C., Karlen W., Maasch K.A. et al. (2004) *Holocene climate variability*, *Quaternary Research* 62, 243.
- McCracken K.G., Beer J., Steinhilber F., Abreu J. (2013) A phenomenological study of the Cosmic Ray variations over the past 9400 years, and their implications regarding solar activity and the solar dynamo, *Solar Physics* 286, 609.
- Meltzer D.J., Holliday V.T., Cannon M.D., and Shane Miller D. (2014) Chronological evidence fails to support claim of an isochronous widespread layer of cosmic impact indicators dated to 12,800 years ago, *PNAS*, DOI/10.1073/pnas.1401150111
- Mogensen I.A. (2009) *Dansgaard-Oeschger cycles*, in V. Gornitz (ed.), *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*, p. 229.
- Mohtadi M., Prange M., Oppo D.W., De Pol-Holz R., Merkel U. (2014) *North Atlantic forcing of tropical Indian Ocean climate*, *Nature* 509, 76.
- Morgan V.I. (2009) *Antarctic cold reversal*, in V. Gornitz (ed.), *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*, p. 22.
- Morrill C., Jacobsen R.M. (2005) *How widespread were climate anomalies 8200 years ago?* *Geophysical Research Letters* 32, L19701.
- Murton J.B., Bateman M.D., Dallimore S.R., Teller J.T., Yang Z. (2010) *Identification of Younger Dryas outburst flood path from Lake Agassiz to the Arctic Ocean*, *Nature* 464, 740.
- Neubauer S., Hublin J.J., Gunz P. (2018) *The evolution of modern human brain shape*, *Science Advances* 4: eaao5961.
- NGRIP (2004), High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period, *Nature*, 431, 147.
- Obrochta S.P., Miyahara H., Yokoyama Y., Crowley T.J. (2012) *A re-examination of evidence for the North Atlantic “1500-year cycle” at Site 609*, *Quaternary Science Reviews* 55, 23.
- Oppenheimer C. (2002) Limited global change due to the largest known Quaternary eruption, Toba  $\approx$ 74 kyr BP? *Quaternary Science Reviews* 21, 1593.

- Peristykh A.N., Damon P.E. (2003) Persistence of the Gleissberg 88-year solar cycle over the last 12000 years: evidence from cosmogenic isotopes, *J. Geophys. Res.* 108, 1003.
- Peteet D.M. (2009) *Younger Dryas*, in V. Gornitz (ed.), *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*, p. 993.
- Pollock, S. (2001) *The Uruk period in southern Mesopotamia*, in M.S. Rothman (Ed.), *Uruk Mesopotamia and its neighbors: Cross-cultural interactions in the era of state formation*, Santa Fe: SAR Press, p. 181.
- Rahmstorf S. (2003) *Timing of abrupt climate change: A precise clock*, *Geophysical Research Letters*, 30, no. 10, 1510.
- Rapp D. (2014) *Assessing climate change. Temperatures, solar radiation and heat balance*, Springer International Publishing Switzerland.
- Renfrew C. (2007), *Prehistory. The making of the human mind*, London, Phoenix, Orion Books Ltd; trad. it., 2011, *Preistoria. L'alba della mente umana*, Torino, Einaudi.
- Riehl S., Zeidi M., Conard N.J. (2013) Emergence of Agriculture in the Foothills of the Zagros Mountains of Iran, *Science* 341, 65.
- Rohling E.J., Pälike H. 2005, Centennial-scale climate cooling with a sudden cold event around 8,200 years ago, *Nature* 434, 975.
- Skonieczny C., Paillou P., Bory A., Bayon G., Biscara L. (2015) *African humid periods triggered the reactivation of a large river system in Western Sahara*, *Nature Communications* 6:8751, DOI: 10.1038/ncomms9751.
- Smith E.I., Jacobs Z., Johnsen R., Ren M., Fisher E.C. et al. (2018) *Humans thrived in South Africa through the Toba eruption about 74,000 years ago*, *Nature* 555, 511.
- Solanki S.K., Krivova N.A., Haigh J.D. (2013) *Solar Irradiance Variability and Climate*, *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*, 51, 311.
- Tanno K., Willcox G. (2006) *How Fast Was Wild Wheat Domesticated?* *Science*, 311, 1886
- Taylor R.E., Bar-Yosef O. (2014) *Radiocarbon dating. An archaeological perspective*, Routledge, Taylor and Francis Group.
- Turner T.E., Swindles G.T., Charman D.J., Langdon P.G., Morris P.J. et al. (2016) *Solar cycles or random processes? Evaluating solar variability in Holocene climate records*, *Scientific Reports* 6:23961, DOI: 10.1038/srep23961.
- van der Horn S.A., van Kolfschoten T., van der Plicht J., Hoek W.Z. (2015) The effects of the 8.2 ka event on the natural environment of Tell Sabu Abyad, Syria: implications for ecosystem resilience studies, *Quaternary International* 378, 111.
- van der Plicht J., Akkermans P.M.M.G., Nieuwenhuys O., Kaneda A., Russell A. (2011) *Tell Sabi Abyad, Syria: radiocarbon chronology, cultural change, and the 8.2 ka event*, *Radiocarbon* 53, 229.

- Vieira L.E.A., Solanki S.K., Krivova N.A., Usoskin I. (2011) *Evolution of the solar irradiance during the Holocene*, *Astronomy and Astrophysics* 531, A6.
- Wagner G., Beer J., Masarik J., Muscheler R. et al. (2001) *Presence of the Solar de Vries Cycle (~205 years) during the Last Ice Age*, *Geophys. Res. Lett.* 28, 303.
- WAIS Divide Project Members (2015) *Precise interpolar phasing of abrupt climate change during the last ice age*, *Nature* 520, 661.
- Wang Y., Cheng H., Edwards R.L., He Y., Kong X. (2005) *The Holocene Asian Monsoon: links to Solar Changes and North Atlantic climate*, *Science*, 308, 854.
- Weaver A.J., Saenko O.A. (2009) *Thermohaline circulation*, in V. Gornitz (ed.), *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*, p. 943.
- Weninger B., Alram-Stern E., Bauer E., Clare L., Danzeglocke U. et al. (2006) *Climate forcing due to the 8200 cal yr BP event observed at Early Neolithic sites in the eastern Mediterranean*, *Quaternary Research* 66, 401.
- Weninger B., Clare L., Rohling E.J., Bar-Yosef O., Böhner U. et al. (2009) *The Impact of Rapid Climate Change on prehistoric societies during the Holocene in the Eastern Mediterranean*, *Documenta Praehistorica* 36, 7; DOI: 10.4312/dp.36.2.
- Willcox, G. (2013), “The roots of cultivation in Southwestern Asia”, *Science*, 341, 39.
- Willcox, G. (2014), “Les premiers indices de la culture des céréales au Proche-Orient / The beginnings of cereal cultivation in the Near East”, in C. Manen, T. Perrin, J. Guilaine (eds) *La transition néolithique en Méditerranée / The Neolithic transition in the Mediterranean*, Errance–AEP, pp. 47-58.
- Wolbach W.S., Ballard J.P., Mayewski P.A., Adedeji V., Bunch T.E. et al. (2018a) *Extraordinary biomass burning episode and impact winter triggered by the Younger Dryas cosmic impact 12800 years ago. 1. Ice cores and glaciers*, *The Journal of Geology*, 126, DOI:10.1086/695703.
- Wolbach W.S., Ballard J.P., Mayewski P.A., Parnell A.C., Cahill N. et al. (2018b) *Extraordinary biomass burning episode and impact winter triggered by the Younger Dryas cosmic impact 12800 years ago. 2. Lake, marine, and terrestrial sediments*, *The Journal of Geology*, 126, DOI:10.1086/695704.
- Xu D., Lu H., Chu G., Wu N., Shen C. (2014) *500-year climate cycles stacking of recent centennial warming documented in an East Asian pollen record*, *Scientific Reports* 4 : 3611 | DOI: 10.1038/srep03611.
- Yu S.Y., Colman S.M., Lowell T.V., Milne G.A., Fisher T.G. (2010) *Freshwater Outburst from Lake Superior as a Trigger for the Cold Event 9300 Years Ago*, *Science* 328, 1262