

Astronomia, paleoclimatologia ed evoluzione umana*

Elio Antonello

INAF-Osservatorio Astronomico di Brera

elio.antonello@brera.inaf.it

Abstract. In the last two decades, several anthropologists have discussed the hypothesis of the possible dependence of human evolution on the habitat variations related to the long-term oscillations of climate. Since the paleoclimatologists generally agree about the orbital forcing, that is, the variations of the orbital parameters of the Earth have triggered such climate oscillations, we should conclude that, if the hypothesis is correct, the characteristics of our specie depend also on the conditions imposed by ‘astronomy’. In other words, astronomy is an essential ingredient for understanding our ‘physiological’ characteristics and not just our culture. Of course, the orbital forcing is triggering also presently the changes and therefore must be taken into account in the attempt to predict the future of the climate.

1. Introduzione

In precedenti convegni SEAC e SIA avevamo ricordato il legame tra astronomia, clima ed evoluzione della società umana, e avevamo concluso che per capire la nostra storia non si può fare a meno dell’astronomia (Antonello 2012, 2013). Il presente lavoro è inteso come un primo aggiornamento, ed è dedicato all’ipotesi, avanzata negli ultimi decenni da vari antropologi, che l’evoluzione stessa della specie umana, iniziando dalla comparsa dei primi ominini tra 7 e 4 Ma fa (Ma = milioni di anni), sia stata influenzata dalle variazioni ambientali dovute alle oscillazioni climatiche, legate a loro volta alla variazione dei parametri orbitali della Terra (*orbital forcing*). Da un lato, si tratterebbe di effetti che avrebbero portato alla estinzione di specie incapaci di adattarsi ai cambiamenti, mentre avrebbero favorito lo sviluppo delle specie con tale capacità, e, dall’altro lato, ci sarebbero stati effetti evolutivi anche sulla vita sociale dei gruppi di individui in relazione all’ambiente. Per esempio, Maslin et al. (2015) definiscono un contesto generale basato sulla variazione del clima

* Lavoro presentato al 16° Convegno SIA, Politecnico di Milano, 3-4 Novembre 2016.

con periodicità definita dalla precessione climatica, “the pulsed climate variability conceptual framework”, entro il quale discutono i diversi meccanismi teorici proposti da vari autori per spiegare in che modo si sarebbero formati i caratteri evolutivi umani. Similmente Potts (2013) discute in dettaglio le ipotesi, concludendo inoltre che “the view that emerges is that important changes in stone technology, sociality, and other aspects of hominin behavior can now be understood as adaptive responses to heightened habitat instability”.

Oggi è diventato possibile trattare il contesto paleo-ambientale e paleoclimatico dell’evoluzione umana grazie all’interdisciplinarietà che integra i dati geologici, biologici e antropologici con la conoscenza del cambiamento climatico globale. In effetti, il rendersi sempre più conto dell’importanza della tettonica, del vulcanesimo e dell’*orbital forcing* durante gli ultimi 5 Ma, ha permesso di unire le informazioni su paleoambiente e paleoclima, fornite dalla geologia, alla storia evolutiva ricavata dall’archeologia e dalla paleoantropologia (Ashley 2009).

Data l’evidente complessità del contesto, sono chiaramente molti i problemi e le incertezze, come per esempio quelli delineati in modo dettagliato da Kingston (2007). Tuttavia è significativa in quel lavoro la sezione intitolata “Orbital forcing as an organizing framework” dove l’autore dichiara che “cycles of low-latitude insolation, controlled primarily by changes in the geometry of the Earth’s orbit, represent a key factor in understanding the evolution of hominid ecosystems in equatorial Africa” (Kingston, 2007).

Allorché si cerca di riassumere in poche pagine come nel nostro caso la realtà spaziale e temporale estremamente complessa del paleoclima, dedotta dagli innumerevoli indicatori climatici, il rischio che si corre è di essere superficiali o semplicisti, e di tendere a privilegiare eventuali preconcetti. E’ opinione dello scrivente che la suddetta realtà costituisca un quadro talmente complesso e articolato da far temere della sua effettiva comprensione, o quantomeno di renderla difficoltosa; alla fine però ci si rende conto di come sia proprio l’astronomia a venire in soccorso, come una guida, fornendo la necessaria coerenza.

2. Parametri orbitali ed effetti climatici

Ricordiamo brevemente i parametri orbitali della Terra e i loro periodi di variazione principali, con riferimento agli ultimi milioni di anni (Figura 1). L’eccentricità dell’orbita varia con periodicità intorno a 100 ka e 400 ka. L’obliquità dell’eclittica (inclinazione dell’asse di rotazione della Terra)

varia di un paio di gradi circa con periodo intorno a 41 ka. La combinazione di precessione astronomica e spostamento degli apsi, che si potrebbe visualizzare come una rotazione del piano orbitale, produce la precessione climatica, cioè le stagioni ‘ruotano’, con periodicità intorno a 23 ka.

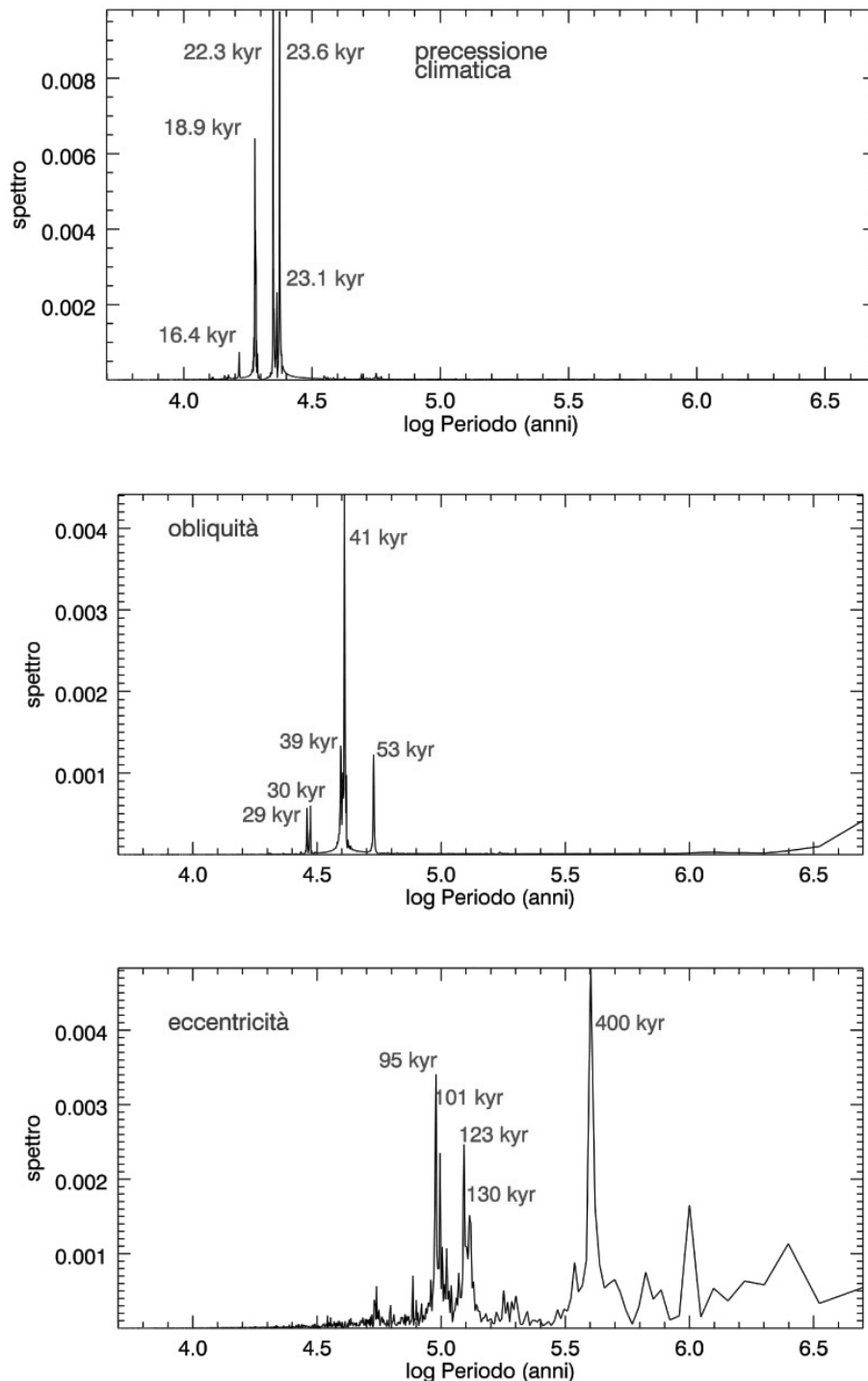


Fig. 1. Spettro di ampiezza da Fast Fourier Transform (FFT) della soluzione orbitale di Laskar et al. (2004) per un intervallo temporale di 10 Ma, ottenuto utilizzando IDL; parametri: precessione climatica (pannello superiore), obliquità (pannello centrale), eccentricità (pannello inferiore). Periodi indicati in kyr, migliaia di anni.

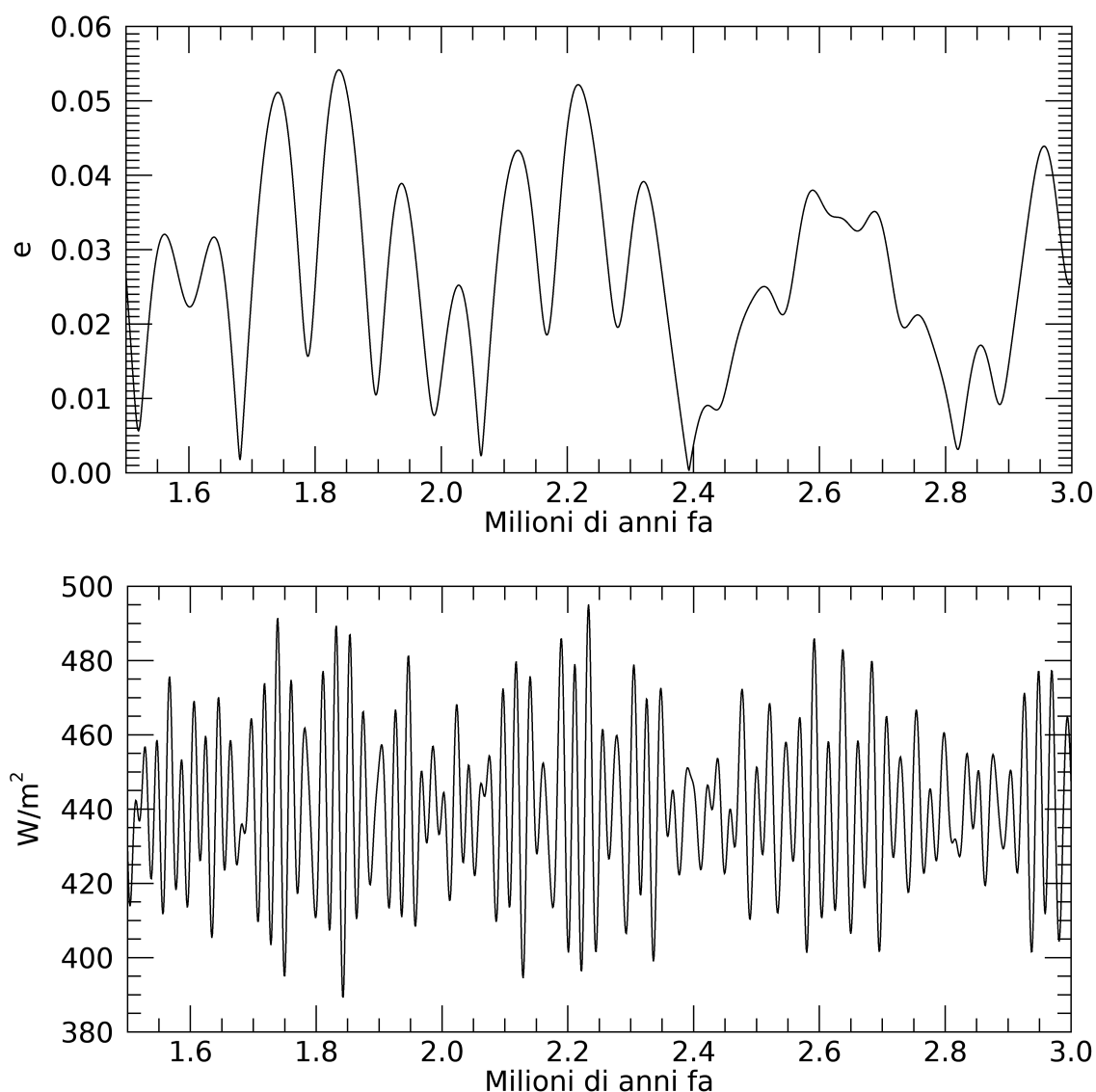


Fig. 2. Andamento dei parametri astronomici tra 1.5 e 3 Ma fa. Pannello superiore: eccentricità; pannello inferiore: insolazione estiva per 65°N. Dati da Berger e Loutre (1991).

L'effetto risultante di queste oscillazioni è di variare le condizioni di insolazione (*orbital forcing*; cicli di Milankovitch), e il sistema complesso costituito da superficie terrestre, oceani, atmosfera, calotte di ghiaccio, risponde di conseguenza a tali sollecitazioni.

A completamento, segnaliamo che Laskar et al. (2011a) hanno studiato l'orbita terrestre fino a 250 Ma fa, trovando un comportamento caotico, e quindi imprevedibilità, a distanza di 50 Ma. Questo comportamento è da addebitare agli asteroidi maggiori (come Cerere e Vesta; Laskar et al. 2011b) che hanno un piccolo effetto gravitazionale sulla Terra, e hanno un'orbita intrinsecamente caotica. Laskar et al. (2011a) rimarcano la stabilità del periodo di 405 ka dell'eccentricità nell'intervallo di 250 Ma, pur in presenza del comportamento caotico, tanto che questo parametro

oggi è usato efficacemente nella cronologia stratigrafica geologica¹.

In vista di quanto diremo, è importante tenere presente l'andamento dell'eccentricità e quello dell'insolazione negli ultimi milioni di anni. Quanto mostrato nella Figura 2 è un esempio per l'intervallo da 1.5 a 3 Ma fa come ricavato dai calcoli di Berger e Loutre (1991). Si notino l'oscillazione dell'eccentricità, con periodicità di circa 100 ka, modulata con una periodicità di circa 400 ka, e l'oscillazione dell'insolazione estiva con periodicità di circa 23 ka² e ampiezza che varia in funzione dell'eccentricità dell'orbita. A questo proposito, è utile riportare un commento di Laskar et al. (2011a). L'insolazione globale media annua varia con il quadrato dell'eccentricità e , per cui risente pochissimo delle sue variazioni, essendo già e una quantità piccola. Questo non è però il caso delle variazioni stagionali; per esempio, mediante un modello semplificato gli autori stimano che, con una variazione di e di 0.02, si creerebbe una ulteriore differenza di temperatura di circa 6° K tra perielio e afelio³.

L'analisi dei numerosi *proxies* (un *proxy* è un indicatore climatico intermedio; v. Sezione 3), ha confermato la presenza di periodicità simili a quelle previste dalla teoria orbitale. L'interpretazione dei dati dei *proxies* è comunque complessa, e la considerazione riassuntiva che riportiamo qui di seguito è solo qualitativa. Negli ultimi 10 Ma circa, dopo una fase iniziale di clima relativamente 'stabile', è andato accentuandosi il progressivo raffreddamento globale, con l'estensione definitiva delle calotte glaciali in Antartide⁴, e la successiva formazione delle calotte nell'emisfero Nord. In

¹ Addirittura, come scrivono Olsen e Whiteside (2009), "The astronomical calibration is so robust that it has allowed for a recalibration of the ⁴⁰K decay constant", costante ora ampiamente adottata. E' inoltre rimarchevole una delle loro conclusioni: "It is not surprising that orbital cycles have affected the climate and the resulting sedimentary record through Earth's history, and thus the discovery of past Milankovitch cyclicity is less interesting for itself than for its possible uses". Per un'introduzione in italiano a quanto discusso in queste sezioni si può consultare Orombelli (1997) e Premoli Silva (1997).

² L'effetto della precessione climatica decresce andando dall'equatore verso i poli, mentre viceversa aumenta quello dell'obliquità (Berger e Loutre, 1991).

³ Già in base a questa semplice indicazione si può sospettare che gli eventuali effetti climatici sarebbero 'amplificati' quando l'eccentricità è maggiore.

⁴ La glaciazione dell'Antartide era iniziata intorno a 30 Ma fa, ed era proseguita poi a fasi alterne; l'origine è legata alla tettonica dell'Antartide, alla modifica della circolazione oceanica a seguito dell'apertura dei passaggi di Drake e Tasman, e alla diminuzione di CO₂ (Licht 2009).

particolare, questa seconda decisa transizione verso il clima più freddo avviene nell'intervallo tra 3 e 2.5 Ma fa (Zachos et al. 2001; Jensen et al. 2007)⁵. Al trend globale si sovrappongono le oscillazioni climatiche legate all'*orbital forcing*, che mostrano un'ampiezza progressivamente crescente, (Figura 3; oppure si veda in dettaglio la figura P71 in Bowen 2009)⁶. La periodicità principale dapprima è di 41 ka, e poi, con l'instaurarsi delle grandi sequenze glaciali nell'ultimo milione di anni, è intorno a 100 ka. Inoltre, al trend di raffreddamento generale è associata anche una tendenza all'aumento dell'aridità (deMenocal 2004); grossolanamente: se aumenta la quantità di ghiaccio, diminuisce la quantità d'acqua libera⁷.

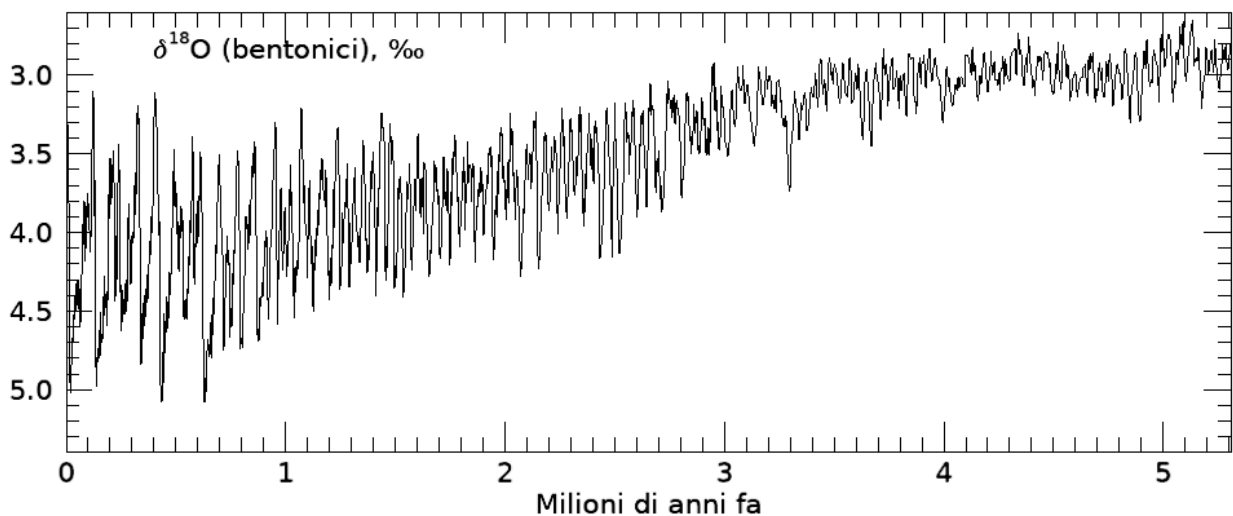


Fig. 3. Andamento dell'indicatore climatico $\delta^{18}\text{O}$ in per mille (‰) ricavato da Lisiecki e Raymo (2005; *LR04 stack*) come media dei dati rilevati in 57 carotaggi a varie latitudini e longitudini negli oceani. L'errore standard medio è di soli 0.06 ‰, e ciò indica che l'andamento è grossolanamente lo stesso per le diverse località.

Dalla geologia arrivano varie altre conferme sul legame tra gli elementi orbitali e l'andamento del clima, in particolare per quanto riguarda aridità

⁵ Questo raffreddamento appare legato all'ulteriore modifica della circolazione oceanica a seguito della chiusura dello stretto di Panama (Bowen 2009).

⁶ Si considera il dato delle variazioni di $\delta^{18}\text{O}$ (v. Sez. 3) bentonico come indicatore soprattutto delle variazioni di volume di ghiaccio e temperatura (Zachos et al. 2001).

⁷ Sono stati espressi vari dubbi sull'origine della periodicità osservata di 100 ka dall'eccentricità, data la piccolezza del parametro. Ford et al. (2016), in base ai dati osservativi, suggeriscono però che il raffreddamento progressivo delle acque profonde nel Nord Atlantico iniziato circa 1.2 Ma fa possa essere stato il precursore necessario alla risposta climatica (calotte glaciali) di circa 900 ka fa, quando un modesto aumento nel volume del ghiaccio e la riorganizzazione della circolazione può aver causato la maggiore sensibilità al ciclo orbitale di 100 ka.

e umidità, in relazione anche ai regimi monsonici, rilevanti per il caso dell'Africa che andremo a illustrare⁸. Per esempio, a Zumaia in Spagna ci sono strati geologici di fondali marini risalenti a 66-61 Ma fa, caratterizzati da una spettacolare alternanza di roccia chiara calcarea, e di roccia più scura in cui si sono mescolati sedimenti argillosi depositati dai fiumi quando il clima era più umido. In altre parole, c'era stata un'oscillazione del clima tra arido e umido, e la periodicità di questa alternanza è proprio circa 23 ka; inoltre, il fenomeno tende a essere più intenso (cioè, umidità più accentuata) durante il massimo di variazione dell'eccentricità del ciclo di 405 ka (Kuiper et al. 2008). Un'alternanza di clima secco e clima umido con analoga periodicità la si rileva anche nelle stratificazioni di epoche più recenti e in varie località, con l'alternanza di carbonati⁹ (fase arida) e *sapropels*, cioè depositi fangosi (fase più umida), per esempio nei fondali del Mediterraneo orientale (Emeis e Sakamoto 1998) e a Gibliscemi in Sicilia (Hilgen et al. 1995; Krijgsman et al. 1995), oppure con quella di carbonati (fase umida) e sabbia desertica (fase più arida) nei fondali del Mar Arabico (*eolian flux*; deMenocal 2004, 2014). Ci sono ovviamente differenze nei dettagli, perché i patterns temporali e facies delle sequenze di *sapropels* differiscono a seconda del sito, e ciò può dipendere da vari fattori, come la diversa profondità dell'acqua o la diagenesi¹⁰ (Emeis e Sakamoto, 1998). Inoltre, mentre le sequenze di *sapropels* negli ultimi milioni di anni (fino ad oggi) sembrano seguire complessivamente l'andamento dell'insolazione (precessione climatica), le sequenze di *eolian flux* appaiono seguire la precessione climatica fino a circa 2.8 Ma fa, dopodiché hanno una periodicità principale di circa 41 ka (obliquità), e nell'ultimo milione di anni tende ad essere più evidente quella di 100 ka, in analogia con l'andamento degli indicatori della temperatura media. Prima di 2.8 Ma fa, i sedimenti di *sapropels* e *eolian flux* mostrano quindi cambiamenti climatici regolati soprattutto dalla precessione climatica, cosa considerata plausibile quando non siano ancora presenti grandi calotte glaciali (deMenocal 2004).

⁸ Oggi la vasta area interessata dal monzone 'asiatico' si estende dall'Estremo Oriente alla costa atlantica dell'Africa tropicale.

⁹ Sul fondo del mare si depositano gli scheletri dei vari organismi, in particolare dei foraminiferi (unicellulari), costituiti da carbonato di calcio, che vivono presso il fondale (organismi bentonici).

¹⁰ Per diagenesi si intende un cambiamento chimico, fisico o biologico subito dai sedimenti dopo la loro deposizione, durante e dopo la loro trasformazione in roccia.

Per cercare di rendere più evidente il discorso, forse è opportuno mostrare i risultati di un lavoro recente dedicato allo studio dei paleomonsoni. Cheng et al. (2016) hanno analizzato *speleothems* (come le stalagmiti) ricavate da caverne cinesi, e misurato il $\delta^{18}\text{O}$ nel carbonato di calcio presente, per un'epoca fino a 640 ka fa¹¹. In Figura 4 mostriamo l'andamento del parametro confrontato con l'insolazione estiva. Come già notato da altri autori per *speleothems* di caverne in varie località nel mondo, il $\delta^{18}\text{O}$ varia, in prima approssimazione, con l'insolazione, a meno di un possibile sfasamento¹². Sono state formulate varie ipotesi circa il meccanismo chimico-fisico che sta alla base dell'eccesso misurato, tuttavia l'interpretazione climatica è sempre la stessa: un $\delta^{18}\text{O}$ inferiore (più negativo) implica “higher spatially integrated monsoon rainfall between the tropical monsoon sources and the cave site and/or higher summer monsoon rainfall in the cave region” (Cheng et al. 2016).

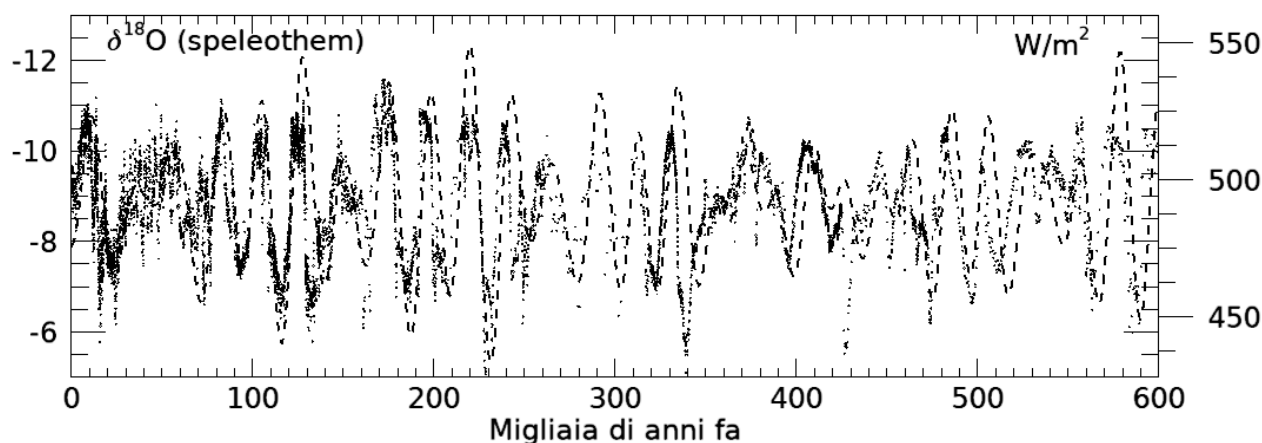


Fig. 4. Andamento dell'eccesso $\delta^{18}\text{O}$ in per mille da *speleothem* di caverne in Cina (punti; dati di Cheng et al. 2016 inclusi quelli di altri autori) confrontato con l'insolazione estiva (linea tratteggiata, insolazione a 60°N, giugno; Berger e Loutre 1991).

In altre parole, un $\delta^{18}\text{O}$ inferiore corrisponde a un monsone forte, con molta piovosità, e ciò avviene quando c'è maggiore insolazione (tenendo conto del possibile sfasamento dell'ordine del migliaio di anni), mentre un $\delta^{18}\text{O}$ maggiore corrisponde a un monsone debole, con poca piovosità, quando c'è minore insolazione. Si può notare come l'andamento ciclico in Figura 4 abbia grossolanamente la periodicità di 23 ka, cioè quella della

¹¹ Gli speleothems (stalattiti, stalagmiti, mutaroccia) in grotte carsiche si formano a seguito di depositi da percolazione di acqua che trasporta minerali in soluzione. Le sezioni di stalagmite sono analizzate e radio-datate.

¹² Bisogna tenere presenti eventuali possibili incertezze nella calibrazione temporale.

precessione climatica. A rigore, il risultato mostrato è specifico per la località cinese; il clima di altre aree del globo interessate dai monsoni potrebbe rispondere in modo diverso all'*orbital forcing*. Inoltre, il dato degli *speleothems* cinesi mostra anche oscillazioni (a volte molto forti) con breve periodo (da vari secoli a un migliaio di anni); nel prossimo lavoro parleremo di quelle avvenute dalla fine dell'ultima glaciazione a oggi.

3. Dati di osservazione

In questa Sezione riporteremo alcune generalità sui tipi di *proxy* maggiormente utilizzati, almeno per quanto riguarda l'argomento del presente lavoro; ricordiamo comunque che esiste un gran numero di indicatori climatici.

Le informazioni su clima ed ambiente provengono da fonti diverse: scavi nelle aree dove si erano trovati fossili di ominini, carotaggi di fondali di laghi e marini, o scavi dove esistevano bacini lacustri. La sedimentologia fornisce le informazioni di base su come si sono formati i depositi, mentre i dati dei *proxies* possono essere derivati dall'insieme dei fossili animali e la loro morfologia, dai resti di piante (fossili, pollini, fitoliti, semi), dalla composizione isotopica dei denti dei mammiferi, dalla geochimica dei sedimenti, che può includere la composizione isotopica dei carbonati nel suolo, la cera epicuticolare delle foglie, la geochimica delle argille e la distribuzione delle biomolecole (Levin 2015). I *proxies* principali usati come dati di osservazione in questo tipo di ricerche, rilevati nell'Africa orientale e nei mari adiacenti, si possono riassumere come segue (Potts 2013).

1) Eccesso $\delta^{18}\text{O}$. E' un parametro (espresso in per mille) legato al rapporto degli isotopi stabili dell'ossigeno ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) misurato nei carotaggi profondi dei fondali marini. Per esempio, l'O è contenuto nella molecola di carbonato di calcio degli scheletri dei microrganismi, ed è un indicatore delle condizioni ambientali di quando si sono formati e depositati nel mare, in relazione alla diversa presenza percentuale degli isotopi nelle molecole d'acqua, H_2O^{13} .

¹³ Il parametro $\delta^{18}\text{O}$ dipende da vari fattori come temperatura, presenza o assenza di calotte glaciali, salinità dell'acqua. Ovviamente l'eccesso può essere misurato in differenti contesti, oltre a quelli marini, come i carotaggi di ghiacciai e calotte (anche per l'ossigeno atmosferico nelle bolle d'aria intrappolate), o sezioni di *speleothemes* per le molecole di carbonati.

2) Polvere e sabbia terrestre di origine eolica misurata nei carotaggi profondi dei fondali marini. Per esempio, è la sabbia desertica trasportata dal vento, e una sua preponderanza indica periodi di aridità.

3) Marcatori biologici (*biomarkers*) vegetali, o fossili molecolari. Sono stati studiati negli ultimi due decenni (p.es.: Sachs et al. 2013), e includono le molecole lipidiche (n-alcane) della cuticola delle foglie delle piante (cera epicuticolare; *leaf wax*), che si conservano a lungo nelle stratificazioni (p.es.: Meyers, 2009).

4) Eccesso $\delta^{13}\text{C}$. E' il rapporto degli isotopi stabili del carbonio ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$). A questo eccesso è legato l'indicatore della fotosintesi (Osborne e Beerling 2005). Circa 30 Ma fa alcune piante iniziarono ad attuare un ciclo della fotosintesi, indicato con C_4 , un po' diverso da quello, indicato con C_3 , seguito fino ad allora. Il rapporto isotopico $\delta^{13}\text{C}$ è leggermente diverso nei due cicli, e tale differenza si ritrova di conseguenza anche nei *biomarkers* e nei fossili. Le piante che utilizzano la C_3 tendono a prosperare in presenza di luce solare e temperature moderate, con concentrazione sufficiente di CO_2 e abbondanza di acqua. La C_4 invece ha il vantaggio di essere attuata anche in condizioni difficili, cioè aridità, alte temperature e scarsità di azoto e scarsità di CO_2 , perché utilizza l'acqua in modo più efficiente e parsimonioso; oggi le piante C_4 si trovano soprattutto in zone tropicali e sub-tropicali. A iniziare tra 8 e 6 Ma fa si è avuto un aumento globale nella biomassa di piante che usano la fotosintesi C_4 , come indicato dai cambiamenti nel rapporto isotopico del carbonio nello smalto di denti (che si formano durante la crescita) fossili di erbivori in Asia, Africa, America del Nord e del Sud (Cerling et al. 1997). Poiché dallo smalto degli animali moderni è possibile distinguere la dieta con vegetali C_3 da quella con vegetali C_4 , si suppone, in base allo stesso principio, che sia possibile dedurre tale dieta anche nel caso dei fossili di animali (Rich, Vickers-Rich 2009).

5) Diatomiti e argille lacustri. Le diatomee sono microrganismi unicellulari acquatici con scheletro siliceo, e l'abbondanza dei depositi indica presenza di bacini lacustri¹⁴.

¹⁴ Nei laghi, la fioritura di alghe inizia in primavera con le diatomee, ed è seguita dalle alghe blu-verdi estive; queste si decompongono facilmente quando si depositano, mentre, in generale, gli scheletri silicei delle diatomee si conservano bene nei sedimenti (Zolitschka e Enters 2009).

6) *Sapropels* del Mediterraneo orientale; depositi fangosi che indicano la rilevanza delle inondazioni del Nilo, legate alla dinamica dei monsoni in Africa nord-orientale.

7) Ci sono altri dati, più discontinui, forniti per esempio da pollini fossili, da sedimenti di origine geochimica, e da stratigrafia degli isotopi $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

I *proxies* provenienti dalle diverse fonti forniscono informazioni tra loro complementari sul clima, l'ambiente e le condizioni dell'ecosistema con cui gli ominini hanno interagito; tuttavia l'interpretazione del dato osservativo non è banale e generalmente neppure diretta¹⁵. Anche la datazione è ovviamente essenziale. Il tempo può essere stimato mediante metodi come le tecniche radiometriche (la più usata è il rapporto isotopico $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$), o la correlazione geochimica delle ceneri vulcaniche (tefrocronologia) data la vasta estensione spaziale delle eruzioni in Africa orientale aventi caratteristiche geochimiche diverse¹⁶. In tutti i casi, per stimare le età si misurano le velocità di sedimentazione degli strati (Levin 2015).

4. Paleoambiente e paleoantropologia

I paleoantropologi si sono chiesti se le oscillazioni più o meno intense del clima avvenute negli ultimi milioni di anni abbiano avuto una qualche influenza sulla evoluzione del genere *Homo*. E sono arrivati a parlare di shocks climatici: l'alternanza di ambienti umidi e aridi avrebbe spinto alcuni antenati verso la specie moderna, e avrebbe invece estinto altri (deMenocal, 2011, 2104).

Secondo quanto scrive Potts (2013), nonostante talvolta si affermi che Darwin abbia stabilito un legame tra clima ed evoluzione, in realtà non aveva considerato l'idea che il cambiamento ambientale stimolasse direttamente la varietà degli eventi evolutivi. Nel secolo scorso i paleoantropologi, invece di considerare con attenzione gli stimoli ambientali esterni, avevano quindi favorito spiegazioni intrinseche dell'evoluzione umana, secondo le quali un unico evento di transizione da

¹⁵ Per rendersi conto dei limiti e dei problemi relativi ai singoli *proxy*, si può consultare la *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*.

¹⁶ Ricordiamo anche la tecnica dell'*orbital tuning* spesso usata in passato: si tratta di un allineamento grafico dei dati di osservazione mediante i risultati orbitali (p.es. l'obliquità), ma ciò implica ovviamente un *bias* dei dati se lo scopo finale è l'analisi dei periodi presenti. Per questo motivo oggi i ricercatori tendono a utilizzare se possibile la radio-datazione.

foresta a prateria avrebbe costretto al bipedismo e all'uso di utensili. Negli ultimi decenni, invece, i ricercatori hanno iniziato a considerare proprio i fattori estrinseci per spiegare in che modo sono iniziati i cambiamenti evolutivi, i tempi e i modi di origine ed estinzione di specie, e gli adattamenti specifici in particolari periodi. Questi studi riguardano essenzialmente l'Africa orientale, e ciò per due motivi: 1) è possibile una risoluzione geocronologica relativamente precisa delle lunghe sequenze stratigrafiche disponibili in tali luoghi, perché sono strati che conservano fossili di ominini e di altri organismi insieme ad indicatori ambientali; 2) la totalità dell'evidenza paleontologica e archeologica indica l'Africa quale origine di molte transizioni critiche nell'evoluzione umana.



Fig. 5. Africa orientale con indicate varie località, bacini, fiumi e laghi, di interesse paleoantropologico (immagine da GoogleEarth).

Nella classificazione introdotta dai paleoantropologi, gli ominini (*hominini*) includono il genere *Pan* (*panina*; scimpanzé), e l'ulteriore separazione tra genere *Homo* (*hominina*) e tutti quelli estinti (come *Australopithecus*). Segnaliamo che queste distinzioni sono tuttora materia

di discussione vivace tra i ricercatori, come pure l'epoca in cui i vari rami si sono distinti¹⁷. L'analisi dei fossili e dei *proxies* africani ha fornito un quadro dell'evoluzione degli ominini che Maslin et al. (2015) hanno riassunto in quattro fasi principali, con la comparsa di: (1) primi (proto) ominini dei generi *Sahelanthropus*, *Orrorin* e *Ardipithecus* tra 7 e 4 Ma fa; (2) *Australopithecus* circa 4 Ma fa e *Paranthropus* circa 2.7 Ma fa; (3) *Homo* intorno al Plio-Pleistocene¹⁸ circa 2.5 Ma fa; (4) *H. heidelbergensis* circa 800 ka fa, fino agli umani anatomicamente moderni circa 200 ka fa. A parte il *Sahelanthropus*, trovato nel Ciad, i primi resti dei generi principali sono stati trovati nel sistema del Rift dell'Africa Orientale (Figura 5). I geologi dicono che oggi nella Rift Valley la crosta terrestre si sta assottigliando, e la grande placca africana tra qualche milione di anni qui finirà col separarsi in due zolle (Nubiana e Somala). Forse sono state le vicende geologiche specifiche nella depressione della Rift Valley a permettere la conservazione dei fossili, oppure, per qualche motivo, è in questa zona specifica che l'evoluzione ha prodotto gli ominini e infine anche il genere *Homo*. Oppure, più plausibilmente, come afferma Levin (2015): “The record of human evolution in eastern Africa exists because rifting has created accommodation space for sediments to accumulate relatively rapidly and because the current climate and tectonic conditions have promoted incision, such that many of these sediments are exposed and have allowed fossil discovery”.

5. Ipotesi sugli adattamenti evolutivi in Africa orientale

Durante il Plio-Pleistocene (ultimi 5 Ma) ci fu un progressivo cambiamento di vegetazione da piante C₃ a piante C₄, come è possibile dedurre dai carbonati del suolo, dagli isotopi di C negli n-alceni dei sedimenti marini e dai denti fossili di mammiferi. Il cambiamento di vegetazione è stato attribuito all'aumento progressivo di aridità dovuto al sollevamento tettonico dell'Africa orientale: l'altezza dei rilievi ha causato un blocco progressivo delle correnti umide che portavano la pioggia (Maslin et al. 2014). Tuttavia bisogna sempre tener presente la possibile

¹⁷ Una descrizione recente della possibile diversità degli ominini si può trovare in Haile-Selassie et al. (2015). Un esempio di discussione vivace riguarda la “realtà” o meno dell'*H. heidelbergensis*, come riportato da Balter (2014).

¹⁸ Per comodità del lettore, ricordiamo la successione temporale delle epoche geologiche, riportando il loro inizio approssimato in Ma fa: Miocene 23, Pliocene 5, Pleistocene 2.6, e infine Olocene 11 ka fa. I limiti temporali possono differire un poco a seconda degli autori.

diversità da zona a zona, come indicato da Levin (2015): “Although it is tempting to make simple connections between uplift and aridification, the histories of both uplift and hydroclimate in Africa during the past 10 Myr vary tremendously by specific location, and this variation must be considered before linking records of aridity and uplift history”.

L'attività tettonica ha avuto anche l'effetto di creare dei bacini adatti alla formazione di laghi, a seguito della progressiva incisione del rift propagatasi da nord verso sud¹⁹. Negli ultimi milioni di anni si osserva la presenza periodica (comparsa e scomparsa) di grandi laghi profondi, su tempi scala di 400 e 800 ka attribuiti alla variazione di eccentricità. L'interpretazione in termini climatici è del tutto analoga a quanto abbiamo ricordato per Zumaia: si hanno cicli di precessione climatica caratterizzati da grande umidità (alternata ad aridità) quando le variazioni di eccentricità sono maggiori. I dati paleoclimatici degli ultimi milioni di anni rilevati in Africa e nel Mediterraneo concordano nel descrivere tale andamento di clima umido e secco in fase con il periodo di circa 23 ka, con la fase umida connessa a quella del monsone forte e di maggiore insolazione, durante la quale tende a prevalere l'ambiente foresta, e la fase arida col monsone debole e minore insolazione, durante la quale tende a prevalere l'ambiente 'savana' (praterie). Se consideriamo la fase umida dell'ultimo ciclo precessionale (quello attualmente in corso) in Africa, la situazione è ben riassunta da deMenocal (2011): “from 15,000 to 5000 years ago, the modern Saharan Desert was nearly completely vegetated, with large, permanent lakes and abundant fauna. Precessional increases in summer radiation invigorated the monsoon, delivering more rainfall deeper into Africa, and enhanced Nile river runoff flooded into the eastern Mediterranean Sea. The resulting freshwater stratification created anoxic conditions and led to deposition of organic-rich sediments (*sapropels*) on the seafloor”. E' da notare che la fase arida dell'attuale ciclo precessionale sarebbe quindi iniziata circa 5000 anni fa, è stata caratterizzata dall'aumento della desertificazione del Sahara (e dei deserti extratropicali come il Gobi), e dovrebbe continuare per qualche altro migliaio di anni.

Basandosi sugli studi effettuati da diversi autori, Maslin et al. (2015) hanno proposto un quadro generale valido per gli ultimi milioni di anni (fino a circa 800 ka fa). Durante la fase 'arida' (poco meno di una decina

¹⁹ I laghi compaiono nella zona nord-orientale (bacini dell'Afar, Omo-Turkana) verso il Miocene medio e finale, circa 15 Ma fa, mentre in Kenya e Tanzania appaiono all'inizio del Pliocene (Maslin et al. 2014).

di migliaia di anni) i laghi in Africa orientale sono (quasi) asciutti, poi si riempiono rapidamente all'inizio della fase umida (che dura una decina di migliaia di anni), e infine si disseccano in modo variabile ed erratico nelle restanti migliaia di anni, per riprendere poi daccapo il ciclo della precessione climatica. Tutto questo dovrebbe essersi ripetuto varie volte durante le centinaia di migliaia di anni caratterizzati da grande variazione di eccentricità orbitale; al contrario, i bacini lacustri devono essere stati caratterizzati da poca acqua o sua completa assenza durante le fasi di piccola variazione di eccentricità.

E' in questo possibile contesto che si potrebbero inserire le diverse teorie evolutive degli ominini proposte da vari autori, teorie che si distinguono l'una dall'altra sulla base dell'importanza data a certi fattori ambientali (e a certe risposte evolutive) piuttosto che ad altri, teorie che si potrebbero forse in parte riconciliare.

Nella *review* di Potts (2013) sono riportate essenzialmente quattro ipotesi sull'evoluzione degli ominini collegata alle caratteristiche climatiche e ambientali; qui ricordiamo gli aspetti principali, senza entrare nei dettagli che sono di competenza degli antropologi²⁰. (1) Vrba (1988) aveva formulato la *turnover-pulse hypothesis* sulla base del raffreddamento avvenuto circa 2.5 Ma fa quale fattore principale del cambiamento di habitat in Africa; allora erano apparsi i generi *Homo* e *Paranthropus*, e l'industria litica, e c'era stata la variazione di specie animali (bovidi e roditori) e più in generale la scomparsa di organismi adatti a un clima caldo-umido a favore di quelli adattati al clima freddo-arido. (2) Un'idea opposta era stata proposta da Passey et al. (2010), i quali, dall'analisi di paleo-suoli nel bacino del Turkana, avevano fornito evidenza di suoli persistentemente molto caldi negli ultimi 4 Ma in tale regione; di conseguenza, la sfida per l'evoluzione degli ominini sarebbe stato il caldo persistente, piuttosto che il freddo²¹. (3) Tuttavia, nel corso degli ultimi decenni è stato dato molto peso al fattore aridità, in base al quale durante il Pliocene-Pleistocene ci sarebbe stato un (progressivo) cambiamento ambientale da foresta a 'savana', ma con il carattere

²⁰ Ci limitiamo a notare che Maslin et al. (2015) elencano un ventaglio di ipotesi più ampio.

²¹ Il risultato di Passey et al. (2010) appare in contrasto rispetto alle altre indicazioni; è in corso la sua verifica nel contesto del recente progetto *Hominin Sites and Paleolakes Drilling Project* (Cohen et al. 2017). Una prima conclusione piuttosto preliminare sembrerebbe escluderlo, confermando, oltre all'aridità, uno *slight cooling* (Upadhyay et al. 2017).

oscillante imposto dai cicli climatici (deMenocal 1995); le specie *homo* sarebbero state le prime ad essersi adattate a un ambiente arido. (4) Trauth et al. (2005) hanno rilevato tre periodi principali particolarmente umidi (2.7-2.5, 1.9-1.7, 1.1-0.9 Ma) dedotti dalla presenza periodica di laghi profondi, come abbiamo già ricordato più sopra, e che corrisponderebbero a cambiamenti evolutivi significativi. I tre periodi si correlano con l'intensificazione della glaciazione nell'emisfero nord (2.7-2.5 Ma), l'intensificazione della circolazione atmosferica zonale Est-Ovest (1.9-1.7 Ma)²², e il cambiamento nella periodicità dei cicli glaciali da 41 ka a 100 ka (1.1-0.9 Ma). Infine, Potts (2013) parla di *variability selection hypothesis*, secondo la quale sarebbe stata appunto l'instabilità ambientale legata ai cicli di 23 ka del clima a costringere la specie a un adattamento, o a far evolvere organismi meglio in grado di adattarsi. L'autore sottolinea la "variabilità alta/bassa" del clima legata agli effetti della precessione climatica modulata dall'eccentricità, cioè, l'alternarsi di umidità e aridità "alte" quando l'oscillazione di eccentricità è maggiore, e l'alternarsi di umidità e aridità "basse" quando l'oscillazione di eccentricità è minore. Potts ritiene che la sua ipotesi possa offrire un modo per riconciliare l'interpretazione basata sull'aridità e l'interpretazione che metteva in rilievo i periodi umidi nelle epoche dei laghi profondi; i maggiori eventi evolutivi (nuove specie; nuove tecnologie litiche) avverrebbero in concomitanza con le epoche di variabilità "alta".

A chiusura di questa Sezione, riportiamo alcune considerazioni conclusive di Kingston (2007). I dati osservati indicano che le variazioni di insolazione con il periodo della precessione climatica hanno avuto effetti significativi sugli *habitats* dei primi ominidi. La variabilità climatica ha prodotto cambiamenti ecologici persistenti in Africa equatoriale, dove le comunità si sono dovute continuamente frammentare e riassemblare in modi nuovi. L'impatto di questi cambiamenti deve essere ancora documentato e capito in modo adeguato, ma comunque esso serve come utile base per sviluppare modelli e proporre ipotesi.

6. Indicazioni dalla flora e dalla fauna africane

Nel corso degli ultimi 7 Ma in varie zone dell'Africa orientale si assisterebbe quindi a un oscillare tra foreste e praterie aperte, con le praterie, dapprima in aree limitate, che si espandono progressivamente a

²² E' la riorganizzazione della circolazione in area tropicale-subtropica nota come *Walker circulation* (che in precedenza era debole; si veda Ravelo et al. 2004).

discapito delle foreste. Le vaste praterie come quelle del Serengeti si sarebbero stabilizzate poi in modo permanente a partire da 3 Ma fa (deMenocal 2014). La vegetazione delle foreste utilizza il ciclo fotosintetico C_3 , mentre la vegetazione della savana, in un ambiente secco, tende a sfruttare il ciclo C_4 . Cerling (1992) ha rilevato la presenza di biomassa C_4 fin da 8 – 9 Ma fa, ma in piccola quantità rispetto alla biomassa totale. Tale quantità è aumentata nel Pliocene e Pleistocene, e non c'è evidenza di praterie di prevalenza C_4 , come si osservano oggi, fino al Pleistocene Medio. Cerling et al. (2011) hanno utilizzato gli isotopi stabili del carbonio nei paleo-suoli, misurati in diversi siti, per quantificare la copertura delle foreste, concludendo che essa era stata inferiore al 40% nella maggior parte dei siti negli ultimi 6 Ma. Da questo hanno dedotto la prevalenza di ambienti aperti rispetto a quelli con foresta nella maggior parte dei siti dove erano stati trovati fossili di ominini. Wynn (2004), oltre all'aumento di aridità e di biomassa C_4 durante gli ultimi 4.3 Ma, ha rilevato vari episodi di crescita accentuata della biomassa C_4 in corrispondenza di paleo-precipitazioni scarse. Si avrebbe in sostanza non solo un aumento di habitat aperti, ma anche una maggiore distribuzione eterogenea (a mosaico) di tali ambienti. Gli episodi appaiono coincidere con un'accresciuta diversità di specie di bovidi e di evoluzione (*speciation*) degli ominini.

I fossili di antilope o bovidi africani sono stati usati come indicatori dell'ambiente (specie animali; tipo di dieta) in quanto i diversi gruppi di bovidi oggi esistenti sono sensibili al tipo di habitat (ambienti stagionalmente aridi come praterie e boscaglie, oppure prati umidi). Si suppone che le preferenze di questi bovidi (p.es. gnu, gazzelle, orici, antilopi cobi) siano rimaste relativamente invariate nel Pliocene-Pleistocene (Levin 2015). Bobe e Behrensmeyer (2004) concludono che tra 4 e 1 Ma fa ci sono stati profondi cambiamenti di fauna nel bacino del Turkana, quali l'abbondanza di famiglie di mammiferi e l'aumento nel numero e nell'abbondanza di specie che mostravano adattamento agli ecosistemi delle praterie, cioè bovidi con dentizione specializzata per brucare l'erba (*hypsodont molars*; de Menocal 2011).

Feakins et al. (2005) hanno analizzato il $\delta^{13}C$ nei biomarkers di piante terrestri conservate in sedimenti nel mare adiacente all'Africa nordorientale. I risultati mostrano grande variabilità di vegetazione, con maggiore espansione di vegetazione C_4 dopo 3.4 Ma fa, con oscillazioni tali da suggerire variazioni ripetute tra paesaggi più chiusi (foreste) e più aperti. Il quadro appare tuttavia complesso. Più recentemente Feakins et al.

(2013) hanno analizzato l'eccesso $\delta^{13}\text{C}$, oltre che nella *leaf wax* di sedimenti marini, anche in carbonati di paleo-suoli, e i pollini di piante erbacee (depositati nei sedimenti marini). Gli autori concludono che nel Miocene ci sarebbe stata un'estensione preponderante di piante erbacee che utilizzavano il ciclo C_3 e in minor parte il ciclo C_4 , estensione che si è andata riducendo; mentre negli ultimi milioni di anni ci sarebbe stata un'espansione della vegetazione che utilizzava C_4 dovuta per lo più ad arbusti in ambiente arido piuttosto che piante erbacee. Infine, recenti risultati dell'analisi del $\delta^{18}\text{O}$ nello smalto di denti fossili di erbivori nel bacino Omo-Turkana, quale indicatore di deficit d'acqua nell'ambiente negli ultimi 4.4 Ma, non mostrano un trend indicatore di mancanza d'acqua. Ciò non confermerebbe l'ipotesi dell'aridità crescente, oppure la dieta non apparirebbe legata all'aridità; l'abbondanza di piante C_4 potrebbe dipendere quindi anche da altri fattori, come la stagionalità (diversità di regime) delle piogge (Blumenthal et al. 2017).

Quindi, se è plausibile che negli ultimi 10 Ma in Africa gli ambienti aperti siano diventati prevalenti e le foreste siano diminuite, tuttavia la natura e i tempi di questa tendenza sono variati a seconda delle zone, e i cambiamenti non sono stati semplicemente unidirezionali (Levin 2015).

7. Evoluzione degli ominini

In base ai fossili, ominini ormai bipedi dovevano essere già presenti in un ambiente dominato dalla foresta tra 7 e 4 Ma fa, cioè *Ardipithecus ramidus*, *Orrorin tugenensis* e *Sahelanthropus tchadensis* (Gibbons 2013a)²³. A seguito delle variazioni del clima, ci sarebbe stata estinzione di alcune specie, ed evoluzione di altre, che si sono adattate a una dieta contenente (o derivata da) anche, o soprattutto, vegetazione erbacea e arbustiva (prateria, savana). Ciò è avvenuto in particolare in due intervalli temporali. Tra circa 2.9 e 2.6 Ma fa si osserva l'estinzione di *Australopithecus afarensis* ("Lucy")²⁴, e la comparsa del robusto *Paranthropus*, e quindi di *Homo*, dotato di un cervello più sviluppato; tra 1.9 e 1.6 Ma fa c'è la comparsa di *Homo erectus*, la prima specie più

²³ E' opportuno notare che nell'intervallo tra 7 e 5 Ma fa, a seguito di eventi geologici che portano alla chiusura dello stretto di Gibilterra, si ha anche la quasi completa evaporazione del Mar Mediterraneo.

²⁴ Per l'*Australopithecus afarensis* si veda Johanson, White e Coppens (1978); la storia del nome "Lucy" introdotto da Coppens è riportata in diversi testi e articoli divulgativi.

simile ai moderni umani, e, alla fine di tale periodo, si assiste allo sviluppo di un'industria litica realizzata con una certa cura (deMenocal 2011).

L'eccesso $\delta^{13}\text{C}$ dello smalto di denti fossili permette di distinguere tra diete basate in modo prevalente su vegetazione C_3 (foglie e frutti di alberi e arbusti, e *graminoids*) a diete basate su vegetazione C_4 (erbe di praterie e ambienti palustri). La maggior parte dei tessuti organici (p.es.: carne) sono solo leggermente più ricchi di ^{13}C in confronto alla dieta vegetale originaria; gli isotopi non sono quindi in grado di distinguere tra una dieta basata su vegetali e una sulla carne (o insetti) nel caso di uno stesso ciclo fotosintetico. Possono però essere usati per distinguere quale sia stata la risorsa primaria, piante C_3 oppure C_4 , anche nel caso di dieta basata su carne di animali che si sono cibati di vegetali C_3 oppure C_4 (Cerling et al. 2013; Lee Thorp et al. 2010). Dall'analisi di denti fossili di un centinaio di individui del bacino del Turkana, Cerling et al. (2013) hanno dedotto le preferenze di dieta di *Australopithecus* (ca. 4 Ma), *Kenyanthropus* (ca. 3-3.6 Ma), *Paranthropus* (ca. 2.5-1.4 Ma) e *Homo* (ca. 2.3 – 0.01 Ma), e le hanno confrontate con quelle di altri ominini in Africa orientale e meridionale. La dieta di *Australopithecus anamensis* era quasi tutta basata su risorse C_3 , il *Kenyanthropus platyops* aveva una dieta molto più varia, da pure risorse C_3 a prevalenti C_4 . Intorno a 2 Ma fa si distinguono due gruppi: il genere *Homo* mostra evidenza di dieta in rapporto percentuale 65/35 di C_3 su C_4 , mentre il *Paranthropus boisei* aveva una frazione più alta di C_4 (ca. 25/75). Durante un intervallo di 1.5 Ma, mentre le specie *Homo* hanno aumentato la frazione di dieta basata su C_4 , il *Paranthropus* ha mantenuto la sua stretta dipendenza dalle risorse C_4 .

In base a questi risultati deMenocal (2014) ha concluso che l'*Homo* studiato da Cerling et al. (2013) aveva utilizzato una varietà di alimenti in un ambiente che allora stava diventando più uniforme, aveva quindi una dieta flessibile, caratteristica che è stata poi trasmessa geneticamente fino a noi. Il *Paranthropus*, invece, viveva con una dieta strettamente legata alla nicchia della vegetazione C_4 . Il punto importante di tale conclusione è che la flessibilità avrebbe permesso alle specie *Homo* di adattarsi ai diversi ambienti continuamente alternatisi in Africa (e legati come si è visto all'*orbital forcing*), mentre la specializzazione del *Paranthropus* lo avrebbe portato all'estinzione a causa della difficoltà di adattamento. Inoltre, secondo diversi autori, sarebbe stata proprio l'estrema variazione climatica a 'costringere' poi, in un certo senso, a sviluppare anche un cervello più grande, in tempi evolutivi relativamente rapidi.

Chiudiamo questa sezione segnalando il suggerimento dell'antropologo Coppens, e di Ries (2007), che potrebbe interessare chi si occupa di astronomia culturale. Sarebbe stato a seguito della posizione eretta assunta definitivamente dagli ominini a far sì che essi potessero contemplare direttamente il cielo, e, quando con il genere *Homo* il cervello fu più sviluppato, a cominciare a 'riflettere' sullo spettacolo che vedevano²⁵.

8. Il genere *Homo*

Secondo Maslin et al. (2015), probabilmente l'episodio più importante nell'evoluzione degli ominini è avvenuto circa 1.9-1.8 Ma fa, quando la diversità degli ominini ha raggiunto il suo livello più alto con la comparsa delle specie del genere *Homo*, quando avvenne la migrazione verso l'Eurasia, e ci fu un rapido aumento delle dimensioni del cervello, come nel caso di *H. erectus* e *H. ergaster* rispetto ai precedenti *Australopithecini*. Individui di specie apparentemente in parte simili a *H. erectus* sono stati infatti trovati in Georgia, in un sito datato tra circa 1,85 e 1,77 Ma fa, e si sta discutendo quale sia stata effettivamente l'evoluzione degli *Homo* africani ivi migrati (Lordkipanidze et al. 2013; Gibbons 2013)²⁶.

L'aumento di volume del cervello fu accompagnato da vari cambiamenti, per esempio: la morfologia delle spalle per permettere il lancio di proiettili, l'adattamento alla corsa su lunga distanza, la flessibilità all'ambiente, il comportamento sociale. Alcuni di questi vanno visti come progressivi cambiamenti di strategia verso maggiore flessibilità e abilità a colonizzare nuovi ambienti.

Gli stadi finali della crescita del cervello nelle specie del genere *Homo* si registrano con la comparsa di *H. heidelbergensis* circa 800 ka fa, *H. denisovan* circa 600 ka fa, *H. neanderthal* circa 300 ka fa, e *H. sapiens* circa 200 ka fa (Maslin et al. 2015). Tali stadi coincidono con l'epoca delle grandi ere glaciali, con periodicità di 100 ka²⁷.

²⁵ Ries parla di *Homo religiosus*; in un approccio scettico, si dovrebbe parlare almeno di *Homo symbolicus* (p.es.: Coppens 2014).

²⁶ L'*H. floresiensis*, di taglia piuttosto piccola, scoperto nell'isola di Flores in Indonesia alcuni anni fa, sarebbe forse l'evoluzione di *H. erectus* in termini di 'nanismo insulare'. La datazione dei resti è circa 100 ka - 60 ka fa (Sutikna et al. 2016), e più recentemente sono stati ritrovati dei possibili antenati, sempre di taglia piccola, che risalirebbero a circa 700 ka fa (van den Bergh 2016).

²⁷ A queste epoche, circa 300 ka fa, dovrebbe risalire anche la specie *H. naledi* trovata in Sud Africa (Berger et al. 2017).

Risultati paleoantropologici sui resti più antichi e meglio datati, trovati in Etiopia meridionale, di ominidi *H. sapiens* anatomicamente simili a noi moderni, indicano un'epoca intorno a 195 ka fa (McDougall et al. 2005); l'analisi genetica suggerisce che la discendenza patrilineare da quell'epoca riguarda popolazioni oggi dell'Africa centro-occidentale (Scozzari et al., 2014). Alcuni dei primi manufatti, tra cui delle semplici incisioni geometriche, risalgono a più di 70 ka fa e sono stati trovati in Sud Africa (Blombos Cave; Henshilwood et al. 2009). Si ritiene di solito che l'effettiva dispersione in Eurasia sia avvenuta a partire da circa 50 ka fa, quando, nel giro di poche migliaia di anni, l'*H. sapiens* sarebbe arrivato, da un lato, fino in Australia e, dall'altro, in Europa occidentale. Tuttavia, è stata segnalata in Cina la presenza di umani moderni risalenti ad almeno 80 ka fa (Liu et al. 2015), e secondo vari autori sarebbero stati già presenti in precedenza nella penisola arabica (p.es.: Petraglia et al. 2010; Armitage et al. 2011). Risultati recentissimi suggeriscono la presenza di: 1) un *Homo* affine al *sapiens* circa 300 ka fa in Marocco (Hublin et al. 2017), e fuori dall'Africa (nel Levante) circa 180 ka fa (Stringer, Galway-Witham 2018; Hershkovitz et al. 2018); 2) un comportamenti simbolico, tecnologico e socio-economico tipici dell'*H. sapiens* in Africa orientale già circa 300 ka fa (Deino et al. 2018), dedotti in base alle caratteristiche dei reperti, ma non sono trovati fossili *Homo* (Brooks et al. 2018).

La genetica dice che ci sono stati accoppiamenti con i *neanderthal* nel Vicino Oriente e in Europa, dove questa specie già risiedeva, perché una piccola percentuale del nostro DNA, cioè il DNA delle attuali popolazioni europee e asiatiche (e americane), si può far risalire a tale specie. I melanesiani dell'Oceania, oltre a tale caratteristica, hanno anche una piccola percentuale genetica derivata dai *denisovan*, gli *Homo* che già risiedevano in Asia. Solo le popolazioni africane sub-sahariane sembrano non avere tali caratteristiche genetiche comuni con *neanderthal* o *denisovan* (Gibbons 2011a, 2011b).

Nelle ultime centinaia di migliaia di anni si osserva quindi il susseguirsi di specie *Homo* che, con un cervello ormai sviluppato, producono industrie litiche piuttosto raffinate, usano un linguaggio per simboli e sono anche in grado di occupare ambienti della Terra caratterizzati da climi estremi.

9. Conclusione

L'associazione tra eventi critici nell'evoluzione degli ominini e gli intervalli di forte instabilità climatica suggerisce che l'instabilità ambientale ha avuto un ruolo significativo nell'evoluzione adattiva del

genere *Homo*. Tuttavia, questa conclusione non può ancora essere considerata definitiva, e richiede continue verifiche. E' probabile che la data della prima comparsa delle specie cambi a seguito di nuove scoperte. Inoltre, interruzioni nella stratigrafia e incertezze nella formazione dei fossili (tafonomia) rendono per ora impossibile l'associazione tra un evento evolutivo e una specifica fase del ciclo precessionale (arida o umida); il processo del cambiamento adattivo probabilmente non è avvenuto completamente in un dato ciclo precessionale. Infine, è necessario verificare che le previsioni del modello della variabilità climatica siano effettivamente registrate negli strati dove c'è evidenza di popolazione di ominini (oggi il progetto *Hominin Sites and Paleolakes Drilling Project* intende appunto fornire nuove indicazioni al proposito; Cohen et al. 2016). Dopo le necessarie precisazioni sopra riportate, Potts (2013) conclude che, benché non sia ancora del tutto certo che la forte instabilità ambientale abbia prodotto cambiamenti evolutivi, tuttavia appare chiaro che le popolazioni di ominini hanno dovuto affrontare cambiamenti ambientali legati alla comparsa e scomparsa di laghi e terre umide, con la corrispondente abbondanza o penuria di risorse alimentari. Di conseguenza, è ovvio che gli organismi, inclusi gli ominini, devono aver risposto ai cambiamenti ambientali mediante l'adattamento.

Da parte nostra, qualunque sarà la conclusione delle suddette verifiche, notiamo ancora una volta come, nel corso degli ultimi decenni, sia diventato sempre più importante il riferimento all'astronomia per poter inquadrare problematiche estremamente complesse, come l'evoluzione umana. Nel panorama interdisciplinare di solito considerato nel nostro ambito, l'astronomia culturale (archeoastronomia) ha un ruolo in apparenza poco riconosciuto, nonostante i molti lavori, i tentativi pluridecennali e il largo interesse che essa suscita nella gente, e ciò non tanto a causa di gelosia tra discipline, ma, nell'opinione di chi scrive, soprattutto per le incertezze di principi che, nella maggior parte dei casi, precludono una interpretazione sufficientemente condivisa nel contesto storico-archeologico del dato astronomico relativo a siti e reperti archeologici²⁸. Al contrario, nel contesto del problema interdisciplinare

²⁸ In molti casi, mancando le fonti scritte, non è possibile dimostrare in modo adeguato con i metodi della *hard science* se un'ipotesi o interpretazione archeoastronomica (per esempio, l'intenzionalità degli orientamenti) è corretta oppure sbagliata, e la sua accettabilità o meno dipende da eventuali 'criteri di plausibilità' che esulano dai principi delle scienze fisico-naturali.

riguardante la storia della Terra, dell'evoluzione umana e delle società umane, l'astronomia ha invece un ruolo di primo piano, perché gli effetti fisici sull'ambiente che hanno origine esterna alla Terra sono sempre più chiaramente riconosciuti, man mano che progrediscono gli studi nelle varie discipline. Nel prossimo lavoro illustreremo quanto si sta rilevando in campo archeologico circa l'impatto dei cambiamenti climatici, forse anche di origine astronomica o astrofisica, sulle società umane.

Concludiamo rimarcando che lo scopo di tutti questi studi non è solo una miglior conoscenza dell'Uomo e dell'Universo, cioè non si tratta solo di Cultura. Gli effetti sul clima continuano anche oggi, e continueranno²⁹. La presa di coscienza di questo fatto rende urgente la necessità di approntare i mezzi teorici o modelli per tentare una previsione del futuro del clima. I modelli devono integrare i dati geologici-paleoclimatici con quelli storico-archeologici, e devono tener conto anche dell'attuale effetto antropico sul clima; e queste sono considerazioni continuamente dette e ripetute da chi si occupa di paleoclimatologia. La priorità data a questo tipo di studi rispetto ad altre urgenze delle scienze fisiche, naturali e umanistiche dovrebbe forse apparire come un nostro dovere verso i nostri discendenti, i quali altrimenti rischiano di trovarsi impreparati ad affrontare situazioni difficili, situazioni a cui forse noi stessi abbiamo più o meno scientemente contribuito.

Bibliografia³⁰

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.

Armitage S.J., Jasim S.A., Marks A.E., Parker A.G., Usik V.I., Uerpmann H.P. (2011) *The Southern Route "Out of Africa": Evidence for an Early Expansion of Modern Humans into Arabia*, Science 331, 453.

Ashley G.M. (2009) *Human evolution and climate change*, in V. Gornitz (ed.), Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments, p. 446.

²⁹ Come già accennato, la fase umida del ciclo precessionale attuale ha avuto un massimo in epoca neolitica ('optimum climatico'); ora è in corso la fase arida.

³⁰ Per altre informazioni bibliografiche consultare: www.brera.inaf.it/utenti/antonello.

- Balter M. (2014) *RIP for a key Homo species?*, Science 345, 129.
- Berger A., Loutre M.F (1991) *Insolation values for the climate of the last 10 million years*, Quaternary Sciences Review 10, 4, 297-317.
- Berger L.R., Hawks J., Dirks P.H.G.M., Elliott M., Roberts E.M. (2017) *Homo naledi and Pleistocene hominin evolution in subequatorial Africa*, eLife, 6:e24234. DOI: 10.7554/eLife.24234.
- Blumenthal S.A., Levin N.E., Brown F.H., Brugal J.P., Chritze K.L. et al. (2017) *Aridity and hominin environments*, Proceedings of the National Academy of Sciences United States of America 114, 7331.
- Bobé R., Behrensmeyer A.K. (2004) *The expansion of grassland ecosystems in Africa in relation to mammalian evolution and the origin of the genus Homo*, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 207, 399.
- Bowen D.Q. (2009) *Pleistocene climates*, in V. Gornitz (ed.), Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments, p. 799.
- Brooks A.S., Yellen J.E., Potts R., Behrensmeyer A.K., Deino A.L. (2018) *Long-distance stone transport and pigment use in the earliest Middle Stone Age*, Science 10.1126/science.aao2646.
- Cerling T.E. (1992) *Development of grasslands and savannas in East Africa during the Neogene*, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 97, 241.
- Cerling T.E., Harris J.M., MacFadden B.J., Leakey M.G., Quade J., Eisenmann V., Ehleringer J.R. (1997) *Global vegetation change through the Miocene/Pliocene boundary*, Nature 389, 153
- Cerling T.E., Manthi F.K., Mbua E.N., Leakey L.N., Leakey M.G. et al. (2013) *Stable isotope-based diet reconstructions of Turkana Basin hominins*, PNAS 110, 10501.
- Cerling T.E., Wynn J.G., Andanje S.A., Bird M., Korir D.K. et al. (2011) *Woody cover and hominin environments in the past 6 million years*, Nature 476, 51
- 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.
- Cohen A., Campisano C., Arrowsmith R., Asrat A., Behrensmeyer A.K. et al. (2016) *The Hominin Sites and Paleolakes Drilling Project: inferring the environmental context of human evolution from eastern African rift lake deposits*, Scientific Drilling 21, 1.
- Coppens Y. (2014) *The emergence of humans: brains (bodies and hands), mind and soul*, in Sustainable Humanity, Sustainable Nature: Our Responsibility, Pontifical Academy of Sciences, Extra Series 41, www.pas.va/content/dam/accademia/pdf/es41/es41-coppens.pdf
- Deino A.L., Behrensmeyer A.K., Brooks A.S., Yellen J.E., Sharp W.D., Potts R. (2018) *Chronology of the Acheulean to Middle Stone Age transition in eastern Africa*, Science 10.1126/science.aao2216.
- deMenocal P.B. (1995) *Plio-Pleistocene African climate*, Science 270, 53.

- deMenocal P.B. (2004) *African climate change and faunal evolution during the Pliocene-Pleistocene*, Earth and Planetary Science Letters 220, 3.
- deMenocal P.B. (2011) *Climate and Human Evolution*, Science 331, 540.
- deMenocal P.B. (2014) *Climate shocks*, Scientific American, September 2014, p. 48 (ediz. italiana Le Scienze, Novembre 2014).
- Emeis K.C., Sakamoto T. (1998) *The sapropel theme of leg 160*, in A.H.F. Robertson, K.-C. Emeis, C. Richter, A. Camerlenghi (eds.), Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, Vol. 160, 29.
- Feakins S.J., deMenocal P.B., Eglinton T.I. (2005) *Biomarker records of late Neogene changes in northeast African vegetation*, Geology, 33, 977.
- Feakins S.J., Levin N.E., Liddy H.M., Sieracki A., Eglinton T.I., Bonnefille R. (2013) *Northeast African vegetation change over 12 m.y.*, Geology 41, 295.
- Ford H.L., Sosdian S.M., Rosenthal Y., Raymo M.E. (2016) *Gradual and abrupt changes during the Mid-Pleistocene transition*, Quaternary Science Reviews 148, 222.
- Gibbons A. (2011a) *A new view of the birth of Homo sapiens*, Science 331, 392.
- Gibbons A. (2011b) *Who were the Denisovans?* Science 333, 1084.
- Gibbons A. (2013a) *How a fickle climate made us human*, Science 341, 474.
- Gibbons A. (2013b) *Stunning skull gives a fresh portrait of early humans*, Science 342, 297.
- Haile-Selassie Y., Gibert L., Melillo S.M., Ryan T.M., Alene M. et al. (2015) *New species from Ethiopia further expands Middle Pliocene hominin diversity*, Nature 521, 483.
- Henshilwood C.S., d'Errico F., Watts I. (2009) *Engraved ochres from the Middle Stone Age levels at Blombos Cave, South Africa*, Journal of Human Evolution 57, 27.
- Herskovitz I., Weber G.W., Quam R., Duval M., Grün R. (2018) *The earliest modern humans outside Africa*, Science 359, 456.
- Hilgen F., Krijgsman W., Langereis C., Lourens L., Santarelli A., Zachariasse W. (1995) *Extending the astronomical (polarity) time scale into the Miocene*, Earth Planet. Sci. Lett. 136, 495.
- Hublin J.J., Ben-Ncer A., Bailey S.E., Freidline S.E., Neubauer S. et al. (2017) *New fossils from Jebel Irhoud, Morocco and the pan-African origin of Homo sapiens*, Nature 546, 289.
- Kingston J.D. (2007) *Shifting adaptive landscapes: Progress and challenges in reconstructing early hominid environments*, Yearbook of Physical Anthropology 50, 20.
- Krijgsman W., Hilgen F., Langereis C., Santarelli A., Zachariasse W. (1995) *Late Miocene magnetostratigraphy, biostratigraphy and cyclostratigraphy in the Mediterranean*, Earth Planet. Sci. Lett. 136, 475.
- Kuiper K.F., Deino A., Hilgen F.J., Krijgsman W., Renne P.R., Wijbrans J.R. (2008) *Synchronizing rock clock of Earth history*, Science, 320, 500.

- Jansen E., Overpeck J., Briffa K.R., Duplessy J.C., Joos F. et al. (2007) *Palaeoclimate*, in S. Solomon et al. (eds.) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Johanson D.C., White T.D., Coppens Y. (1978) *A new species of the genus Australopithecus (Primates: Hominidae) from the Pliocene of Eastern Africa*, Kirtlandia, n. 28, p. 1-14.
- Laskar J., Robutel P., Joutel F., Gastineau M., Correia A.C.M., Levrard B. (2004) *A long term numerical solution for the insolation quantities of the Earth*, Astronomy & Astrophysics, 428, 261.
- Laskar J., Fienga A., Gastineau M., Manche H. (2011a) *La2010: a new orbital solution for the long-term motion of the Earth*, Astronomy & Astrophysics 532, A89.
- Laskar J., Gastineau M., Delisle J.-B., Farrés A., Fienga A. (2011b), *Strong chaos induced by close encounters with Ceres and Vesta*, Astronomy & Astrophysics 532, L4.
- Lee-Thorp J.A., Sponheimer M., Passey B.H., de Ruiter D.J., Cerling T.E. (2010) *Stable isotopes in fossil hominin tooth enamel suggest a fundamental dietary shift in the Pliocene*, Phil. Trans. R. Soc. B 365, 3389–3396
- Levin N.E. (2015) *Environment and climate of early human evolution*, Annual Reviews Earth Planetary Science, 43, 405
- Licht K. (2009) *Antarctic glaciation history*, in V. Gornitz (ed.), *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*, p. 24.
- Lisiecki L.E., Raymo M.E. (2005) *A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}O$ records*, Paleoceanography, 20, PA1003.
- Liu W., Martinón-Torres M., Cai Y., Xing S., Tong H. et al. (2015) *The earliest unequivocally modern humans in southern China*, Nature 526, 696.
- Lordkipanidze D., Ponce de Leon M.S., Margvelashvili A., Rak Y., Rightmire G.P. (2013) *A complete skull from Dmanisi, Georgia, and the evolutionary biology of early Homo*, Science 342, 326.
- Maslin M.A., Brierley C.M., Milner A.M., Shultz S., Trauth M.H., Wilson K.E. (2014) *East African climate pulses and early human evolution*, Quaternary Science Reviews, 101, 1.
- Maslin M.A., Shultz S., Trauth M.H. (2015) *A synthesis of the theories and concepts of early human evolution*, Philosophical Transactions Roy. Soc. B 370, 20140064.
- McDougall I., Brown F.H., Fleagle J.G. (2005) *Stratigraphic placement and age of modern humans from Kibish, Ethiopia*, Nature 433, 733.
- Meyers P.A. (2009) *Organic geochemical proxies*, in V. Gornitz (ed.), *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*, p. 659
- Olsen P.E., Whiteside J.H. (2009) *Pre-Quaternary Milankovitch cycles and climate variability*, in V. Gornitz (ed.), *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*, p. 826.

- Orombelli G. (1997) *Recenti progressi nella valutazione del paleoclima: le variazioni climatiche negli ultimi 150.000 anni*, in: La Terra nel Sistema Solare (lezioni), Milano, Istituto Lombardo di Scienze e Lettere p. 73.
- Osborne C. P., Beerling D. J. (2006) *Nature's green revolution: the remarkable evolutionary rise of C₄ plants*, Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 361, 173.
- Passey B.H., Levin N.E., Cerling T.E., Brown F.H., Eiler J.M. (2010) *High-temperature environments of human evolution in East Africa based on bond ordering in paeosol carbonates*, Proceedings of the National Academy of Sciences United States of America 107, 11.245.
- Petraglia M.D., Haslam M., Fuller D.Q., Boivin N., Clarkson C. (2010) *Out of Africa: new hypotheses and evidence for the dispersal of Homo sapiens along the Indian Ocean rim*, Annals of Human Biology, 37, 288.
- Potts R. (2013) *Hominin evolution in settings of strong environmental variability*, Quaternary Science Reviews, 73, 1.
- Premoli Silva I. (1997) *Sedimenti e variazioni cicliche*, in: La Terra nel Sistema Solare (lezioni), Milano, Istituto Lombardo di Scienze e Lettere p. 99.
- Ravelo A.C., Andreasen D.H., Lyle M., Lyle A.O., Wara M.W. (2004) *Regional climate shifts caused by gradual global cooling in the Pliocene epoch*, Nature 429, 263.
- Rich T.H., Vickers-Rich P. (2009) *Animal proxies, vertebrates*, in V. Gornitz (ed.), Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments, p. 13
- Ries J. (2007) *L'uomo religioso e la sua esperienza del sacro*, Opera Omnia Vol. III, Milano, Jaca Book.
- Sachs J.P., Pahnke K., Smittenberg R., Zhang Z. (2013) *Biomarker indicators of past climate*, in A.E. Scott, C.J. Mock (eds.), Encyclopedia of Quaternary Science, Vol. 2, p. 775.
- Scozzari R., Massaia A., Trombetta B., Bellusci G., Myres N.M. et al. (2014) *An unbiased resource of novel SNP markers provides a new chronology for the human Y chromosome and reveals a deep phylogenetic structure in Africa*, Genome Res. 24, 535.
- Stringer C., Galway-Witham J. (2018) *When did modern humans leave Africa?* Science 359, 389.
- Sutikna T., Tocheri M.W., Morwood M.J., Saptomo E.W., Jatmiko et al. (2016) *Revised stratigraphy and chronology for Homo floresiensis at Liang Bua in Indonesia*, Nature 532, 366.
- Trauth M.H., Maslin M.A., Deino A., Strecker M.R. (2005) *Late Cenozoic moisture history of East Africa*, Science 309, 2051.
- Upadhyay D., Biebel M., Caraveo C., Gomis E., Hailemichael M. et al. (2017) *Testing hypotheses for the role of climate change in hominin evolution using the geochemistry of carbonates from the East African Rift system*, GSA Annual Meeting in Seattle, Washington, Paper No. 309-7, poster (handout).

- van den Bergh G., Kaifu Y., Kurniawan I., Kono R.T., Brumm A. et al. (2016) *Homo floresiensis*-like fossils from the early Middle Pleistocene of Flores, Nature 534, 245.
- Vrba E.S. (1988) *Late Pliocene climatic events and hominid evolution*, in F. Grine (ed.) Evolutionary history of the 'Robust' Australopithecines, Berlin, De Gruyter, p. 405.
- Wynn J.G. (2004) *Influence of Plio-Pleistocene aridification on human evolution: evidence from paleosols of the Turkana Basin, Kenya*, Am. J. Phys. Anthropol. 123, 106.
- Zachos J., Pagani M., Sloan L., Thomas E., Billups K. (2001) *Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present*, Science, 292, 686.
- Zolitschka B., Enters D. (2009) *Lacustrine sediments*, in V. Gornitz (ed.), Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments, p. 485.