

Pasado y futuro del clima, aterriza como puedes.

Trinidad de Torres y José Eugenio Ortiz

Laboratorio de Estratigrafía Biomolecular. E.T.S.I. Minas. Universidad Politécnica de Madrid

Los Programas Marco de la Unión Europea "Euratom" contemplaron, como uno más de sus objetivos el análisis del cambio climático. Estos estudios se confiaron a equipos internacionales y pluridisciplinarios con la intervención de agencias, universidades y centros de investigación, centrándose estos trabajos en la evolución climática durante el pasado geológico reciente (Cuaternario 1.8 millones de años); es verdad que este rango de edad sobrepasa la escala temporal humana, ya que a fin de cuentas el hombre moderno *Homo sapiens* solo lleva unas decenas de miles de años sobre la Tierra, no obstante con el fin de asegurar a hipotéticas generaciones venideras, la inocuidad de dichos depósitos, se pensó realizar una prospectiva del clima futuro basándose en el clima del pasado. Esta idea se basa en el "Principio del Uniformismo" que ya fue definido por Hutton en el S XVI: los escenarios geológicos actuales permiten explicar los del pasado y, por extensión, los del futuro.

Dejando de lado depósitos marinos o de hielo, que quedaron fuera de estos proyectos, los registros geológicos más adecuados resultan ser los lacustres: paleolagos.

De esta forma, desde 1991, la Escuela de Minas de la Universidad Politécnica de Madrid, a través del Laboratorio de Estratigrafía Biomolecular primero y del Grupo de Estudios Ambientales después, participó como socio de ENRESA en una amplia serie de proyectos del Programa Marco EURATOM de la Unión Europa siendo, además, contratista de proyectos financiados directamente por ENRESA y el Consejo de Seguridad Nuclear.

El clima del pasado

Entre otras áreas, se seleccionó la cuenca lacustre de Guadix-Baza (Torres et al., 2003), ambas en la provincia de Granada (Fig.-1). Una amplia zona lacustre de varios miles de kilómetros cuadrados de extensión que durante el Cuaternario estuvo ocupada por lagos más o menos salinos, con un ecosistema asociado de sabana africana donde medraron animales como el tigre de dientes de sable, panteras, cebras, rinocerontes y homínidos. Aunque el resto denominado "Hombre de Orce" ha estado sometido a gran controversia paleoantropológica, no hay duda de la presencia humana en la zona ya que recientemente se han localizado herramientas de piedra de 1,1 millones de años de antigüedad

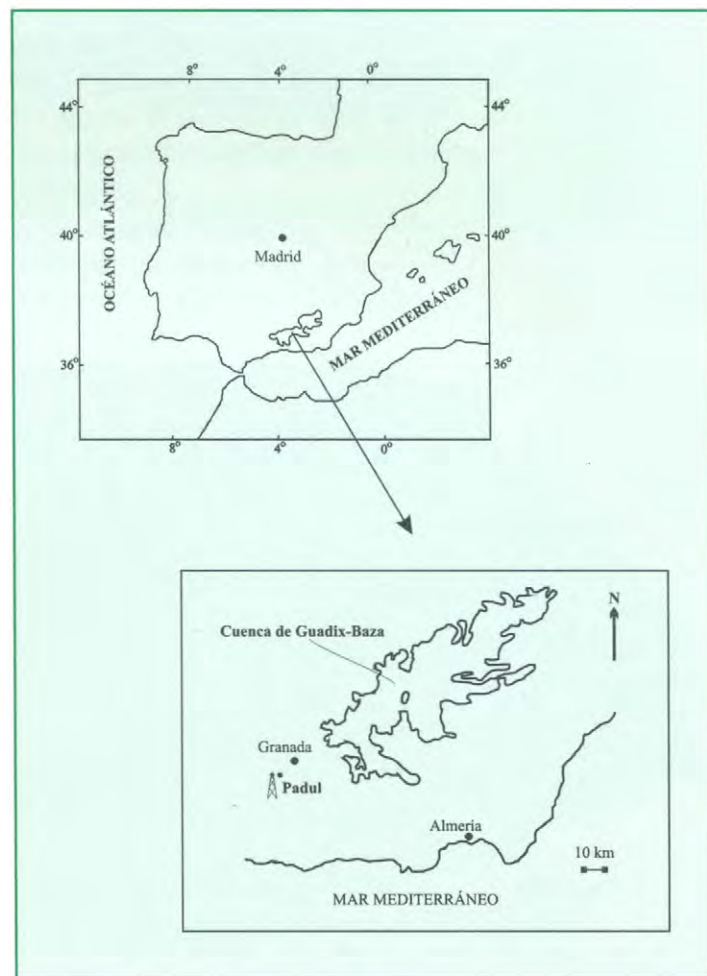


Figura 1. Situación geográfica de la Cuenca de Guadix-Baza, Turbera de Padul y terrazas travertínicas de Priego (Cuenca).

Dejando de lado el tema conflictivo de los vertebrados fósiles, el proyecto se enfocó al estudio de unos diminutos habitantes de los charcos salinos: los ostrácodos, pequeños crustáceos que aparecen en gran número en muchas de las muestras recogidas (Fig.-2).

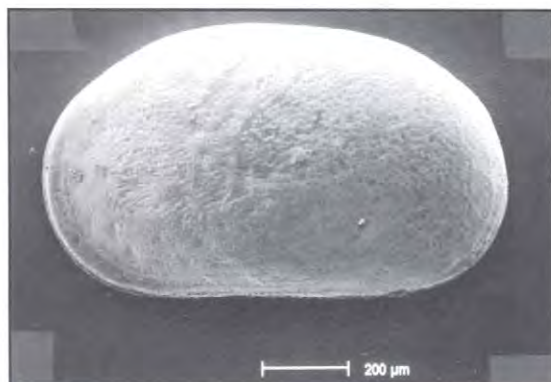


Figura 2. Imagen tomada con microscopio electrónico de una valva del ostrácodo *Cyprideis torosa*.

Como en la cuenca de Guadix Baza no se preservaron pólenes fósiles, posiblemente destruidos en ambientes salinos. A falta de indicadores de vegetación, se estudiaron ostrácodos: pequeños crustáceos de concha calcítica. En ella no solamente abundan aminoácidos, base del sistema de datación por análisis de racemización; también registran en el carbonato cálcico de su fracción mineral, señales isotópicas (isótopos estables de oxígeno y carbono). Un aumento de la abundancia relativa del isótopo más pesado del oxígeno (^{18}O) indica temperaturas más elevadas en medios continentales. También queda registrado en estas conchas la relación isotópica del carbono que proporcionan información sobre la biomasa vegetal. Estos estudios isotópicos se llevaron a cabo en la Estación Experimental El Zaidín (CSIC, Granada) mediante espectrometría de masas. En algunos puntos aparecen gigantescos cristales de yeso lenticular en los que se conservan gotitas de agua del lago ocluidas -inclusiones fluidas. Su estudio en el Laboratorio de Inclusiones Fluidas de la Escuela de Ingenieros de Minas, permitió definir la salinidad de agua del antiguo lago.

El estudio del registro geológico de la cuenca de Guadix -Baza fue pródigo en resultados: no solamente se dataron los numerosos yacimientos paleontológicos y arqueológicos existentes, también descubrió un lago salino complejo, rodeado de abanicos aluviales de los que partían pequeños ríos que alimentaban la masa de agua donde abrevaron hombres y animales. Hace unos 2 millones de años, la zona registró el primer incendio forestal catastrófico y carbones de plantas espinosas aparecen espectacularmente expuestos (Fig.-3).

De los análisis isotópicos y las inclusiones fluidas se obtuvo valiosa información paleoclimática, (Fig.-4).

El clima en Iberia se gobernó con una impronta claramente africana de forma que durante los períodos fríos, glaciaciones, se habría producido un aumento de humedad, posiblemente ligado a una menor evaporación y a un aumento de las precipitaciones; a lo largo de los períodos cálidos la zona habría estado sometida a una aridez extrema, aunque los lagos posiblemente no llegaron a desaparecer. El análisis

espectral del registro, reveló una ciclicidad de gran amplitud, de unos 520 y 315 mil años, que se superpuso a las de orden menor, 100, 40 y 17 mil años. Estas repeticiones están gobernadas por forzamientos astronómicos ligados a cambios en la excentricidad de la órbita terrestre, inclinación y precesión del eje de rotación de la Tierra.

En resumen: En Iberia, en especial en su mitad sur y posiblemente la Meseta Norte, el comportamiento climático tuvo un "sello mediterráneo" con mayor humedad en los períodos fríos y un incremento de aridez durante los cálidos. Este tipo de comportamiento climático también se ha encontrado en registros lacustres del Mar Muerto en Israel.

Mirando al futuro

Las primeras modelaciones se realizaron aplicando exclusivamente modelos de forzamientos puramente astronómicos. Esto significaba que el clima se dirigía a un escenario de glaciación en el que en algunas zonas de Europa (Escandinavia) pasarían a estar cubiertos por los hielos árticos con espesores kilométricos y en los períodos de mejora climática, interglaciares e interestadiales, se complicaría enormemente el comportamiento hidrogeológico en las zonas de



Figura 3. Fotografía de nivel correspondiente a un paleoincendio en el límite Plioceno/Pleistoceno en la base de la sección de Cortes de Baza.

los repositorios. Pese a todo, estas simulaciones quedaron modificadas con los datos derivados del análisis de la cuenca de Guadix Baza (Proyecto PADAMOT) donde la evolución climática llevaría a períodos pluviales e interpluviales que, respectivamente, coincidirían con fases frías y cálidas del clima, con ausencia de glaciario.

El proyecto BIOCLIM produjo un cambio dramático al asunto al poner en los escenarios futuros la influencia antrópica- al CO₂ atmosférico de la Era Industrial.

BIOCLIM modeló variables como precipitación, temperatura superficie/aire, topografía, calibrándolos con datos meteorológicos actuales con tres escenarios de CO₂ atmosférico (natural, moderado elevado).

Algunas de las simulaciones aparecen en la Fig.-5. Es fácil deducir que la afección climática de tipo antrópico es, lisa y llanamente, irreversible y que la vuelta a condiciones naturales, forzamiento astronómico tendría lugar en el transcurso de varios cientos de miles de años. Este análisis no ha permitido explicar el origen de algunas oscilaciones climáticas bruscas y de corta duración denominadas eventos Dansgaard y Heinrich, que se interpretan como procesos de reajuste climático interno.

BIOCLIM no considera otros factores cruciales que, ahora, se concocoe están afectando gravemente al clima: la manifestación temprana del calentamiento en el Hemisferio Sur y los Trópicos: la Antártica va a tener una influencia decisiva en la evolución futura del clima al afectarse la circulación termohalina reguladora del clima global. Durante períodos glaciares hay estratificación térmica y salina del agua del mar (fría y más salina debajo), mientras que en períodos interglaciares (hoy) las aguas profundas son frías pero bastante poco salinas y se produce una desgasificación. El registro del sondeo en hielo ártico Vostok (GRIP) demuestra que en las burbujas de aire ocluidas en el hielo, durante los períodos glaciares hay una baja concentración de CO₂ atmosférico.

Hay factores menos tangibles pero que también afectan al calentamiento global: metano procedente del permafrost y la actividad agrícola.

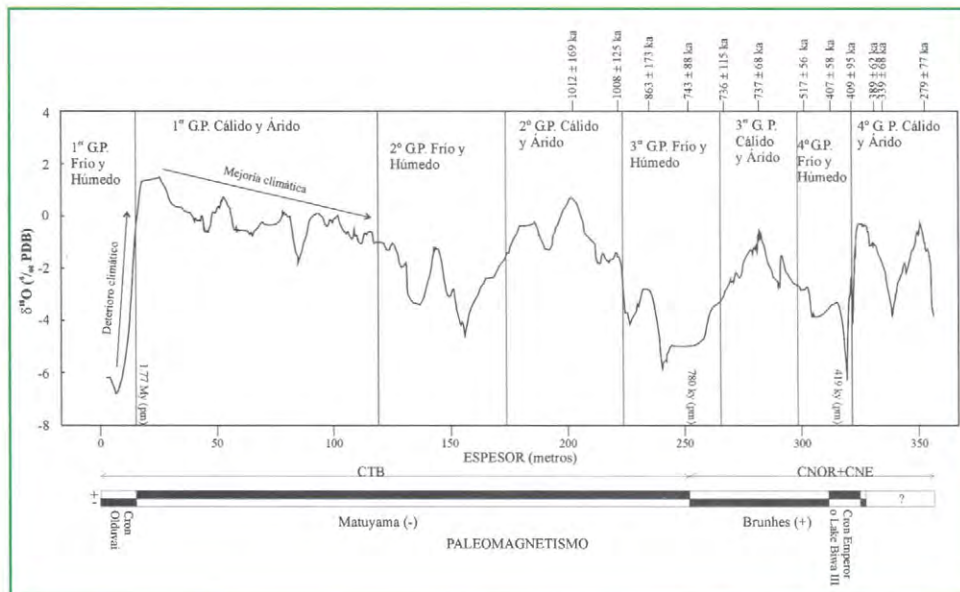


Figura 4. Curva suavizada de los valores de la $\delta^{18}O$ obtenidos en valvas del ostrácodo *Cyprideis torosa* de la sección estratigráfica tipo de la cuenca de Guadix-Baza con la interpretación paleoambiental. (Torres et al. 2003, Ortiz et al., 2006, PADAMOT, BIOCLIM).

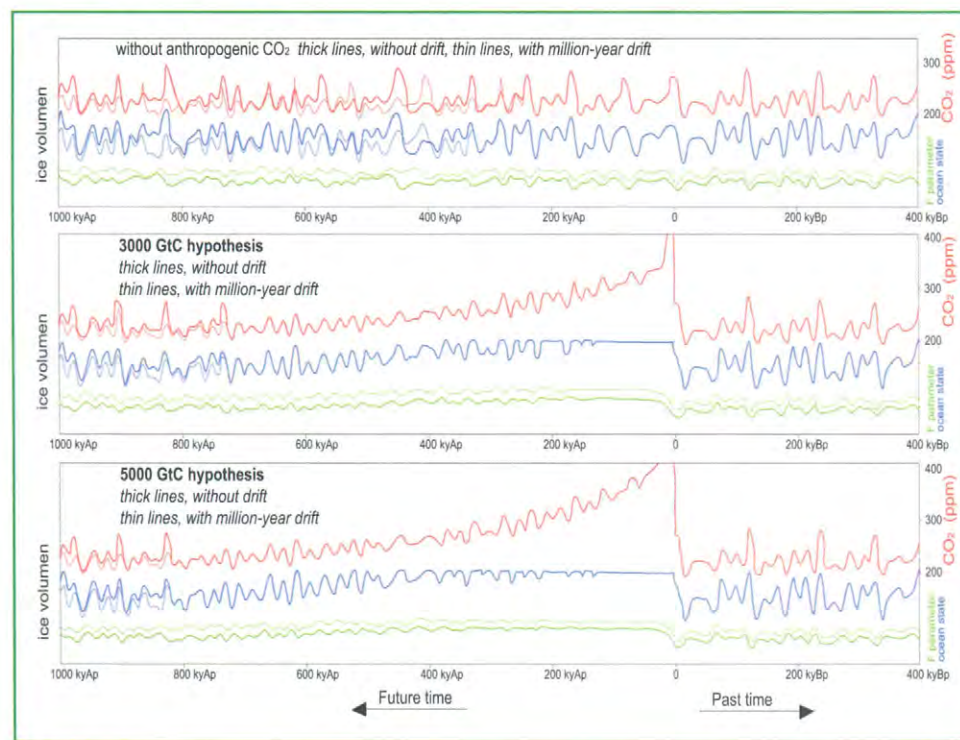


Figura 5. Síntesis evolutiva del nivel del mar y de la concentración atmosférica del CO₂ en los tres escenarios: natural, con CO₂ y alto consumo de combustibles fósiles (modificado de BIOCLIM)

Conclusión

El proceso que se ha desencadenado no tiene retroceso posible. Habrá que esperar un periodo temporal "geológico" para acercarse de nuevo a las condiciones naturales. Puede argumentarse que las simulaciones están llenas de incertidumbre, y lo están. Puede también pensarse que los resultados, que proyectan hasta 400 mil años el problema parecen exagerados. Pero si dividimos entre diez el periodo de influencia del CO₂ atmosférico, tendríamos una cifra orientativa de 40 mil años. Más o menos lo que lleva el hombre moderno habitando España. Algunos optimistas hablan, con cierta razón, de la capacidad de adaptación del hombre. No hay duda de que nuestros antepasados del Paleolítico superior fueron capaces de sobrellevar con éxito los efectos de brutales cambios climáticos. Pero igualmente se ha de considerar que se enfrentaban, parcialmente coexistían, a un bioma casi intacto y una población global muy reducida, lo que obviamente ahora no ocurre cf. Lovejoy y Hannah (2006). Por lo tanto cabe esperar grandes migraciones desde zonas superpobladas que tendrán como consecuencia hambrunas y enfrentamientos armados para, finalmente, permanezca una población humana residual de unos cientos de millones, el lector puede poner una cifra.

¿Hay solución al problema? Sinceramente no: el cambio climático en su estado actual es un proceso que no se puede detener. No obstante, se hace preciso ralentizar, que no detener, un proceso cuyas variables solo se conocen en parte, pero que definen un sistema con procesos retroalimentados cuya velocidad y magnitud, conforme se avanza en su conocimiento, resulta ser exponencialmente mayor que lo previamente calculado. Quizás el dato más significativo lo aportan, hace unos días, Rohling et al (2007) quienes encuentran que el nivel del mar durante el último periodo cálido (interglaciario), se situó mucho más alto de lo que se pensaba 4-6m. Para justificar el título de este artículo podría decirse que la Humanidad ha de prepararse para un aterrizaje en una situación ambiental nueva. Posiblemente podrá elegir entre un *aterrizaje catastrófico* o un *aterrizaje suave*. Al primero, simplemente se llega manteniendo la situación actual: emisión sin freno, compra de derechos, quijotismo nuclear, desalación con emisión de CO₂. Para un aterrizaje suave, pero inevitable, habría que pensar en concienciación social, energías renovables y energía nuclear.

Referencias

- Goodess, C.M., Palutikof, J.P., Davies, T.D. (1988). Studies of climatic effects relevant to site selection and to assessments of the radiological impact of disposal at selected sites. Nirex Safety Series, NNS/R137.
- Lovejoy, T.E., Hannah L. (2006). Climatic Change and Biodiversity. Yale University Press.
- Ortiz, J.E., Torres, T., Delgado, A., Reyes, E., Llamas, J.F., Soler, V., Raya, J., (2006). Pleistocene paleo-environmental evolution at continental middle latitudes inferred from carbon and oxygen stable isotope analysis of ostracodes from the Guadix-Baza Basin (Granada, SE Spain). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 240, 535-561.
- Rohling, E.J., Grant K., Hemleben, Ch., Siddali, M., Hoogakker, B.A.A., Bolshaw, M., Lucera M. (2007). *Nature Geoscience* publ. On line 16 dec. 2007; doi 10.1038/ngeo.2007.28.
- Torres, T., Ortiz, J.E., Alcalde, C., Badal, E., Castroviejo, R., Cobo, R., Chacón, E., Delgado A., Demoustier, A., Fernández-Gianotti, J., Figueiral, I., García-Amorena, I., García-Martínez, M.J., Llamas, J.F., Julià, R.; Postigo, J.M., Rubiales, J.M., Reyes, E., Shepherd, T., Soler, V., Valle, M. (2003). Evolución paleoambiental de la mitad sur de la Península Ibérica. Aplicación a la evaluación del comportamiento de los repositorios de residuos radiactivos. ENRESA, publicación técnica 4/03, Madrid, 173 pp.