

Clima i condicions de conreu en els orígens de l'agricultura mediterrània: evidències a partir de la composició isotòpica del carboni en restes arqueobotàniques

J. P. Ferrio, N. Alonso, J. Voltas, R. Buxó, J. L. Araus

Introducció

Durant els darrers 10.000 anys, l'agricultura s'ha adoptat de manera independent arreu del món: fins ara, s'han trobat evidències arqueològiques de la domesticació de diferents espècies vegetals al Pròxim Orient, Etiòpia, l'Àfrica subsahariana, la Xina i l'Amèrica Central i del Sud (BUXÓ, 1997; HARLAN, 1998; ZOHARY I HOPF, 2000). En particular, l'agricultura del Vell Món, basada en els cereals d'hivern (blat i ordi) i els llegums (cigró i lletia), es va originar en una àrea del Pròxim Orient coneguda com el «Creixent Fèrtil», i que comprèn les planes de Mesopotàmia i els deserts de Síria i Palestina, a més d'algunes àrees muntanyes d'Anatòlia.

L'origen i expansió de l'agricultura coincideix amb el que ha estat el període càlid més estable durant almenys el darrer mig milió d'anys: l'holocè. Per tant, aquest procés no pot aïllar-se de les particulars condicions ambientals en les quals es va desenvolupar. D'altra banda, l'agricultura va modificar radicalment l'estructura social i demogràfica de les poblacions humanes, així com la seva interacció amb el medi, fins al punt que l'adopció de l'agricultura és probablement el primer exemple d'interacció recíproca entre el medi i la humanitat. És, per tant, interessant disposar d'informació detallada sobre les condicions ambientals (tant climàtiques com antropogèniques) que van caracteritzar aquest procés per tractar de com-

prendre'n les possibles causes, així com per entendre els efectes a llarg termini de l'economia agrícola sobre el medi.

Els canvis climàtics globals durant l'holocè han estat ben definits a partir de diferents evidències paleoclimàtiques (COACC, 2002; IPCC, 2001). Seria convenient, però, concentrar més esforços a escala local a fi d'assolir una descripció detallada de les condicions climàtiques específiques a les quals es van enfrontar els primers agricultors. Això és particularment necessari en el cas de la precipitació, ja que presenta una gran heterogeneïtat geogràfica (MAGNY *et al.*, 2003). En aquest context, l'estudi de la signatura isotòpica de carboni en restes fòssils vegetals pot aportar informació local sobre les condicions ambientals dominants en l'agricultura primitiva, informació que pot relacionar-se directament amb el context arqueològic al qual pertanyen les restes.

En aquest article volem mostrar la metodologia que permet inferir el clima del passat i les condicions ambientals dels conreus primitius a partir de l'estudi de carbons i llavors carbonitzades que són recollides de forma sistemàtica durant les excavacions arqueològiques. Després d'una introducció general sobre les particularitats dels isòtops estables de carboni, descriurem la metodologia a partir de diferents estudis que mostren l'aplicació dels isòtops de carboni en aquest material com a eina paleoambiental.

Isòtops estables en teixits vegetals

La fotosíntesi permet a les plantes fixar el carboni del CO₂ atmosfèric i incorporar-lo als seus teixits. Durant aquest procés, les plantes amb metabolisme fotosintètic C₃ (per exemple tots els arbres, així com els conreus originaris del Pròxim Orient) prenen preferentment l'isòtop de carboni més lleuger (i majoritari), el carboni 12 (¹²C), en lloc del carboni 13 (¹³C). La magnitud d'aquest fenomen depèn de diversos processos fisiològics, i s'expressa en termes de discriminació isotòpica de carboni ($\Delta^{13}\text{C}$), segons Farquhar [*et al.*] (1989):

$$\Delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = (\delta^{13}\text{C}_{\text{aire}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{planta}}) / [1 + (\delta^{13}\text{C}_{\text{planta}} / 1000)]$$

Eq. 1

on $\delta^{13}\text{C}_{\text{aire}}$ i $\delta^{13}\text{C}_{\text{planta}}$ fan referència a la composició isotòpica del carboni ($\delta^{13}\text{C}$) en el CO₂ atmosfèric i a la planta, respectivament. La $\delta^{13}\text{C}_{\text{aire}}$ ha sofert canvis importants durant l'holocè, en especial durant els darrers segles a causa del consum de combustibles fòssils. No obstant això, tal com es descriu a Ferrio [*et al.*] (2006a), hem pogut inferir els valors de la $\delta^{13}\text{C}_{\text{aire}}$ en el passat a partir de dades provinents de testimonis de gel de l'Antàrtida i de dues estacions antàrtiques de la xarxa CU-INSTAAR/NOAA-CMDL per a l'anàlisi del CO₂ atmosfèric (<ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2c13/flask/readme.html>).

Discriminació de carboni i estat hídric dels vegetals

A les plantes amb metabolisme C₃, la $\Delta^{13}\text{C}$ dels teixits vegetals és inversament proporcional al balanç entre la taxa fotosintètica (fixació de carboni) i la transpiració (pèrdua d'aigua), fet que és conegut com a eficiència en l'ús de l'aigua. Les plantes reaccionen típicament davant una reducció en la disponibilitat d'aigua tancant els seus estomes, augmentant la seva eficiència hídrica i reduint la $\Delta^{13}\text{C}$ de la matèria orgànica produïda per la fotosíntesi (FARQUHAR [*et al.*], 1989). D'altra banda, un increment en el dèficit de pressió de vapor (relacionat amb la demanda hídrica, i veritable motor de la transpiració) també pot provocar el tancament estomàtic, i reduir així la $\Delta^{13}\text{C}$ (BARBOUR I FARQUHAR, 2000). La regulació estomàtica és la base per a les relacions observades entre la $\Delta^{13}\text{C}$

i diverses variables associades amb la disponibilitat d'aigua i/o la demanda hídrica, com ara la precipitació, la humitat relativa o l'evapotranspiració potencial (vegeu referències a FERRIO [*et al.*], 2005b; MATEO [*et al.*], 2004). Alguns exemples d'aquest tipus de relacions els trobem a la figura 1, on es relaciona la disponibilitat d'aigua amb la $\Delta^{13}\text{C}$ de llavors de cereals (blat i ordi) i de fustes (pi blanc i alzina), en espècies àmpliament documentades en el registre arqueològic de la península Ibèrica. En tots els casos, s'observa una forta correlació positiva entre aquestes dues variables, especialment evident en els ambients més secs, allà on la disponibilitat d'aigua esdevé el principal factor limitador de la conductància estomàtica. Efectivament, la $\Delta^{13}\text{C}$ sembla que és un bon indicador de la disponibilitat hídrica, però tan sols en els climes amb un cert grau de sequera estacional (WARREN [*et al.*], 2001).

Una ullada a les condicions agronòmiques dels antics conreus: l'aproximació isotòpica

D'acord amb el que hem vist fins ara, la $\delta^{13}\text{C}$ dels teixits vegetals reflecteix les condicions ambientals en les quals s'han desenvolupat aquests teixits. Les restes arqueobotàniques carbonitzades que es troben a la major part dels jaciments són, de fet, un subproducte dels teixits vegetals, i per tant poden preservar informació ambiental a la seva signatura isotòpica. De Niro i els seus col·laboradors (DENIRO I HASTORF, 1985; MARINO I DENIRO, 1987) van ser els primers a proposar l'anàlisi de la $\delta^{13}\text{C}$ en restes arqueobotàniques per tal d'obtenir valors de referència per als seus estudis dietètics. Van dur a terme carbonitzacions experimentals de diferents tipus de llavors, i van trobar que tant la carbonització com el tractament químic de les mostres per eliminar contaminants del sòl no afectaven la $\delta^{13}\text{C}$. Aquesta observació es pot estendre a les llavors de cereals (ARAUS [*et al.*], 1997b; FERRIO [*et al.*], 2006c), especialment rellevants en el context dels orígens de l'agricultura occidental, ja que els cereals d'hivern, com el blat i l'ordi, van ser dels primers conreus al Creixent Fèrtil, i les seves restes carbonitzades són relativament freqüents en els jaciments del

neolític antic del Pròxim Orient. Això va permetre al nostre grup desenvolupar un mètode per quantificar, a partir de l'anàlisi de les llavors arqueològiques, la disponibilitat hídrica dels conreus de cereals (ARAUS [*et al.*], 1997a; ARAUS [*et al.*], 1999; ARAUS I BUXÓ, 1993; FERRIO [*et al.*], 2005a). La base d'aquesta metodologia és la relació observada entre la disponibilitat d'aigua durant l'ompliment del gra i la $\Delta^{13}\text{C}$ dels grans madurs conreats en diferents condicions ambientals (figura 1a).

Exemple d'aplicació: disponibilitat d'aigua als conreus de la conca mediterrània durant el neolític

Un exemple de l'ús d'aquesta tècnica es mostra a la figura 2. Es va mesurar la $\delta^{13}\text{C}$ de llavors carbonitzades de blat i ordi provinents de diferents jaciments arqueològics de Catalunya i Andalusia (ARAUS [*et al.*], 1997a; ARAUS I BUXÓ, 1993) i de dos jaciments del neolític preceràmic del Pròxim Orient (des de 8800 cal a. de la n. e.) (ARAUS [*et al.*], 1999; ARAUS [*et al.*], 2006; FERRIO [*et al.*], 2005a). La $\Delta^{13}\text{C}$ de les llavors arqueològiques es va calcular tal com s'ha descrit abans, i les aportacions hídriques durant l'ompliment del gra van ser estimades a partir

de la $\Delta^{13}\text{C}$, tot aplicant el model mostrat a la figura 1a. A la figura 2 es comparen els valors així estimats pel material arqueològic amb els valors mitjans actuals de precipitació durant l'ompliment del gra (aproximadament d'abril a mitjan maig). Es pot observar una davallada important en la disponibilitat hídrica des del neolític fins al present, especialment evident per als jaciments més secs, com ara els d'Andalusia i els del Pròxim Orient. Per tant, aquests resultats suggereixen que durant els principis de l'agricultura els cereals gaudien de millors condicions hídriques que les que trobem en l'actualitat en condicions de secà. De fet, els estudis arqueobotànics abonen la possibilitat d'unes condicions climàtiques més humides i fresques en el passat, tant al Pròxim Orient (HARLAN, 1998; WILLCOX, 1996) com a la península Ibèrica (VERNET, 1990; VERNET I THIEBAULT, 1987). Malgrat tot, algunes pràctiques culturals, com ara la irrigació o la sembra preferent en sòls al·luvials, poden haver incrementat les diferències entre les mostres neolítiques i els valors actuals (ARAUS [*et al.*], 1997b, 1999; BAR-YOSEF [*et al.*], 1989; FERRIO [*et al.*], 2005a; vegeu també secció 5 d'aquest article). Tot i que aquestes pràctiques difícilment podrien provocar per si

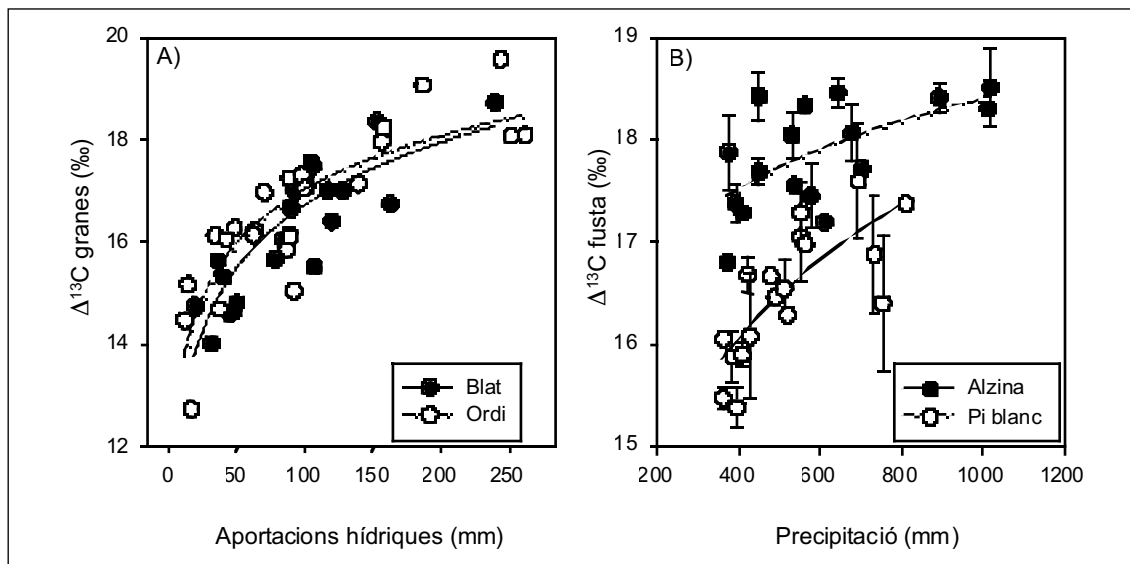


Figura 1. A) Relació entre les aportacions hídriques totals (precipitació més irrigació suplementària, si s'escau) durant l'ompliment del gra i la $\Delta^{13}\text{C}$ de granes de blat (*T. aestivum* L. i *T. turgidum* L. var. *durum*) i ordi (*Hordeum vulgare* L.). Redibuixat a partir de Ferrio [*et al.*] (2005a). $\Delta_{\text{ordi}} = 9.99 + 1.52 \cdot \ln(\text{AH})$, $r^2 = 0.73$, $P < 0.001$, $N = 25$; $\Delta_{\text{blat}} = 8.50 + 1.78 \cdot \ln(\text{AH})$, $r^2 = 0.73$, $P < 0.001$, $N = 22$. B) Relació entre la $\Delta^{13}\text{C}$ de la fusta d'alzina (*Quercus ilex* L.) i de pi blanc (*Pinus halepensis* Mill.) i la precipitació mitjana anual (P_{an}). $\Delta_{\text{alzina}} = 11.72 + 0.97 \cdot \ln(P_{\text{an}})$, $r^2 = 0.36$, $P < 0.01$, $N = 18$; $\Delta_{\text{pi}} = 4.63 + 1.91 \cdot \ln(P_{\text{an}})$, $r^2 = 0.59$, $P < 0.001$, $N = 18$. Redibuixat a partir de Ferrio [*et al.*] (2003).

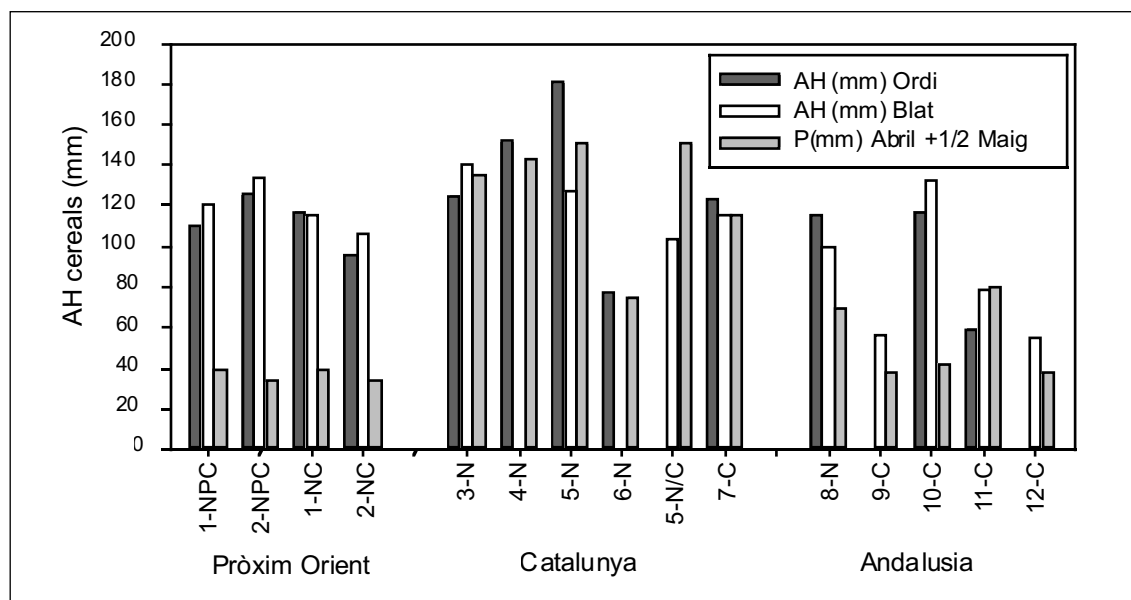


Figura 2. Aportacions hídriques durant l'ompliment del gra (AH) estimades a partir de la $\Delta^{13}\text{C}$ de granes arqueològiques carbonitzades. Com a referència s'inclouen els valors actuals de precipitació durant l'ompliment del gra (aproximadament d'abril a la primera meitat de maig) per a cada jaciment. Jaciments: 1-Akarçay Tepe (SE Turquia), 2-Tell Halula (NO Síria), 3-La Draga, 4-Plansallosa, 5-Cova 120, 6-Can Tintorer, 7-Institut Manlleu, 8-Cueva del Toro, 9-Campos, 10-Millares, 11-Malagón, 12-Pilas. Divisions culturals: NPC-neolític preceràmic, NC-neolític ceràmic, N-neolític ple, C-calcolític.

mateixes els canvis observats, es fa necessari disposar d'una font d'informació climàtica local, però insensible als canvis en el maneig dels conreus. En aquest sentit, els carbons de fusta apareixen com una bona alternativa. Per una banda, són relativament abundants en els jaciments arqueològics i, per l'altra, la disponibilitat hídrica dels arbres no depèn de les pràctiques agrícoles.

Canvis climàtics en el passat reflectits en la composició isotòpica dels carbons

La $\Delta^{13}\text{C}$ de la fusta d'anells de creixement en arbres s'ha relacionat amb èxit amb una gran varietat de variables ambientals (vegeu per exemple figura 1b, i referències a MCCARROLL I LOADER, 2004; SWITSUR I WATERHOUSE, 1998). En particular, en els climes amb una estació seca (com els que predominen a tota la regió mediterrània), la $\Delta^{13}\text{C}$ es relaciona sobretot amb variables que determinen l'estat hídric de les plantes, com ara la precipitació o la demanda hídrica (vegeu referències a FERRIO [et al.], 2005b). Tot i que existeixen algunes cronologies d'anells excepcionals que cobreixen gairebé tot

l'holocè, a bona part de la Mediterrània la desforestació intensiva no permet establir cronologies més enllà d'uns pocs segles. A mitjan anys noranta, alguns autors (FEBRUARY I VAN DER MERWE, 1992; VERNET [et al.], 1996) van suggerir que el senyal climàtic original dels isòtops de carboni en fustes es podria preservar als carbons fòssils. Malgrat això, a diferència del que hem vist per als cereals, la carbonització pot alterar considerablement la signatura isotòpica de la fusta. Per començar, coníferes i frondoses no reaccionen igual davant la carbonització, a causa de la diferent composició química de la fusta en gimnospermes (per exemple coníferes) i angiospermes (per exemple frondoses). La fusta de coníferes carbonitzada a baixes temperatures (150-300°C) tendeix a incrementar lleugerament la seva $\delta^{13}\text{C}$, mentre que a majors temperatures (300-600°C) es produeix una progressiva disminució en la $\delta^{13}\text{C}$ (ALONSO [et al.], 2004; FERRIO [et al.], 2006a; JONES I CHALONER, 1991). Per tant, en aquest cas els canvis en la $\delta^{13}\text{C}$ depenen de la temperatura i la $\delta^{13}\text{C}$ dels carbons resultants variarà en funció del grau de carbonització. No obstant això, s'ha comprovat que la $\delta^{13}\text{C}$ dels carbons manté la seva relació amb les condicions climàtiques, i que els canvis

deguts a la carbonització es poden corregir fàcilment a partir del percentatge de carboni de la mostra (FERRIO *[et al.]*, 2006a). En un estudi recent (FERRIO *[et al.]*, 2006c) hem assajat l'efecte de la carbonització sobre fustes d'un total de vuit espècies de frondoses pertanyents als gèneres *Quercus* (roures i alzines) i *Pistacia* (llentiscler). A diferència de les coníferes, no hem trobat canvis significatius en la $\delta^{13}\text{C}$ sobre un ampli rang de temperatures (300-500°C). En aquest cas, per tant, la $\delta^{13}\text{C}$ dels carbons és directament comparable amb la de la fusta intacta, sense necessitat d'aplicar cap correcció.

Exemple d'aplicació: evolució de l'aridesa a la plana de Lleida

Com hem vist, ja sigui directament o aplicant una correcció, és possible obtenir a partir dels carbons fòssils el valor original de la $\delta^{13}\text{C}$ de la fusta i, tal com hem descrit per als cereals, calcular-ne la $\Delta^{13}\text{C}$ tenint en compte els canvis en la $\delta^{13}\text{C}$ de l'aire. Tot seguit, aplicant models calibrats amb material actual com els de la figura 1b, podem arribar a quantificar la precipitació en el passat a partir de la composició isotòpica dels carbons. Seguint aquesta metodologia, hem pogut reconstruir els canvis en la precipitació a la plana de Lleida des de l'edat del bronze (Minferri, 2100-1650 cal a. de la n. e.) fins a l'edat moderna (ciutat de Lleida, s. XVIII n. e.) (figura 3a, Ferrio *[et al.]*, 2006a). Actualment, aquesta zona es troba entre les més àrides d'Europa, amb una precipitació anual entorn dels 350 ml. Tot i això, mancava establir si les condicions actuals es devien a canvis ambientals recents o bé a una progressiva aridificació, ja iniciada en època prehistòrica. D'acord amb els nostres resultats (figura 3a), la disponibilitat d'aigua en el passat seria clarament superior a la que trobem actualment, cosa que indica que les condicions semiàrides de la zona es deuen a canvis climàtics recents. A més de les diferències generals entre els valors del passat i del present, es van detectar dues fases particularment humides (1500-900 a. de la n. e.; 300 a. de la n. e.-300 n. e.) en alternança amb períodes més secs (900-300 a. de la n. e.; 900-1100 n. e.). En conjunt, aquests resultats coincideixen amb altres evidències paleoambientals, principalment deri-

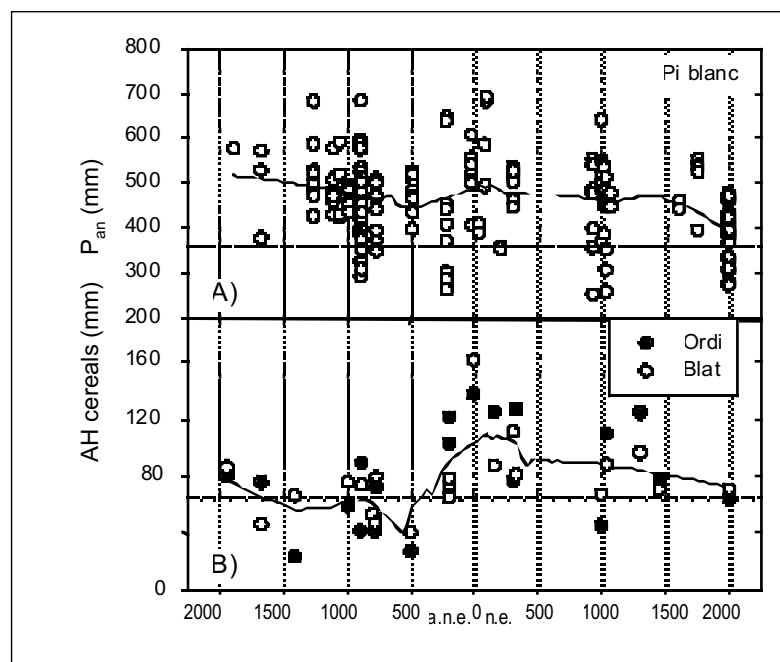
vades d'estudis pol·línics, antracològics i geomorfològics (vegeu, per exemple, ALONSO, 1999; DAVIS, 1994; GUTIÉRREZ-ELORZA I PEÑA-MONNÉ, 1998; JALUT *[et al.]*, 2000; RIERA *[et al.]*, 2004). A més, l'evolució de la $\Delta^{13}\text{C}$ en restes de carbons de llentiscler (*Pistacia lentiscus* L.), roures i alzines (*Quercus* sp.) provinents dels mateixos jaciments coincideix amb els resultats obtinguts per al pi blanc (FERRIO *[et al.]*, 2006c), fet que confirma la robustesa d'aquesta aproximació.

Quan els arbres ajuden a veure el bosc: combinant dades d'espècies agrícoles i forestals tot cercant evidències de pràctiques agronòmiques en el passat

Tal com hem apuntat més amunt, des del punt de vista de la reconstrucció climàtica l'anàlisi de restes de conreus té una aplicació limitada a causa del fet que l'estat hídric d'aquestes restes depèn tant de factors climàtics com agronòmics (per exemple la disponibilitat d'aigua al sòl) (ARAUS *[et al.]*, 1997b). Tot i això, si disposem d'una estimació independent del clima, aquesta «limitació» pot esdevenir útil per reconstruir pràctiques agronòmiques del passat. A la figura 3 trobem un exemple de com les anàlisis de restes coetànies de fusta i cereals de vuit jaciments de la plana de Lleida poden combinar-se per tractar d'entendre els canvis observats en disponibilitat hídrica. En tots dos casos, el període més sec del registre arqueològic se situa entre ca. 800 a. de la n. e. (el Vilot, bronze final) i el 500 a. de la n. e. (els Vilars, ibèric antic), i va seguit d'un increment de la disponibilitat hídrica entre ca. 300 a. de la n. e. (Roques del Sarró, ibèric ple) i 300 n. e. (ciutat de Lleida, època romana). La bona correlació entre els resultats d'espècies forestals i conreades suggereix que les variacions en disponibilitat hídrica observades en els cereals són degudes principalment a canvis climàtics, més que no pas a la implantació de noves pràctiques agrícoles.

Una aproximació alternativa per detectar la implantació selectiva de pràctiques de maneig d'aigua és comparar els canvis en l'estat hídric de diferents conreus. El nostre grup ha aplicat aquest plantejament a un total de 27 jaciments

Figura 3. Comparació entre l'evolució de A) precipitació anual (P_{an}) i B) aportacions hídriques durant l'ompliment del gra (AH) en cereals (blat i ordi combinats) a la plana de Lleida. P_{an} i AH estimades a partir de la $\Delta^{13}C$ de carbons de pi blanc i granes carbonitzades respectivament. Redibuixat a partir de Ferrio [*et al.*] (2006a) per a carbons i de Ferrio [*et al.*] (2006b) per a cereals.



de Catalunya i Andalusia, amb cronologies que van des del neolític antic (La Draga, ca. 5500 cal a. de la n. e.) fins a l'edat mitjana (l'Esquerda, s. XII n. e.). En general, la relació entre la $\Delta^{13}C$ de blats i ordis coetanis coincideix amb la que trobaríem per a aquests dos conreus en condicions de secà, en concordança amb els resultats obtinguts a la plana de Lleida (ARAUS [*et al.*], 1997b). No obstant això, per a alguns jaciments de les edats del bronze i del ferro (Puente Tablas i Peñalosa a Andalusia, Sitges UAB i Montou a Catalunya), la $\Delta^{13}C$ dels blats és superior a l'esperada, fet que indica que aquest cereal gaudia de millors condicions hídriques que l'ordi. Aquests resultats suggereixen que durant aquest període el blat rebia un tracte preferent en alguns indrets, de manera que probablement era conreat en els millors sòls (per exemple a les planes al·luvials dels rius). Aquesta ha estat des de fa temps una pràctica tradicional a la península Ibèrica (vegeu, per exemple, CASCÓN, 1934; EGUARAS, 1988), a causa del fet que l'ordi és menys sensible a l'estrès hídric que el blat i que el segon és preferit pel consum humà. D'acord amb les nostres dades, aquesta pràctica podria haver-se iniciat localment durant l'edat del bronze. De manera semblant, l'anàlisi de llavors de lleguminoses de diferents jaciments andalusos indica que aquestes eren conreades en

millors condicions hídriques que els cereals, almenys des de l'edat del bronze, probablement en petits horts a l'interior del poblat (ARAUS [*et al.*], 1997b). Per tant, l'anàlisi dels isòtops estables ens indica que les pràctiques agronòmiques dirigides a incrementar la disponibilitat hídrica dels conreus podrien haver començat durant les primeres fases de l'agricultura, tot i que no de manera generalitzada.

Conclusions

L'aplicació de les tècniques d'isòtops estables als estudis paleoambientals en arqueologia és encara als seus inicis. Des dels treballs pioners d'Araus i Buxó (1993) i February i Van der Merwe (1992) s'han produït molts avenços en el coneixement de l'ecofisiologia de conreus i espècies forestals, en tant que l'interès dels arqueòlegs per les restes arqueobotàniques s'ha incrementat notablement, fins al punt que els estudis arqueobotànics ara són sistemàtics a la major part de les excavacions. L'objectiu final dels treballs aquí resumits va ser expandir la informació disponible a partir de les restes arqueobotàniques. Mitjançant l'estudi dels isòtops de carboni, les llavors de cereals poden aportar dades sobre la disponibilitat hídrica dels

conreus, en tant que els carbons proporcionen estimacions fiables dels règims de precipitació en el passat. Així, l'estudi dels carbons, a més de representar una font complementària d'informació ambiental per als arqueòlegs, pot contribuir al coneixement dels canvis climàtics en el passat. Finalment, combinant dades d'espècies conreades i forestals, així com de diferents conreus, és possible trobar evidències de pràctiques agronòmiques adreçades a incrementar el rendiment dels conreus. En resum, les tècniques d'isòtops estables aplicades a restes arqueobotàniques poden ajudar a definir els condicionaments ambientals amb què es van enfrontar els primers agricultors, així com aportar evidències de la seva interacció amb el paisatge i el clima.

Agraïments

Aquest treball ha estat cofinançat pels projectes DGI CGL2005-08175-C02-02/BOS i MENMED (INCO-MED-ICA3-CT-2002-10022). Donem les gràcies a M. Ros i R. Piqué per la identificació dels carbons, així com a A. Florit, A. Vega, J. Coello i A. Ameztegui per la seva ajuda en la preparació de les mostres i el processament de dades. J. P. Ferrio gaudeix d'una beca postdoctoral Beatriu de Pinós de la Generalitat de Catalunya.

Abstract

Climate and growing conditions in the origins of mediterranean agriculture: evidences from carbon isotope composition in archaeobotanical remains.

In this study, we describe the methodology used to infer past climate and growing conditions of ancient crops from the study of carbonised plant remains (wood charcoal and charred seeds) that are routinely recovered in the course of archaeological excavations. After a brief introduction, this article illustrates by different case studies the application of carbon isotopes in such material as palaeoenvironmental tool. In particular, the carbon isotope composition of cereal seeds may provide information on water availability by ancient crops, whereas charcoal analysis allows quantifying past rainfall dynamics. By combining both

data sources, inferences on the implementation of specific agronomic practices in the past aimed at increasing crop water use can be drawn.

Resumen

Clima y condiciones de cultivo en los orígenes de la agricultura mediterránea: evidencias a partir de la composición isotópica del carbono en restos arqueobotánicos

Este trabajo ilustra cómo el análisis de la composición isotópica del carbono en restos arqueobotánicos aporta información sobre las condiciones climáticas y de cultivo en el pasado. Tras una introducción metodológica, se presentan distintos ejemplos que utilizan semillas carbonizadas (trigo y cebada) y/o carbones de especies forestales (pino carrasco, encina, etc.), ambos tipos de restos recuperados en yacimientos de la cuenca mediterránea. Mientras la composición isotópica en cereales proporciona inferencias sobre la disponibilidad hídrica de los cultivos, el análisis de carbones ayuda a cuantificar la precipitación. La combinación de ambas fuentes permite hipotetizar sobre la implementación de prácticas agronómicas específicas encaminadas a incrementar la disponibilidad hídrica de los cultivos en el pasado.

Referències bibliogràfiques

- ALONSO, N. (1999). «De la llavor a la farina: els processos agrícoles protohistòrics a la Catalunya Occidental». (UMR 154-CNRS: Lattes).
- ALONSO, N.; FERRIO, J. P.; FLORIT, A.; LÓPEZ, J. B.; PIQUÉ, R.; VOLTAS, J. (2004). «Evolució climàtica de la plana occidental catalana durant els darrers 4.000 anys: primers resultats de la discriminació isotòpica del carboni ($\Delta^{13}\text{C}$)». *Revista d'Arqueologia de Ponent*, 14, p. 9-29.
- ARAUS, J. L.; BUXÓ, R. (1993). «Changes in carbon isotope discrimination in grain cereals from the north-western Mediterranean basin during the past seven millennia». *Australian Journal of Plant Physiology*, 20, p. 117-128.
- ARAUS, J. L.; FEBRERO, A.; BUXÓ, R.; CAMALICH, M. D.; MARTÍN, D.; MOLINA, F.; RODRÍGUEZ-ARIZA, M. O.; ROMAGOSA, I. (1997a). «Changes in carbon isotope discrimination in grain cereals from different regions of the western Mediterranean basin during the past seven millennia. Palaeoenvironmental evidence of a differential change in aridity during the late Holocene». *Global Change Biology*, 3, p. 107-118.

- ARAUS, J. L.; FEBRERO, A.; BUXÓ, R.; RODRÍGUEZ-ARIZA, M. O.; MOLINA, F.; CAMALICH, M. D.; MARTÍN, D.; VOLTAS, J. (1997b). «Identification of Ancient Irrigation Practices based on the Carbon Isotope Discrimination of Plant Seeds: a Case Study from the South-East Iberian Peninsula». *Journal of Archaeological Science*, 24, p. 729-740.
- ARAUS, J. L.; FEBRERO, A.; CATALÀ, M.; MOLIST, M.; VOLTAS, J.; ROMAGOSA, I. (1999). «Crop water availability in early agriculture: evidence from carbon isotope discrimination of seeds from a tenth millennium BP site on the Euphrates». *Global Change Biology*, 5, p. 201-212.
- ARAUS, J. L.; FERRIO, J. P.; BUXÓ, R.; VOLTAS, J. (2006). «The historical perspective of dryland agriculture: Lessons learned from 10000 years of wheat cultivation». *Journal of Experimental Botany* (en premsa).
- BAR-YOSEF, O.; KISLEV, M. E.; HARRIS, D. R.; HILLMAN, G. C. (1989). «Early farming communities in the Jordan Valley». Dins: HARRIS, D. R.; HILLMAN, G. C. (ed.) *Foraging and farming: the evolution of plant exploitation*. London: Unwin Hyman, p. 632-642. .
- BARBOUR, M. M.; FARQUHAR, G. D. (2000). «Relative humidity-and ABA-induced variation in carbon and oxygen isotope ratios of cotton leaves». *Plant, Cell and Environment*, 23, p. 473-485.
- BUXÓ, R. (1997). *Arqueología de las plantas: la explotación económica de las semillas y los frutos en el marco mediterráneo de la Península Ibérica*. Barcelona, Espanya: Crítica.
- CASCÓN, J. (1934). *Agricultura española: antología de artículos, monografías y conferencias*. Madrid: Dirección General de Agricultura.
- COACC. (2002). *Abrupt climate change: Inevitable surprises*. Washington: National Academy of Sciences.
- DAVIS, BAS. (1994). *Palaeolimnology and Holocene environmental change from endorheic lakes in the Ebro Basin, N.E. Spain*. (PhD. thesis, University of Newcastle upon Tyne).
- DENIRO, M. J.; HASTORF, C. A. (1985). «Alteration of $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of plant matter during the initial stages of diagenesis: Studies utilizing archaeological specimens from Peru». *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49, p. 97-115.
- EGUARAS, J. (1988). *Ibn Luyun, Tratado de Agricultura (Kitab al-Filaha, Almería, 1348)*. (Patronato de la Alhambra y Generalife: Granada).
- FARQUHAR, G. D.; EHLERINGER, J. R.; HUBICK, K. T. (1989). «Carbon isotope discrimination and photosynthesis». *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 40, p. 503-537.
- FEBRUARY, E. C.; VAN DER MERWE, N. J. (1992). «Stable carbon isotope ratios of wood charcoal during the past 4000 years: anthropogenic and climatic influences». *South African Journal of Science*, 88, p. 291-292.
- FERRIO, J. P.; ALONSO, N.; LÓPEZ, J. B.; ARAUS, J. L.; VOLTAS, J. (2006a). «Carbon isotope composition of fossil charcoal reveals aridity changes in the NW Mediterranean Basin». *Global Change Biology*, 12, p. 1253-1266.
- FERRIO, J. P.; ALONSO, N.; VOLTAS, J.; ARAUS, J. L. (2006b). «Grain weight changes over time in ancient cereal crops: Potential roles of climate and genetic improvement». *Journal of Cereal Science* (en premsa).
- FERRIO, J. P.; ARAUS, J. L.; BUXÓ, R.; VOLTAS, J.; BORT, J. (2005a). «Water management practices and climate in ancient agriculture: inference from the stable isotope composition of archaeobotanical remains». *Vegetation History and Archaeobotany*, 14, p. 510-517.
- FERRIO, J. P.; FLORIT, A.; VEGA, A.; SERRANO, L.; VOLTAS, J. (2003). «D ^{13}C and tree-ring width reflect different drought responses in *Quercus ilex* and *Pinus halepensis*». *Oecologia* 137, p. 512-518.
- FERRIO, J. P.; RESCO, V.; WILLIAMS, D. G.; SERRANO, L.; VOLTAS, J. (2005b). «Stable isotopes in arid and semi-arid forest systems». *Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales*, 14, p. 371-382.
- FERRIO, J. P.; VOLTAS, J.; ALONSO, N.; ARAUS, J. L. (2006c). «Reconstruction of climate and crop conditions in the past based on the carbon isotope signature of archaeobotanical remains». Dins: DAWSON, T. D.; SIEGWOLF, R. (ed.). *Isotopes as tracers of ecological change*. (En premsa). (Elsevier Academic Press).
- GUTIÉRREZ-ELORZA, M.; PEÑA-MONNÉ, J. L. (1998). «Geomorphology and late Holocene climatic change in northeastern Spain». *Geomorphology*, 23, p. 205-217.
- HARLAN, J. R. (1998). *The living fields: our agricultural heritage*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IPCC. (2001). *Climate Change 2001: the scientific basis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- JALUT, G.; ESTEBAN-AMAT, A.; BONNET, L.; GAUQUELIN, T.; FONTUGNE, M. (2000). «Holocene climatic changes in the Western Mediterranean, from south-east France to south-east Spain». *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 160, p. 255-290.
- JONES, T. P.; CHALONER, W. G. (1991). «Fossil charcoal, its recognition and palaeoatmospheric significance». *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 97, p. 39-50.
- MAGNY, M.; BEGEOT, C.; GUIOT, J.; PEYRON, O. (2003). «Contrasting patterns of hydrological changes in Europe in response to Holocene climate cooling phases». *Quaternary Science Reviews*, 22, p. 1589-1596.
- MARINO, B. D.; DENIRO, M. J. (1987). «Isotope analysis of archaeobotanicals to reconstruct past climates: effects of activities associated with food preparation on carbon, hydrogen and oxygen isotope ratios of plant cellulose». *Journal of Archaeological Science*, 14, p. 537-548.
- MATEO, M. A.; FERRIO, J. P.; ARAUS, J. L. (2004). «Isótopos estables en fisiología vegetal». Dins: REIGOSA, M. J.; PEDROL, N.; SÁNCHEZ, A. (ed.). *La ecofisiología vegetal, una ciencia de síntesis*. Madrid: Paraninfo, S. A., p. 113-160.
- MCCARROLL, D.; LOADER, N. J. (2004). «Stable isotopes in tree rings». *Quaternary Science Reviews*, 23, p. 771-801.
- RIERA, S.; WANSARD, G.; JULIÀ, R. (2004). «2000-year environmental history of a karstic lake in the Medi-

- terranean Pre-Pyrenees: the Estanya lakes (Spain)». *Catena*, 55, p. 293-324.
- SWITSUR, V. R.; WATERHOUSE, J. S. (1998). «Stable isotopes in tree ring cellulose». Dins: GRIFFITHS, H. (ed.). *Stable isotopes: integration of biological, ecological and geochemical processes*. Oxford: BIOS Scientific Publishers Ltd., p. 303-321.
- VERNET, J. L. (1990). «The bearing of phyto-archaeological evidence on discussions of climatic change over recent millennia». *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A330, p. 671-677.
- VERNET, J. L.; PACHIAUDI, C.; BAZILE, F.; DURAND, A.; FABRE, L.; HEINZ, C.; SOLARI, M. E.; THIEBAULT, S. (1996). «Le $\delta^{13}\text{C}$ de charbons de bois préhistoriques et historiques méditerranéens, de 35000 BP a l'actuel. Premiers resultats». *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, série II a*, 323, p. 319-324.
- VERNET, J. L.; THIEBAULT, S. (1987). «An approach to northwestern Mediterranean recent prehistoric vegetation and ecologic implications». *Journal of Biogeography*, 14, p. 117-127.
- WARREN, C. R.; MCGRATH, J. F.; ADAMS, M. A. (2001). «Water availability and carbon isotope discrimination in conifers». *Oecologia*, 127, p. 476-486.
- WILLCOX, G. (1996). «Evidence for plant exploitation and vegetation history from three Early Neolithic pre-pottery sites on the Euphrates (Syria)». *Vegetation History and Archaeobotany*, 5, p. 143-152.
- ZOHARY, D.; HOPF, M. (2000). *Domestication of plants in the Old World*. Oxford: Oxford Science Publications (tercera edició).

J. L. ARAUS és catedràtic de Fisiologia Vegetal a la Universitat de Barcelona i especialista en ecofisiologia de conreus i relacions hídriques; R. Buxó és arqueòleg del Museu d'Arqueologia de Catalunya, i els seus estudis se centren en el camp de l'arqueobotànica; J. Voltas és professor titular de la Universitat de Lleida, especialista en genètica i fisiologia de conreus i espècies forestals; N. Alonso és professora agregada de Prehistòria a la Universitat de Lleida, especialista en l'estudi de restes carpològiques; J. P. Ferrio és becari postdoctoral a la Universitat de Freiburg, i ha dedicat la seva tesi a l'aplicació dels isòtops estables en arqueobotànica.