

Datació radiocarbònica i calibratge

La problemàtica plantejada per la cronologia radiocarbònica convencional i el calibratge de les seves datacions va portar la secció d'Arqueologia, Prehistòria i Història Antiga del Departament de Geografia i Història de la Universitat de Lleida a decidir que aquest fos el tema a tractar en el XVIII Curset d'Arqueologia, celebrat a Lleida els dies 18 i 19 de maig de 1995. Els objectius proposats eren presentar un estat de la qüestió i les línies actual de debat, facilitar el diàleg entre els tècnics i els arqueòlegs, oferir indicacions metodològiques sobre el tractament i la interpretació de les datacions calibrades i debatre casos concrets centrats en bandes cronològiques conflictives de la prehistòria i la protohistòria peninsulars. Els articles que presentem recullen de forma extractada el contingut d'algunes de les ponències presentades i les línies que segueixen recullen la part que hem estimat com més significativa del desenvolupament de les sessions i la taula rodona de conclusions.

Datació radiocarbònica i calibratge

E. Junyent, J. B. López i A. Martín

Malgrat que el temps no és una categoria d'anàlisi històrica, per als arqueòlegs i historiadors constitueix una dimensió ineludible i el seu control esdevé necessari per a poder ordenar els fets i comprendre els processos històrics.

La cronologia radiocarbònica convencional es pot considerar normalitzada en el nostre país, si tenim en compte el nombre de datacions disponibles en relació amb d'altres països europeus. No passa el mateix amb el calibratge. Inèrcia i recels es confonen en la comunitat acadèmica, incòmoda pels canvis que introdueixen els successius afinaments de les corbes i els programes informàtics de calibratge i, alhora, vacil·lant i expectant en veure trontollar els esquemes cronològics tradicionals i trobar dificultats per ajustar les datacions calibrades i el temps històric ancorat en les fonts escrites. En funció del contingut de les ponències presentades podem inferir:

1a. La necessitat d'integrar en els projectes de recerca històrico-arqueològica la problemàtica de la datació radiocarbònica. La perspectiva de la investigació multidisciplinària ofereix el marc adequat per a una incorporació dels tècnics en cronologia als equips de recerca, fins i tot sobre el terreny. L'objectiu és: 1) el disseny conjunt de l'estratègia de mostreig i d'anàlisi específica, en funció dels problemes prèviament plantejats i del tipus de mostres disponibles (p. e., en cada cas, tipus de mostra més adequada, nombre de mostres, d'anàlisi d'una mateixa mostra, tipus d'anàlisi, etc.); 2) rendibilitzar els pressupostos esmerçats i els resultats obtinguts; i 3) garantir la lectura-valoració de les dades obtingudes.

2a. La teoria arqueològica que ha de presidir qual-sevol projecte s'estén a l'estratègia de recollida i selecció de mostres que exigeix: 1) establir clarament l'objectiu de la datació, sigui reconèixer la durada d'un fenomen arqueològic (ús d'un tipus ceràmic, ritual funerari, etc.), o de l'ocupació d'un assentament, o sigui datar un esdeveniment puntual (destrucció, abandonament, amortització d'una estructura) o ancorar en el temps un sondeig estratigràfic o una columna pol·línica, etc.; 2) establir quin tipus de mostra és més adient datar, tenint en compte les característiques intrínseques de les pròpies mostres i, en conseqüència, les seves limitacions (per exemple, vida curta: ossos, llavors, etc., o llarga: fusta, carbons); 3) comprendre i interpretar correctament el context arqueològic de les mostres, és a dir les activitats humanes documentades i associades al material orgànic datat (llar, abocament, sepultura primària, col·lectiva o secundària, nivell de destrucció, d'amortització, etc.), per poder valorar correctament la significació de la data.

3a. Actualment no existeix cap raó per a no calibrar. L'acceptació del mètode de datació absoluta per radiocarboni exigeix per coherència assumir el seu

desenvolupament i millora. És un contrasentit treballar amb la cronologia radiocarbònica convencional i rebutjar el calibratge. Encara més, resulta igualment clar que l'expressió calendàrica dels resultats, és a dir, en anys solars, correspon a temps real i s'ajusta molt millor a la comprensió del procés històric. L'actitud escèptica, fins i tot hostil, de bona part de la comunitat arqueològica, revestida d'hipercriticisme, respon a la reticència a abandonar els esquemes cronològics tradicionals.

4a. La corba de calibratge actualment comprovada i acceptada internacionalment recull els darrers 13.000 anys. Diferents programes de calibratge faciliten la tasca de conversió de les dates convencionals BP i les novetats del futur aniran pel camí d'aconseguir cada cop més precisió però no resultats diferents. L'existència d'alguns trams excessivament imprecisos, amb més fortes variacions en la concentració de C14 atmosfèric, genera alguns períodes conflictius com l'anomenat «desastre del ferro». Corba només n'hi ha una, però existeixen diferents mètodes de calibrar i diferents formes de tractar, valorar, representar i interpretar les dates. I d'això és responsable l'arqueòleg que ha de ser conscient del risc que s'assumeix amb l'elecció.

Al llarg de la reunió, i a partir de l'acceptació, òbviament compartida per tothom, que allò que obtenim correspon a un interval de temps i no a una data concreta, s'han manifestat dues posicions que, s'ha de dir, no corresponen a una simple distinció entre tècnics i arqueòlegs:

Una emfatitza, des d'una perspectiva diguem-ne tècnica, el rigor i els límits del resultat obtingut en el laboratori i qüestiona el mètode d'intersecció: el que es projecta sobre la corba no és una línia (valor mitjà) que dona un punt (data) sinó que es projecta un marge de probabilitat i s'obté un interval. Així, el valor mitjà està mancat de significació cronològica i el resultat s'assumeix exclusivament com a lapse de temps inclòs en un interval, la qual cosa condiciona la lectura i el tractament.

L'altra emfatitza la necessària optimització dels resultats des de la lectura del procés històric, recalca que, en bona mesura, l'acceptació de l'interval anul·la la utilitat del calibratge i critica el que anomena «positivisme isotòpic». L'objectiu és l'aproximació —amb explicitació dels procediments i del risc assumit— a una escala de temps més concreta, mitjançant la rendibilització de les tendències centrals de les datacions i l'ús del valor mitjà, així com la substitució de les discussions data a data per la ponderació de sèries de valors mitjans.

5a. Sense intenció de fer-ne un valor absolut, la datació radiocarbònica calibrada s'ha d'incorporar amb urgència al debat existent entre les cronologies arqueològiques i històriques de la Mediterrània, especialment conflictiu a les acaballes del segon mil·lenni i les primeres centúries del primer.

6a. Insistir en la necessitat de publicar de forma rigorosa les datacions, recollint la informació referent al laboratori, jaciment, context arqueològic, tipus de mostra i la datació C14 convencional expressada BP, més la seva incertesa, el punt d'intersecció i la bibliografia.

7a. Finalment, concloure que la calibració contribueix a resoldre alguns problemes, en planteja altres de nous i en definitiva obre noves perspectives. Integrar la calibració de la datació radiocarbònica respon a una necessària línia d'exigència de rigor i pluridisciplinarietat de la pròpia arqueologia.

Consideraciones sobre la calibración

Fernán Alonso

La curva que ofrece el programa de calibración 3.03 de la Universidad de Washington (STUIVER, REIMER 1993) tiene dos partes bien diferenciadas, según se observa en la fig. 1:

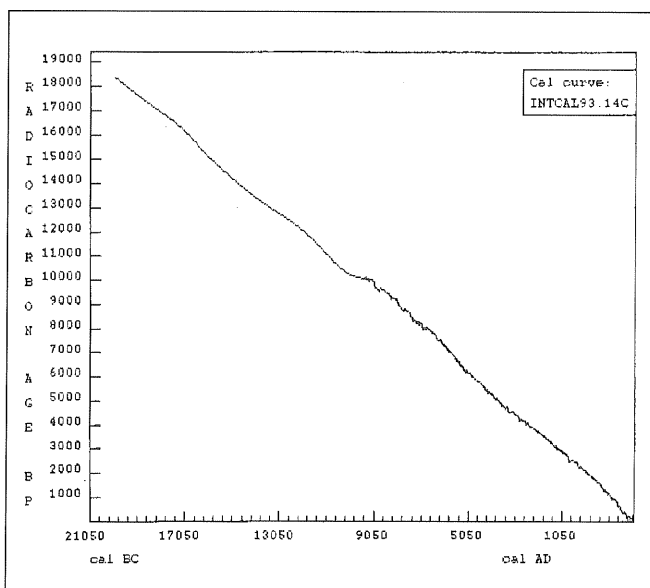


Figura 1. - Curva de calibración completa.

— La primera se ha obtenido midiendo las edades carbono-14 en madera de anillos de árbol agrupados de 10 en 10 o de 20 en 20 e identificados inequívocamente en años de calendario. La curva presenta oscilaciones, que se supone corresponden a cambios climáticos de corto y largo alcance y a variaciones en el campo magnético terrestre, pero se considera de gran precisión hasta aproximadamente unos 10.000 años.

— La segunda se ha obtenido (BARD et al. 1993) comparando las edades carbono-14 con las edades uranio-torio que en ambos casos suministran los corales marinos. La curva no tiene oscilaciones de corto alcance, dado que la escasez de puntos de medida obliga a una integración matemática, pero se considera todavía de poca precisión para aplicarla a fechas de carbono-14 entre 10.000 y 18.000 años.

Por otro lado, se acepta que la determinación de edades por el método del carbono-14 está perfectamente establecida ya que todos los laboratorios respetan las mismas normas, entre ellas utilizar una idéntica ecuación para el cálculo de la edad, el mismo patrón de referencia y el mismo período de semidesintegración. La representación gráfica de una fecha de carbono-14 experimental o convencional dará siempre una distribución de Gauss que es simétrica respecto del valor central (fecha concreta) y más o menos acampanada en función del error \pm sigma que acompañe a la fecha.

Por tanto, la calibración de las fechas de carbono-14 convencionales se reduce a proyectar la campana de esas fechas sobre la curva de calibración y ver qué resulta (fig. 2). Obviamente si la curva fuese recta la

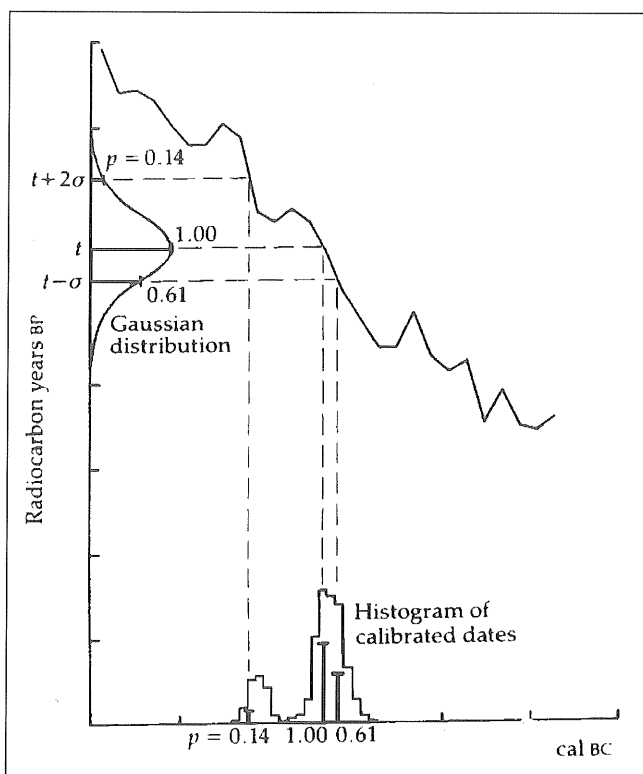


Figura 2. - Calibración de fechas de carbono-14 (BOWMAN 1990).

calibración sería sencilla ya que obtendríamos una campana más o menos similar dependiendo de su inclinación. Como no es recta sino irregular, las variaciones que presenta la curva de calibración no son susceptibles de describirse mediante una fórmula matemática, por lo que es preciso utilizar métodos informáticos para reflejar la probabilidad de cada uno de los puntos de la distribución gaussiana sobre el tramo de curva calibrada que le corresponde. El resultado de esa proyección es una sucesión no uniforme de años calibrados, con probabilidades asignadas aparentemente de manera aleatoria, y cuya agrupación puede expresarse de formas distintas, entre ellas la reflejada en la figura como histograma.

Al no haberse acordado todavía criterios de uniformidad para expresar los intervalos de edad obtenidos en la calibración de fechas de carbono-14, excepto el que se citen como cal BP o cal BC/cal AD, habremos de enfrentarnos inevitablemente al hecho de que

puedan utilizarse diversos programas de calibración, todos ellos parecidos —es cierto— al emplear la misma curva de calibración como referencia pero distintos en el tratamiento de la probabilidad.

Pero no son estas posibles discrepancias las que plantean el principal escollo en la aplicación práctica de la calibración, sino el hecho de que la amplitud de los intervalos calibrados genera imprecisión y antigüedad en la resolución de problemas de cronología arqueológica. Por ello, los arqueólogos disponen de absoluta libertad para tratar la información de la manera que les parezca más oportuna, bien acortando los intervalos con criterios específicos bien agrupando las fechas estadísticamente semejantes para mejorar la resolución y, en definitiva, intentando extraer la máxima utilidad de los datos experimentales.

Bibliografía

BARD, et al. 1993

E. Bard, M. Arnold, R. G. Fairbanks, B. Hamelin, «Th-230-U-234 and C-14 ages obtained by mass spectrometry on corals», *Radiocarbon*, 35, 191-200.

BOWMAN, 1990

S. Bowman, «Radiocarbon Dating», British Museum Pub., Londres, 48.

STUIVER, REIMER 1993

M. Stuiver, P. Reimer, «Extended C-14 data base and revised Calib 3.0 C-14 age calibration program», *Radiocarbon*, 35, 215-230.

El C14 y la resolución de problemas arqueológicos. La conveniencia de una reflexión¹

Pedro V. Castro Martínez²

Rafael Micó Pérez³

La cronología absoluta de los materiales, contextos y de las entidades arqueológicas constituye todavía una asignatura pendiente. Esta afirmación puede sonar fuera de lugar a quienes consideran que, tras más de un siglo de uso, los métodos tradicionales de datación arqueológica gozan de suficiente fiabilidad. Éstos otorgan la dimensión temporal a los objetos y a sus asociaciones mediante una combinatoria de conexiones en la que intervienen analogías morfológicas (los célebres «paralelos» entre «fósiles directores» cronológicos), junto a valoraciones en términos de cronología relativa proporcionadas por registros estratigráficos o seriaciones tipológicas. Sin embargo, ni estratigrafías ni paralelos por sí solos conceden cronologías absolutas. Para ello, en última instancia, deben remitir a un referente calendárico universal. Desde el inicio de la práctica arqueológica como disciplina académica, esta seguridad ha sido prestada por las fuentes escritas referenciadas en un tiempo universal astronómico (léase básicamente las listas dinásticas y el calendario de las Olimpiadas). En otras palabras, la clave residía en los textos antiguos que mencionaban eventos astronómicos susceptibles de ser ubicados en algún momento del *continuum* de nuestro calendario. Lo dicho es plenamente aplicable a la prehistoria reciente del llamado Viejo Mundo (desde el neolítico hasta la edad del hierro) y, con matices, para otras épocas. Así, desde la adopción del calendario juliano y la creciente frecuencia de referencias escritas dentro de la tradición grecorromana, la ubicación cronológica de los restos arqueológicos gozó de mayores garantías, aunque, ya emplazados en el terreno de la historiografía, tales restos quedaron a menudo relegados al papel en imágenes ilustrativas de los textos. Por otra parte, la cronología de los periodos iniciales de la historia de la humanidad, sin posibilidad de engancharse con referencias escritas, siempre se apoyó

1. Este trabajo debe buena parte de su contenido a un trabajo colectivo desarrollado en el marco del *Proyecto Gatas*, así como a diversas iniciativas protagonizadas por miembros de este equipo de investigación. A todos ellos/as nuestro agradecimiento por habernos permitido plasmar en unas líneas lo que es fruto de una reflexión conjunta.

2. Departament d'Història de les Societats Pre-capitalistes i d'Antropologia Social. Universitat Autònoma de Barcelona.

3. Becario Postdoctoral CIRIT. Department of Archaeology. University of Reading (Reino Unido).

en los tiempos relativos de la geología o de la paleontología.

No obstante, durante las últimas décadas en el edificio que había albergado la cronología absoluta de la prehistoria reciente europea se ha ido comprobando la necesidad de hacer reformas. Las llamadas de atención en este sentido han llegado de diferentes direcciones. Por un lado, el propio método arqueohistoriográfico ha generado su autocrítica. La más contundente y clara ha sido enunciada recientemente por P. J. James y sus colaboradores en el libro *Centuries of Darkness* (1991). En esta obra se analizan los fundamentos de las cronologías cruzadas tradicionales, enfatizando su dependencia respecto a los listados dinásticos egipcios, así como la posible fragilidad de las conexiones entre éstos y los eventos astronómicos que les otorgan dimensión absoluta. En alusión al problema básico que motivó su estudio, las denominadas «Edades oscuras» definidas en la transición entre el II y el I milenio antes de Cristo en muchas áreas de Europa y del Próximo Oriente, James y su equipo señalan que son el resultado de errores de datación arqueológica y proponen su eliminación. Ello supondría en la práctica rebajar doscientos o trescientos años la cronología de las culturas y periodos arqueológicos de finales del II milenio hasta enlazar con las primeras entidades definidas ya en el primer milenio. Las críticas de James et al. han puesto en el candelero las posibles debilidades del método tradicional, pero no ofrecen una alternativa que permita superarlas satisfactoriamente, ya que la nueva cronología propuesta se sustenta también en el mismo sistema de analogías y referencias cruzadas.

La otra línea de crítica a los esquemas cronológicos tradicionales ha venido de la mano de la aplicación de métodos de datación absoluta y, fundamentalmente, del C14. Estos métodos se basan en el conocimiento de los ritmos de desintegración de determinados isótopos y en su medición en diversos tipos de muestras (materiales orgánicos, cerámica, rocas) o en los ciclos anuales de crecimiento de determinadas especies arbóreas (dendrocronología). De este modo, proporcionan una estimación en términos absolutos anuales sobre la edad de la muestra, cuyo fundamento es independiente en principio de consideraciones arqueológicas. Sin embargo, la utilización de las fechas obtenidas ha tenido una gran trascendencia arqueológica, puesto que su contribución al debate de determinadas problemáticas ha sido de tal magnitud que ha merecido el calificativo de «revolucionaria». La más célebre de estas aportaciones tuvo lugar a inicios de la década de los setenta, cuando, a la luz de las dataciones de C14 calibradas, se comprobó la mayor antigüedad del fenómeno megalítico y de la metalurgia europea respecto a sus hasta entonces admitidos precursores del Próximo Oriente (RENFREW 1973). El impacto fue tal que sin duda contribuyó a uno de los principales «cambios de paradigma» de la arqueología contemporánea: la quiebra del difusionismo tradicional y la irrupción del procesualismo autoctonista de la *New Archaeology*. A partir de entonces, se ha sucedido la crítica y remodelación de las cronologías tradicionales mediante el análisis de los registros radiocarbónicos, especialmente en lo que a la edad del bronce europea se refiere. No obstante, el uso arqueológico

de los métodos de cronología absoluta no ha venido acompañado por una reflexión propia de la arqueología sobre las repercusiones que tiene fechar elementos aislados e interpretar significados cronológicos de conjuntos de elementos asociados.

Aquí trataremos de mostrar las ventajas de la utilización de los métodos de datación absoluta y, en especial, del C14 calibrado dendrocronológicamente, sobre los procedimientos analógicos tradicionales. Un uso reflexivo de los primeros garantiza en la actualidad un mayor grado de fiabilidad a la hora de establecer las situaciones de sincronía y diacronía material (horizontes, fases, periodos), a partir de las cuales se realizan interpretaciones históricas desde la arqueología. Para ciertos periodos, como el paleolítico, su empleo se hace ineludible, siendo en este caso los procedimientos isotópicos del Uranio-Torio y del Potasio-Argón los más utilizados. No obstante, cuando nos adentramos en la Prehistoria reciente y cada vez más a medida que arribamos a los puertos aparentemente seguros de la historiografía, se observan numerosas reticencias a su adopción, a menudo motivadas por falta de información sobre las técnicas y, en otros casos, por lo incorrecto de ésta. En las páginas siguientes trataremos de sugerir posibles caminos a seguir para superar ambos problemas, desde la perspectiva de que el recurso a la cronometría isotópica debe estar regido por un razonamiento arqueológico, en función de problemas concretos de nuestra disciplina. Sin esta reflexión, centrada en una serie de puntos que repasaremos sucesivamente, pronto comprobaríamos que la cronometría, en sí misma, no aporta soluciones válidas.

La propuesta metodológica que resumiremos en este ensayo ha sido ya dada a conocer en diversos trabajos centrados en análisis a diferentes escalas espacio-temporales, como la «edad del bronce» europea (GONZÁLEZ MARCÉN, LULL y RISCH 1992), la prehistoria reciente de la Península Ibérica y Baleares en su marco global (CASTRO et al. e.p./a) o en análisis específicos a escala regional (CASTRO 1992, 1994, CASTRO, GONZÁLEZ MARCÉN y LULL e.p., CASTRO, MICO y SANAHUJA e.p., CASTRO et al. e.p./b; GILI, LULL y RIHUETE e.p., GONZÁLEZ MARCÉN 1991), así como en los periodos iniciales de la Edad del Bronce en el Egeo (MONTÓN 1993). Además de estas obras de síntesis, la apuesta por la cronometría isotópica se está plasmando en la labor de investigación sobre el yacimiento prehistórico de Gatas (Turre, Almería) (CASTRO et al. e.p./c), para el cual se dispone en la actualidad de una serie compuesta por casi cincuenta dataciones.

1. Los principios de la datación por C14: ¿de qué se trata?⁴

El método de datación por C14 se basa en una serie de principios y procesos físico-químicos naturales que

4. Pueden encontrarse descripciones más detalladas de las premisas teóricas y los medios instrumentales de la datación por C14 en Gillespie (1986), Aitken (1990), Bowman (1990), así como en las contribuciones de J. Mestres y F. Alonso incluidas en este volumen.

han sido establecidos científicamente. El C14 es un isótopo radiactivo e inestable del carbono, presente en la atmósfera en forma de dióxido de carbono como resultado de la acción de las radiaciones cósmicas en el N14. Aunque en muy bajas cantidades, el C14 se distribuye por toda la cadena trófica, siendo asimilado por los seres vivos. Tras la muerte de éstos, se inicia un proceso mediante el cual la cantidad de C14 en cada organismo experimenta una paulatina desintegración, durante la cual se liberan partículas beta conforme a una tasa conocida. Esta tasa, designada como «vida media», es constante y señala que cada 5730 años se desintegrará la mitad de los átomos de C14 originalmente presentes en una muestra.

Así pues, el principio básico del sistema de datación reside en cuantificar el número de átomos que quedan en una muestra, para poder calcular cuánto tiempo ha debido transcurrir desde que el número inicial de átomos de C14, que se presupone equivalente al valor actual, comenzó a desintegrarse según la tasa de vida media. El recuento de las partículas beta que señalan la desintegración del isótopo se realiza en el laboratorio durante un tiempo limitado. Dado que la desintegración de un átomo concreto de C14 en ese periodo de tiempo constituye un fenómeno aleatorio, la cuantificación está sujeta a un error estadístico. Por tal motivo, las fechas de C14 proporcionadas por el laboratorio se expresan en forma de una distribución normal con un valor medio (x) y una desviación-tipo (S) que señala el 68,26% de posibilidades de que el valor real se encuentre entre los límites del intervalo demarcado de esta manera (1 sigma). Se trata de valores consensuados de la edad de la muestra en referencia al año 1950 y a una vida media de 5.658 años, en homenaje a W. Libby que desarrolló el procedimiento, aunque no correspondan a la edad real del radiocarbono. A estos resultados se les denomina dataciones «convencionales» por esta razón y porque finalmente se ha podido precisar un desajuste entre la edad del radiocarbono y las fechas de calendario.

El principal problema que afecta al método estriba en que uno de los términos de la ecuación, la cantidad de C14 inicial en la atmósfera y, por ende, en cada organismo, ha sufrido variaciones a lo largo del tiempo, principalmente como consecuencia de cambios en la intensidad de la radiación cósmica que ha recibido el planeta. Por tal motivo, resulta preciso corregir las estimaciones convencionales, expresadas en «años radiocarbónicos», a fin de convertirlas en «años de calendario». La solución al problema de la «calibración» de las fechas de C14 ha venido de la mano de la dendrocronología. Gracias a la obtención de una secuencia milenaria de anillos arbóreos de crecimiento anual y su subsiguiente datación por C14, se ha llegado a elaborar una curva que refleja las fluctuaciones en la cantidad de C14 atmosférico a lo largo de este periodo de tiempo, posibilitando por tanto la conversión deseada a años calendáricos. Dicha curva, unánimemente aceptada, recibe el nombre de «alta precisión» y, tras su última actualización,⁵ permite calibrar

dataciones hasta unos 10.000 años antes del presente. Los resultados de la calibración se pueden obtener mediante un sencillo programa de ordenador que recibe el nombre de *Calib* y que proporciona la Universidad de Washington (STUIVER y REIMER 1993). Los resultados de la calibración dendro-cronológica ofrecen intervalos de probabilidad correspondientes a 1 (68,26%) o a 2 sigmas (95%). Sin embargo, conviene indicar que en este caso estos intervalos no se ajustan a una distribución normal, sino que los momentos de máxima o mínima probabilidad se ubican de manera desigual en su interior, conforme a las propias sinuosidades de la curva de referencia.

En lo que respecta al tema de la presentación de los resultados, los laboratorios asignan a cada fecha un código de identificación alfanumérico que acompaña el valor cronológico en términos de años de radiocarbono antes del presente. A partir de ahí, cada investigador/a puede optar por hacer uso del equivalente de tales valores antes de Cristo o bien manejar fechas calibradas. La terminología que permite indicar cuál de estas opciones se ha adoptado en cada caso no está exenta de problemas. La solución más extendida consiste en utilizar las siglas inglesas bp (*before present*) o bc (*before Christ*) en referencia a valores convencionales antes del presente o antes de Cristo respectivamente. Si nos movemos en cronologías calibradas, lo usual es emplear siglas mayúsculas BP o BC, anteponiendo la indicación «cal». Por nuestra parte, hemos optado desde hace varios años por un sistema terminológico con un mayor número de variantes, en respuesta a los diferentes «tiempos» que se utilizan en los estudios arqueológicos (CASTRO 1992: 32):

— ane/dne: fecha «antes de nuestra era/de nuestra era» según la cronología radiométrica convencional basada en la vida media del C14 y establecida en 5568 años (valor Libby).

— cal ANE/DNE: fecha «antes de nuestra era/de nuestra era» según la cronología radiométrica calibrada dendrocronológicamente u otros procedimientos físico-químicos como la termoluminiscencia, que proporcionan directamente valores en años solares.

— arq ANE/DNE: fecha «antes de nuestra era/de nuestra era» según la metodología arqueológica convencional fundada en paralelos tipológicos.

— ANE/DNE: fecha «antes de nuestra era/de nuestra era» según las fechas historiográficas de los textos antiguos que han sido adaptadas a nuestro calendario.

No hay duda que la homologación terminológica resultaría beneficiosa en aras de la claridad de la divulgación. Sin embargo, ante el hecho consumado de la existencia de diferentes opciones terminológicas, la única recomendación aconsejable es que se expliciten en cada caso los criterios de presentación de la información y el contenido informativo a que hacen referencia.

De todo el proceso para la obtención de una datación de C14, que acabamos de exponer de manera muy simplificada, es preciso enfatizar dos aspectos principales. El primero es que tras casi medio siglo de práctica desde la invención del método, éste se halla plenamente contrastado en cuanto a sus premisas teóricas y a sus medios instrumentales. En este sentido,

5. La primera versión de la curva apareció en la revista *Radiocarbon* en 1986, y su actualización corresponde al año 1993.

los avances que hayan de producirse se encaminarán a lograr mayor precisión en los cálculos de la edad de la muestra. El segundo reside en afirmar la necesidad de calibrar todas las dataciones convencionales como única forma de obtener una escala cronométrica acorde con nuestro calendario y, por tanto, útil para establecer comparaciones en tiempo real.

2. Distintos tipos de muestras: ¿qué datar?

El método de datación por C14 sólo es aplicable sobre muestras de material orgánico. Afortunadamente, éste se encuentra a menudo en las excavaciones arqueológicas, casi siempre en forma de fragmentos de carbón vegetal, restos de semillas, huesos o conchas marinas. Cada uno de estos materiales presenta características y problemas específicos, que fundamentalmente giran en torno a su variable capacidad para asimilar el C14 en vida y a las repercusiones a nivel interpretativo que de ello se derivan.

En primer lugar, comencemos con la recomendación de evitar datar conchas, puesto que constituyen el material más propenso a experimentar distorsiones en cuanto a la absorción del C14 y también el más sujeto a procesos de contaminación de difícil corrección en el laboratorio. En lo que respecta a los demás tipos de muestra, se dividen en dos tipos, de «vida larga» o de «vida corta», atendiendo a la proximidad entre el valor de la fecha obtenida y el momento en que se produjo la muerte del organismo. El carbón vegetal constituye el ejemplo más claro de muestras de «vida larga», ya que en el caso de árboles centenarios la datación sólo reflejará el momento de muerte de la planta y su aprovechamiento humano (por ejemplo, cuando fue talado para ser utilizado como viga) si la muestra procede de la corteza o, a lo sumo, de los últimos anillos de crecimiento. Si, por contra, se datan anillos del núcleo del tronco, donde la absorción de C14 cesó mucho tiempo atrás, tan sólo estaremos constatando un episodio biológico cuya valoración arqueológica siempre resultará incierta. En suma, al utilizar dataciones procedentes de muestras de vida larga siempre habrá que tener en cuenta la posibilidad de que estén señalando eventos anteriores a las manifestaciones arqueológicas asociadas.

Por otro lado, las muestras de vida corta son aquellas en las que media poco tiempo entre el proceso de absorción isotópica y el comienzo de su desintegración. El ejemplo más característico es el de las semillas o frutos, dada la brevedad de su ciclo vital. Este es el tipo de muestras que proporciona resultados más precisos en relación a los materiales arqueológicos que se pretende datar.

Como síntesis de este apartado, hay que retener la importancia del tipo de muestras seleccionadas en la excavación arqueológica, sabiendo que cada una de ellas ofrecerá una precisión cronométrica distinta. Además, conviene tener presente una afirmación que puede resultar de perogrullo, pero que en muchas ocasiones no parece haber sido asimilada: siempre se datan muestras, no los conjuntos artefactuales del pasado a cuya investigación nos dedicamos (desde

unidades habitacionales o funerarias en un yacimiento a entidades de significación global como cultura, periodo o *facies*). El resultado de la analítica que ofrecerán los laboratorios de radiocarbono se limitará a determinar la edad de un fragmento de materia orgánica. A partir de aquí la responsabilidad en el uso de las dataciones recaerá en quienes efectúen la interpretación arqueológica. Así pues, resulta primordial una teoría arqueológica que dé cuenta de las relaciones entre la muestra datada y los conjuntos materiales que se pretende datar, con el fin de estar en condiciones de efectuar una correcta lectura y utilización de las fechas absolutas. En el siguiente punto nos ocuparemos de esta cuestión crucial.

3. La necesidad de una significación arqueológica de las dataciones: ¿qué data la fecha?

Parte de la desconfianza o del rechazo mostrado por muchos arqueólogos/as respecto a la utilización de métodos absolutos de datación se deriva de la controversia generada por fechas consideradas «anómalas» o incluso «aberrantes» respecto a los valores esperados según los esquemas cronológicos al uso. Las fuentes de error en cuanto al cálculo de la edad de una muestra pueden ser de distinta índole, desde la contaminación de la misma previamente a su extracción o durante su manipulación, hasta errores registrados en los aparatos de medición del laboratorio. Frente a estos peligros, hay que oponer un extremo cuidado en la toma de muestras que evite la mezcla con materia orgánica actual, así como un estricto control entre laboratorios que garantice la precisión de sus instrumentos de medición.

Sin embargo, las controversias que más negativamente han incidido en la aceptación arqueológica de la cronometría isotópica han tenido por objeto fechas en principio metodológicamente/científicamente válidas en cuanto a su cálculo y que han sido rechazadas por desavenencias con las cronologías arqueológicas establecidas. Muchos de estos problemas no lo serían tanto si se tuviese en cuenta la naturaleza del contexto arqueológico de donde procede la muestra datada. En contextos habitacionales (fig. 1), puede sorprender que una datación obtenida a partir de carbones recogidos en un nivel estratigráficamente superior sea anterior a otra de semillas o huesos procedente de un nivel infrayacente. Este hecho sorprenderá más si la excavación se ha llevado a cabo siguiendo el sistema de extracción de capas artificiales de un determinado grosor, en el cual se prioriza más la profundidad de los sucesivos hallazgos que la significación de los contextos arqueológicos. La aparente paradoja queda explicada si tenemos en cuenta que la primera de las muestras formó parte de un tronco utilizado como viga de sustentación de la unidad habitacional y que, por ello, data el momento de construcción de la misma o, más exactamente, el evento cronológicamente anterior que supuso la tala del árbol correspondiente. Como se puede prever, se registraría su presencia en un nivel de derrumbe por encima de los suelos de habitación. A su vez, las semillas halladas en un contenedor del

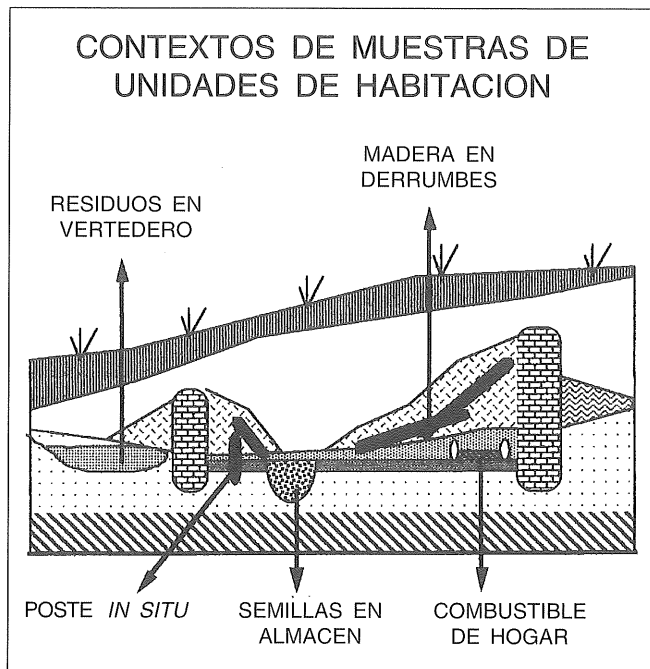


Figura 1.

nivel inferior o los restos de la última combustión en un hogar datarían con precisión el momento final de ocupación del piso y, por tanto, indican un momento más reciente que la anterior, aunque de su posición estratigráfica pudiera inferirse lo contrario en una lectura geológica simple.

Otro ejemplo emblemático en torno a la problemática interpretación arqueológica de las dataciones absolutas lo proporciona la fechación de los sepulcros megalíticos (fig. 2). Dada la habitual escasez de

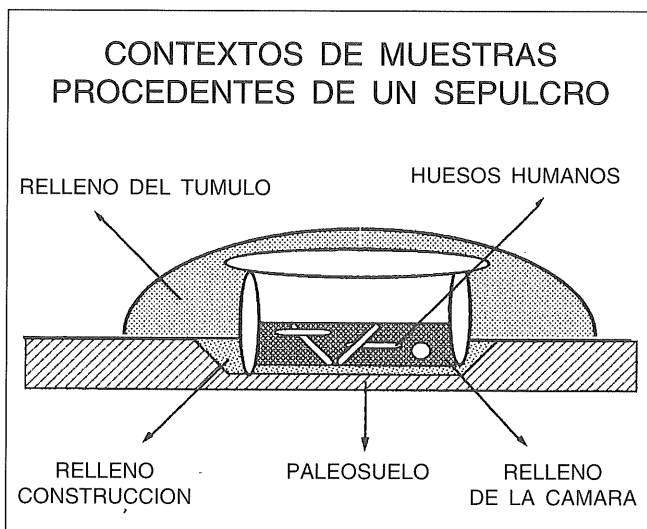


Figura 2.

estructuras de sustentación en madera, a partir de las cuales sería posible apuntar el momento de construcción del sepulcro, normalmente se tiende a recoger muestras de carbón del paleosuelo sobre el cual se edificó el monumento, con vistas a la determinación de dicho momento. Sin embargo, conviene no olvidar que la datación del paleosuelo no fecha forzosamente

el evento constructivo, sino un episodio natural (la formación del paleosuelo) que aconteció en un momento indeterminado con anterioridad a aquél. Por tanto, se trata de dataciones siempre sujetas a crítica, cuya asunción generalizada podría llevar a datar el inicio del fenómeno megalítico con anterioridad a su comienzo real. Lo más adecuado en este caso consistiría en enviar al laboratorio muestras óseas de los propios esqueletos inhumados, a partir de las cuales se dataría inequívocamente el periodo de utilización del sepulcro en cuestión.

De los comentarios anteriores resulta evidente la necesidad de seleccionar las muestras teniendo en cuenta la significación de los contextos arqueológicos que nos proponemos datar. Si no lo hacemos así, nos exponemos a sorpresas desagradables que podrían conducir precipitadamente a descartar *per se* el método de datación. Es preciso que la comunidad arqueológica tome conciencia de esta necesidad, ya que ante una fecha que se antoje anómala, el o la responsable del laboratorio difícilmente podrá dar solución a un problema que sólo compete a quien realiza la excavación y selecciona las muestras. De la misma manera, también está claro que el incremento de dataciones no garantiza la respuesta a interrogantes tan corrientes como puede ser el establecimiento del periodo de ocupación de un yacimiento o bien la cronología de sus diferentes fases de ocupación. Así pues, reiteramos de nuevo la necesidad de una reflexión arqueológica sobre la significación de los restos materiales. Sólo una vez efectuada ésta y delimitados los problemas concretos, la cronometría estará en condiciones de aportar elementos decisivos de clarificación.

4. La utilización arqueológica de las dataciones de C14: ¿cómo utilizar las fechas?

Entre los problemas del uso arqueológico de las dataciones radiométricas no cabe duda que uno de los más evidentes es el propio acceso a la información sobre las mismas. No se puede dejar pasar la oportunidad sin hacer un llamamiento para la publicación completa de los resultados: «matrícula» o código de identificación del laboratorio, valor y desviación tipo, señalando en cada caso si se hace referencia a una datación convencional o calibrada y también si es antes de Cristo o antes del presente, convencionalmente fijado en 1950.

Sin embargo, quizás el ámbito de problemas a los que debería hacer frente con mayor contundencia la investigación arqueológica es la lectura sesgada de las dataciones. Tomar el valor central de una datación convencional y considerarlo representativo del estrato, del yacimiento o de todo un periodo supone redimensionar una analítica por encima de sus posibilidades. Si obramos de este modo, no utilizamos sistemáticamente el C14, simplemente lo utilizamos para «ilustrar» los conjuntos materiales, como si de otro material se tratase (y eso si la fecha ha pasado la criba de su «adecuación» a lo esperado).

Resolver estos problemas pasa por adoptar una actitud investigadora que exija la convergencia de

análisis de diversas disciplinas en la dirección que se podría esperar de los estudios arqueológicos, es decir en el camino de proporcionar una base reflexionada para las interpretaciones históricas, aunque éstas se efectúen al amparo de la demarcación académica de la prehistoria.

Un programa sistemático de toma de muestras y la obtención de series amplias de dataciones calibradas correctamente contextualizadas permitirán otorgar fechas precisas a los conjuntos arqueológicos y abrir un camino a la operatividad de las cronometrías en la investigación histórica. No cabe duda de que con ello obtendremos una base empírica operativa para efectuar diversas evaluaciones analíticas de resultados que eleven a otro nivel las posibilidades de lectura. Ya no se trata sólo de fechar objetos, sino de fechar contextos arqueológicos de los que podremos proponer una interpretación. A su vez, éstos contextos deberán cobrar otro valor en el marco de entidades asociativas (las «culturas arqueológicas» si se quiere).

La posibilidad de manejar series de fechas amplias, sin embargo, no elimina un problema intrínseco a los propios resultados de la analítica, aunque constituye la única vía posible de minimizarlo. Como ya se ha señalado, las dataciones calibradas de las fechas de C14 se presentan en forma de intervalos de probabilidad (1 o 2 sigmas) que podrían dificultar lecturas ajustadas si se tienen en cuenta individualmente cada una de las fechas. En primer lugar, los intervalos de probabilidad tienden a mostrar una amplitud que excede el lapso donde podría ubicarse la máxima probabilidad de una medición, con lo que las fechas se «dispersan» en amplios lapsos temporales que podrían desanimar a quien intentara efectuar una interpretación basada en las mismas. En segundo lugar, el propio procedimiento de presentación de resultados en forma de intervalos impide manejar un punto de referencia cronológica «centrado», necesario para efectuar comparaciones de anterioridad-posterioridad, puesto que la amplitud del rango suele conllevar solapamientos que anulan las distancias. Ante esta situación, parece aconsejable buscar una alternativa, que debería situarse en otro camino del análisis estadístico. En este sentido, proponemos una búsqueda de valores centrales que sirva para articular los resultados de las series en una fuente informativa efectivamente resolutive.

Nuestra propuesta parte de utilizar el valor central del intervalo de probabilidad de la calibración a 1 sigma como referente de comparación. Esta propuesta conlleva un incremento del riesgo estadístico asumido, puesto que la probabilidad de dicho valor central no tiene por qué coincidir con el valor modal de la distribución de valores de las fechas calibradas, ni tampoco contempla la amplitud del rango del intervalo de probabilidad, perdiendo, por lo tanto, capacidad de matizar en su máxima expresión el análisis individualizado de cada muestra. Sin embargo, como ya señalamos, no será la particularidad de una fecha la que proporcione significado al análisis cronométrico, sino que deberá ser el ajuste de series amplias lo que otorgará peso a la lectura cronológica de las cronometrías radiométricas (de un contexto, de un yacimiento, de una categoría taxonómica o de una entidad tipo «cultura arqueológica»). Al evaluar el

significado de las series de fechas considerando los valores centrales, será posible proceder a situar en el tiempo los fenómenos arqueológicos y a asentar a partir de esa base las lecturas históricas. El riesgo estadístico asumido en la fecha correspondiente a cada muestra datada se verá considerablemente reducido al evaluar el conjunto de la serie.

En la misma dirección de redimensionar la lectura cronométrica desde la arqueología, resulta conveniente reflexionar también sobre el significado de las series de dataciones. No resulta inusual efectuar lecturas basadas en el *floruit* de una serie, de manera que se concibe que el tiempo de una manifestación arqueológica corresponde a sus valores centrales. Esta lectura mecánica de la concentración de dataciones, sin embargo, no parece útil a la hora de comprender la dinámica temporal de los restos materiales. No creemos conveniente «mezclar» tipos de muestras y de contextos al efectuar una interpretación cronométrica. Por el contrario, parece necesario proceder a disociar aquellas muestras que podríamos poner en relación con eventos de intensa actividad social vinculada a situaciones de cambio generalizado (momentos de asentamiento y construcción de edificaciones, cambios urbanísticos, momentos de abandono de lugares de habitación) de aquéllas vinculadas a acontecimientos cotidianos que no conllevan una transformación global de la expresión material de una sociedad (vertederos, reposición de herramientas de trabajo, enterramientos). En el primer caso, una concentración estadísticamente significativa de dataciones vinculadas a construcción y/o abandono, podrá ser leída en términos de inflexiones históricas relevantes. En el segundo caso, cabe esperar que las dataciones de los fenómenos ligados a actividades de ritmo continuado tenderán a ubicarse entre las inflexiones demarcadas por los grandes eventos de ocupación y/o abandono. Para el primer marco de lecturas cronológicas parece aconsejable recurrir a fechas obtenidas de muestras procedentes de estructuras constructivas (maderas de elementos de sustentación) o de muestras que indiquen el abandono de una ocupación (semillas en almacenes, combustible en hogares). En cambio, el ámbito de los contextos funerarios puede considerarse la mejor referencia de actividad normalizada de un asentamiento estable (paradójicamente, los contextos ligados a la muerte ilustran el transcurso de la vida).

Un análisis como el que proponemos permitirá establecer aquellos momentos temporales relevantes para una lectura histórica y delimitar «fases» en una determinada comunidad. Las distribuciones de frecuencias de valores centrales de dataciones calibradas dendrocronológicamente constituyen la base analítica operativa para este tipo de aproximación. No obstante, para efectuar comparaciones entre series correspondientes a fenómenos-entidades arqueológicas diferenciadas y establecer su sincronía-diacronía, creemos que resulta aconsejable proceder desde otra perspectiva. En este caso, lo que interesa es establecer la amplitud y la estructura del intervalo temporal correspondiente a la serie. Así, la aproximación más útil es la descripción de la estructura percentilica de la serie, con la que podremos ubicar con un elevado grado de confianza la máxima duración aceptable, si tomamos en con-

sideración el rango interdecílico. Éste además nos permite descartar un 20% de dataciones situadas en los extremos que podrían introducir errores de apreciación derivados de posibles resultados anómalos y «centrar» el intervalo del 80% de fechas restante, matizando igualmente donde se ubican otras concentraciones porcentuales (rango intercuartílico, mediana). Con ello será posible delimitar etapas de sincronía de entidades con momentos de inicio-final distintos, o identificar aquellas entidades coetáneas en toda su duración, y proponer sobre esa base interpretaciones acerca de las relaciones que pudieron mantener las comunidades que generaron la fenomenología arqueológica analizada.

Buscando pasar una página

La exposición anterior ha tenido como uno de sus objetivos el mostrar la conveniencia de adoptar plenamente los métodos independientes de datación absoluta. En especial, nos hemos centrado en la alternativa que supone el uso reflexivo de amplias series de dataciones de C14 calibradas dendro-cronológicamente. Para finalizar, quisiéramos aprovechar las últimas líneas para subrayar las ventajas que esta alternativa tiene sobre las metodologías cronológicas tradicionales.

En primer lugar, la cronometría del radiocarbono tiene la capacidad de afinar sus resultados y de ir reduciendo paulatinamente los márgenes de error. Ello se consigue, por un lado, mediante la aplicación de programas sistemáticos de datación que impliquen el aumento del tamaño de las series de fechas y, en consecuencia, el reforzamiento de las tendencias estadísticamente significativas. Además, hay que tener en cuenta que el incremento del tiempo de contaje por parte del laboratorio puede reducir de por sí apreciablemente los márgenes de error de la fecha convencional. Por otro lado, el afinamiento y mejora de la curva de calibración dendrocronológica el C14 será capaz de proporcionar resultados cada vez más precisos.

La automejora de que es capaz la cronometría radiocarbónica no es aplicable a los métodos cronotipológicos tradicionales. Éstos, por contra, pierden precisión a medida que se incrementa el número de paralelos establecidos en más o más lejanos yacimientos respecto a la referencia historiográfica original. Ello es así porque todos los paralelos secundarios, terciarios, etc. dependerán en última instancia del primero o del más claro, a partir del cual la seguridad en otros contextos irá descendiendo.

En síntesis, la independencia del C14 calibrado respecto a las manifestaciones materiales que data permite su autocorrección, puesto que el referente frente al que se corrige es externo a él, natural y astronómico: el ciclo natural del C14 y sus variaciones a lo largo de una escala de tiempo absoluto y los ciclos de crecimiento anual de los árboles. En cambio, la cronotipología no puede desvincularse de las manifestaciones que data, porque el referente de este sistema se halla en su interior: la datación de un objeto depende de otro y así sucesivamente, hasta que uno de ellos es

designado desde un texto. Así, mientras que el método del C14 posee una teoría cobertora, todavía no se ha enunciado en arqueología una teoría similar que dé cuenta de las relaciones entre el texto (significante escrito) y el fósil-director que constituye su referente. Si buscásemos esta teoría en otras disciplinas, resultaría obligado dirigirse a la lingüística. Sin embargo, no parece que tras la crítica postestructuralista a los trabajos fundacionales de Saussure haya esperanzas de establecer relaciones inequívocas entre significante (texto) y significado (fósil director cronológico) y, con ello, se desvanece la posibilidad de fundar las bases para una cronometría *absoluta*.

Esta *indeterminación* cronométrica que acompaña a la conexión texto-contexto arqueológico-fósil director resulta fácilmente ejemplificable. Imaginemos que en una tumba aparece un objeto con la cartela de un faraón egipcio. Desde la perspectiva cronométrica tradicional, se trataría de un hecho afortunado que a buen seguro colmaría las expectativas habituales de precisión temporal: sabiendo que dicho faraón reinó entre tal y tal año, ya tenemos la referencia cronométrica para la tumba en cuestión. No pretendemos aguar la celebración al ufano descubridor/a, pero la enumeración de los factores que pueden distorsionar dicha ecuación resulta, cuando menos, inquietante. En primer lugar, difícilmente sabremos si el objeto fue fabricado al inicio o al final del reinado del faraón citado. A este respecto, vale la pena señalar que si éste se hubiera prolongado entre 35 o 40 años, nos moveríamos ya dentro del margen de error que puede conseguirse en dataciones de C14 convencionales (± 18 o 20 años). En segundo lugar, el objeto podría ser una copia o imitación fabricada tiempo después del reinado de dicho faraón. En esta ocasión, volveríamos a estar en dificultades para determinar este desfase temporal. El asunto se complica si resulta que nuestro objeto egipcio formó parte originariamente del ajuar depositado en una tumba en el país del Nilo, tumba que fue saqueada posteriormente y, sus contenidos, objeto de comercio o intercambio. De esta forma, tendríamos de nuevo una dosis de incertidumbre cronométrica, tanto más elevada si ignoramos los mecanismos de dicho comercio y, obviamente, el tiempo implicado en el transporte del objeto (importación directa, intercambio de mano en mano, etc.). Una vez llegado el objeto a destino, la incertidumbre a que nos venimos refiriendo no cesa, ya que pudo haber sido transmitido de generación en generación en calidad de bien valioso o preciado, hasta que finalmente fuese amortizado como ajuar funerario.

En suma, hemos relatado algunas de las peripecias por las que pudo haber pasado un fósil director, sabiendo que no hemos dado rienda suelta a la imaginación y que, además, en muchos casos la realidad puede superar a la ficción. Con ello quisiéramos remarcar la dificultad de controlar el error potencial inherente al método cronométrico tradicional. Llevaría mucho tiempo y esfuerzo conseguir descartar con argumentos arqueológicos sólidos tan sólo una de las fuentes posibles de desfase temporal que hemos expuesto. Únicamente *asumiendo* que la fabricación, transporte y deposición del objeto constituyese un proceso lineal y extremadamente rápido

gozaríamos de cierta fiabilidad, pero, ¿cómo saberlo? ¿a qué principio o ley acudir (¿arqueológica? ¿textual?)? Pensemos en cambio en las posibilidades del radiocarbono para controlar la incertidumbre cronométrica (aumento del tiempo de contaje, incremento de las series de fechas, afinamiento de la curva de calibración), a la hora de decantarnos por una u otra opción.

Otra de las razones que inclinan la balanza del lado del radiocarbono es su universalidad, propiedad que contrasta con el localismo cronohistoriográfico. El C14 se basa en una realidad física, la desintegración regular de un isótopo, conectada con una causalidad cósmica (la producción de C14) y, por tanto, de alcance planetario.⁶ De este modo, dos fechas de C14 pueden ser comparadas en la misma escala absoluta y, por consiguiente, los materiales arqueológicos asociados a ambas, aunque entre éstos no medie similitud alguna. Ello abre la posibilidad, como así ha sido, de comparar en planos de sincronía las secuencias de desarrollo social del Viejo y del Nuevo Mundo, empresa irrealizable con visos de fiabilidad si no dispusiésemos del C14.

En cambio, como apuntábamos anteriormente, el método crono-historiográfico posee forzosamente un radio de acción local, en tanto en cuanto sólo es aplicable al contexto arqueológico donde aparece el fósil director que permite conectar con la referencia historiográfica. Dado que no todos los contextos excavados poseen fósiles directores de calidad, se explica el recurso a la búsqueda de analogías más vagas o de «proximidad estratigráfica» a la hora de dar dimensión temporal a los hallazgos.

No queríamos concluir dejando abierta una lectura de confrontación entre quienes utilizan un sistema de cronología independiente y quienes mantienen modos de fechar cronohistoriográficos. El problema que arrastra la demarcación cronológica en arqueología va más allá del uso o no de técnicas analíticas sofisticadas. Si se pasan a utilizar dataciones aisladas como fósiles directores y las lecturas se basan en los mismos principios que la arqueología tradicional (un elemento identifica a un contexto, un fósil-director identifica un tiempo, una fecha cronométrica «fecha» una asociación de fósiles-directores), mantendremos la incertidumbre y seguiremos restringiendo la discusión a la individualidad (los problemas de aquella datación, el carácter anómalo de aquella muestra). Solamente procediendo a una sistemática exclusión de todos aquellos resultados que pudieran implicar problemas ajenos a la lectura arqueológica (laboratorio, muestra), obteniendo series amplias que desplacen a su lugar la discusión de las particularidades y efectuando interpretaciones basadas en la cualificación de las muestras, contextos y resultados y en su asociación en agrupaciones relevantes, podremos pasar a otro capítulo en los estudios arqueológicos.

6. Pese a que las curvas de calibración disponibles se han obtenido a partir de mediciones efectuadas sobre maderas del hemisferio norte, no hay razón para pensar que el método pueda ser válido para muestras procedentes de cualquier parte del planeta. Si se diese la circunstancia de que en el hemisferio sur la producción, distribución o absorción de C14 fuese diferente, el propio método podría dar respuesta a esta novedad.

Una vez afrontada esta empresa y, en palabras de Vicente Lull, «liberados» los objetos arqueológicos (y fundamentalmente los fósiles directores) de la carga que supone en su papel hasta ahora obligado como denotadores cronométricos, y los arqueólogos/as, de las áridas discusiones cronotipológicas, podríamos dedicar nuestras energías a cuestiones más fecundas, como por ejemplo, la investigación de la significación social, económica y política de los objetos.

Bibliografía

AITKEN 1990

Aitken, M. J. (1990), *Science-based Dating in Archaeology*. Longman, Londres.

BOWMAN 1990

Bowman, S. (1990), *Radiocarbon Dating*. British Museum, Londres.

CASTRO 1992

Castro, P. V. (1992), *La Península Ibérica entre 1600-900 antes de nuestra era*. Servei de Publicacions de la Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, tesis doctorals-microfitxa.

CASTRO 1994

Castro, P. V. (1994), *La sociedad de los Campos de Urnas en el Nordeste de la Península Ibérica. La necrópolis de El Calvari (El Molar, Priorat, Tarragona)*. British Archaeological Reports, International series, Tempus Reparatum, Oxford.

CASTRO et al. (e.p./c)

Castro, P. V.; Colomer, E.; Chapman, R. W.; Gili, S.; González Marcén, P.; Lull, V.; Micó, R.; Montón, S. y Rihuete, C.; Risch, R.; Ruiz Parra, M.; Sanahuja Yll, M.^a E.; Tenas, M. y Van Strydonck, M. (e.p./c), «La serie radiocarbónica de Gatas (Turre, Almería). Diacronía y faseificación del depósito arqueológico», *Anuario Arqueológico de Andalucía, 1992*.

CASTRO et al. (e.p./c)

Castro, P. V.; Gili, S.; González Marcén, P.; Lull, V.; Micó, R. y Rihuete, C. (e.p./b), «Cronología de las Islas Baleares desde los inicios del poblamiento humano hasta el cambio de era. La aportación de las dataciones radiocarbónicas», *Meloussa*.

CASTRO et al. (e.p.)

Castro, P. V.; González Marcén, P. y Lull, V. (e.p.), «Cronología y tiempo de los grupos arqueológicos en el Sudeste de la Península ibérica (c. 3000-1000 cal ANE)», *Cuadernos de Prehistoria de la Universidad de Granada*, e.p.

CASTRO et al. (e.p./a)

Castro, P. V.; Lull, V. y Micó, R. (e.p./a), *Cronología de la Prehistoria reciente de la Península Ibérica y Baleares (c. 2800-900 cal ANE)*.

CASTRO et al. (e.p.)

Castro, P. V.; Micó, R. y Sanahuja Yll, M.^a E. (e.p.), «Economía. Estratègies productives entre el VIIIè

mil·lenni i el segle VII abans de la nostra era», AA.VV., *Història, societat i cultura dels Països Catalans*. Fundació Enciclopèdia Catalana, Barcelona.

GILI-LULL-RIHUETE (e.p.)

Gili, S.; Lull, V. y Rihuete, C. (e.p.), «Economia i Societat durant la Prehistòria a les Illes Balears», AA.VV., *Història, societat i cultura dels Països Catalans*. Fundació Enciclopèdia Catalana, Barcelona.

GILLESPIE 1986

Gillespie, R. (1986), *Radiocarbon User's Handbook*. Committee for Archaeology-Monograph, 9. Oxford University, Oxford.

GONZÁLEZ MARCÉN 1991

González Marcén, P. (1991), *Cronología del Grupo Argárico. Ensayo de falsificación radiométrica a partir de la curva de calibración de Alta Precisión*, Servei de Publicacions de la Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, tesis doctorals-microfitxa.

GONZÁLEZ MARCÉN (e.p.)

González Marcén, P. (e.p.), «Cronología del grupo argárico», *Revista d'Arqueologia de Ponent*. e.p.

GONZÁLEZ MARCÉN-LULL-RISCH 1992

González Marcén, P.; Lull, V. y Risch, R. (1992), *Arqueología de Europa, 2250-1200 A.C. Una introducción a la 'edad del bronce'*. Síntesis, Madrid.

JAMES-THORPE-KOKKINOS-MORKOT-FRANKISH 1991

James, P. J.; Thorpe, I. J.; Kokkinos, N.; Morkot, R. y Frankish, J. A. (1991), *Centuries of Darkness. A challenge to the conventional chronology of Old World Archaeology*, Jonathan Cape, Londres (trad. cast. (1992) *Siglos de oscuridad. Desafío a la cronología convencional de la arqueología del Viejo Mundo*. Crítica, Barcelona).

MONTÓN 1993

Montón, S. (1993), *Cerámica de las comunidades griegas (c. 2600-1650 cal ANE)*, Servei de Publicacions de la Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, tesis doctorals-microfitxa.

RENFREW 1973

Renfrew, C. (1973), *Before Civilisation*. Jonathan Cape, Londres (trad. cast. (1986), *El alba de la civilización*. Istmo, Madrid).

STUIVER-REIMER 1993

Stuiver, M. y Reimer, P. J. (1993), «Extended ¹⁴C data base and revised Calib 3.0 ¹⁴C age calibration program», *Radiocarbon*, 35: 215-230.

La datació per radiocarboni i el calibratge de les dates radiocarbòniques. Objectiu, problemes i aplicacions

Joan S. Mestres

1. Introducció

L'evolució humana només es pot comprendre plenament si s'emmarca dins la dimensió temporal i, per aquest motiu, la datació de les troballes arqueològiques i del passat prehistòric ha estat sempre un motiu de preocupació per als arqueòlegs i prehistoriadors.

Els esdeveniments poden situar-se en l'escala temporal de dues maneres diferents que originen dos sistemes cronològics distints: de manera relativa, quan els esdeveniments s'ordenen uns amb relació als altres segons l'ordre d'ocurrència; i de manera absoluta, quan s'expressa en anys el temps transcorregut entre l'ocurrència de l'esdeveniment i el present. Evidentment, la cronologia més desitjable és l'absoluta, perquè permet quantificar la dimensió temporal i permet establir relacions de sincronia o diacronia entre esdeveniments geogràficament distants.

En arqueologia, l'eina fonamental per a l'establiment de la cronologia ha estat l'estratigrafia: si no hi ha hagut pertorbació en la formació de dipòsits, pot establir-se una seqüència cronològica dels objectes i dels contextos basada en la superposició dels estrats més joves sobre els més antics; d'aquesta manera, pot obtenir-se una satisfactòria escala temporal relativa. Quan l'estratigrafia no és possible, pot establir-se l'escala cronològica recurrent a la seriació: una vegada establerta la variació tipològica d'una classe d'objectes, la classificació tipològica d'un objecte trobat permet la seva adscripció cronològica dins l'escala relativa corresponent.

Una altra aproximació a l'establiment de la cronologia és la datació físico-química, basada en la determinació de l'edat d'un material o artefacte a través de la mesura de la seva composició química o isotòpica. Poden distingir-se quatre grups de mètodes de datació físico-química:

1. Mètodes basats en el contingut d'elements o compostos estables: datació d'ossos basada en el contingut de fluor o nitrogen o bé en la racemització d'aminoàcids.

2. Mètodes basats en el contingut d'un isòtop inestable: datació per radiocarboni.

3. Mètodes basats en la relació isòtop radioactiu progenitor/isòtop fill estable: datació per potassi-argó.

4. Mètodes basats en l'efecte causat per la radiació radioactiva natural sobre els materials que hi són

exposats: datació per termoluminiscència i per traces de fissió.

Cadascun d'aquests mètodes de datació pot aplicar-se només a un nombre limitat de materials i alguns proporcionen datacions absolutes.

De tots els mètodes de datació físico-química, la datació per radiocarboni és, sens dubte, el més difós i el que ha estat objecte de més esforços per al seu perfeccionament. La voluntat de perfeccionament ha estat present en el mètode de datació per radiocarboni des del seu adveniment i els pilars en què se sosté la seva evolució són els següents: concepció del mètode i la seva verificació mitjançant l'ús del comptador de carboni sòlid (ARNOLD I LIBBY, 1949), introducció dels comptadors proporcionals per a la mesura del contingut de radiocarboni (DE VRIES, BARENSEN, 1954), introducció dels comptadors de centelleig líquid per a la mesura del contingut de radiocarboni (NOAKES et al. 1965), calibratge dendrocronològic de les dates radiocarbòniques (SUESS, 1967) i introducció de l'espectrometria de masses amb accelerador de partícules (MULLER, 1977).

La datació per radiocarboni proporciona una escala cronològica d'abast universal i, consegüentment, un marc comú de referència temporal per al plistocè tardà i l'holocè i això ha fet possible una prehistòria d'abast mundial ja que ha permès als prehistoriadors establir la sincronia o diacronia de fenòmens arqueològics d'arreu del món. L'aplicació de la datació per radiocarboni a l'arqueologia va bastir una nova estructura cronològica de la prehistòria i, en revelar per al neolític d'Europa i l'Orient Mitjà una cronologia molt més antiga que la suposada, va causar un fort impacte que s'ha anomenat la «primera revolució del radiocarboni» (RENFREW, 1973), en trastornar l'esquema cronològic vigent fins al moment del seu adveniment.

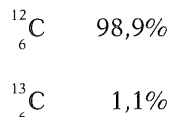
Dels pilars que marquen el desenvolupament del mètode de datació per radiocarboni, tots llevat d'un fan referència a la mesura del contingut de radiocarboni i els seus efectes sobre l'arqueologia i la prehistòria han estat indirectes i no tan decisius; l'altre, tanmateix, fa referència al calibratge de les dates radiocarbòniques i els seus efectes sobre la prehistòria, en permetre accedir a una cronologia expressada en el calendari solar, han estat més trasbalsadors encara perquè han enderrocat el sòlid esquema cronològic vigent a Europa, basat en el difusionisme cultural des de l'Egea. A aquest fet se l'ha anomenat «la segona revolució del radiocarboni» (RENFREW, 1973).

En aquesta exposició s'expliquen els fonaments de la datació per radiocarboni, els motius pels quals l'escala cronològica radiocarbònica no és equivalent a l'escala cronològica solar, la qual cosa ha originat la necessitat del calibratge per transformar les dates radiocarbòniques en dates expressades en aquell sistema cronològic, els problemes que comporta el calibratge i les aplicacions que troba el calibratge.

2. Fonaments del mètode de datació per radiocarboni

La datació per radiocarboni és possible gràcies a les característiques químiques específiques de l'element

carboni que el fan l'element clau de la bioquímica i també un element geoquímicament i geodinàmicament particular a causa de la seva ubiqüitat. El carboni a la terra està constituït bàsicament per dos isòtops estables en les següents proporcions:



A nivell planetari, aquest element es troba en dos possibles estats: en un estat d'equilibri estàtic i en un estat d'equilibri dinàmic. El carboni que es troba en equilibri estàtic està reclòs en compartiments aïllats tals com els dipòsits de petrolis, de carbons minerals i de roques sedimentàries. El carboni que es troba en equilibri estàtic no està involucrat en la datació per radiocarboni, però hi té algunes implicacions importants.

El carboni que es troba en estat d'equilibri dinàmic forma l'anomenat dipòsit de bescanvi del carboni (DBC), el qual està constituït per un conjunt de compartiments no aïllats, sinó que estan en equilibri dinàmic entre si respecte al bescanvi de carboni. En cadascun d'aquests compartiments el carboni adopta una forma química característica. Els compartiments que integren el DBC són els següents:

* L'atmosfera, on el carboni es troba en estat de diòxid de carboni.

* La biosfera, on el carboni adopta la forma de matèria orgànica vivent.

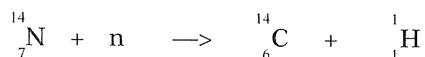
* L'humus, on el carboni es troba en forma de matèria orgànica en descomposició.

* La hidrosfera, on el carboni adopta la forma de diòxid de carboni i bicarbonat dissolt.

Que aquests compartiments es trobin en equilibri dinàmic entre si respecte al bescanvi del carboni significa que aquest element contínuament transita dels uns als altres i que la quantitat total de carboni continguda a cadascun es manté sensiblement constant al llarg del temps. El trànsit continu del carboni entre els diferents compartiments comporta l'existència d'unes vies de transferència que el fan possible. Així, el bescanvi de carboni entre l'atmosfera i la biosfera s'esdevé a través de la fotosíntesi i de la respiració: els vegetals, organismes autòtrofs, incorporen el carboni a llurs teixits mitjançant la fotosíntesi; dels vegetals el carboni passa als animals, organismes heteròtrofs, per ingestió. Una part del carboni assimilat pels éssers vivents és restituida a l'atmosfera com a diòxid de carboni per la respiració. Les excrecions dels organismes vivents i llur descomposició, un cop morts, porten el carboni a l'humus i d'aquest, per mitjà d'una contínua degradació, torna a l'atmosfera com a diòxid de carboni. El bescanvi de carboni entre la hidrosfera i l'atmosfera s'esdevé per dissolució del diòxid de carboni atmosfèric en l'aigua, bescanvi de carboni entre aquest i els bicarbonats dissolts i retorn a l'atmosfera com a diòxid de carboni. Cadascun dels compartiments que integren el DBC està caracteritzat per un temps de residència del carboni en el seu si; aquest paràmetre representa el temps necessari perquè hi entri o en surti una quantitat de carboni igual a la que conté i pot interpretar-se com el temps necessari

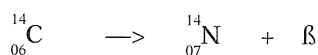
per a la renovació de tot el carboni contingut en el compartiment. El temps de residència del carboni en un compartiment depèn de dos factors: la quantitat total de carboni que conté i la velocitat de transferència entre els altres compartiments. La figura 1 mostra esquemàticament els diferents compartiments que integren el DBC, les vies de transferència del carboni entre els compartiments, la fracció de carboni de tot el DBC continguda en cada compartiment, expressada percentualment, i el temps de residència del carboni en cada compartiment, expressat en anys. Com es pot observar, la major reserva de carboni del DBC es troba a la hidrosfera i, consegüentment, el temps de residència és també notablement més gran. Això, com es veurà més endavant, té implicacions importants en la datació per radiocarboni.

El carboni que es troba al DBC conté, a més dels dos isòtops citats anteriorment, ^{12}C i ^{13}C , encara que en proporcions ínfimes, un altre isòtop del C, el ^{14}C . L'origen d'aquest isòtop és el següent: la terra es troba immersa en un camp de radiació còsmica i els protons procedents d'aquesta radiació reaccionen a l'alta atmosfera amb el nitrogen i l'oxigen de l'aire per produir neutrons. Aquests neutrons dissipen llur energia a través de successives col·lisions amb els elements de l'aire fins arribar a un nivell d'energia adequat i aleshores reaccionen amb el nitrogen atmosfèric per produir ^{14}C segons la següent reacció nuclear:



Com que el ^{14}C es comporta químicament igual que els seus dos isòtops ^{12}C y ^{13}C , immediatament després de la seva formació, s'oxida amb l'oxigen de l'aire a diòxid de carboni, com a tal es difon per l'atmosfera i des d'aquesta, participant de la mateixa manera que els seus isòtops en totes les vies de transferència del carboni, es dispersa homogèniament en tot el DBC. La velocitat de producció de radiocarboni depèn de la intensitat de la radiació còsmica incident sobre la terra que al seu torn depèn de les variacions del camp geomagnètic, de les variacions de l'activitat solar i dels cicles de les taques solars. Tots aquests factors poden fer variar la intensitat de la radiació còsmica incident sobre la terra i, per tant, influeixen sobre la taxa de producció de radiocarboni.

El ^{14}C , a diferència dels seus altres dos isòtops, és un nucli inestable que es transforma en nitrogen per emissió d'una partícula β (per aquest motiu rep el nom de *radiocarboni*) d'acord amb la següent reacció nuclear:



amb un període de semidesintegració¹ de 5.730 anys.

La inestabilitat del radiocarboni fa que la quantitat d'aquest continguda en el DBC no augmenti indefinidament malgrat la seva contínua formació, ja que

aquesta es troba compensada per la seva contínua descomposició. En efecte, la velocitat de descomposició del radiocarboni és proporcional a la quantitat de radiocarboni present al DBC i tendeix a compensar exactament la seva producció de manera que la quantitat total de radiocarboni continguda en el DBC segueix les fluctuacions de la velocitat de formació del radiocarboni. *En resum, pot dir-se doncs, que la quantitat de radiocarboni present en el DBC segueix les fluctuacions de la intensitat de la radiació còsmica incident sobre la terra.*

Un corol·lari de tot el que s'ha exposat fins ara és que qualsevol material pertanyent al DBC, és a dir, que contínuament bescanviï carboni amb el medi circumdant, conté radiocarboni en la proporció pròpia del compartiment i del moment en què es trobi. Si per qualsevol circumstància, per exemple, mort d'un organisme vivent, un material abandona el DBC, és a dir, deixa d'incorporar carboni procedent del seu medi exterior, aleshores també s'atura l'aportació de radiocarboni procedent del medi exterior i en aquest moment s'inicia la disminució del seu contingut de radiocarboni d'acord amb la llei del decaïment radioactiu, l'expressió matemàtica de la qual és la següent:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

En aquesta equació N_0 representa el nombre d'àtoms de radiocarboni continguts en el material quan aquest formava part del DBC i N^2 representa el nombre residual d'àtoms de radiocarboni que encara es troben en el material després d'haver transcorregut un temps t d'ençà de l'abandó del DBC; λ és la constant de desintegració del ^{14}C , relacionada amb el seu període de semidesintegració $T_{1/2}$ per $\lambda = T_{1/2}/\ln 2^3$.

L'equació anterior mostra que si es coneix el contingut actual N de radiocarboni d'un material i el seu contingut quan formava part del DBC, és a dir, el seu contingut inicial N_0 , el càlcul del temps transcorregut des que el material va abandonar el DBC és immediat i respon a l'equació

$$t = (T_{1/2}/\ln 2) \times \ln (N_0/N) \quad (2)$$

obtinguda en aïllar la variable t en l'equació (1). Aquesta equació i la mesura de les seves variables constitueixen la peça clau de la datació per radiocarboni.

2. El nombre d'àtoms de radiocarboni, N i N_0 , s'expressa en relació a un sistema de referència que és un gram de carboni. Per aquest motiu, a partir d'ara, el nombre d'àtoms de radiocarboni es referirà com a «contingut de radiocarboni».

3. El valor admès actualment per al període de semidesintegració del ^{14}C és 5.730 anys, però el valor utilitzat per al càlcul de la data radiocarbònica és 5.568 anys, que és el valor adoptat durant els primers temps de la datació per radiocarboni. Per tal d'evitar alterar el valor de les dates antigues, s'ha acordat mantenir aquest valor malgrat la seva incorrecció; tanmateix, l'error del període de semidesintegració no té cap importància perquè si les dates radiocarbòniques es calibren, aquest error es corregeix amb el procés de calibratge; si les dates no es calibren, l'error introduït per la incorrecció del període de semidesintegració és una contribució més al caràcter convencional de les dates radiocarbòniques.

1. El període de semidesintegració $T_{1/2}$ d'un isòtop radioactiu és el temps que ha de transcorrer perquè una població d'àtoms es redueixi a la meitat.

3. Hipòtesis fonamentals

S'acaba de veure que la datació per radiocarboni es basa en el càlcul del temps transcorregut entre l'abandonament d'un material del DBC, generalment la mort d'un organisme vivent, i el present, a través de la llei del decaïment radioactiu expressada en la forma indicada per l'equació (2). L'aplicació pràctica del mètode exigeix, doncs, dos requisits experimentals: la mesura del contingut residual N de radiocarboni i la mesura del contingut inicial de radiocarboni N_0 . El primer requisit no suposa altra dificultat que la purament analítica, és a dir, mesurar amb la màxima exactitud i precisió aquesta variable química. El segon requisit, tanmateix, ultra els mateixos requeriments analítics, comporta seriosos problemes teòrics, ja que, com s'ha vist, el contingut inicial de radiocarboni depèn precisament del temps, que és allò que justament es vol determinar. Amb la finalitat d'obviar aquest problema i fer el mètode practicable, la datació per radiocarboni recorre a dues hipòtesis fonamentals:

* El contingut de radiocarboni és el mateix en tot el DBC, és a dir, no depèn del compartiment ni del material.

* El contingut de radiocarboni en tot el DBC s'ha mantingut constant al llarg del temps.

El compliment d'aquestes dues hipòtesis és molt important perquè permet considerar un únic valor independent del temps i del compartiment com a contingut inicial de radiocarboni N_0 . Com a tal s'ha considerat el corresponent a la biosfera l'any 1950 representada per la cel·lulosa d'origen vegetal (per aquest motiu, aquest any s'ha pres com origen de l'escala cronològica radiocarbònica). La mesura del contingut inicial de radiocarboni la realitza independentment cada laboratori de datació i es duu a terme sobre una substància sintètica, àcid oxàlic preparat pel National Institute of Standards and Technology (EUA), que cada laboratori tracta de la mateixa manera que les mostres i mesura paral·lelament amb elles.

Plantejat d'aquesta manera, la datació per radiocarboni només proporcionarà resultats exactes en la mesura en què les hipòtesis fonamentals en què es basa la seva aplicació siguin certes. Tanmateix, cap de les dues hipòtesis fonamentals és rigorosament exacta sinó que estan subjectes a desviacions que a continuació s'exposaran breument per determinar quines són corregibles i quines no.

3.1. Compliment de les hipòtesis fonamentals

Al compliment de la primera hipòtesi s'oposen dos fets: el fraccionament isotòpic i l'efecte dipòsit. El fraccionament isotòpic consisteix en el fet que en tot canvi químic que experimenti el carboni es produeix un enriquiment o empobriment en els isòtops que el componen. Així per exemple, la fotosíntesi es realitza preferentment sobre els isòtops més lleugers del C i per aquest motiu el contingut de ^{14}C dels vegetals és lleugerament més baix que el de l'atmosfera d'on procedeix. Si aquest efecte no es corregís, es donaria

la paradoxa que materials contemporanis presentarien edats radiocarbòniques diferents. Afortunadament, aquest efecte es pot corregir mesurant per espectrometria de masses l'abundància isotòpica del ^{13}C en el material objecte de datació.⁴

Un altre motiu d'incompliment de la primera hipòtesi és l'efecte dipòsit: a causa de la seva enorme grandària, el temps de residència del carboni en els oceans és del mateix ordre de magnitud que el període de desintegració del ^{14}C (fig. 1) i això fa que el nivell de radiocarboni dels oceans, perquè té temps de decaure, sigui deficitari respecte als altres compartiments que integren el DBC. Aquest fet pot interpretar-se com un envelliment de la hidrosfera respecte als altres compartiments i es manifesta com una edat aparent en els materials d'origen marí que s'afegeix a la seva edat real. Es pot presentar també un efecte dipòsit d'àmbit local en els llacs que es troben en regions calcàries: les aigües de pluja que els alimenten contenen diòxid de carboni atmosfèric i exerceixen una acció dissolvent sobre la roca calcària antiga, i per tant exempta ja de ^{14}C . El carboni d'aquestes aigües, en forma de bicarbonat i de diòxid de carboni està, doncs, empobrit en ^{14}C i, consegüentment, també la matèria orgànica que hi viu i que formarà els sediments després de la seva mort, està afectada d'una edat aparent (GARCÍA et al., 1992). L'efecte dipòsit origina, doncs, una indeterminació en el contingut inicial de radiocarboni i pot corregir-se determinant experimentalment l'edat aparent, però això no sempre és possible. Per aquest motiu, materials d'origen marí o lacustre, tals com les closques, no són gaire fiables per a la datació per radiocarboni, ja que poden mostrar edats radiocarbòniques més altes que les reals.

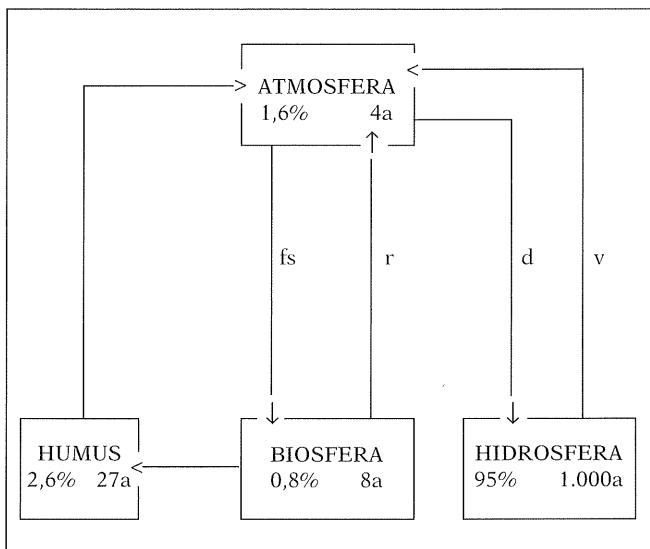


Figura 1. - El dipòsit de bescanvi del carboni i les vies de transferència del carboni entre els diversos compartiments. Sota del nom de cada compartiment s'indica la fracció del total de carboni del DBC continguda en el compartiment i el temps de residència expressat en anys. Abreviatures: fs=fotosíntesi, r=respiració, d=dissolució, v=volatilització.

4. És important que els usuaris dels laboratoris de datació per radiocarboni sàpiguen si les seves dates han estat calculades practicant la correcció per fraccionament isotòpic.

Respecte al compliment de la segona hipòtesi, s'han trobat evidències experimentals que hi ha hagut fluctuacions del contingut inicial de radiocarboni. Tals evidències les ha proporcionades la dendrocronologia: els arbres que viuen en regions temperades experimenten cada primavera un procés de creixement i produeixen una nova capa de cel·lulosa que es manifesta en forma d'un anell concèntric als anells produïts els anys anteriors; per aquest motiu, el contingut de radiocarboni de cadascun d'aquests anells és un reflex fidel del contingut de radiocarboni atmosfèric en aquell any i per tant de la biosfera. L'estudi minuciós de successions d'anells d'arbres vius y fòssils proporciona un llarg registre cronològic de fusta d'edat exactament coneguda, l'anàlisi de la qual ha permès comprovar que el contingut inicial de radiocarboni no és constant en el temps.

S'acaba de veure que la pràctica de la datació per radiocarboni comporta l'adopció d'unes hipòtesis fonamentals que estan afectades d'unes desviacions que no sempre són corregibles, per consegüent, les edats determinades mitjançant aquest mètode també estan afectades de desviacions respecte a les edats reals expressades en cronologia solar. L'única d'aquestes desviacions que és corregible en tota la seva extensió és el fraccionament isotòpic. A causa d'aquesta situació, *la utilització del mètode de datació per radiocarboni, aplicant la correcció per fraccionament isotòpic, origina una escala cronològica convencional anomenada escala cronològica radiocarbònica que no es correspon exactament amb l'escala cronològica real, expressada mitjançant el calendari solar.* L'adopció d'aquesta escala cronològica convencional resol el problema de l'incompliment de les hipòtesis fonamentals, però planteja una qüestió nova: com transformar les dates expressades en la escala cronològica radiocarbònica en dates expressades en l'escala cronològica solar. Aquest problema el resol el calibratge de les dates radiocarbòniques.

4. Mesura del contingut de radiocarboni

S'ha vist que la datació per radiocarboni es basa en l'ús de l'equació

$$t = (T_{1/2}/\ln 2) \times \ln (N_0/N)$$

on N_0 representa el contingut inicial de ^{14}C i N representa el contingut residual de ^{14}C corregit per l'efecte del fraccionament isotòpic. Tota datació per radiocarboni requereix, doncs, la mesura d'aquestes magnituds que són extraordinàriament petites i exigeixen, en conseqüència, mètodes de mesura extremadament sensibles i l'aplicació d'un zel exquisit.

El nombre d'àtoms de ^{14}C és difícil de mesurar i fins recentment no s'ha disposat de la tecnologia adequada per dur a terme tal mesura. Tanmateix, és més fàcil mesurar el nombre de partícules β emeses en el procés de desintegració del ^{14}C . El nombre de partícules β emeses per unitat de temps s'anomena activitat i és proporcional al contingut de radiocarboni. Aquestes consideracions permeten classificar els mètodes de mesura del contingut de radiocarboni en mètodes

directes, basats en la mesura del nombre d'àtoms de ^{14}C , i en mètodes indirectes o radiomètrics, basats en la mesura de la radioactivitat.

4.1. Mètodes indirectes

Actualment hom disposa de dos mètodes radiomètrics eficaços per mesurar l'activitat del radiocarboni: els mètodes basats en l'ús de comptadors proporcionals i els mètodes basats en l'ús del centelleig líquid. Els primers treballen en fase gasosa i els segons en fase líquida. La mesura de l'activitat del radiocarboni present en qualsevol material requereix, doncs, l'aïllament del carboni en forma de un compost químicament definit d'una puresa química i radioquímica tan elevada com sigui possible. Tenint en compte la proporcionalitat entre l'activitat del radiocarboni i el seu contingut, l'equació que permet calcular l'edat radiocarbònica s'expressa de la manera següent:

$$t = (T_{1/2}/\ln 2) \times \ln (A_0/A_c)$$

on A_0 y A representen respectivament l'activitat inicial i residual corregida pel fraccionament isotòpic del ^{14}C .

La mesura del contingut de radiocarboni per mètodes radiomètrics suposa, doncs, la mesura de l'activitat del radiocarboni contingut al carboni i la mesura d'aquesta magnitud amb suficient precisió exigeix esperar el temps necessari perquè es produeixi un nombre de desintegracions prou gran per assolir la precisió adequada. Com que la probabilitat de desintegració del nucli de ^{14}C és extremadament petita ($2,3 \times 10^{-10}$ per minut), això significa que per comptar un nombre de desintegracions suficientment gran per tal d'assolir una bona precisió en la mesura, cal un llarg temps de mesura i una quantitat notable de mostra (l'equivalent a 0,5 a 6 g de carboni en forma apta per a la mesura).

4.2. Mètodes directes

Les circumstàncies desfavorables de la mesura radiomètrica milloren ostensiblement si en lloc de comptar els àtoms de ^{14}C que es desintegren es poden comptar els àtoms de ^{14}C presents en el material objecte de datació (la quantitat d'aquests per gram de carboni modern és $4,6 \times 10^{10}$). Per dur a terme aquest compte calen distintes etapes:

1. Ionització del carboni present en el material objecte de datació, prèviament transformat en grafit.
2. Acceleració dels àtoms ionitzats a elevades velocitats mitjançant un accelerador de partícules.
3. Separació dels àtoms de ^{14}C de la resta dels isòtops de carboni mitjançant l'aplicació d'un camp magnètic que desvia els diferents isòtops de llur trajectòria en un grau més gran com més petita és la massa dels àtoms (etapa d'espectrometria de masses).
4. Compte del nombre d'àtoms de ^{14}C .

Aquest mètode de mesura del contingut de ^{14}C basat en l'espectrometria de masses combinada amb l'ús d'acceleradors de partícules se'l designa amb la sigla AMS (Accelerator Mass Spectrometry).

Els avantatges més notoris de la datació per radiocarboni mitjançant AMS són que el temps de mesura necessari és molt més curt (només hores, davant de dies per als mètodes indirectes de mesura) i que la quantitat de mostra requerida per a l'anàlisi és de l'ordre de 1.000 vegades més petita que per als mètodes radiomètrics. Tanmateix, cal ser prudent davant d'aquesta qualitat engrescadora ja que pot ser il·lusòria; en efecte, l'ús de mètodes directes de mesura fa el mètode virtualment no destructiu permetent la datació directa (no per associació) d'artefactes i possibilita datar quantitats de material tan petites com un granet de carbó aïllat o una única llavor carbonitzada, però aleshores cal qüestionar-se la representativitat o associació del material, ja que aquestes quantitats tan petites de material poden haver arribat accidentalment al nivell arqueològic objecte de datació, mentre que quan la quantitat de material és notable, la probabilitat d'associació entre el material i l'esdeveniment arqueològic que hom pretén datar és molt més alta.

5. Expressió dels resultats de les datacions per radiocarboni

El resultat primari d'una datació per radiocarboni és una magnitud cronomètrica anomenada *data radiocarbònica*. La unitat amb què s'expressen les dates radiocarbòniques és l'«any BP» i l'origen de l'escala cronològica radiocarbònica, és a dir, l'any 0 BP, és, per definició, l'any 1950 dC. Tota datació per radiocarboni es basa en la mesura del contingut inicial i el contingut residual de radiocarboni en el material objecte de la datació i com que la desintegració radioactiva és un fenomen aleatori, tota mesura del contingut de radiocarboni està afectada d'una incertesa que es transmet també a la data radiocarbònica calculada a partir dels seus valors. Així, una llarga sèrie de datacions replicades d'una mateixa mostra produiria un conjunt de resultats que es repartirien segons una distribució de probabilitat de Gauss al voltant del veritable valor (fig. 2A). Pel mateix motiu, tota data radiocarbònica experimental és una aproximació al valor veritable i està associada a una incertesa expressada també mitjançant una distribució de probabilitat de Gauss centrada en el valor experimental. El sentit que té la distribució de probabilitat és que delimita un interval de temps en què per a qualsevol petit segment de temps inclòs en el seu interior hi ha una probabilitat no nul·la i calculable que contingui la veritable data radiocarbònica (fig. 2B). *D'aquí es desprèn que una data radiocarbònica no és un valor puntual sinó un interval continu de valors associat a una distribució de probabilitat de Gauss.* L'expressió completa d'una data radiocarbònica requereix, doncs, a més de la indicació del valor experimental, l'expressió de la seva incertesa que s'indica mitjançant la desviació típica (s) corresponent a la distribució de probabilitat de Gauss associada, en forma d'addició i subtracció ($\pm s$). D'acord amb aquests conceptes, el significat d'una expressió típica d'una data radiocarbònica, per exemple 5000 ± 100 BP és

el següent: amb una probabilitat del 68,3% (corresponent a \pm una desviació típica), la veritable data radiocarbònica es troba a l'interval 4900-5100 BP (fig. 2C); o bé, amb una probabilitat del 95,4% (corresponent a \pm dues desviacions típiques), la veritable data radiocarbònica es troba a l'interval 4800-5200 BP.

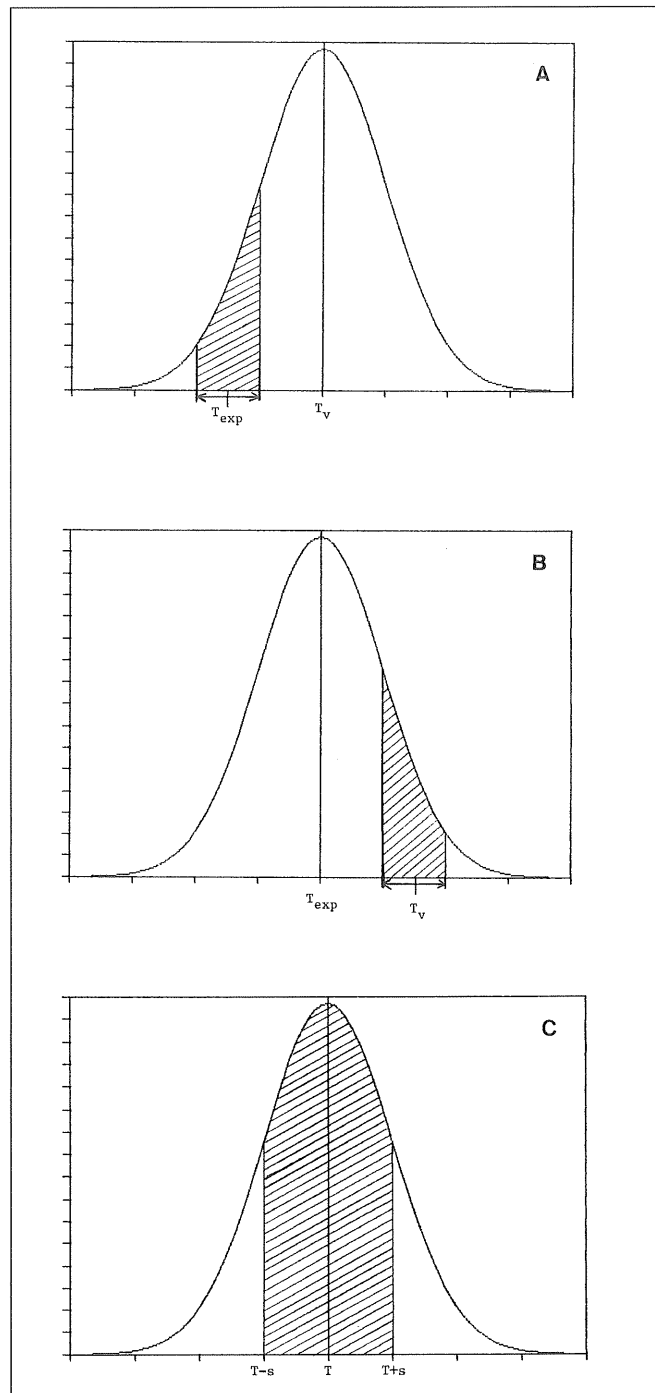


Figura 2. - A) Distribució de probabilitat d'un nombre infinit de dates radiocarbòniques experimentals T_{exp} al voltant de la veritable data radiocarbònica T_v . L'àrea ombrada indica la probabilitat que una data experimental caigui dins l'interval senyalat.

B) Distribució de probabilitat de la veritable data radiocarbònica al voltant de la data radiocarbònica experimental T_{exp} . L'àrea ombrada indica la probabilitat que la veritable data radiocarbònica T_v caigui dins el segment marcat.

C) Probabilitat (àrea ombrada) que la veritable data radiocarbònica T_v corresponent a la data experimental T caigui dins l'interval $T \pm s$.

6. Aplicacions arqueològiques de la datació per radiocarboni

La cronologia no és un objectiu per ella mateixa sinó un mitjà d'adquirir informació i una comprensió global del passat humà i la datació per radiocarboni compleix diverses funcions dintre del raonament arqueològic (WATERBOLK, 1983):

1. És un instrument per establir la cronologia relativa quan la tipologia i l'estratigrafia fallen.

2. Permet establir correlacions entre seqüències arqueològiques associades a processos culturals massa allunyats geogràficament per poder aplicar l'estratigrafia o la tipologia.

3. Proporciona una escala de temps absoluta d'abast universal que permet situar-hi els fenòmens arqueològics i permet estimar-ne la durada. Així, per exemple, permetria avaluar el desfasament entre el començament del cultiu de cereals i de la ramaderia a les costes de la mar del Nord i de la Mediterrània.

4. Permet establir correlacions entre seqüències arqueològiques i seqüències ambientals, geològiques o climàtiques.

La datació per radiocarboni pot utilitzar-se amb dues finalitats diferents: deductiva i inductiva. La primera es refereix a la determinació de l'edat d'un objecte o context particular, la qual podrà utilitzar-se posteriorment per relacionar-lo amb el registre arqueològic; la segona, potser la més valuosa i pròpia de la naturalesa probabilística de les dates radiocarbòniques, es refereix a l'ús de conjunts de dates per a l'establiment de la cronologia i de la duració de fenòmens arqueològics tals com cultures o manifestacions culturals, la qual cosa facilita l'estudi de la sincronia o diacronia d'expressions d'aquest fenomen, veïnes tant en sentit geogràfic com cronològic. Sovint els arqueòlegs presenten al laboratori una mostra amb el propòsit de tenir una comprovació independent sobre la seva identificació de ceràmica, de sepultura, de tipus d'habitatge o sobre la seva posició estratigràfica. En totes aquestes situacions la data radiocarbònica és de gran ajuda per verificar les conclusions arqueològiques derivades de la tipologia i l'estratigrafia i és una mostra de la utilització deductiva de les dates radiocarbòniques.

7. Interpretació dels resultats de les datacions per radiocarboni

La validesa d'una data radiocarbònica depèn de molts factors. Alguns d'aquests factors depenen exclusivament del laboratori, tals com la qualitat del tractament aplicat per eliminar la contaminació i la qualitat de les mesures; altres factors són de naturalesa arqueològica, tals com el grau d'associació del material datat amb l'esdeveniment arqueològic o la possibilitat de mescla. En tots els casos és imprescindible un elevat nivell de diàleg i un intercanvi d'informació entre l'arqueòleg i el laboratori de datació per tal de poder extreure la informació més exacta del material objecte de datació i interpretar-ne correctament la informació extreta. Una o unes poques dates radiocarbòniques

discrepants amb les evidències arqueològiques no són suficients per enderrocar una concepció cronològica consolidada per mitjans purament arqueològics, però tampoc no han de ser menyspreades immediatament si no confirmen els resultats esperats: una altra vegada s'imposa el diàleg entre l'arqueòleg i el laboratori per dissenyar una nova estratègia basada en materials alternatius, si és possible, i en un altre plantejament arqueològic per confirmar o desmentir els resultats anòmals. A continuació es revisen breument alguns factors arqueològics que cal considerar a l'hora d'estimar la validesa d'una data radiocarbònica.

7.1. Certesa de l'associació

Allò que hom pretén amb l'aplicació de la datació per radiocarboni és que el material objecte de datació dati l'activitat humana documentada per un nivell arqueològic. La majoria de les vegades no es data un material per ell mateix sinó que la data que proporciona s'atribueix a un fet arqueològic rellevant i perquè aquesta atribució sigui vàlida el material i el fet arqueològic han de ser contemporanis. Per la seva pròpia naturalesa, la datació per radiocarboni data la formació dels materials arqueològics i no els fets arqueològics en què participen aquests materials, ni la seva deposició en el nivell arqueològic en què es troben. Hi ha una gran variació en el grau de certesa amb què les mostres datades estan associades amb el veritable material o fet arqueològic que hom pretén datar.

A. Certesa plena. Hom data el mateix objecte arqueològic: artefacte, biga d'una construcció, fusta d'una embarcació, etc.

B. Alta probabilitat d'associació. Hi ha una relació funcional directa entre el material datat i l'objecte o nivell que hom pretén datar: taüt carbonitzat en un clot sepulcral amb artefactes, llavors carbonitzades en un clot de deixalles amb presència de fragments ceràmics, llar de foc en el terra d'una casa, etc.

C. Probabilitat raonable. No hi ha una relació funcional demostrable entre el material datat i l'objecte o nivell que hom pretén datar, però la quantitat del material i la grandària dels fragments són una prova a favor de la relació: acumulació de carbó en un clot de deixalles o en una capa d'ocupació.

D. Possibilitat baixa. Com el cas anterior, però, els fragments són petits i dispersos: terra carbonosa en una capa d'ocupació, partícules de carbó en una sepultura.

7.2. Edat abans de la utilització humana

El material datat té una edat més antiga que el moment en què es va dipositar i va esdevenir associat amb d'altres objectes en el nivell arqueològic que hom pretén datar. El temps transcorregut entre aquests dos moments creix en el sentit següent:

- llavors
- branquetes
- ossos

- anells exteriors d'arbres de vida curta
- fusta d'arbres de vida llarga i carbó procedent d'aquesta fusta
- material susceptible de reutilització
- material de naturalesa desconeguda.

7.3. Contaminació i mescla

Els materials susceptibles de datació, a causa de la seva estada en el sòl, adquireixen per infiltració o penetració altres substàncies carbonades de formació anterior o posterior al material d'interès, i de naturalesa diferent. Aquest fet és una constant en els materials datables i s'anomena contaminació; la contaminació ha de ser eliminada perquè en cas contrari falsejaria el resultat de la datació. L'eliminació de la contaminació és generalment possible per mètodes químics gràcies a la diferent naturalesa química del material datable i els contaminants; els laboratoris apliquen sempre mètodes per eliminar la contaminació.

Un problema similar però de resolució impossible és la mescla de materials datables d'identica naturalesa química però d'edats diferents, produïda per pertorbació dels estrats o en el moment de la presa de mostra. En aquest cas, només l'arqueòleg pot avaluar la probabilitat d'aquesta contingència. La possibilitat de mescla és més gran com més petita és la certesa de l'associació.

Hom pot formar-se un judici assenyat de la fiabilitat d'una data si es disposa de determinacions de les diferents fraccions químiques de la mostra o bé dates de materials associats de naturalesa química diversa o també dates de sèries de mostres del mateix perfil vertical.

8. Calibratge de les dates radiocarbòniques

La dendrocronologia és capaç de proporcionar llargs registres de fusta d'edat exactament coneguda i la datació per radiocarboni d'aquest material ha permès la confecció d'unes corbes que correlacionen les dates radiocarbòniques amb les dates solars corresponents. Aquestes corbes, que avui dia arriben fins als últims 11.390 anys, permeten la transformació de les dates radiocarbòniques, obtingudes mitjançant la datació de materials adequats, en dates del calendari solar. Aquesta transformació rep el nom de calibratge de les dates radiocarbòniques i les corbes que permeten tal transformació s'anomenen corbes de calibratge. Cal tenir present que el calibratge només és aplicable als materials d'origen terrestre i que és limitada en el temps.

Les corbes de calibratge de què hom disposa actualment són d'alta precisió fins a 7890 BC en el sentit que la incertesa que afecta als punts que les componen és molt petita ja que la data radiocarbònica s'ha obtingut a partir de mostres de grans dimensions en laboratoris d'alta precisió. Les corbes són també d'alta exactitud en el sentit que cada punt és el resultat de mesures contrastades dutes a terme per laboratoris diferents per tècniques de mesura

diferents⁵ (comptadors proporcionals i de centelleig líquid) sobre mostres de fusta de la mateixa edat però d'origen geogràfic diferent (STUIVER, REIMER, 1993), la qual cosa garanteix l'aplicabilitat a tot l'hemisferi nord.⁶ Entre 7890 i 9400 BC la corba de calibratge és el resultat de les mesures d'un sol laboratori (KROMER, BECKER, 1993) realitzades sobre arbres alemanys datats dendrocronològicament.

Quan la dendrocronologia és incapaç de proporcionar materials d'edat coneguda susceptibles de datació per radiocarboni, hom recorre a la datació de coralls, la datació mitjançant U/Th dels quals subministra la data en cronologia solar (BARD et al., 1993). D'aquesta manera les corbes de calibratge poden estendre's fins a 20.000 BC, però amb una resolució i una precisió més petita que la corresponent al tram dendrocronològic.

Les corbes de calibratge poden observar-se a dos nivells: a nivell global, és a dir per a llargs períodes de temps, i a nivell restringit, per a curts períodes de temps. L'observació a nivell global revela les tendències generals de la corba de calibratge i les relacions entre l'escala cronològica radiocarbònica i l'escala cronològica solar. La fig. 3 mostra a nivell global la corba de calibratge per als últims 10.000 anys; en ordenades es representa l'escala cronològica radiocarbònica i en abscisses l'escala cronològica solar en sentit retrògrad i amb origen a l'any 1950 dC. Com a tret més característic pot observar-se que ambdues escales cronològiques no són equivalents, ja que si ho fossin, la correlació entre elles vindria donada per la línia recta. S'indica a més el nombre d'anys solars que correspon a cadascun dels deu primers mil·lennis de l'escala radiocarbònica. De l'observació d'aquesta gràfica pot concloure's, a més, que ambdues escales cronològiques no són equivalents, que la unitat cronomètrica radiocarbònica, l'any BP, no és equivalent a l'any solar i, a més, que l'any BP no es manté constant al llarg del temps. Pot observar-se, així mateix, que des del cinquè mil·lenni BP les edats expressades en l'escala radiocarbònica són més de 500 anys més petites que quan són expressades en l'escala solar.

L'observació a nivell restringit de la corba de calibratge (fig. 4) mostra que està fortament estructurada ja que presenta cims i valls la qual cosa estableix una relació no unívoca entre l'escala radiocarbònica i l'escala solar en el sentit que a una data radiocarbònica pot correspondre més d'una data solar. Així, per exemple, a la data radiocarbònica experimental 4500 BP (Fig. 4) corresponen 5 dates solars.

5. A l'interval comprès entre 5180 i 5500 aC hi ha una diferència sistemàtica d'uns 27 anys entre els resultats de dos laboratoris (STUIVER, PEARSON, 1993) que possiblement es corregirà en una pròxima revisió. Tanmateix, aquesta revisió no afectarà la forma general de les corbes de calibratge.

6. A causa de la major superfície oceànica en l'hemisferi sud, el bescanvi de diòxid de carboni entre l'atmosfera i la hidrosfera és més gran, per la qual cosa la biosfera d'aquest hemisferi és lleugerament deficitària en ^{14}C i les dates radiocarbòniques estan envellides uns 40 anys BP. Per aquest motiu, abans de calibrar les dates radiocarbòniques procedents d'aquest hemisferi, cal corregir aquest efecte restant-hi 40 anys BP.

ESCALA RADIOCARBONICA. UNITAT: "ANY BP"

ORIGEN DE L'ESCALA: 1950 DC (0 BP)

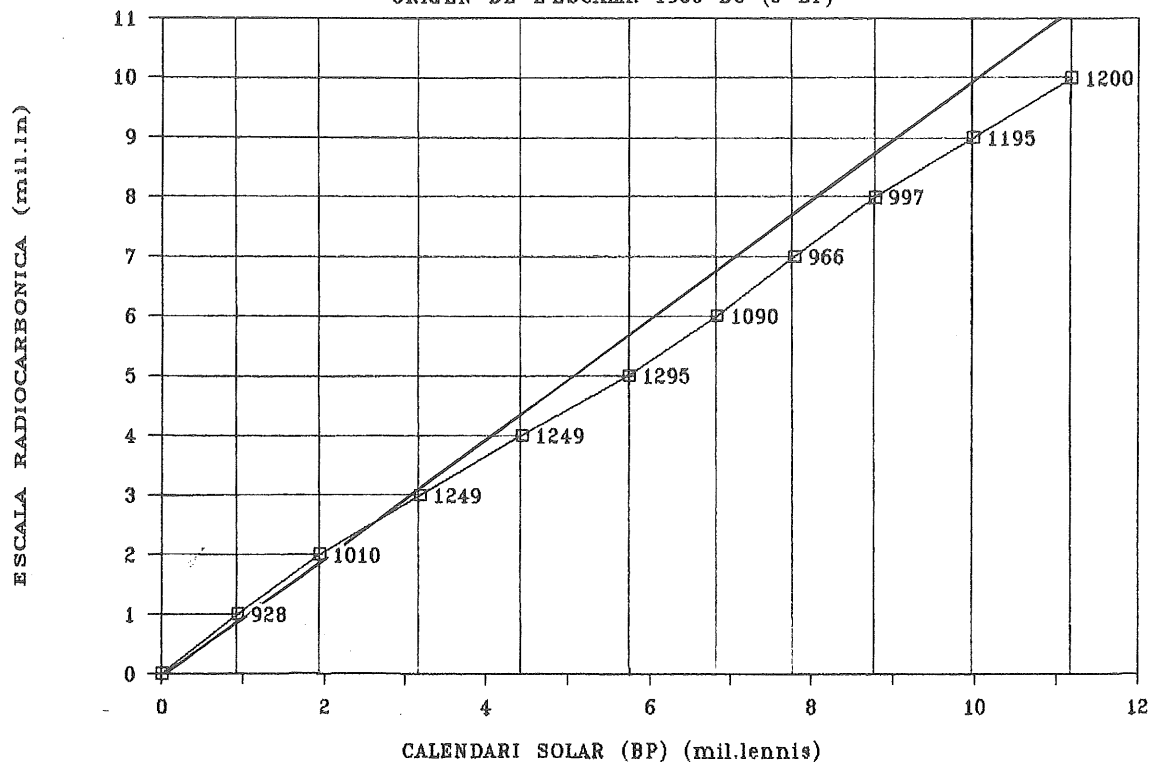


Figura 3. - Forma general de la corba de calibratge per als últims 10.000 anys. Sobre l'eix d'abscisses es representa l'escala cronològica solar en sentit retrògrad i amb origen a l'any 1950 dC (anys solars BP). Sobre la corba s'indiquen el nombre d'anys solars corresponents a cadascun dels 10 primers mil·lennis radiocarbònics.

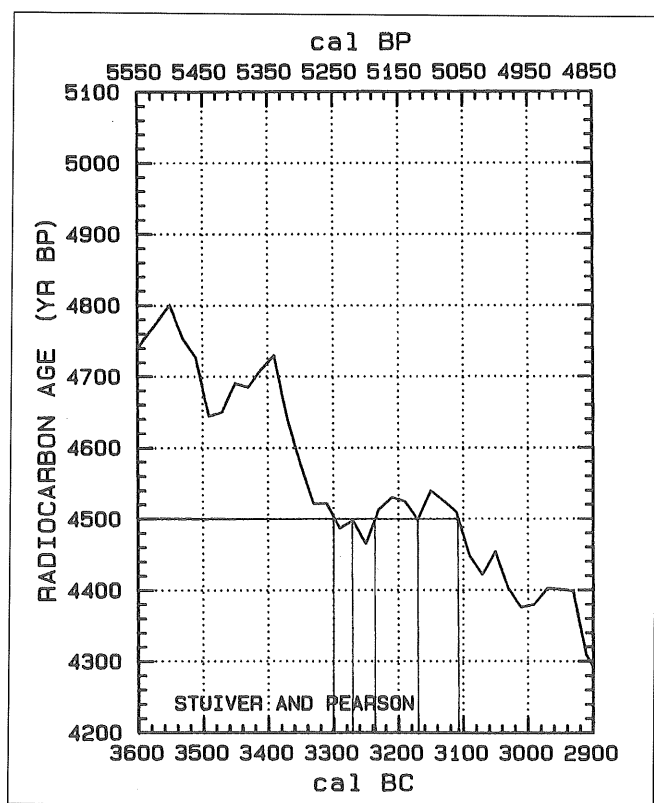


Figura 4. - Tram de la corba de calibratge amb indicació de les dates calibrades corresponents a les interseccions de la data radiocarbònica 4500 BP amb la corba de calibratge.

Per indicar que una data expressada en cronologia solar procedeix del calibratge d'una data radiocarbònica s'utilitza la notació «cal BC» o «cal AD» per al període de temps anterior o posterior al naixement de Crist, respectivament. *També pel fet de ser ambdues escales cronològiques diferents, és vivament desaconsellable la pràctica habitual de subtraure 1950 anys a les dates radiocarbòniques amb la finalitat de expressar-les en cronologia solar cristiana.* L'únic recurs vàlid per transformar una data radiocarbònica en una data solar és el seu calibratge.

El calibratge d'una data radiocarbònica és un procés complicat per dues causes: pel caràcter no puntual sinó probabilístic de la data radiocarbònica, motiu pel qual *la data calibrada tampoc no és puntual sinó que també està associada a una distribució de probabilitat*, i per la forma complexa de la mateixa corba de calibratge. Aquesta es manifesta, tal com ja s'ha vist, pel fet de no ser lineal i a més no establir una correspondència unívoca entre les dates radiocarbòniques i les dates solars. Per aquests dos motius la distribució de probabilitat de la data calibrada no respon a una simple distribució de probabilitat de Gauss, com és el cas de la data radiocarbònica, sinó que és una distribució de probabilitat complexa no associada a cap expressió matemàtica simple coneguda, és una distribució de probabilitat no simètrica i la distribució és diferent i particular per a cada data radiocarbònica.

La fig. 5 mostra, com a exemple, un tram de la corba de calibratge, la data radiocarbònica 5300 ± 50 BP i la distribució de la probabilitat de la data calibrada corresponent. Pot observar-se el caràcter complex d'aquesta distribució i la seva falta de simetria. Cal destacar que la distribució de probabilitat de la data calibrada pot ser multimodal, ja que exhibeix màxims absoluts sobre les dates calibrades corresponents a la data radiocarbònica experimental perquè aquelles són les més probables.

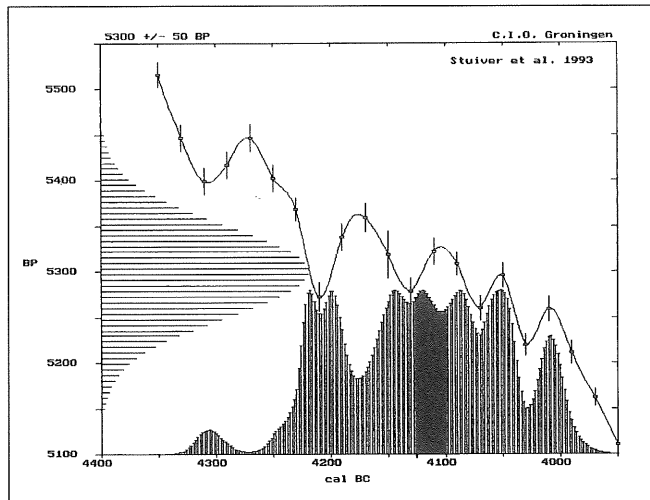


Figura 5. - Tram de la corba de calibratge amb indicació sobre l'eix d'ordenades de la distribució gaussiana de probabilitat corresponent a la data radiocarbònica 5300 ± 50 BP i sobre l'eix d'abscisses, la distribució de probabilitat de la corresponent veritable data calibrada. L'àrea més fosca indica la probabilitat que la veritable data calibrada caigui dins l'interval cal BC 4100-4150.

Anàlogament a la distribució de probabilitat de la data radiocarbònica, la distribució de probabilitat de la data calibrada delimita un interval de temps en què hi ha una probabilitat no nul·la i calculable que la veritable o veritables dates calibrades es trobin dintre de qualsevol segment de temps inclòs a l'interior de la distribució (fig. 5). La manca de simetria de la distribució de probabilitat de la data calibrada impedeix una expressió tan simple com la de la data radiocarbònica en forma d'un interval definit pel seu valor experimental i la seva desviació típica. Establint un paral·lelisme amb les dates radiocarbòniques, les dates calibrades es representen com intervals al voltant dels màxims de la distribució per a una probabilitat total de 68,3% y 95,4% (VAN DER PLICHT, MOOK, 1989; fig. 6).

Una altra forma útil de representar la distribució de probabilitat de les dates calibrades és la corba de probabilitat integral, perquè permet calcular la probabilitat associada a qualsevol interval de la data calibrada. La fig. 7 mostra la corba de probabilitat integral de la mateixa data calibrada i il·lustra la seva utilització: la probabilitat que la veritable data calibrada estigui continguda en un interval de temps és igual a la diferència de les ordenades corresponents als seus extrems segons la corba de probabilitat. Així per exemple, la probabilitat que la veritable data calibrada caigui en l'interval 4150-4100 cal BC és $60 - 36 = 24\%$.

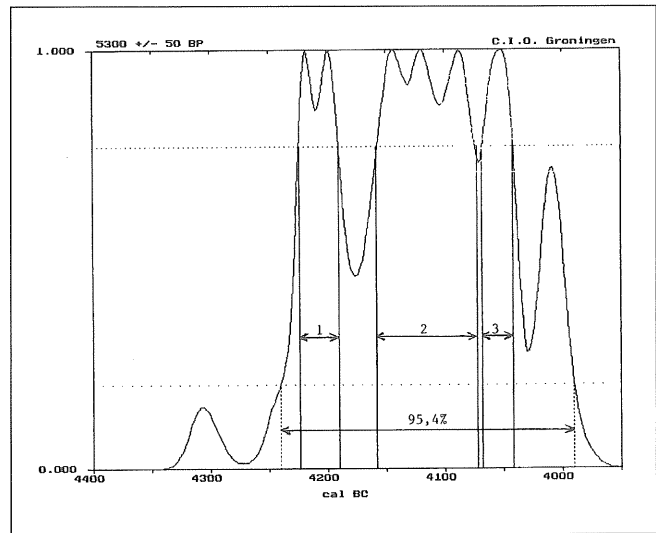


Figura 6. - Distribució de probabilitat de la veritable data calibrada corresponent a la data radiocarbònica 5300 ± 50 BP. Es mostren els intervals centrats en els màxims de la distribució de probabilitat corresponents a un 68,3% de probabilitat (indicats per 1, 2 i 3) i el corresponent a una probabilitat del 95,4%.

8. Aplicacions del calibratge

El calibratge de les dates radiocarbòniques adquireix la seva màxima rellevància en el cas de la utilització de la datació per radiocarboni amb finalitats inductives. De l'estudi d'un conjunt de dates radiocarbòniques relacionades entre si per pertànyer a un mateix fenomen arqueològic de llarga durada pot extreure-se'n conclusions sobre la seva cronologia i sobre la seva durada i aquests resultats poden utilitzar-se posteriorment per correlacionar la cronologia d'aquests fenòmens amb la cronologia d'altres fenòmens relacionats esdevinguts en regions geogràfiques distintes o en la mateixa regió geogràfica. L'estudi pot realitzar-se sobre les dates radiocarbòniques o sobre les dates calibrades generades pel conjunt de les dates radiocarbòniques inicial; tanmateix, la disponibilitat de les actuals corbes de calibratge d'alta precisió aconsella l'ús de les dates calibrades, ja que sense pèrdua de rigor estadístic s'obtenen els resultats expressats en l'escala cronològica solar. Com a exemple, a continuació s'exposen els mètodes per a l'establiment del període de vigència d'una entitat arqueològica i per a l'establiment del període d'ocupació d'un assentament arqueològic.

8.1. Establiment de períodes de vigència

Des del punt de vista arqueològic s'entén per període de vigència d'una entitat arqueològica el període de temps associat al seu registre arqueològic. Si aquest és susceptible de datació per radiocarboni, pot obtenir-se un conjunt de dates radiocarbòniques relacionades entre si pel fet d'estar associades a tal entitat arqueològica i aleshores l'anàlisi del conjunt de les dates pot subministrar informació sobre el període de

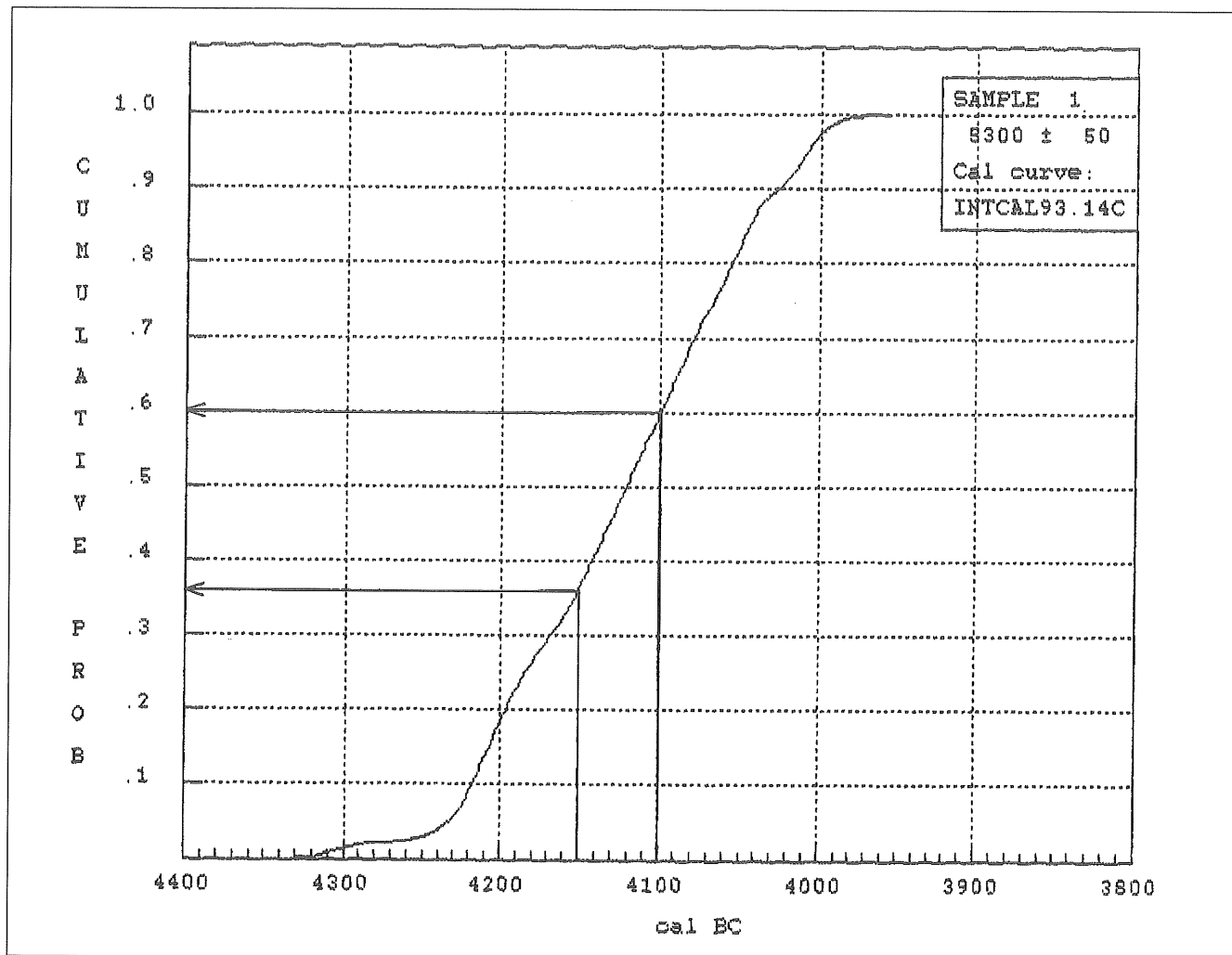


Figura 7. - Corba de probabilitat integral de la data calibrada corresponent a la data radiocarbònica 5300 ± 50 BP i il·lustració de la seva utilització: la probabilitat que la veritable data calibrada caigui en l'interval cal BC 4150-4100 és 60-36 = 24%.

vigència de l'entitat arqueològica en qüestió. En primer lloc, és necessari definir des del punt de vista estadístic el període de vigència d'una entitat arqueològica; aquest es defineix com aquell període cronològic en què per a cada petit segment temporal inclòs en el seu interior, hi ha una probabilitat no nul·la que contingui qualsevol de les veritables dates calibrades procedents del conjunt inicial de dates radiocarbòniques.

8.1.1. Càlcul del període de vigència

La manera d'actuar per establir el període de vigència és avaluar la probabilitat que un segment temporal qualsevol contingui qualsevol de les dates calibrades procedents del conjunt de dates radiocarbòniques inicial i procedir d'aquesta manera sistemàticament per a tots els segments adjacents. El càlcul d'aquesta probabilitat es realitza per addició de les probabilitats que cada una de les dates calibrades veritables caigui en el segment considerat i posterior divisió pel nombre de dates radiocarbòniques del

conjunt per normalitzar la probabilitat a la unitat. Així, si P representa la probabilitat que un petit segment determinat contingui qualsevol de les dates calibrades procedents del conjunt de n dates radiocarbòniques i p_i representa la probabilitat que aquest segment contingui la data i , es compleix

$$P = \sum_{i=1}^n p_i$$

L'avaluació de la probabilitat que una data calibrada concreta caigui en un segment temporal determinat es pot realitzar recorrent a la corba de probabilitat integral mitjançant el mètode exposat a l'apartat 7 (fig. 7). Aquest mètode de càlcul és molt laboriós per dur-lo a terme manualment quan hom maneja gran quantitat de dates; afortunadament hi ha programes informàtics que faciliten el càlcul (STUIVER, REIMER, 1993).

El conjunt de segments adjacents amb una probabilitat no nul·la de contenir qualsevol de les dates calibrades procedents del conjunt inicial de dates radiocarbòniques associades a l'entitat arqueològica en qüestió genera una distribució de probabilitat que defineix el seu període de vigència. Com a exemple, la fig. 8A mostra la distribució de probabilitat cor-

7. Com més petit sigui el segment, més precís serà el resultat.

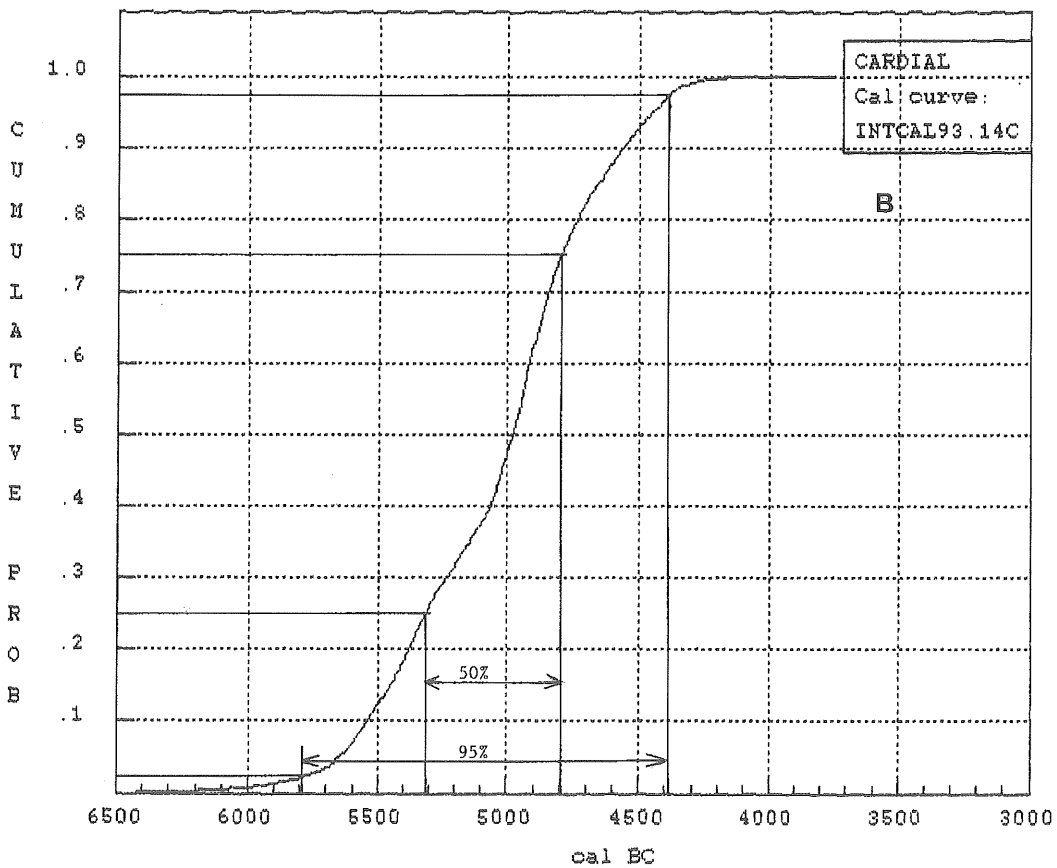
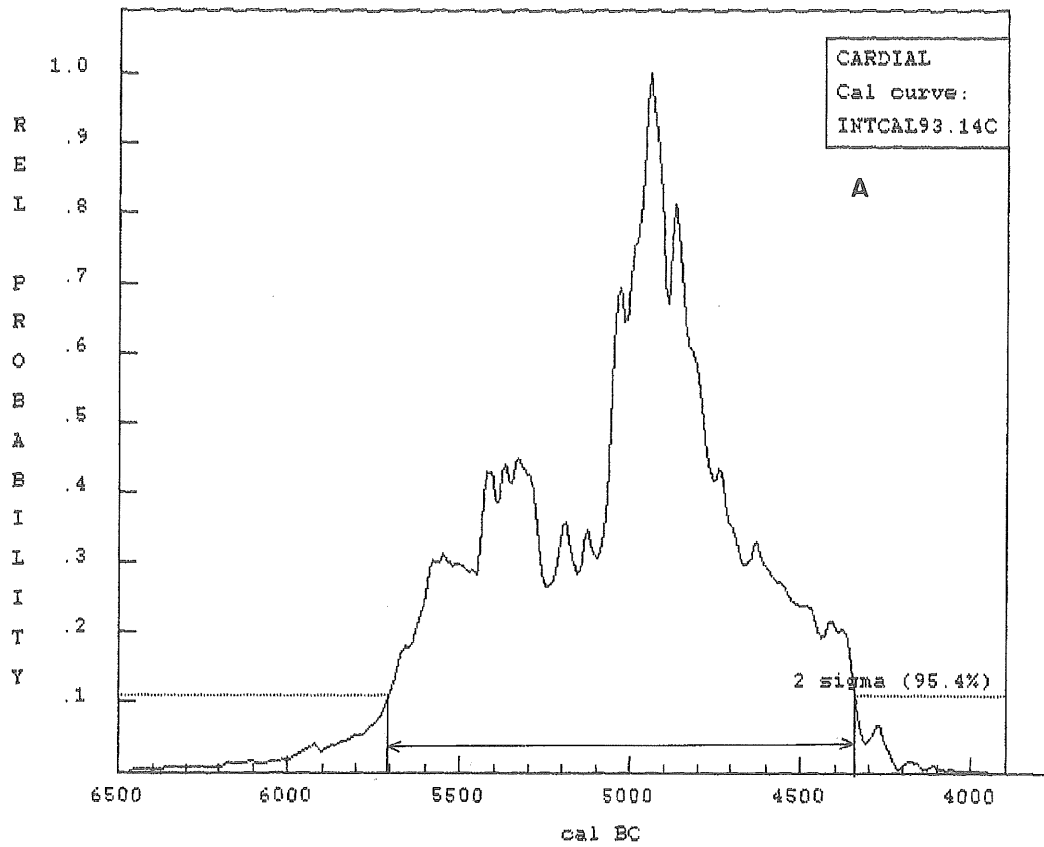


Figura 8. - A) Distribució de probabilitat corresponent al període de vigència de l'estil ceràmic cardial a Catalunya amb indicació del límit del període corresponent a un interval amb una probabilitat del 95,4% centrat al màxim de la distribució. B) Corba de probabilitat integral corresponent al període de vigència de l'estil ceràmic cardial a Catalunya amb indicació del càlcul dels límits del període corresponents a intervals amb una probabilitat del 95% i 50% centrats a la mediana de la distribució.

responent al període de vigència de l'estil ceràmic cardial a Catalunya.

8.1.2. Representació de períodes de vigència

Encara que el període de vigència així definit és un concepte precís, els seus límits no ho són tant ja que els extrems de la distribució de probabilitat tendeixen a zero molt lentament (fig. 8A) i a més aquesta representació no facilita la visualització de grups de períodes de vigència veïns cronològicament o geogràfica. Per tal de resoldre aquest problema, el període de vigència es representa en forma de bloc horitzontal referit a un eix d'abscisses cronològic i per determinar els seus límits s'han proposat distintes alternatives: a) considerar els límits corresponents al 95,4% de probabilitat de manera anàloga a la del calibratge d'una data única (VAN DER PLICHT, MOOK, 1989; fig. 8A); b) considerar els límits corresponents al període de temps amb un 95% de probabilitat centrat en la mediana de la distribució (PAZDUR, MICHZYNSKA, 1989, fig. 8B); y c) considerar el període de temps cor-

responent al 50% de probabilitat centrat en la mediana de la distribució (OTTAWAY, 1973; AITCHISON et al. 1990, 1991; fig. 8B). La primera alternativa ofereix la possibilitat, quan la distribució de probabilitat del període de vigència presenta màxims relatius prop dels extrems, de presentar «illes de probabilitat» separades de l'interval principal que poden ser poc representatives; la tercera alternativa presenta l'avantatge que l'interval resultant és molt robust (poc afectat pels valors extrems i per la incorporació de noves dates) i a més representa l'interval de temps més prolífic, d'apogeu, plenitud o màxima esplendor (*floruit*) dins del període de vigència, ja que és l'interval de temps on es concentra el major nombre de dates. La fig. 8B mostra la corba de probabilitat integral corresponent al període de vigència de l'estil ceràmic cardial a Catalunya amb indicació del càlcul dels intervals corresponents a una probabilitat del 95% i de l'interval corresponent al *floruit* (50%). Com a exemple de la condensació d'informació produïda per aquests mètodes de representació, la fig. 9 mostra els períodes de vigència dels estils ceràmics corresponents al neolític i calcolític a Catalunya (MESTRES, MARTÍN, 1995).

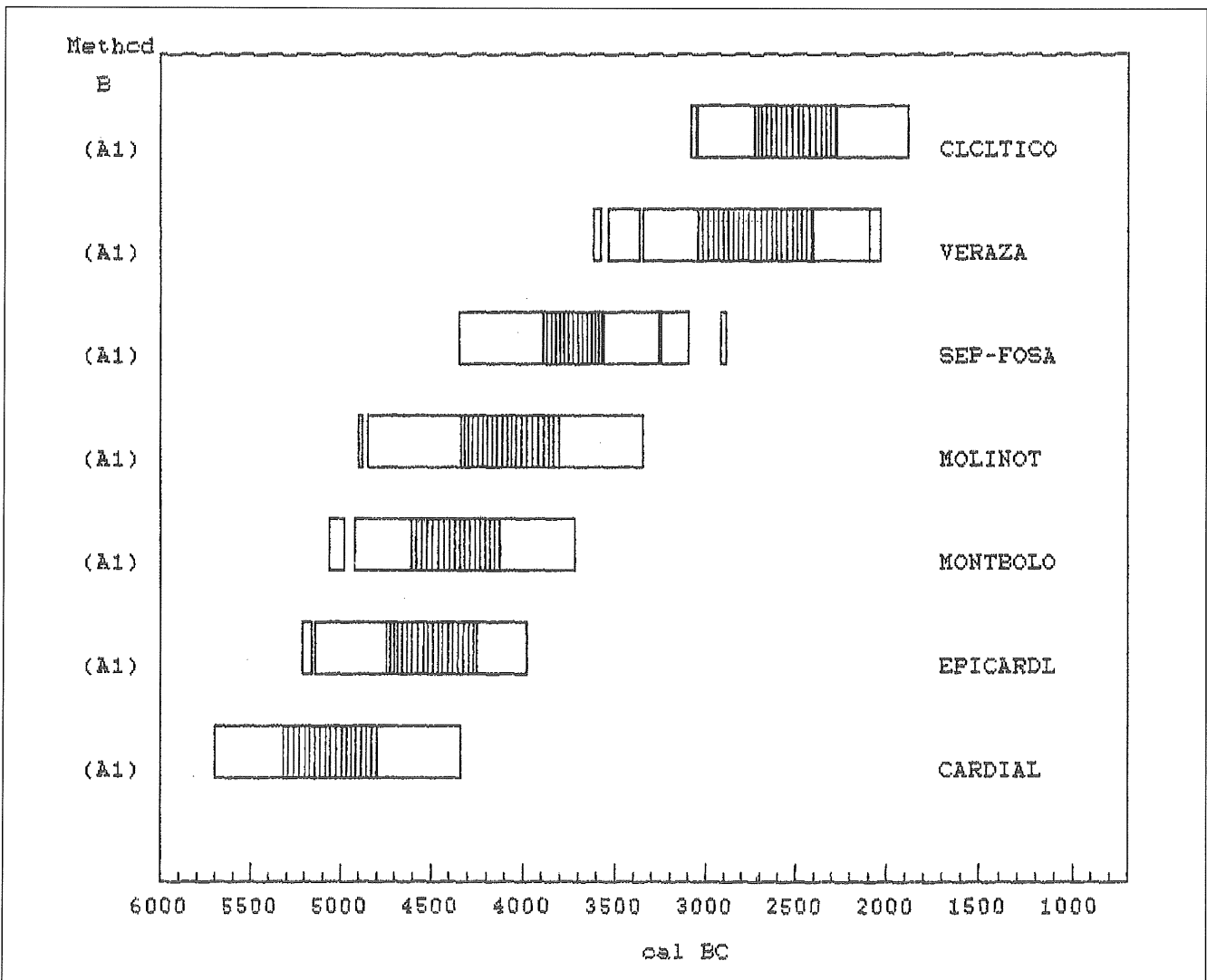


Figura 9. - Períodes de vigència dels estils ceràmics corresponents al neolític i calcolític a Catalunya. Els blocs grans corresponen a intervals amb una probabilitat del 95,4% centrada al màxim de la distribució (poden observar-s'hi les «illes de probabilitat») i la zona ombrejada correspon al *floruit*.

8.2. Establiment de períodes d'ocupació

Anàlogament, si per període d'ocupació d'un jaciment o d'un assentament s'entén el lapse de temps associat al seu registre arqueològic i aquest és susceptible de datació, pot obtenir-se un conjunt de dates radiocarbòniques relacionades entre si pel fet de pertànyer a l'assentament. Aleshores, també pot definir-se el període d'ocupació com aquell període cronològic en què per a cada petit segment temporal inclòs en el seu interior, hi ha una probabilitat no nul·la que contingui qualsevol de les veritables dates calibrades procedents del conjunt inicial de dates radiocarbòniques. La distribució de probabilitat que s'obté (calculada de la mateixa manera que el període de vigència) defineix també el període d'ocupació i de la forma d'aquesta distribució es poden extreure conclusions. Així, si la distribució és inequívocament bimodal o multimodal, hi ha períodes de temps d'alta probabilitat al costat de períodes de baixa probabilitat que poden interpretar-se, sempre que el raonament

arqueològic no ho desmenteixi, com a períodes de baixa activitat o fins i tot d'abandó o desocupació de l'assentament. Com a exemple, la fig. 10 mostra la representació gràfica de 8 dates calibrades procedents del període neolític de la Bòbila Madurell: les quatre inferiors pertanyen a estructures pròpies del neolític mitjà i les quatre superiors a estructures del neolític final (MARTÍN et al.). L'observació visual no indica una clara discontinuïtat en l'ocupació, tanmateix l'estudi del període d'ocupació suggereix una altra interpretació. La fig. 11 mostra la distribució de probabilitat corresponent al període d'ocupació del jaciment on pot observar-se una notable davallada de la probabilitat entre cal BC 2900 i 3300, la qual cosa suggereix un període de temps de desocupació.

En el cas dels períodes d'ocupació, la millor representació en forma de bloc és la corresponent a l'opció a) (apartat 8.1.2; fig. 11) ja que les opcions b) i c) pel fet d'estar centrades a la mediana de la distribució de probabilitat, no poden reflectir els períodes de desocupació (fig. 12).

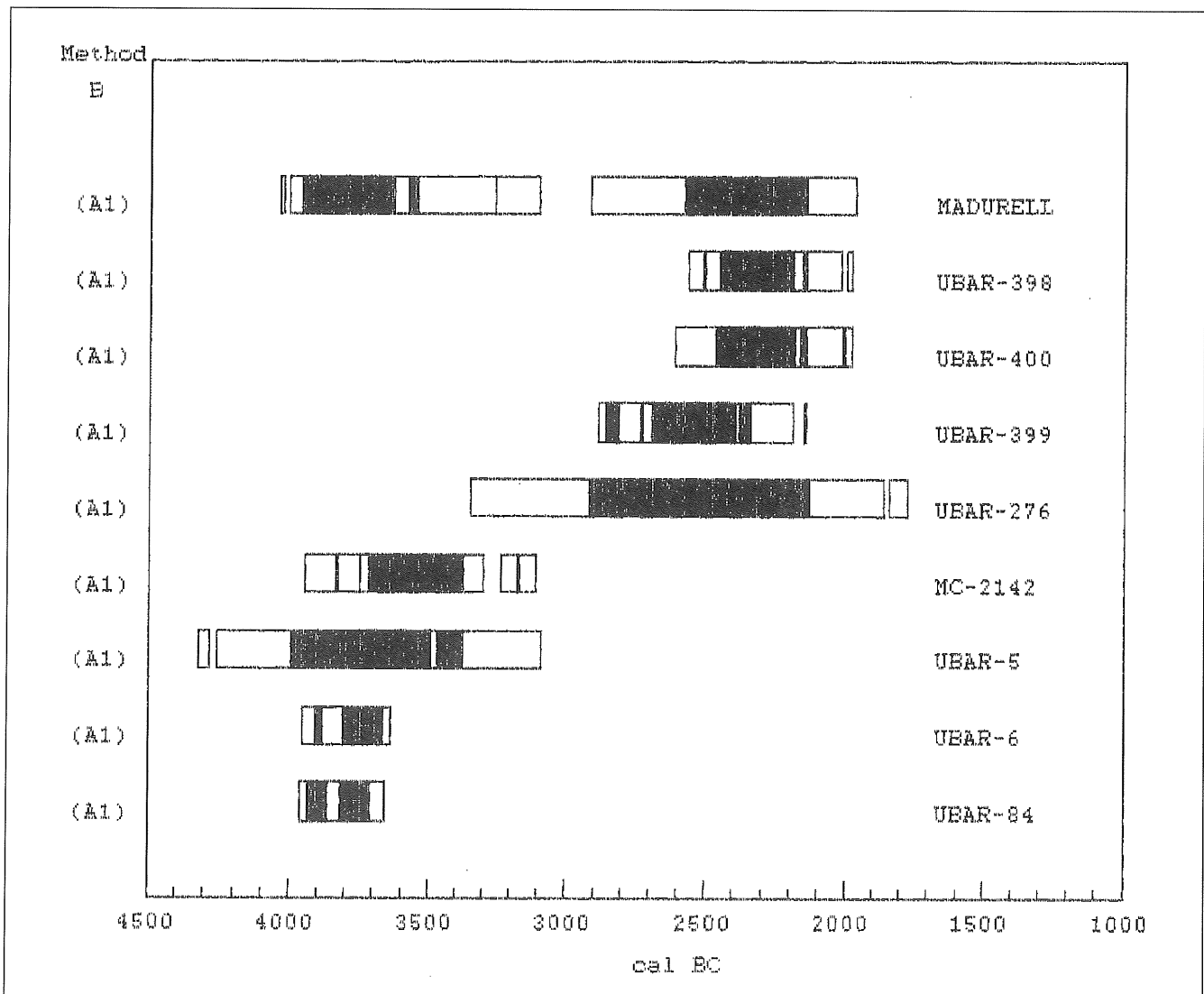


Figura 10. - Dates calibrades de la Bòbila Madurell corresponents al neolític mitjà i final. El blocs grans corresponen a una probabilitat del 95,4% i les zones ombrejades al 68,3%. El bloc superior correspon al període d'ocupació representat mitjançant l'opció a) (vegeu text).

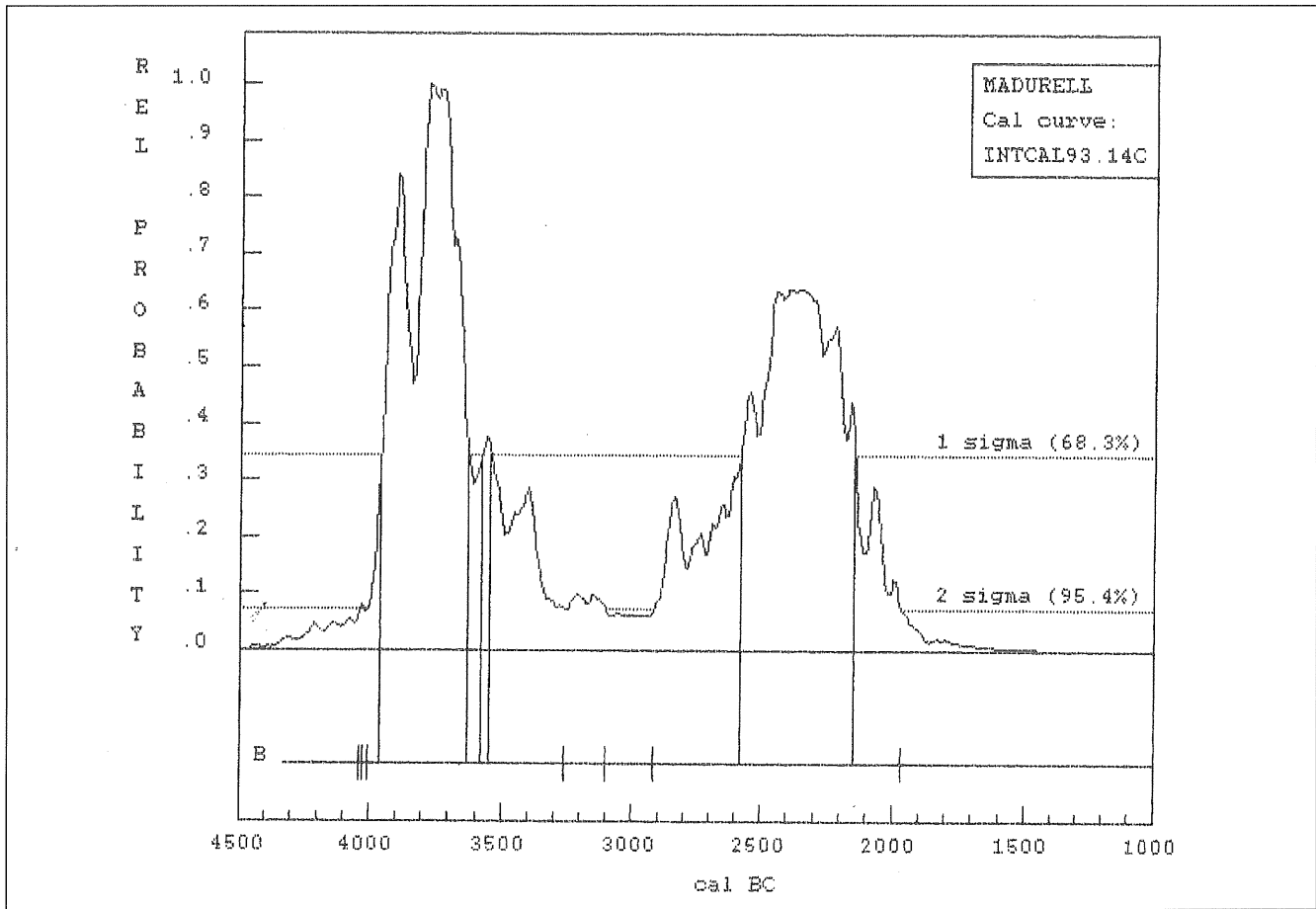


Figura 11. - Període d'ocupació de la Bòbila Madurell corresponent al neolític mitjà i final.

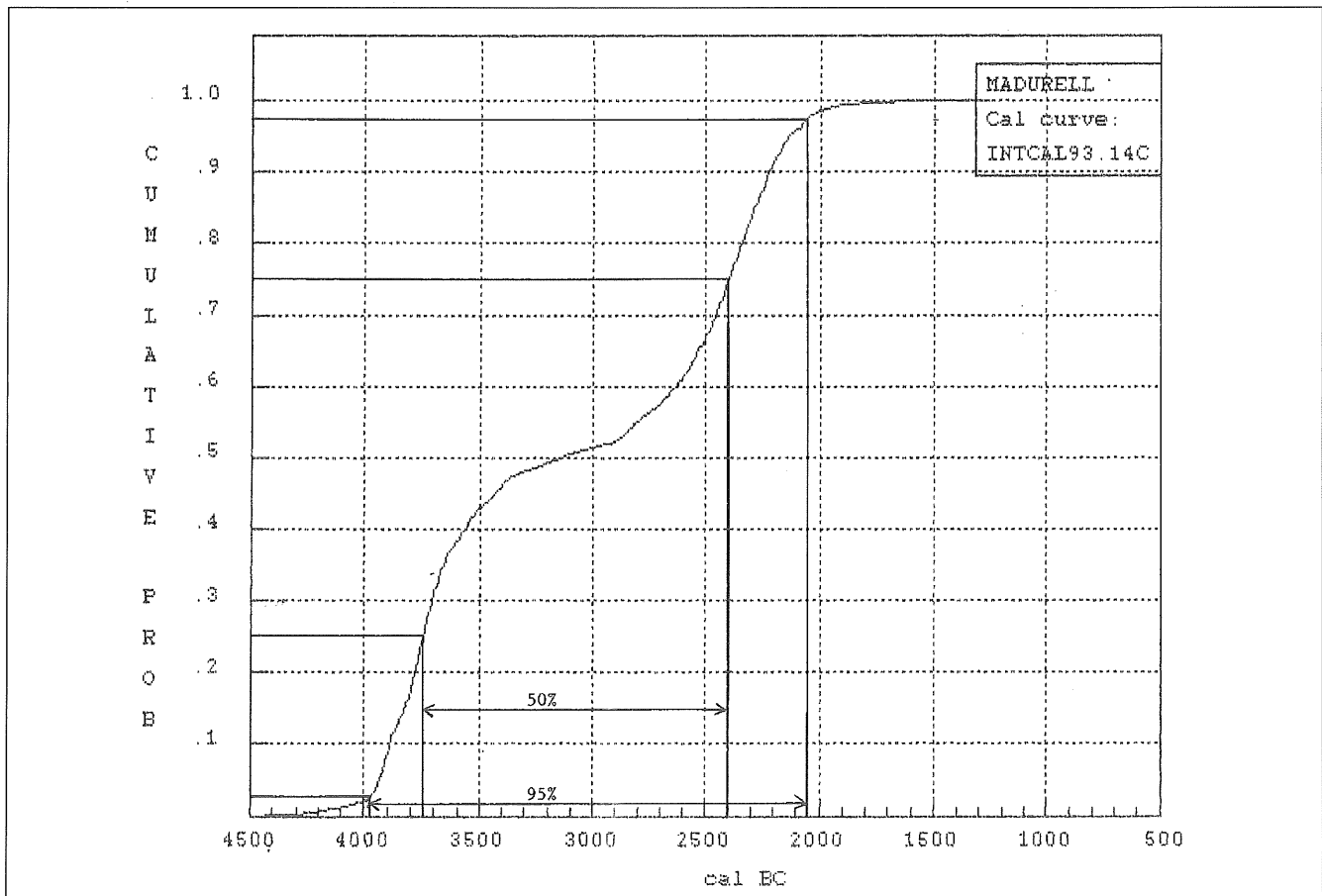


Figura 12. - Corba de probabilitat integral del període d'ocupació de la Bòbila Madurell corresponent al neolític mitjà i final. Pot observar-se que els blocs corresponents als intervals centrats a la mediana de la distribució no reflecteixen el període de desocupació.

Bibliografia

AITCHISON et al. 1990

Aitchison, T. C., Ottaway, B. S. i Scott, E. M. (1990): «Statistical Treatment of Groups of Related Radiocarbon Ages», *Proceedings of the Second International Symposium ¹⁴C and Archaeology. Groningen, 1987*, 95-104. PACT, 29.

AITCHISON et al. 1991

Aitchison, T. C., Ottaway, B. S. i Al-Ruzaiza, A. S. ¹⁴C dates on the historical time scale: with a worked example from the Late Neolithic of Bavaria». *Antiquity* 65, 108-16.

ARNOLD, LIBBY 1949

Arnold, J. R. i W. F. Libby, 1949: «Age determinations by Radiocarbon content: checks with samples of known age». *Science* 110, 678-680.

BARD et al. 1993

Bard, E., M. Arnold, R. G. Fairbanks i B. Hamelin, 1993: «²³⁰Th-²³⁴U and ¹⁴C Ages Obtained by Mass Spectrometry on Corals». *Radiocarbon* 35(1), 191-200.

GARCÍA et al. 1992

García, J. F., J. S. Mestres i G. Rauret, 1992: «Comparing Continental Carbonates with Other Materials in Dating a Paleolake». *Radiocarbon* 34(3), 619-625.

KROMER, BECKER 1993

Kromer, B. i B. Becker, 1993: «German Oak and Pine ¹⁴C Calibration, 7200-9400 BC». *Radiocarbon* 35(1), 125-136.

MARTÍN et al. 1995

Martín, A., A. Bordas i M. Martí, 1995: «Bòbila Madurell (Barcelona). Estratègia econòmica i organització social». Actes del I Congrés del Neolític a la Península Ibèrica, *Rubricatum* 1, en premsa.

MESTRES, MARTÍN 1995

Mestres, J. S. i A. Martín, 1995: «Calibración de las fechas radiocarbónicas y su contribución al estudio del Neolítico catalán». Actes del I Congrés del Neolític a la Península Ibèrica, *Rubricatum* 1, en premsa.

MULLER 1977

Muller, R. A., 1977: «Radiocarbon dating with a cyclotron». *Science* 196, 489-494.

NOAKES et al. 1965

Noakes, J. E., S. M. Kim, i J. J. Stipp, 1965: «Chemical and counting advances in liquid age dating». *Proceedings of the 6th International Conference on Radiocarbon and Tritium Dating*, 68-92. Conf 650652; R. M. Chatters i E. A. Olson.

OTTAWAY 1973

Ottaway, B. «Dispersion diagrams: A new approach to the display of carbon-14 dates». *Archaeometry* 15, 5-12.

PAZDUR, MICHCZYNSKA 1989

Pazdur, M. F. i D. J. Michczynska, 1989: «Improvement of the procedure for probabilistic calibration or radiocarbon dates», *Radiocarbon* 31(3), 824-832.

VAN DER PLICHT, MOOK 1989

Van der Plicht, J. i W. G. Mook, 1989: «Calibration of radiocarbon ages by computer», *Radiocarbon* 31(3), 805-816.

RENFREW 1973

Renfrew, C. «Before Civilization, the Radiocarbon Revolution and Prehistoric Europe». New York, 1973.

STUIVER, PEARSON 1993

Stuiver, M. i G. W. Pearson, 1993: «High-Precision Bidecadal Calibration of the Radiocarbon Time Scale, AD 1950-500 BC and 2500-6000 BC», *Radiocarbon* 31(3), 1-24.

STUIVER, REIMER 1993

Stuiver, M. i P. Reimer, 1993: «Extended ¹⁴C Data Base and Revised CALIB 3.0 ¹⁴C Age Calibration Program». *Radiocarbon* 35(1), 215-230.

Suess 1967

Suess, H. E., 1967: «Bristlecone pine calibration of the radiocarbon time scale from 4100 B.C. to 1500 B.C.» a *Radiocarbon dating and methods of low-level counting*, 143-150. Viena, Agència Internacional de l'Energia Atòmica.

DE VRIES, BARENDSEN 1954

De Vries, H. i G. W. Barendsen, 1954: «Measurements of age by the carbon-14 technique (Groningen I)». *Nature* 174, 1138-1141.

WATERBOLK 1983

Waterbolk, H. T., 1983: «The Integration of Radiocarbon Dating in Archaeology». *Radiocarbon* 25(2), 639-644.

Emili Junyent
Joan B. López
Araceli Martín

Universitat de Lleida
Servei d'Arqueologia. Departament de Cultura
Generalitat de Catalunya

Fernán Alonso

Laboratorio de Geocronología
Instituto Rocasolano CSIC Madrid

Pedro V. Castro
Rafael Micó

Universitat Autònoma de Barcelona

Joan S. Mestres

Laboratori de Datació per Radiocarboni
de la Universitat de Barcelona