

| | | | | | |
|----------------------------------|-------|---------|---------------|------|----------------|
| MUNIBE (Antropología-Arkeología) | nº 60 | 331-347 | SAN SEBASTIÁN | 2009 | ISSN 1132-2217 |
|----------------------------------|-------|---------|---------------|------|----------------|

Recibido: 2009-10-05
Aceptado: 2009-11-05

Límites de la geocronología en el estudio de yacimientos de época histórica

Limits of Geochronology in the study of historical sites

PALABRAS CLAVES: Metodología, radiocarbono, Arqueología histórica, Estadística.

KEY WORDS: Methodology, Radiocarbon, Historical Archaeology, Statistics.

GAKO-HITZAK: Metodologia, Erradiokarbonoa, Arkeologia historikoa, Estatistika.

Antonio RUBINOS PÉREZ⁽¹⁾

RESUMEN

En el presente trabajo, se revisan y discuten los requisitos metodológicos, tanto fisicoquímicos como arqueológicos, que deben cumplir las fechas obtenidas con datación por carbono-14 para proporcionar cronologías fiables. Además se muestra el empleo de estadística bayesiana para aunar la información suministrada por las fechas con la generada durante el estudio del yacimiento.

Datación por carbono-14; radiocarbono; modelos cronológicos; arqueometría; estadística bayesiana.

ABSTRACT

In this paper, both physical-chemistry and archaeological assumptions of radiocarbon dating method are reviewed and discussed to get reliable chronologies. Moreover, Bayesian statistics are explained to join radiocarbon dates with the information collected during the study of the site.

Radiocarbon dating; chronological modelling; archaeometry; Bayesian statistics.

LABURPENA

Lan honetan, karbono-14 bidezko datazioekin lortutako datek kronologia fidagarriak eskaintzeko bete behar dituzten baldintza metodologikoak, fisiokimikoak eta arkeologikoak, berrikusiko eta eztabaidatuko ditugu. Horrez gain, bayesiar teknikaren erabilera ere azalduko dugu. Teknika hori datek ematen dituzten informazioa eta aztarnategiaren azterketan lortutakoa bateratzeko erabiltzen da.

Karbono-14 bidezko datazioa; erradiokarbonoa; eredu kronologikoak; arkeometria; bayesiar estatistika.

1- INTRODUCCIÓN

La datación por carbono-14 es el método físico-químico más empleado para determinar los momentos de ocupación en yacimientos arqueológicos prehistóricos, y resulta de indudable ayuda puesto que es difícil encontrar materiales o estructuras con una cronología bien definida. Sin embargo, en época histórica sí existen marcadores que tiene una precisión mayor, como modelos constructivos, tipologías cerámicas, dataciones históricas o documentos historiográficos, que no hacen tan necesaria la utilización de este método. A pesar de lo anterior, existen yacimientos históricos que carecen de los marcadores citados y requieren de este tipo de datación para la determinación cronológica de una o varias de sus fases. En estos casos, se presentan una serie de

problemas en la interpretación de las fechas obtenidas por carbono-14, que, siendo inherentes al propio método, se acentúan al tener mucha más información sobre los periodos que son objetos de estudio. Así, las dataciones realizadas requieren de una mayor precisión, es decir, que el intervalo que proporcionan sea lo más pequeño posible para encajar adecuadamente en la secuencia histórica local. Mientras en yacimientos prehistóricos un intervalo de 100-150 años permite situar perfectamente el momento de actividad arqueológica, en el caso de yacimientos históricos la magnitud de este intervalo impide definir con la precisión necesaria ciertos momentos concretos.

Estos problemas inciden profundamente en la utilización de la datación por carbono-14 como método para conseguir cronologías absolutas en

⁽¹⁾ Instituto de Química-Física Rocasolano – CSIC, Serrano, 119 28006 Madrid. rubinos@iqfr.csic.es

periodos históricos, puesto que le obliga a realizar dataciones de alta precisión (con errores en torno a 25 años, o menos si es posible), lo cual no es siempre posible debido al tamaño o estado de preservación de la muestra, y sin que desviaciones estándar pequeñas garanticen fechas de intervalos pequeños si el tramo de la curva de calibración presenta irregularidades importantes (RUBINOS, 1999). A pesar de estas limitaciones, cuando es posible obtener series de fechas, la utilización de la información obtenida en el yacimiento (estratigrafía, tipología de materiales, enterramientos o construcciones, etc.) permite realizar análisis estadísticos bayesianos que ayudan a resolver con bastante rigor algunos de los interrogantes planteados. De este modo, se asocian las fechas en *fases, secuencias definidas o variables*, etc., según directrices arqueológicas delimitadas *a priori* en el modelo cronológico.

2- PRINCIPIOS DEL MÉTODO DE DATACIÓN POR CARBONO-14

El isótopo ^{14}C es uno de los tres isótopos del carbono que se encuentran en la Naturaleza y, a diferencia de los otros dos ^{12}C y ^{13}C , es radiactivo. Se produce en las capas altas de la atmósfera, se oxida a $^{14}\text{CO}_2$ una vez generado y como tal se distribuye por toda la superficie del planeta, igual que cualquier otro átomo de carbono. La mayoría se absorbe en los océanos, mientras que una pequeña parte pasa a la biosfera terrestre mediante su captación en la fotosíntesis, y de ahí al resto de los seres vivos de la cadena alimentaria. Mientras el organismo vive, sus procesos metabólicos mantienen la proporción de los tres isótopos aproximadamente igual que en la atmósfera. Cuando la planta o el animal mueren, el contenido en ^{14}C comienza a reducirse por su carácter radiactivo.

De este modo, se define el evento radiocarbónico (o evento ^{14}C) como *"el momento en el que una sustancia que contiene carbono es aislada de la(s) reserva(s) de la que obtiene el carbono"* (VAN STRYDONK *et alii.*, 1999). Este momento inicia el reloj radiocarbónico que es normalmente entendido como la muerte del ser vivo. Esta visión es una simplificación puesto que algunos tejidos orgánicos son aislados de su reserva cientos de años antes de la muerte del ser vivo (por ejemplo, los anillos interiores de árboles muy longevos) y, por otro lado, algunos materiales inorgánicos que

poseen carbono pueden ser datados. Es importante puntualizar que el evento radiocarbónico representado por una muestra puede estar o no directamente asociado con el evento arqueológico de interés.

Cualquier isótopo radiactivo sigue una ley que dice que la cantidad que posee una sustancia de dicho isótopo en un momento determinado (N) depende la cantidad de isótopo que había originalmente (N_0), del tiempo transcurrido (t) desde el momento inicial -en nuestro caso, el evento radiocarbónico- hasta el momento en el que hacemos la medida, y de la naturaleza del propio isótopo, a través de su constante de desintegración radiactiva (λ), según la ecuación:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Como se observa, la pérdida del isótopo por desintegración radiactiva es una función exponencial dependiente del tiempo. Si sustituimos los valores de N y N_0 por su correspondiente en Actividad (número de isótopos que se desintegran por unidad de tiempo), A y A_0 , podemos determinar el tiempo que ha transcurrido desde el momento inicial hasta el momento de la medida despejando la incógnita t (tiempo), y sustituyendo el valor la constante de desintegración radiactiva para el ^{14}C :

$$EDAD(\text{años}) = -8033 \cdot \text{Ln} \frac{A}{A_0}$$

El valor así obtenido se denomina edad carbono-14 convencional. Para su determinación se ha de medir la actividad actual de la muestra (A) y relacionarla con la actividad que tenía la muestra en su evento radiocarbónico (A_0), que se presupone inicialmente como constante. Este valor se expresa en *años antes del presente* ("Before Present o BP" en inglés), tomando el año 1950 d.C. como presente (STUIVER y POLACH, 1977). La elección de esta fecha es arbitraria y se adoptó por acuerdo internacional debido a su cercanía con la publicación de las primeras fechas realizadas en diciembre de 1949 (ARNOLD y LIBBY, 1949). De este modo, el año 1950 d.C. se considera el "año cero" del método y todas las fechas se refieren a él.

Para que pueda utilizarse como método de datación se deben cumplir una serie de requisitos, que brevemente pueden enumerarse (TAYLOR, 1978; VAN STRYDONK *et alii.*, 1999):

1. La concentración de ^{14}C en cada reserva debe permanecer constante a lo largo del tiempo.
2. Debe producirse una rápida y total mezcla del ^{14}C en las distintas reservas.
3. La muestra que va a ser datada debe haber estado en equilibrio isotópico con el dióxido de carbono de su atmósfera contemporánea (bien de forma directa, como las plantas, o de forma cuasi-directa como los animales que comen estas plantas).
4. La relación isotópica del carbono en las muestras no debe alterarse, excepto por la desintegración radiactiva del ^{14}C una vez muerto el organismo.
5. El periodo de semidesintegración del ^{14}C se conoce perfectamente.
6. Los niveles naturales de ^{14}C pueden medirse con la precisión y exactitud apropiada.

3- LÍMITES FÍSICOQUÍMICOS DE LA TÉCNICA DE DATACIÓN

La mayoría de los requisitos enumerados en el epígrafe anterior no se cumplen estrictamente más allá de una primera aproximación. Esto se debe a varias razones, tanto geoquímicas como geofísicas, y a lo largo de la historia de la técnica se han ido buscando las soluciones para solventarlas que iremos desgranando a continuación.

3.1 La concentración de ^{14}C en cada reserva debe permanecer constante a lo largo del tiempo

Este requisito fue ampliamente debatido desde el comienzo de la utilización del método, y ya durante la década de los 50 del siglo pasado, los continuos avances en las técnicas empleadas hicieron emerger discrepancias entre las fechas carbono-14 y las edades históricas para el Periodo Antiguo egipcio. Las diferencias encontradas mostraban que las fechas carbono-14 eran regularmente varios siglos más jóvenes, aun cuando la validez de las fechas históricas no hubiera sido probada fuera de toda duda.

Por otro lado, a finales de la década de los 50 H. de Vries comenzó la medida sistemática del contenido de carbono-14 de anillos datados por den-

drocronología y confirmó la discrepancia (DE VRIES, 1958). Esto llevó al claro convencimiento de que las fechas carbono-14 debían ser ajustadas (o calibradas, empleando la terminología inglesa que utilizaremos a partir de ahora) para convertirlas en edades reales o fechas de calendario. A partir de la medida de la presencia de ^{14}C en una secuencia de anillos que alcanzaba los últimos 8000 años preparada por Ferguson, H. Suess publicó la primera curva de calibración (SUESS, 1967).

Esta curva mostró una discrepancia aún más acusada entre las fechas carbono-14 y las edades de calendario, mostrando dos tendencias. Una primera de larga duración, que puede describirse como una onda sinusoidal con un periodo aproximado de 9000 años. La mayor desviación de la edad real se sitúa hacia comienzos del IV Milenio a.C. y genera fechas carbono-14 900 años más recientes de lo que son realmente. Por el contrario, hacia mediados del I Milenio d.C., la datación por carbono-14 proporciona fechas más antiguas en torno a un siglo. La segunda tendencia toma la forma de súbitos altibajos (*wiggles*), que se superponen a la onda principal y duran unas pocas décadas.

Aunque no se comprenden totalmente las causas geofísicas exactas de las tendencias encontradas en la curva de calibración, los principios básicos son conocidos. La tendencia de larga duración se correlaciona razonablemente bien con las fluctuaciones de la fuerza del campo magnético terrestre (momento geomagnético) Los rayos cósmicos causantes de la producción de los átomos de ^{14}C son partículas cargadas que son repelidas por un campo magnético. Si el momento geomagnético terrestre es elevado se produce un mayor rechazo de rayos cósmicos, por lo que éstos no pueden alcanzar las capas altas de la atmósfera y la producción de ^{14}C decae; si, por el contrario, dicho momento es débil, la producción aumenta.

La causa de las tendencias de corto alcance (*wiggles*) tiene que ver con la variación de la actividad de las manchas solares, y es conocida como *efecto de Vries*. Cuando las manchas solares presentan actividades más altas se incrementa el campo magnético débil existente entre los planetas, lo que induce una mayor repulsión de rayos cósmicos y, por tanto, una disminución en la producción de ^{14}C (GREY y DAMON, 1970; DAMON, LERMAN y LONG, 1978; LIBBY, 1973)

Además de las variaciones en la producción del isótopo, existen otras dos causas de las variaciones en el contenido atmosférico del mismo. Por un lado, la solubilidad del dióxido de carbono en agua depende de la temperatura, incrementándose cuando ésta baja. Las glaciaciones ocurridas en el pasado habrían influido en el contenido atmosférico del ^{14}C , de igual modo que los periodos cálidos interglaciares habrían invertido esta tendencia, liberando además carbono con menor contenido en ^{14}C procedente de las masas de hielo formadas durante las glaciaciones. Los efectos de estos factores interrelacionados no han sido todavía bien establecidos.

Por otro lado, la actividad humana también ha intervenido en la cantidad global de este isótopo de dos maneras. Primero, la quema masiva de combustibles fósiles desde la Revolución Industrial ha enviado a la atmósfera enormes cantidades de dióxido de carbono sin ^{14}C , alterando la relación entre los tres isótopos del carbono. Hay que recordar que la génesis tanto del carbón como del petróleo se produjo hace millones de años, por lo que el ^{14}C existente inicialmente en estos materiales se desintegró en su totalidad a lo largo del tiempo. De este modo se ha observado que los anillos de árboles correspondientes a la primera mitad del siglo veinte tienen un contenido significativamente más bajo que el esperado. Este efecto es conocido con el nombre de efecto Suess en honor a su descubridor (Suess, 1955). Sin embargo, un efecto mucho más dramático sobre el contenido de ^{14}C en la atmósfera se debe al desarrollo de las bombas nucleares. La gran cantidad de neutrones producidos en una explosión nuclear interactúan con el ^{14}N atmosférico, generando grandes sumas de ^{14}C . Por este motivo, las pruebas nucleares realizadas durante las décadas 50 y 60 han doblado prácticamente el contenido atmosférico de ^{14}C hacia 1965, decayendo desde ese momento (Stuiver y Quay, 1981).

3.1.1. La calibración de las fechas carbono-14

La consecuencia inmediata de que el ritmo de producción del isótopo ha variado con el tiempo es que los años carbono-14 no se corresponden con los años solares. Por ello, se ha hecho necesario precisar lo más exactamente posible la concentración de ^{14}C en la reserva a lo largo del tiempo, lo que se realizó midiendo la actividad de ^{14}C de series de anillos de árboles, cuyas fechas estaban

perfectamente delimitadas por dendrocronología. La curva así obtenida se ha denominado curva de calibración. Esta curva relaciona la edad carbono-14 convencional con la edad solar o de calendario. Así, en los años 1986, 1993, 1998 y 2004 (Stuiver y Kra, 1986; Stuiver, Long y Kra, 1993; Stuiver y Van Der Plicht, 1998; Reimer *et alii*, 2004) se han publicado curvas de calibración con el consenso de la comunidad científica internacional, en la que se ha ido refinando los distintos tramos y extendiendo el periodo hasta el cual es posible calibrar las fechas, situado actualmente alrededor del 12000 BP, continuando los esfuerzos por prolongarla mediante otras técnicas como la datación de corales por carbono-14 y uranio-torio.

El proceso de calibración es matemáticamente complejo y se realiza mediante programas desarrollados para tal fin: OxCal (Bronk Ramsey, 1995), CALIB (Stuiver y Reimer, 1993) BCal (Buck, Cavanagh y Litton, 1996), WinCal (Van Der Plicht, 1993), con los que se convierte la **edad carbono-14** convencional en su correspondiente edad calibrada, cuya escala es ya solar. Básicamente, se trata de proyectar la probabilidad de cada punto de la curva gaussiana de la edad convencional sobre la curva de calibración, para obtener con el mismo valor el o los puntos correspondientes de la edad calibrada. Como la curva de calibración es irregular, la edad calibrada no presenta un perfil gaussiano, sino que es irregular también (Figura 1). Esta irregularidad produce que muchas veces la distribución

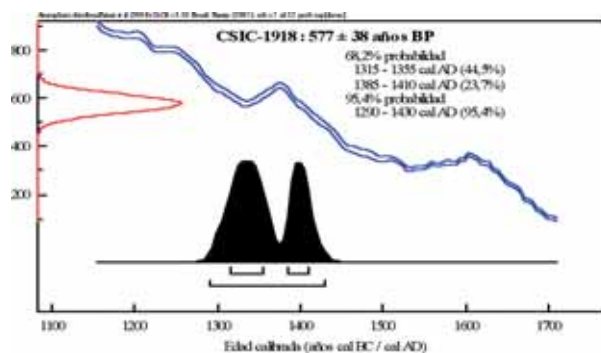


Fig. 1. Ejemplo de calibración de una fecha radiocarbónica. La distribución gaussiana o normal de la fecha carbono-14 convencional (en rojo) se sitúa en el eje de ordenadas. Tiene una forma simétrica centrada en 577 y el 68% de su área (1 sigma) se sitúa en 577 ± 38 . La curva de calibración INTCAL04 (en azul) tiene una forma irregular debido a la variación desigual del contenido en carbono-14 a lo largo del tiempo. La edad calibrada presenta una distribución también irregular, resultante de proyectar la probabilidad de cada punto de la edad convencional sobre la curva de calibración. Debido a la presencia de "dientes de sierra" (wiggles) en la curva de calibración, a un punto de la distribución de edad convencional puede corresponderle más de un punto de la distribución de la edad calibrada, como es el caso que se muestra. Tras la calibración, la fecha real se encuentra, con un 95,4% de probabilidad, en el intervalo 1290 – 1430 cal AD.

de la edad calibrada tenga más de un intervalo, cada uno de ellos con una probabilidad definida. Este dato hay que entenderlo como el porcentaje de área que ocupa dicho intervalo respecto del área total de la edad calibrada.

3.2 Debe producirse una rápida y total mezcla del ^{14}C en las distintas reservas

La atmósfera, los océanos y la biosfera son reservas de carbono y parte de su ciclo global. Puesto que los diferentes organismos toman su carbono de la reserva en la que se encuentran, es necesario que exista una rápida mezcla entre ellas para conseguir un reparto uniforme del ^{14}C producido. Para comprender algunos de los factores que afectan a la concentración de ^{14}C en entornos específicos, hay que considerar los tamaños relativos de las distintas reservas, así como las interacciones entre ellas. Los principales procesos de intercambio y transferencia son aquellos que se llevan a cabo entre la atmósfera y la biosfera, por un lado, y entre aquella y la superficie marina, por otro. Podemos diferenciar los siguientes efectos que impiden que este requisito se cumpla:

3.2.1. El efecto de la reserva marina

El ^{14}C producido en las altas capas de la atmósfera se incorpora rápidamente en forma de CO_2 a la biosfera terrestre, y con un retraso cercano a los 10 años a las capas superficiales del mar, pero una vez en el agua el intercambio con las capas más profundas es muy lento y cobra más importancia el ritmo de desintegración radiactiva. Puesto que en las capas más profundas existe un porcentaje elevado de carbono procedente de la disolución de carbonatos de origen geológico (sin ^{14}C), la proporción del isótopo en dichas capas es menor y proporciona edades más antiguas que las reales. Además, el sistema de intercambio no es estable sino que las capas profundas ascienden periódicamente a la superficie y se mezclan con las capas superficiales, modificando su contenido en este isótopo en ellas. Este fenómeno, denominado *upwelling*, está causado por el efecto del viento y la rotación terrestre que expulsan las aguas superficiales hacia alta mar provocando la subida de aguas profundas. Las áreas más afectadas son las costas occidentales y las regiones polares, aunque en cada zona particular, el tipo de costa, el clima local, las corrientes y la clase de viento contribuyen a la

variación en la magnitud del *upwelling*. La consecuencia final de este fenómeno es que la concentración en carbono-14 en las aguas superficiales disminuye, por lo que la actividad carbono-14 de éstos no es igual a la de las muestras terrestres y los seres vivos que viven en ella presentan edades más antiguas. En general, esta diferencia se estima en aproximadamente 400 años, aunque debe cuantificarse en cada región al variar las condiciones que la generan.

El efecto de la reserva marina impide calibrar directamente las fechas de conchas. Para solucionar este problema se han seguido dos procedimientos. El primero consiste en determinar la **edad aparente** de las conchas, es decir, la diferencia en edad entre éstas y las muestras terrestres coetáneas. Una vez determinada la edad aparente media para el yacimiento, se puede restar del valor individual de edad de cada concha y proceder a la calibración. Este método tiene como principal desventaja que no tiene en cuenta la variación en la concentración de carbono-14 con el tiempo debido al *upwelling*, por lo que sólo puede aplicarse al momento temporal en el que se calcula. El segundo procedimiento para calibrar conchas se desarrolló en 1986 mediante la obtención de una curva de calibración específica para muestras marinas, que es continuamente ampliada y mejorada (STUIVER, PEARSON y BRAZIUNAS, 1986; STUIVER y BRAZIUNAS, 1993; HUGHEN *et alii*, 2004) Estas curvas determinan la edad solar de una muestra marina en función de su edad carbono-14 convencional y de un parámetro, denominado ΔR , que cuantifica la desviación respecto al modelo debido al *upwelling* de cada zona. La curva de calibración lleva implícita la variación temporal de la actividad carbono-14 con el tiempo y define un modelo de cómo varía la reserva marina de forma global, mientras que ΔR determina la variación peculiar de cada zona en función de sus condicionantes regionales y es, en primera aproximación, independiente del tiempo. Cuando ΔR sea próximo a cero podremos concluir que el modelo ha dado una buena aproximación al comportamiento de la reserva marina en esa zona (RUBINOS *et alii*, 1999).

3.2.2. El efecto de las aguas continentales

A pesar de que tanto ríos como lagos no sufren el efecto de la reserva marina, llevan disueltos carbonatos procedentes de formaciones rocosas y, por tanto, de nulo contenido en ^{14}C , por lo

que la concentración de este isótopo es menor a la que le correspondería. Este efecto influye sobre los organismos acuáticos de estos ambientes, en los que se observa una discrepancia en su edad de varios siglos. Sin embargo, hay pocas evidencias que sugieran que afecta a plantas terrestres que vivan en área con aguas ricas en carbonatos, puesto que su fuente principal de suministro de carbono es la vía fotosintética.

3.2.3. Diferencias entre los hemisferios norte y sur

Los estudios han demostrado que se produce una buena mezcla del ^{14}C en la atmósfera de cada hemisferio, mientras que esta mezcla es muy pobre entre ellos puesto que prevalecen vientos de signo opuesto a lo largo del ecuador. Se ha constatado que las fechas obtenidas en el hemisferio sur son sistemáticamente más antiguas que las procedentes del hemisferio norte, en un valor que oscila entre los 25 y 50 años (MC CORMAC *et alii*, 2004). Esto se ha explicado por la mayor superficie de océanos en el hemisferio sur respecto del norte, lo que propicia una mayor interfase entre la atmósfera y los océanos, y con ello una dilución del ^{14}C atmosférico en éstos más elevada, reduciendo la proporción que es asimilada por la biosfera terrestre.

3.3 La muestra que va a ser datada debe haber estado en equilibrio isotópico con el dióxido de carbono de su atmósfera contemporánea (bien de forma directa, como las plantas, o de forma cuasi-directa como los animales que comen estas plantas)

Aunque los tres isótopos naturales del carbono tienen un comportamiento químico indistinguible, en algunos procesos biológicos existe una preferencia por los isótopos más ligeros y, por tanto, tienden a enriquecer el contenido de ^{12}C respecto al ^{13}C , y de éste respecto del ^{14}C (CRAIG, 1953) Por ello, durante el crecimiento de plantas y animales, las partes que intercambian con el medio tienen un contenido inferior en ^{14}C que el atmosférico. Si la diferencia es significativa, parecerán que son más antiguos que lo que en realidad son.

Este efecto, conocido como fraccionamiento isotópico, obliga a realizar una corrección en la actividad medida de ^{14}C . Para ello, se determina la relación isotópica $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ de la muestra respecto a un patrón (PDB o *Belemnite americana*) en un espectrómetro de masas, y se asume que el efecto

para el ^{14}C es el doble que para el ^{13}C . El fraccionamiento isotópico se expresa como $\delta^{13}\text{C}$, donde:

$$\delta^{13}\text{C} = \left[\frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}}{\left(^{13}\text{C}/^{12}\text{C} \right)_{\text{PDB}}} - 1 \right] \cdot 10^3$$

y de este modo, la actividad medida de la muestra (A_M), queda corregida de este efecto como A_C , donde (STUIVER y POLACH, 1977):

$$A_C = A_M \cdot \left[\frac{1 + (-25/10^3)}{1 + (\delta^{13}\text{C}/10^3)} \right]$$

En términos absolutos, esta corrección implica una variación de 16 años por cada 1‰ de diferencia con el valor estándar de -25‰ . Si el valor de $\delta^{13}\text{C}$ es mayor que -25‰ la corrección produce edades más antiguas (por ejemplo, para un valor de -15‰ la edad corregida es 160 años más antigua), mientras que si es menor las edades se hacen más modernas.

3.4 La relación isotópica del carbono en las muestras no debe alterarse, excepto por la desintegración radiactiva del ^{14}C , una vez muerto el organismo

Una de las bases del método de datación es que, salvo por la desintegración radiactiva, ningún proceso ha alterado el valor del ^{14}C una vez que la muestra ha cesado su actividad biológica. Por ello, cualquier adición de material que contenga carbono se considera contaminación, y como tal debe ser eliminada antes del proceso de datación para no obtener resultados erróneos. Un caso normal de contaminación es la deposición de carbonatos disueltos en agua sobre las muestras. Estos carbonatos proceden de la disolución de rocas calizas de millones de años y, por tanto, sin ^{14}C , por lo que envejecen las muestras. Otro ejemplo es la presencia de ácidos húmicos que, dependiendo de su origen, pueden hacer las muestras más antiguas o más modernas. El efecto de la contaminación depende tanto de la cantidad de material contaminante incluido en la muestra como de las edades relativas de muestra y contaminante. Por ello, los laboratorios de datación han implementado protocolos de rigurosos tratamien-

tos químicos para eliminar los contaminantes, y extraer aquellos compuestos que han demostrado ser más seguros.

Dado que este efecto debe ser evitado en todo momento, hay que ser especialmente escrupuloso a la hora de extraer, tratar, empaquetar y almacenar las muestras. Hay que seguir la máxima de “no añadir nada que el tiempo no haya hecho ya”. La presencia de consolidantes orgánicos (por ejemplo, pegamento que une fracciones de hueso), cenizas, papel (en forma de etiquetas o como envoltorio), son fuentes de carbono y, por ello, posible contaminantes.

3.5 Los niveles naturales de ^{14}C pueden medirse con la precisión y exactitud apropiada

La ecuación de cálculo de la edad carbono-14 convencional proporciona un valor puntual que se obtiene a partir de la medida de la cantidad de ^{14}C que contiene una muestra en comparación con la de un patrón estándar (STUIVER y POLACH, 1977). Sin embargo, ni las técnicas convencionales, mediante el recuento de las desintegraciones producidas, ni la medida directa empleando AMS permiten saber el contenido real de ^{14}C que posee la muestra o el patrón. Cualquier proceso de medida está sujeto a una variabilidad inherente que se puede minimizar hasta cierto nivel, pero no suprimir. Toda evaluación experimental lleva asociado un error que se determina mediante la repetición de la medida de la magnitud de interés. Este error no debe entenderse como sinónimo de fallo, sino como el nivel de incertidumbre que tiene la estimación realizada. Es importante señalar que la información analítica generada por los laboratorios se basan en resultados que inexcusablemente deben estar expresados mediante dos valores numéricos $M \pm N$, donde M representa la mejor estimación que el laboratorio hace de aquello que está determinando (en nuestro caso la edad de una muestra), y N expresa el nivel de duda que tiene tal estimación (COMPANÓ y RÍOS, 2002). El valor de M está relacionado con la exactitud como propiedad analítica, en cómo se ajusta la estimación obtenida al valor real. En datación, cómo se ajusta la edad calculada a la edad real de la muestra. Por el contrario, el valor de N está relacionado con la precisión analítica y proporciona un intervalo dentro del cual se espera encontrar, con una probabilidad determinada, aquello que se está midiendo.

Durante la medida de la actividad del ^{14}C de una muestra, los laboratorios se topan con el hecho de que la desintegración radiactiva es un proceso aleatorio, lo que implica que no hay modo de conocer cuándo un núcleo individual de ^{14}C va a desintegrarse. Sin embargo, si se monitoriza la desintegración de un gran número de núcleos en un espacio de tiempo relativamente largo, la distribución de los resultados puede describirse mediante una función de probabilidad denominada distribución normal o de Gauss. Esta función tiene forma de campana y está caracterizada por la media aritmética (μ), que corresponde al máximo de la función, y por la desviación estándar (σ), determinada por la posición de los puntos de inflexión. Es importante indicar que esta función cumple que:

1. El 68,2% de los valores están comprendidos en el intervalo $\mu \pm \sigma$
2. El 95,4% de los valores están comprendidos en el intervalo $\mu \pm 2\sigma$

Para calcular la desviación estándar asociada a una fecha, los laboratorios deben realizar una estimación de todas las fuentes de incertidumbre: la actividad de la muestra, del patrón y del fondo instrumental, fraccionamiento isotópico, condiciones de medida, etc. Hay que indicar que algunos estudios han demostrado que los laboratorios minusvaloran las fuentes de incertidumbre, aunque en general los ejercicios internacionales de comparación entre laboratorios consideran que las dataciones que éstos proporcionan son exactas y precisas.

Cuando se aplica el cálculo de la desviación estándar al valor obtenido en la ecuación 10, la edad carbono-14 convencional toma la forma de una distribución de Gauss, cuyo punto central es el valor obtenido por esta ecuación y su anchura es mayor o menor en función de la desviación estándar. De este modo, la edad carbono-14 convencional representa un intervalo de tiempo y no una fecha puntual. Por ejemplo, la fecha 4000 ± 50 años BP equivale al intervalo 4050 – 3950 años BP si tomamos una desviación estándar, o al intervalo 4100 – 3900 años BP si elegimos dos desviaciones estándar. En este caso, la edad C-14 convencional indica que, si no hay errores sistemáticos, la edad real de la muestra está en el primer intervalo con una probabilidad del 68,2% (1σ) o en el segundo con una probabilidad del 95,4% (2σ).

Cualquier fecha, como ejemplo de resultado de una técnica analítica, debe presentar las condiciones necesarias de **exactitud** (correspondencia con la fecha real de la muestra) y **precisión** (intervalo temporal en que existe probabilidad de que se halle la verdadera fecha) (MESTRES y NICOLÁS, 1997). Para conseguir los niveles exigibles de exactitud, los laboratorios de datación se someten periódicamente a actividades de control, tanto a nivel interno con la medida de muestras de control, como a nivel externo, mediante la participación en ejercicios de intercomparación. De estos últimos, los coordinados por la Universidad de Glasgow han englobado a más de 80 laboratorios de todo el mundo (SCOTT *et alii*, 2003a y b) y de ellos se deduce que, en general, los laboratorios son exactos y precisos en un amplio rango de materiales datados, no existiendo diferencias apreciables según el método de medida.

Sin embargo, hay que considerar que fechas con una buena exactitud y precisión pueden no satisfacer las necesidades del arqueólogo, sobre todo en periodos históricos. Hay casos en los que la fecha obtenida tiene un intervalo demasiado grande para poder situar el evento histórico dentro de unos rangos que se puedan asumir. Este caso se dio en la datación de la iglesia de Santa María de Melque (RUBINOS, 1999) Una de las cuestiones más interesantes que se pretendía determinar era si la construcción de la iglesia era visigoda o mozárabe, de la cual se había propuesto tres hipótesis: iglesia mozárabe de fines del s. IX o primer cuarto del s. X (GÓMEZ MORENO, 1919); iglesia de época visigoda, segunda mitad del s. VII (CABALLERO y LATORRE, 1982); o iglesia mozárabe de la segunda mitad del s. VIII (GAREN, 1992; CABALLERO 1994/5)

Para determinar la fecha de construcción de la iglesia se hicieron tres fechas carbono-14 (Tabla 1);

| MATERIAL | ZONA | CÓDIGO | EDAD C-14 años BP | EDAD CALIBRADA años cal AD ⁽¹⁾ |
|---------------------------------|---------|-----------|-------------------|---|
| Esparto | Iglesia | AA-33543 | 1308 ± 24 | 668 - 729 (62%) 731 - 773 (38%) |
| Esparto | Iglesia | UtC-3625 | 1290 ± 70 | 636 - 891 (100%) |
| Carbón vegetal | Sur | CSIC-1303 | 1273 ± 26 | 673 - 817 (99%) |
| COMBINACIÓN DE LAS TRES FECHAS: | | | | 846 - 855 (1%) 680 - 773 (100%) |

Tabla 1. Fechas realizadas para determinar el momento de construcción de la iglesia de Santa María de Melque (Puebla de Montalbán, Toledo) Se realizaron dos medidas sobre la cuerda de esparto y una más sobre carbón vegetal. Las tres fechas se combinaron para obtener una precisión mayor empleando el programa OxCal (RUBINOS, 1999)

las dos primeras, UtC-3625 y AA-33543, sobre la cuerda de esparto que formaba cuerpo con el estuco que decora el lado oeste del arco, entre el cimborio y la nave sur de la iglesia, y que servía para unir la decoración de la cara interior del arco con sus dos laterales exteriores. La tercera, CSIC-1303, sobre madera quemada tomada en un nivel de relleno con presencia de cerámica asociada. Los resultados obtenidos no permiten discernir totalmente entre las hipótesis planteadas, debido a que las fechas están a caballo entre las dos últimas hipótesis. Esto es así porque el perfil de la curva de calibración presenta un repunte en el intervalo de trabajo que hace muy difícil obtener un intervalo cronológico pequeño, una vez que se calibran las fechas. Sin embargo, ya permite desechar definitivamente la propuesta cronológica de Gómez Moreno. Para mejorar la resolución se realizó una combinación de las fechas calibradas, mediante el programa OxCal que, si bien reduce el intervalo en el que las fechas carbono-14 fijan la construcción del monasterio, no es lo suficiente para inclinarse por una de las dos hipótesis. Sólo nos permite decir que, a la vista de estos resultados, no parece factible que la construcción de la iglesia se realizara a finales del s. IX o principios del s. X, como defendía Gómez Moreno.

4- LÍMITES ARQUEOLÓGICOS DE LA TÉCNICA DE DATACIÓN

Además de los requisitos comentados, de naturaleza fisicoquímica, existe un requisito fundamental para que la técnica de datación por carbono-14 obtenga fechas que produzcan cronologías adecuadas:

Debe existir una relación conocida entre la muestra que se analiza y el evento o fenómeno que se quiere datar.

En 1965, JOHNSON ya indicaba que una fecha radiocarbónica "no data un yacimiento o edificio, un enterramiento o nivel de ocupación. La fecha se refiere a la muestra y es obligación del arqueólogo descubrir la relación real entre la muestra y el área o lugar de donde se tomó". Además de los requisitos de exactitud y precisión que toda fecha debe cumplir, existen otras dos características que la muestra debe tener para general cronologías fiables. La muestra debe ser **representativa** del contexto arqueológico que pretende datar, es decir, que el material mismo o

su presencia en el contexto arqueológico sea producto de la actividad humana del grupo que creó el contexto (asociación), y que su formación sea contemporánea al contexto arqueológico (sincronía) (MESTRES Y NICOLÁS, 1997).

Respecto a la asociación, WATERBOLK (1971 y 1983) enumeró una serie de proposiciones para mejorar la utilización de las fechas carbono-14 en arqueología. En la primera, dividía los tipos de muestras según el grado de certeza de su asociación en:

- A. Certeza plena: El propio objeto arqueológico proporciona la muestra sobre la que se realiza la datación (tronco de una canoa, rueda de una carreta, poste de una casa, material orgánico cocinado en un recipiente, etc.).
- B. Alta probabilidad: Existe una relación funcional directa entre el material orgánico que se va a medir y los hallazgos arqueológicos (ataúd carbonizado en una tumba, carbón en una urna, hogar en el suelo de una casa).
- C. Probabilidad: No existe una relación funcional directa entre el material orgánico que se va a medir y los materiales arqueológicos, pero la cantidad de material orgánico encontrado y el tamaño de los fragmentos sostiene la relación (concentración de carbón en un basurero o en una capa de ocupación).
- D. Probabilidad razonable: Como en el caso anterior, pero con fragmentos pequeños y dispersos (tierra carbonosa en una capa de ocupación, trocitos de carbón en un enterramiento).

Además de asegurar la certeza de la asociación, hay que considerar también la sincronía de la muestra datada. Una buena asociación no excluye la posibilidad de que el material a datar sea más antiguo que la formación del depósito donde se ha encontrado. Se debe insistir en el hecho de que esta técnica determina la edad de los materiales analizados, no la del estrato, objeto, edificio o grupo humano que la depositó. En general, todas las fechas radiocarbónicas proporcionan un *terminus post quem*, es decir, sólo da el momento en el que o después del que el estrato o la estructura fueron depositados. En este sentido, cuando se pretende datar una estructura concreta hay que buscar aquellas muestras que mejor cumplen este requisito. En una tumba, es mejor datar los huesos del individuo que el ataúd donde fue depositado, pero si existieran textiles u ofren-

das en forma, por ejemplo, de semillas, éstos darían una estimación mejor al estar cronológicamente más próxima al momento del enterramiento. Teniendo en cuenta esto, podemos considerar que existe falta de sincronía cuando se dan alguno de los siguientes episodios (BOWMAN, 1990):

- Datación de partes internas de troncos de elevada longevidad.
- Reutilización: Empleo de materiales previamente utilizados, por ejemplo en el empleo de maderas constructivas de edificios anteriores.
- Utilización retardada: Empleo de materiales que llevan un cierto tiempo fuera del ciclo de intercambio de carbono, por ejemplo, madera traída por las corrientes marinas, emplear turba o carbón mineral (hulla y antracita), o betún para preservar del agua productos manufacturados.
- Residualidad: Incorporación de material de fases anteriores de actividad en depósitos arqueológicos posteriores (reliquias o desechos no enterrados).

Un claro ejemplo de falta de sincronía constituye la datación de una viga procedente de la iglesia de San Pedro de la Nave, depositada en la actualidad en el museo de Zamora. La datación (CSIC-1318) proporcionó una fecha de 1880 ± 29 años BP, cuya calibración da un intervalo 69 – 230 cal AD (RODRÍGUEZ, ALONSO y CABALLERO, 1998). La comparación dendrocronológica de la muestra con otras maderas procedentes de la iglesia de San Juan de Baños (Palencia) ha permitido reducir el intervalo de la fecha a 100 – 206 d.C. Si el trabajo se hubiera quedado ahí, no hubiera aportado información alguna a la datación del edificio. Sin embargo, el estudio botánico de la pieza estima que, como mínimo, hay añadir 388 años, 278 años de duramen y 110 de albura, que se eliminaron durante el labrado de la viga, por lo que la fecha se sitúa realmente en el intervalo 488 – 594 d.C. (ALONSO, RODRÍGUEZ y RUBINOS, 2004). En este caso, la porción de la muestra analizada no da información sobre la construcción del edificio, sino sobre el momento de crecimiento del grupo de anillos del árbol, y es el estudio posterior el que permite discernir cuándo fue posiblemente empleada como material constructivo.

4.1 Madera y carbón vegetal

Un elevado porcentaje de las dataciones realizadas en arqueología se han hecho sobre mate-

riales procedentes de árboles, bien a partir de la madera del tronco o de las ramas, bien como madera quemada o carbonizada, en forma de carbón vegetal. Es un excelente material por su elevado contenido en carbono en forma de compuestos de elevado peso molecular, lo que permite realizar rigurosos tratamientos químicos que eliminan posibles contaminantes sin una pérdida acusada de la muestra original.

Para la datación, es importante considerar las partes internas de aquellas plantas que crecen formando anillos. Cada anillo representa el conjunto de células formadas durante un ciclo de crecimiento, normalmente un año. Los compuestos químicos de estas células se forman a partir de la fotosíntesis con el carbono presente en la atmósfera durante el periodo de crecimiento, por lo que reflejan la relación isotópica $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}/^{14}\text{C}$ de ese momento. Esto implica que cada anillo conserva las características isotópicas de su año de crecimiento, puesto que, además, se ha demostrado que no existe intercambio de sustancias entre los diferentes anillos. Gracias a esta característica, ha sido posible emplear series de anillos datados por dendrocronología para realizar la curva de calibración de las fechas obtenidas con carbono-14.

Por otro lado, la estructura en forma de anillos también tiene que tenerse en cuenta cuando se realiza la datación de especies de larga vida. Las diferentes especies de árboles tienen una vida media que oscila entre menos de 100 años en abedules y abetos, alrededor de 400 a 500 años en el caso de los robles, y varios milenios si se habla de secuoyas o pinos de Bristlecone. Así, existe una diferencia notable en las fechas obtenidas de una muestra próxima a la corteza y de otra situada en el corazón del tronco del árbol, puesto que la datación proporciona la edad de la porción elegida. Por ello, hay que ser cuidadoso a la hora de seleccionar las muestras y comprender que existe un desfase entre la fecha obtenida (evento radiocarbónico) y la fecha de utilización de la madera en el contexto arqueológico (evento humano). Para paliar en lo posible esta divergencia, se debe estimar cuántos anillos habría entre la muestra tomada y la corteza del árbol de partida, y sumar estos años al dato obtenido. Además, de este modo estaremos fijando el momento del corte del árbol, pero no el de su utilización, por ejemplo, como elemento constructivo.

4.2 Huesos

Los huesos están formado por una matriz mineral, en forma de hidroxapatita (calcio, magnesio y fosfatos) y una matriz orgánica, que contiene diversas proteínas, sobre todo colágeno (>90%). La medida se realiza únicamente sobre la parte proteica del mismo, puesto que los carbonatos presentes en la fracción mineral sufren procesos de interacción con el medio e intercambian carbono con la reserva desde el momento de la deposición hasta el de la recogida, y no proporcionan fechas veraces. El porcentaje de matriz orgánica en el hueso es pequeño, entre el 5 y el 15%, por lo que se requiere mayor cantidad de muestra para su procesamiento en el laboratorio. Su mayor desventaja es que la parte proteica se degrada con el tiempo, llegando incluso a desaparecer y haciendo imposible la medida.

El proceso de preparación del hueso para su datación es lento y bastante complicado. Por un lado, hay que eliminar la fracción inorgánica que no proporciona fechas fiables y aislar el conjunto de proteínas, que muchas veces se encuentra seriamente deteriorado. Existen una serie de parámetros que permiten discernir cuál es el estado de preservación del material orgánico el hueso. Tanto la relación carbono/nitrógeno como el porcentaje de colágeno obtenido de la muestra permite cuantificar este estado (VAN KLINKEN, 1999).

Cuando un hueso se carboniza, la materia orgánica que poseía se destruye, por lo que no puede datarse. Sin embargo, si el hueso ha sido sometido a temperaturas superiores a los 600 °C (hueso cremado) es posible realizar la datación (LANTING, AERTS-BIJMA y VAN DER PLICHT, 2001) En estos casos, la materia orgánica ha sido destruida por completo y el hueso presenta un color blanco. En el proceso de incineración la bioapatita ha recristalizado formando cristales de carbonato más grandes y con mejor estructura. Estos cristales no sufren procesos de alteración con el tiempo y se pueden datar mediante AMS.

Por tanto, si su conservación es adecuada, es un excelente material para la datación puesto que suele estar perfectamente relacionado con el hecho histórico a datar. Existe una asociación inmejorable, al datar la persona o animal en concreto y su sincronía apenas difiere unos pocos años al momento de la muerte del individuo, pues

la proteína del hueso está formada por carbono recolectado a lo largo de la vida del sujeto.

4.3 Otros materiales orgánicos

De origen animal como pelo, lana y piel, o vegetal como cestería, semillas, grano, etc. Están bien asociados al hecho arqueológico puesto que, salvo reutilización muy improbable, son materiales asociados a los grupos humanos. Además, sus contenidos en ^{14}C corresponden a un solo año, por lo que la sincronía es total.

4.4 Conchas

Material de cómoda utilización en el laboratorio pero de difícil interpretación, ya que la variación de la concentración del isótopo en el océano se rige por distintas pautas a aquellas establecidas en tierra, por lo que hay que precisar para cada área el modelo de intercambio de masas de agua. Como ya se ha indicado, las conchas proporcionan edades alrededor de 400 años más antiguas que otro tipo de materiales del mismo contexto arqueológico. Como ventaja, cabe destacar que normalmente se obtienen bien asociados a grupos humanos concretos.

4.5 Otros materiales

En principio, cualquier material con contenido en carbono es susceptible de datación, siempre y cuando se conozca la procedencia de este carbono y los procesos fisicoquímicos que han conducido a su formación. Gracias a la técnica AMS, se han podido datar los pigmentos orgánicos presentes en pinturas prehistóricas, restos de comida en cerámica, objetos de gran valor (tallas de madera, objetos tallados en hueso, papel de documentos históricos, etc.) y un largo etcétera.

4.6 Consideraciones arqueológicas en la toma de muestras

Teniendo en cuenta todos los condicionantes anteriormente descritos, hay una serie de pasos a seguir para evaluar la aplicación de este método de datación a un problema cronológico concreto en arqueología:

1. Definir el evento arqueológico (humano) de interés. Los arqueólogos deben definir qué evento humano pasado va a ser datado y con qué fina-

lidad, estimando con qué precisión debe ser determinada la fecha (cuál debe ser la longitud del intervalo de la fecha adecuado para interpretarla correctamente). Este evento puede ser de corta duración (incendio, manufactura de un objeto, erupción volcánica, etc.), o de una longitud temporal mayor (periodo de depósito de un estrato o de ocupación de una aldea).

2. Considerar si el método de datación puede proporcionar una fecha adecuada para responder la cuestión planteada. Para cuestiones arqueológicas, este método suele ser adecuado, pero existen casos en los que no puede dar una adecuada precisión cuando se dan sucesivos eventos de muy corta duración.
3. Reconocer cuál es el tipo de evento radiocarbónico que proporciona cada tipo de muestra.
4. Determinar cómo se asocia el evento ^{14}C con el evento humano, puesto que debe existir una conexión conocida que una ambos eventos. Algunos ejemplos permiten ilustrar cómo debe ser esta asociación. Si se talla una flecha a partir de una rama de unos pocos años de crecimiento, el evento radiocarbónico (el crecimiento de la rama) está unido al evento humano (talla de la flecha). De igual modo, el carbón vegetal producido a partir de ramas jóvenes en un hogar estará bien asociado con su ocupación. Sin embargo, el tronco de un árbol empleado en una construcción puede haber sido reutilizado de una construcción anterior. De igual modo, el carbón vegetal persiste en el suelo durante cientos de años, por lo que su presencia no indica siempre una ocupación humana sino que puede ser, simplemente, un incendio natural.

Normalmente, los materiales procedente de animales como huesos, conchas suelen estar bien asociados con el evento humano. Si se encuentran estos materiales en un hogar hay que considerar que, aunque reflejan el momento de vida de sus animales, este no difiere apenas del momento de su consumo. Por el contrario, esta diferencia puede ser mayor y debe cuantificarse si estos materiales se encuentran formando parte de tallas u ornamentos.

El empleo de la técnica AMS permite seleccionar más rigurosamente el material o la porción del mismo que mejor cumple el requisito de asociación con el evento humano. Pero de igual modo, hay que ser cautelosos si al poder datar

cantidades muy pequeñas se pierda la conexión obligada entre evento radiocarbónico y arqueológico.

5. La naturaleza del evento radiocarbónico debe ser tal que satisfaga las hipótesis del método, en particular aquella que implica que el carbono proceda de la atmósfera contemporánea a la muestra. Este es el caso de los tejidos de las plantas (madera, carbón, semillas, etc.) que obtienen su carbono de la atmósfera a través de la fotosíntesis, pero no así de los huesos o las conchas, puesto que en ellos el carbono se recibe de la dieta del animal. A pesar de ello, los animales herbívoros incorporan su carbono de la hierba, lo que implica un retraso mínimo, y los carnívoros, que se alimentan de los anteriores, con un retraso algo mayor.

Por el contrario, los animales marinos no toman su carbono directamente de la atmósfera sino del océano, con los problemas de circulación del carbono que se han comentado. El efecto de la reserva marina obliga a realizar una corrección para obtener fechas radiocarbónicas que desafortunadamente no es fácil de realizar, puesto que la circulación oceánica es diferente en distintos puntos de los océanos. Semejante situación se da en los organismos de agua dulce que toman su carbono de lagos y ríos, donde existen aportes de carbonatos de edad geológica.

Una situación incluso más compleja surge en la datación de humanos que habitan en zonas costera, al obtener sus alimentos tanto del mar como de la tierra. En estos casos es preciso determinar que cantidad de carbono procede de cada una de las reservas. Afortunadamente, en algunas circunstancias se pueden realizar aproximaciones a partir del valor del fraccionamiento isotópico del hueso datado.

5- UTILIZACIÓN DE LA ESTADÍSTICA BAYESIANA EN DATACIÓN

A principios de los años 90, gracias a la potencia de cálculo alcanzada por el empleo de los ordenadores, comenzaron a aparecer estudios que empleaban la estadística bayesiana en la interpretación de fechas radiocarbónicas (BUCK *et alii*, 1991; BUCK, LITTON y SMITH 1992; BUCK, LITTON y SCOTT, 1994; BUCK, CAVANAGH y LITTON, 1996) A partir de estos estudios, se des-

arrollaron programas que permitían obtener cronologías empleando esta técnica, como OxCal (BRONK RAMSEY, 1995 y 2001), BCal (BUCK, CHRISTEN y JAMES, 1999) y DateLab (JONES y NICHOLLS, 1999).

No es nuestra intención hacer una explicación exhaustiva de esta técnica estadística, y remitimos al lector a bibliografía más específicas (BUCK, CAVANAGH y LITTON, 1996; BAYLISS y BRONK RAMSEY, 2004; BRONK RAMSEY, 2009) e intentaremos seguir la senda desarrollada por BAYLISS (2009), cuyo artículo recomendamos a todos aquellos que quieran conocer ejemplos de utilización de esta técnica, así como del modelo de cronologías que el *English Heritage* ha implementado en su proyectos arqueológicos que poseen dataciones por carbono-14.

La estadística bayesiana se basa en el teorema que enunció Thomas Bayes (1702-171), sobre la probabilidad de un suceso condicionado por la ocurrencia de otro suceso. En esencia, los seguidores de la estadística tradicional sólo admiten probabilidades basadas en experimentos repetibles y que tengan una confirmación empírica mientras que los llamados estadísticos bayesianos permiten probabilidades subjetivas. El teorema puede servir entonces para indicar cómo debemos modificar nuestras probabilidades subjetivas cuando recibimos información adicional de un experimento. La estadística bayesiana demuestra su utilidad en ciertas estimaciones basadas en el conocimiento subjetivo a priori y en el hecho de permitir revisar esas estimaciones en función de la evidencia empírica. De este modo, como indica BAYLISS (2009), la "cronología objetiva" de Renfrew se ve contaminada por las opiniones arqueológicas conocidas de forma previa a la realización de las dataciones.

Los estimadores "a priori" son aquellos conocimientos que se tienen del yacimiento (estratigrafía, tipología, monedas, crecimiento de anillos de árboles, etc.). Incluyendo estos datos en un modelo cronológico durante la calibración de las fechas radiocarbónicas, podemos obtener distribuciones de probabilidad de las fechas, ya calibradas, que incorporan estos condicionantes, que a partir de ahora no podrán ser consideradas como evidencias científicas independientes.

Dada la importancia que en el desarrollo de la cronología empleando estadística bayesiana tienen los estimadores "a priori" es crucial insistir en

que esta información debe conocerse de forma previa a la realización de las dataciones. El caso más paradigmático es la estratigrafía, donde se establece una relación entre las distintas unidades estratigráficas, y, de este modo, entre las muestras que en ellas aparecen. Aquellas muestras que aparecen en niveles superiores deben normalmente ser más modernas que las que se encuentran en los niveles inferiores. Así, resulta fundamental establecer de un modo indiscutible que la muerte y deposición del material que va a ser analizado ha sido de forma coetánea a la formación del contexto en el que se halla. Más que nunca, conviene recordar que la datación por carbono-14 se realiza sobre materiales y, por tanto, solo determina la edad de éstos, no de los contextos en los que se encuentran. No solo se requieren muestras de vida corta e identidad única, sino que se precisan datos incuestionables sobre la deposición de los mismos en el depósito arqueológico.

Además de este tipo de relaciones, se incluye en el modelo cronológico todos aquellos datos susceptibles de aportar información cronológica: agrupación de fechas por fases de actividad arqueológica, fechas que son el origen o la terminación de una secuencia, fechas que están ordenadas dentro de una secuencia, eventos puntuales incluidos entre dos fases de actividad, y un largo etcétera.

Para realizar modelos cronológicos empleando esta técnica, es preciso formular un modelo matemático. La cronología del yacimiento ha de ser dividida en sucesos, es decir, en puntos individuales dentro de una escala temporal continua y que ocurren en un periodo temporal bien definido. Se pueden modelar procesos con mayor continuidad en el tiempo, pero deben estar descritos en función de sucesos. Por ejemplo, una fase de actividad arqueológica se limita mediante un evento inicial y otro final (BRONK RAMSEY, 2009).

En estudios cronológicos existen dos tipos de información: fechas de calendario, que sitúan los sucesos en escalas de tiempo absolutas (reinado, documento fechado, fechas obtenidas por métodos de datación); y fechas relativas, que son aquellas procedentes de la estratigrafía, estudio de los materiales, agrupamiento de unidades estratigráficas en fases ordenadas o no, etc. La primera suele referirse normalmente a fechas de una muestra en concreto, mientras que las fechas relativas generan relaciones más complejas entre

los momentos en los que se desarrollan los eventos del yacimiento en cuestión. Por esta razón, al aplicar la estadística bayesiana las fechas de calendario se emplean como los intervalos temporales de probabilidad, por ejemplo, una fecha carbono-14 calibrada, mientras que las fechas relativas se muestran como las probabilidades *a priori*.

Pongamos como ejemplo la datación de un tronco de un árbol. Las fechas de calendario serán las dataciones obtenidas en distintos puntos del mismo. Las muestras se han tomado de tal modo que exista una diferencia de años conocida entre ellas (X años), mediante el estudio de los anillos del tronco. Así, entre ellas existirá una relación cronológica conocida, de modo que la muestra más interna debe ser X años más antigua que la siguiente, y ésta otros tanto respecto a la siguiente, y así sucesivamente. De modo que cuando realizamos la calibración de las fechas carbono-14, cada una de las cuales se ha obtenido de una medida independiente en el laboratorio, incluimos esta información obligando a que las distribuciones de probabilidad tenga la diferencia de X años. Este empleo de la estadística bayesiana fue uno de los primeros ejemplos empleados en la literatura, con el que intentaba minimizar el efecto que los *wiggles* de la curva de calibración producían en las fechas, alargando en exceso los intervalos de probabilidad. Existen abundantes ejemplos en la literatura (ALONSO, RODRÍGUEZ y RUBINOS, 2004; FRIEDRICH *et alii*, 2006) (Figura 2 y Tabla 2).

La importancia de determinar aquellas relaciones temporales que van a incidir sobre el modelo bayesiano incide en las decisiones sobre que muestras se deben datar. Puesto que no todas las muestras obtenidas ni todas las unidades estratigráficas definidas pueden proporcionar informa-

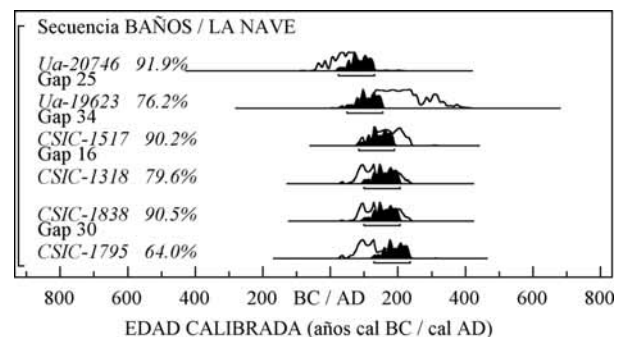


Fig. 2. Resolución gráfica del ajuste por wiggle matching realizado sobre la viga de San Pedro de la Nave y el dintel exterior de la iglesia de San Juan de Baños (ALONSO, RODRÍGUEZ y RUBINOS, 2004).

| REFERENCIA | EDAD C-14 (años BP) | EDAD CALIBRADA (años cal BC / cal AD) | INTERVALO (años cal AD) | CONFIANZA |
|-----------------------------------|-------------------------|--|----------------------------|--------------|
| Ua-20746 San Juan de Baños | 1955 ± 40 | 42 – 8 cal BC (10,9%) 3 cal BC – 129 cal AD (84,5%) | 25 – 131 (95,4%) | 91,9% |
| | Diferencia: 25 años | | | |
| Ua-19623 San Juan de Baños | 1820 ± 60 | 69 – 346 cal AD (94,4%) 370 – 380 cal AD (1,0%) | 50 – 156 (95,4%) | 76,2% |
| | Diferencia: 34 años | | | |
| CSIC-1517 San Pedro de la Nave | 1850 ± 23 | 84 – 104 cal AD (6,6%) 124 – 239 cal AD (88,8%) | 84 – 190 (95,4%) | 90,2% |
| | Diferencia: 16 años | | | |
| CSIC-1318 San Pedro de la Nave | 1880 ± 29 | 69 – 230 cal AD (95,4%) | 100 – 206 (95,4%) | 79,6% |
| | Diferencia: 0 años | | | |
| CSIC-1838 San Juan de Baños | 1873 ± 27 | 76 – 228 cal AD (95,4%) | 100 – 206 (95,4%) | 90,5% |
| | Diferencia: 30 años | | | |
| CSIC-1795 San Juan de Baños | 1883 ± 32 | 64 – 232 cal AD (95,4%) | 130 – 236 (95,4%) | 64,0% |
| | CONFIANZA TOTAL: | | | 60,0% |

Tabla II. Ejemplo de utilización de estadística bayesiana en la interdatación de la viga de la iglesia de San Pedro de la Nave y del dintel exterior de la iglesia de San Juan de Baños (ALONSO, RODRÍGUEZ Y RUBINOS, 2004). Cada muestra se tomó con una diferencia determinada de años respecto de la muestra anterior, excepto las muestras CSIC-1318 de La Nave y la muestra CSIC-1839 de Baños que eran, dendrocronológicamente, iguales. Se empleó la técnica denominada *wiggle matching* a partir del programa OxCal 3.5, opción D_Sequence. Una vez incorporada la información *a priori*, que en este caso el número de anillos de diferencia entre una muestra y otra, se obtienen unos intervalos cronológicos sensiblemente más precisos. La resolución gráfica se puede ver en la Figura 2.

ción adecuada para obtener un modelo cronológico válido, hay que seleccionar cuidadosamente qué interrogantes se pueden despejar y emplear los recursos en ellos. Para ello hay que establecer un protocolo de actuación coherente con los datos recogidos y con los que nos pueden dar las dataciones radiocarbónicas. En este sentido, vale la pena observar el método de trabajo sobre cronología basado en estadística bayesiana implementado por el *English Heritage* en la última década. Los pasos, abreviados, son (BAYLISS, 2009):

1. Construir un modelo de la cronología del yacimiento:
 - a. Definir claramente los objetivos del programa de datación (inicio, duración, conclusión, etc.)
 - b. Establecer la información "a priori" disponible.
 - c. Seleccionar las muestras susceptibles de datación siguiendo los criterios de asociación y sincronía.
 - d. A través de la matriz del yacimiento, establecer relaciones entre muestras para obtener secuencias de datación relativas.
 - e. Identificar grupos de muestras significativos con los periodos de actividad.
2. Realizar múltiples simulaciones matemáticas de las fechas radiocarbónicas del grupo de muestras elegidas. Para ello:

- a. Considerar la desviación estadística de la fecha como la que obtiene habitualmente el laboratorio donde se realizan las dataciones para ese tipo de material y periodo.
- b. Incluir la información "a priori" desarrollada en la fase anterior.

El resultado más importante de esta simulación es identificar qué problemas arqueológicos no van a poder ser resueltos con las muestras, estratigrafía y otra información cronológica disponible. Gracias a ello, permite concentrar los recursos en aquellas cuestiones que sí pueden ser datadas de forma efectiva.

3. Enviar las muestras para su datación.
4. Reemplazar las simulaciones por los resultados obtenidos. En ese momento aparecen los problemas, puesto que las simulaciones se realizaron sobre valores ideales y no reales.
5. Identificar los errores cometidos (en el laboratorio, en la toma de muestra, estratigráficos, de relación muestra-evento, etc.)
6. Realizar nuevas simulaciones para obtener un nuevo modelo cronológico y enviar nuevas muestras para su datación.
7. Repetir el ciclo tantas veces como sea posible.
8. Construir un modelo cronológico creíble en función de los resultados obtenidos y publicar los resultados.

6- CONCLUSIONES

Para emplear fechas radiocarbónicas con plena seguridad en contextos históricos, hay que conseguir un elevado grado de cumplimiento de todos los requisitos metodológicos que tiene esta técnica. Mientras que es misión de los arqueólogos elegir aquellos materiales que garanticen su asociación y sincronía al evento histórico que se quiere determinar, es necesario exigir a los laboratorios de datación que obtengan fechas de gran calidad técnica, en términos de exactitud y precisión. Ambos procesos deben estar incluidos dentro de un protocolo general de actuación, que involucre a ambos estamentos en el mismo nivel. Sólo con el conocimiento de qué puede aportar la técnica y cuáles son sus limitaciones en términos de precisión y calibración, podrá el arqueólogo definir qué cuestiones cronológicas puede abordar con esta técnica y cuales no, consiguiendo una mejor gestión de sus recursos. De igual modo, saber los problemas que presenta un yacimiento permite al laboratorio encaminar sus análisis en el mejor camino y asesorar al arqueólogo en la búsqueda de soluciones cronológicas a su modelo explicativo.

Todas estas premisas enlazadas dentro de una metodología de trabajo van a permitir extraer la mayor cantidad posible de la información que se encuentra en un yacimiento. Así, empleando la estadística bayesiana en la rutina de trabajo se pueden conseguir fechas más precisas, que se ajusten mejor al marco temporal de estudio, situación muy necesaria en estudios sobre yacimientos históricos.

5. BIBLIOGRAFÍA

- ALONSO, F., RODRÍGUEZ, E. y RUBINOS, A.
2004 Datación de madera constructiva en San Pedro de la Nave (Zamora) y su interdatación con San Juan de Baños (Palencia). *La iglesia de San Pedro de la Nave (Zamora)*. Instituto de Estudios Zamoranos "Florián de Ocampo". Zamora.
- ARNOLD, J.R. y LIBBY, W.F.
1949 Age determinations by radiocarbon content: checks with samples of known age. *Science* 110, 678-680.
- BOWMAN, S.
1990 *Radiocarbon dating*. British Museum Publications Ltd. Londres.
- BAYLISS, A.
2009 Rolling out revolution: using radiocarbon dating in archaeology. *Radiocarbon* 51-1, 123-147.
- BAYLISS, A. y BRONK RAMSEY, C.
2004 Pragmatic Bayesians: a decade integrating radiocarbon dates into chronological models. *Tools for Constructing Chronologies: Tools for Crossing Disciplinary Boundaries*. Springer. Londres, 25-41.
- BRONK RAMSEY, C.
1995 Radiocarbon calibration and analysis of stratigraphy: The OxCal program. *Radiocarbon* 37-2, 425-430.
2001 Development of the radiocarbon calibration program. *Radiocarbon* 43-2A, 355-363.
2009 Bayesian analysis of ¹⁴C dates. *Radiocarbon* 51-1, 337-360.
- BUCK, C.E., LITTON, C.D. y SMITH, A.F.M.
1992 Calibrations of the radiocarbon results pertaining to related archaeological events. *Journal of Archaeological Sciences* 19-5, 497-512.
- BUCK, C.E., LITTON, C.D. y SCOTT, E.M.
1994 Making the most of radiocarbon dating: some statistical considerations. *Antiquity* 68-259, 252-263.
- BUCK, C.E., CAVANAGH W.G. y LITTON, C.D.
1996 *Bayesian approach to Interpreting Archaeological Data*. Wiley. Chichester.
- BUCK, C.E., CHRISTEN, J.A. y JAMES
1999 Bcal: an on-line Bayesian radiocarbon calibration tool. *Internet Archaeology* 7. http://intarch.ac.uk/journal/issue7/buck_index.html. Acceso sept. 2009.
- BUCK, C.E., KENWORTHY, J.B., LITTON, C.D. y SMITH, A.F.M.
1991 Combining archaeological and radiocarbon information: A Bayesian approach to calibration. *Antiquity* 65-249, 808-821.
- CABALLERO, L.
1994/5 Un canal de transición de lo clásico en la Alta Edad Media. Arquitectura y escultura de influjo omeya en la Península Ibérica entre mediados del s. VIII e inicios del s. X. *Al-Qantara* 15, 321-348 y 16, 107-124.
- CABALLERO ZOREDA, L. Y LATORRE MACARRÓN, J.I.,
1982 Santa María de Melque y la arquitectura visigoda. *II Reunión d'Arqueologia Paleocristiana Hispànica* (Montserrat 1978) Barcelona, 303-32.
- COMPAÑÓ, R. y RÍOS, Á.
2002 *Garantía de la calidad en los laboratorios analíticos*. Editorial Síntesis. Madrid.
- CRAIG, H.
1953 The geochemistry of the stable carbon isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 3, 53-92.
- DAMON, P.E., LERMAN, J.C. y LONG, A.
1978 Temporal fluctuations of atmospheric ¹⁴C: Casual factors and implications. *Annual Review of Earth and Planetary Science* 6, 457-494.

- DE VRIES, H.
1958 Variations in concentration of radiocarbon with time and location on Earth. *Proceedings, Nederlandse Akademie van Wetenschappen, Series B* 61:1.
- FRIEDRICH, W.L., KROMER, B., FRIEDRICH, M., HEINEMEIER, J., PFEIFFER, T. y TALAMO, S.
2006 Santori eruption radiocarbon dated to 1627 – 1600 B.C. *Science* 312, 548.
- GAREN, S.
1992 Santa María de Melque and Church Construction under Muslim Rule. *Journal of the Society of Architectural Historians* 51-3, 208-305.
- GREY, D.C. y DAMON, P.E.
1970 Sunspots and radiocarbon dating in the Middle Ages. *Scientific methods in medieval archaeology*. University of California Press. Berkeley, 167-182.
- GOMEZ MORENO, M.
1919 *Iglesias mozárabes. Arte español de los siglos IX a XI*. Centro de Estudios Históricos, Madrid (Patronato de la Alhambra, Granada, 1975) 862-930.
- HUGHEN, K.A., BAILLIE, M.G.L., BARD, E., BECK, J.W., BERTRAND, C.J.H., BLACKWELL, P.G., BUCK, C.E., BURR, G.S., CUTLER, K.B., DAMON, P.E., EDWARDS, R.L., FAIRBANKS, R.G., FRIEDRICH, M., GUILDERSON, T.P., KROMER, B., MCCORMAC, G., MANNING, S., RAMSEY, C.B., REIMER, P.J., REIMER, R.W., REMMELE, S., SOUTHON, J.R., STUIVER, M., TALAMO, S., TAYLOR, F.W., VAN DER PLICHT, J. y WEYHENMEYER, C.E.
2004 Marine04 - marine radiocarbon age calibration, 0 – 26 kyr BP. *Radiocarbon* 46-3, 1059-1086.
- JOHNSON, F.
1965 The impact of radiocarbon dating upon archaeology. *Proceedings of the Sixth International Conference Radiocarbon and Tritium Dating*. Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information. Springfield. 762-780.
- JONES, M. Y NICHOLLS, G.
1999 New radiocarbon calibration software. *Radiocarbon* 44-3, 663-674.
- LIBBY, W.F.
1973 Radiocarbon dating, memories and hopes. *Proceedings of the Eighth International Radiocarbon Conference*. Royal Society of New Zealand. Wellington. xxvii-xliii.
- LANTING, J.N., AERTS-BIJMA, A.T. y VAN DER PLICHT, J.
2001 Dating of cremated bones. *Radiocarbon* 43-2A, 249-254.
- MCCORMAC, F.G., HOGG, A.G., BLACKWELL, P.G., BUCK, C.E., HIGHAM, T.F.G. y REIMER, P.J.
2004 SHCal04 - Southern Hemisphere calibration, 0 – 11.0 cal kyr BP. *Radiocarbon* 46-3, 1087-1092.
- MESTRES, J.S. y NICOLÁS, J.F.
1997 Contribución de la datación por radiocarbono al establecimiento de la cronología absoluta de la prehistoria menorquina. *Caesar Augusta* 73, 327-341.
- REIMER P.J., BAILLIE, M.G.L., BARD, E., BAYLISS, A, BECK, J.W., BERTRAND, C., BLACKWELL, P.G., BUCK, C.E., BURR, G., CUTLER, K.B., DAMON, P.E., EDWARDS, R.L., FAIRBANKS, R.G., FRIEDRICH, M., GUILDERSON, T.P., HUGHEN, K.A., KROMER, B., MCCORMAC, F.G., MANNING, S., BRONK RAMSEY, C., REIMER, R.W., REMMELE, S., SOUTHON, J.R., STUIVER, M., TALAMO, S., TAYLOR, F.W., VAN DER PLICHT, J., y CE WEYHENMEYER, C.E.
2004 IntCal04 Terrestrial Radiocarbon age calibration, 0-26 cal Kyr BP. *Radiocarbon* 46-3, 1029-1058.
- RODRÍGUEZ, E., ALONSO, F. y CABALLERO, L.
1998 Datación de una viga de la iglesia de San Pedro de la Nave (Zamora). *Archivo Español de Arqueología* 71, 283-294.
- RUBINOS A.
1999 Datación por carbono-14 del yacimiento de Santa María de Melque. *Archivo Español de Arqueología* 72 179-180, 220-226.
- RUBINOS, A., FÁBREGAS, R., ALONSO, F. y CONCHEIRO, A.
1999 Las fechas C-14 del castro de O Achadizo (Boiro, A Coruña): problemática de la datación de conchas marinas. *Trabajos de Prehistoria* 56-1, 147-155.
- SCOTT, E.M., COOK, g., HARKNESS, D., NAYSITH, P. y BRYAN, C.
2003a The Fourth International Radiocarbon Intercomparison (FIRI). *Radiocarbon* 45-2, 135-291.
- SCOTT, E.M., COOK, g., HARKNESS, D. y NAYSITH, P.
2003b The Third International Radiocarbon Intercomparison (TIRI). *Radiocarbon* 45-2, 293-408.
- STUIVER, M. y POLACH, H.
1977 Discussion: Reporting of ¹⁴C data. *Radiocarbon* 19-3, 355-363.
- STUIVER, M. y QUAY, P.D.
1981 Atmospheric ¹⁴C changes resulting from fossil fuel CO₂ release and cosmic rays flux variability. *Earth and Planetary Science Letters* 53, 349-362.
- STUIVER, M. y KRA, R.
1986 Calibration issue. *Radiocarbon* 28-2B.
- STUIVER, M. y BRAZIUNAS, T.
1993 Modeling atmospheric ¹⁴C influences and ¹⁴C ages of marine samples to 10,000 BC. *Radiocarbon* 35-1, 137-89.
- STUIVER, M. y REIMER, P.J.
1993 Extended ¹⁴C data base and revised CALIB 3.0 ¹⁴C calibration program. *Radiocarbon* 35-1, 215-230.
- STUIVER, M y VAN DER PLICHT, J.
1998 Calibration issue. *Radiocarbon* 40-3
- STUIVER, M., LONG, A. y KRA, R.
1993 Calibration 1993. *Radiocarbon* 35-1

STUIVER, M., PEARSON G.W. y BRAZIUNAS, T.

1986 Radiocarbon age calibration of marine samples back to 9000 cal yr BP. *Radiocarbon* 28-2B, 980-1021.

SUESS, H.E.

1955 Radiocarbon concentration in modern wood. *Science* 122, 415-417.

1967 Bristlecone pine calibration of the radiocarbon time scale from 4100 B.C. to 1500 B.C. *Radiocarbon dating and methods low-level counting*. International Atomic Energy Agency. Viena, 143-150.

TAYLOR, R.E.

1978 Radiocarbon dating: An archaeological perspective. *Archaeological chemistry II*. American Chemical Society. Washington D.C., 33-69.

VAN DER PLICHT, J.

1993 The Groningen radiocarbon calibration program. *Radiocarbon* 35-1, 231-237.

VAN KLINKEN, G.J.

1999 Bone collagen quality indicators for paleodietary and radiocarbon measurements. *Journal of Archaeological Science* 26, 687-695.

VAN STRYDONCK, M., NELSON, D.E., CROMBÉ, P., BRONK RAMSEY, C. SCOTT, E.M., VAN DER PLICHT, J. y HEDGES, R.E.M.

1999 What's in a ¹⁴C date. Rapport du groupe de travail: les limites de méthode du carbone 14 appliquée a l'archéologie. *3rd International Symposium ¹⁴C and Archaeology. Mémoires de la Société Préhistorique Française XXVI*, 443-448.

WATERBOLK, H.T.

1971 Working with radiocarbon dates. *Proceedings of the Prehistoric Society* 37, 5-33.

1983 Ten guidelines for the archaeological interpretation of radiocarbon dating. *¹⁴C and Archaeology*. Council of Europe. Strasbourg, 17-27.

