

# La datació per radiocarboni. Una visió actual

JOAN S. MESTRES I TORRES

## INTRODUCCIÓ

La datació per radiocarboni es va gestar durant la segona meitat de la dècada dels anys 40 i l'any 1949 el seu descobridor, el químic nord-americà Willard F. Libby, va publicar els resultats d'un treball experimental dissenyat per a la validació del mètode de datació que ell proposava (Arnold i Libby, 1949). Aquest experiment consistia en l'aplicació del mètode a un conjunt de materials l'edat dels quals es coneixia històricament. Els resultats, dins la incertesa de la mesura, van ser compatibles amb la hipòtesi bàsica en què basava el seu mètode de datació i aquest va ser aleshores àmpliament acceptat. Posteriorment, la millora de les tècniques de mesura i l'acumulació de dades van descobrir successivament petites desviacions atribuïbles a causes de naturalesa diversa. Per aquest motiu, la datació per radiocarboni se sol explicar d'una manera historicista com una successió de descobriments, cadascun dels quals afegeix una nova complicació al senzill esquema inicial que va imaginar Libby. En aquest article s'intenta mostrar que tots aquests coneixements es poden organitzar d'una manera coherent, la qual cosa atorga a la datació per radiocarboni el caràcter de disciplina.

## 1. ELS FONAMENTS DE LA DATACIÓ PER RADIOCARBONI

La datació per radiocarboni és possible gràcies a les característiques químiques específiques de l'element carboni que li confereixen la condició d'element clau de la bioquímica i també la condició d'un element geoquímicament particular a causa de la seva ubiqüitat a l'escorça terrestre. El carboni a la Terra està constituït bàsicament per dos isòtops estables en les següents proporcions:

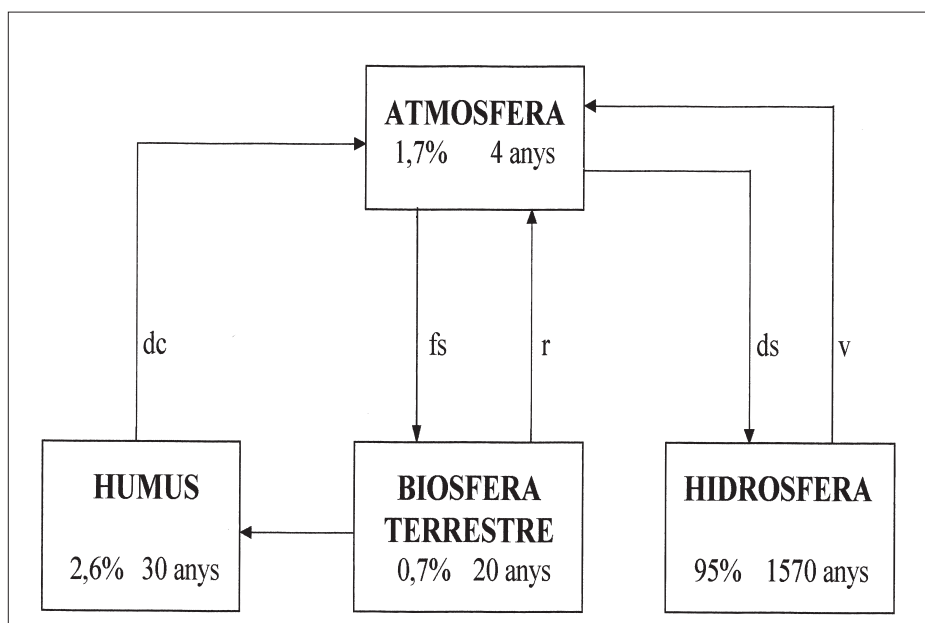


Figura 1. Representació esquemàtica dels compartiments que integren el dipòsit de bescanvi del carboni i les vies de transferència del carboni entre els diversos compartiments: fs, fotosíntesi; r, respiració; dc, descomposició; ds, dissolució; v, volatilització. Sota el nom de cada compartiment s'indica, expressada percentualment, la fracció total del carboni del DBC continguda en cadascun d'ells i el període de residència, expressat en anys.

$^{12}_6\text{C}$	98,9%
$^{13}_6\text{C}$	1,1%

Aquest element a escala planetària 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 com els dipòsits de petroli, 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 implicacions importants.

El carboni que es troba en estat d'equilibri dinàmic constitueix el **dipòsit de bescanvi del carboni (DBC)** el qual està format per un conjunt de compartiments no aïllats sinó que es troben en equilibri dinàmic entre si pel que fa al bescanvi de carboni. Els compartiments que integren el DBC són els següents que es mostren a la figura 1 en forma de diagrama de blocs:

**L'atmosfera**, on el carboni es troba a l'estat químic 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 es troba com a diòxid de carboni i ió hidrogen-carbonat dissolt a l'aigua.

Que aquests compartiments estiguin en equilibri dinàmic entre si respecte al bescanvi de carboni significa que aquest element contínuament transita dels uns als altres i que la quantitat total de carboni continguda en cadascun es manté sensiblement constant en el transcurs del temps. El trànsit continu de carboni entre els distints compartiments que integren el DBC 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— assimilen i incorporen el carboni atmosfèric als seus teixits a través de la fotosíntesi; dels vegetals, el carboni passa als animals —organismes heteròtrofs— per ingestió. Una part del carboni assimilat pels éssers vivents és restituïda 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, a través d'una contínua degradació dels compostos que l'integren, torna a l'atmosfera com a diòxid de carboni. El bescanvi de carboni entre l'atmosfera i la biosfera s'esdevé per dissolució del diòxid de carboni atmosfèric a les aigües oceàniques, intercanvi de carboni entre aquest i l'ió hidrogen-carbonat dissolt i retorn a l'atmosfera com a diòxid de carboni.

Cadascun dels compartiments que integren el DBC està caracteritzat per un **període de residència** del carboni en el seu si; aquest paràmetre representa el temps necessari perquè en un compartiment entri o surti una quantitat de carboni igual a la que conté i pot interpretar-se com el temps que ha de transcórrer per a la renovació de tot el carboni contingut en el compartiment. La figura 1 mostra esquemàticament els distints compartiments que integren el DBC, les vies de transferència del carboni entre els distints compartiments, la fracció del carboni total continguda en cada compartiment i els respectius períodes de residència expressats en anys. Pot observar-se que la reserva de carboni més gran del DBC es troba a la hidrosfera i, consegüentment, el període de residència del carboni en aquest compartiment és el més gran de tots els compartiments. Això, com es veurà més endavant, té implicacions molt importants en la datació per radiocarboni.

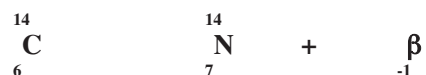
Fins al moment no s'ha parlat en absolut del radiocarboni sinó solament del carboni, però s'ha descrit el medi en què el radiocarboni es desenvolupa. El carboni que es troba al DBC conté, a més dels dos isòtops esmentats abans, tot i que en proporcions ínfimes, un altre isòtop, el  $^{14}\text{C}$ . L'origen d'aquest isòtop del carboni és el següent: la Terra es troba immersa en un camp de radiació còsmica i els protons d'alta energia que en formen part reaccionen amb els constituents de l'atmosfera per produir neutrons d'alta energia. Aquests neutrons dissipen la seva energia per successives col·lisions amb els elements de l'aire fins arribar a un ni-

vell d'energia adequat i aleshores reaccionen amb el nitrogen atmosfèric per produir  $^{14}\text{C}$  segons la reacció nuclear següent:



La taxa de formació del  $^{14}\text{C}$  depèn de la intensitat de la radiació còsmica incident sobre la Terra la qual, al seu torn, depèn de la intensitat de la radiació còsmica incident sobre tot el sistema solar i de les alteracions locals produïdes per les variacions del camp magnètic solar i del camp geomagnètic. Com que el  $^{14}\text{C}$  es comporta químicament igual que els altres dos isòtops  $^{12}\text{C}$  i  $^{13}\text{C}$ , immediatament després de format 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 per tot el DBC.**

El  $^{14}\text{C}$ , a diferència dels altres seus dos isòtops, posseeix un nucli inestable que es transforma espontàniament en nitrogen per emissió d'una partícula (per aquest motiu s'anomena **radiocarboni**) d'acord amb la següent reacció nuclear:



amb un període de semidesintegració<sup>1</sup> de 5.730 anys.

La desintegració del  $^{14}\text{C}$  segueix la llei del decaïment radioactiu. La llei del decaïment radioactiu és una llei general aplicable a tots els àtoms radioactius i té una expressió molt simple: **la probabilitat de desintegració d'un nucli inestable només depèn de la seva pròpia naturalesa.** L'expressió matemàtica de la llei de decaïment radioactiu també és molt senzilla; en efecte, si  $N$  representa el nombre de nuclis d'una població d'àtoms radioactius, la seva derivada  $dN/dt$  respecte del temps significa el nombre de nuclis desintegrats en la unitat de temps i el quocient entre aquesta magnitud i el nombre de nuclis que integren la població és la probabilitat de desintegració d'un nucli en la unitat de temps, que, segons la llei del decaïment radioactiu, és constant i depèn del nucli considerat:

$$-\frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{dt} = \lambda$$

La probabilitat de desintegració  $\lambda$  rep el nom de *constant de desintegració* i per al radiocarboni, considerant l'any com a unitat de temps, val

$$\lambda = 1,21 \times 10^{-4}$$

1. El període de semidesintegració  $T_{1/2}$  és una constant física i significa el temps que ha de transcórrer perquè una població d'àtoms radioactius redueixi el seu nombre a la meitat

L'equació que representa la llei del decaïment radioactiu pot adquirir una expressió més útil si s'integra entre dos moments concrets: un moment considerat inicial i un moment considerat final després d'haver transcorregut un temps  $t$ . L'expressió de l'equació integrada és la següent

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

on  $N_0$  representa el nombre d'àtoms radioactius que integraven la població en el moment inicial i  $N$  representa el nombre residual d'àtoms radioactius després d'haver transcorregut el temps  $t$ . Aquesta equació permet també establir la relació existent entre la constant de desintegració  $\lambda$  i el període de semidesintegració  $T_{1/2}$ :

$$\lambda T_{1/2} = \ln 2$$

La inestabilitat del radiocarboni fa que la quantitat d'aquest isòtop continguda al DBC no augmenti indefinidament malgrat la seva contínua formació. La causa d'aquest comportament és que la taxa de descomposició del radiocarboni és directament proporcional al nombre d'àtoms, és a dir, que si  $N$  és el nombre d'àtoms de radiocarboni presents al DBC, per a la seva taxa de descomposició (nombre de nuclis desintegrats per unitat de temps) es compleix la relació següent<sup>2</sup>:

$$V_d = \lambda N$$

Per altra banda, si  $V_f$  representa la taxa de formació del radiocarboni (nombre de nuclis formats per unitat de temps) poden produir-se dues situacions:

$V_f > V_d$ : aleshores com que es forma més radiocarboni que no pas en desapareix, augmenta  $N$  fins que es compleixi  $V_f = V_d$

$V_f < V_d$ : aleshores com que desapareix més radiocarboni que no pas se'n forma, disminueix  $N$  fins que es compleixi  $V_f = V_d$

Segui quina sigui la situació, la condició a la qual tendeix la naturalesa és que

$$V_f = V_d$$

és a dir, **que la desintegració del radiocarboni tendeix a compensar exactament la seva formació**. Tenint en compte la proporcionalitat entre la velocitat de formació i la quantitat de radiocarboni present al DBC pot escriure's

$$N = V_f / \lambda$$

2. Aquesta relació és una conseqüència immediata de la llei del decaïment radioactiu

En resum, es pot doncs afirmar **que la quantitat de radiocarboni present en el DBC tendeix a seguir les variacions de la intensitat de la radiació còsmica incident sobre la Terra.**

Com a conseqüència de tot el que s'ha exposat fins ara poden enunciar-se els dos corol·laris següents:

**1. Qualsevol material que hagi pertangut al DBC, és a dir, que hagi incorporat carboni procedent del medi circumdant (si es tractava d'un ésser inanimat) o que l'hagi assimilat i l'hagi bescanviat (si es tractava d'un ésser animat) contenia radiocarboni en la proporció pròpia del moment en què es va formar o del moment en què el bescanviava.**

**2. Si per qualsevol circumstància, per exemple, aïllament físic o químic d'un ésser inanimat o mort d'un organisme vivent, un material abandona el DBC, és a dir, deixa d'incorporar carboni procedent del seu medi exterior, aleshores també cessa 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'aplicació de l'equació integrada de la llei del decaïment radioactiu al radiocarboni (1) mostra que si per a un material es coneix el nombre inicial d'àtoms de radiocarboni  $N_0$  que contenia quan formava part del DBC i el nombre residual d'àtoms de radiocarboni  $N$  que conté en l'actualitat, el càlcul del temps  $t$  transcorregut des que el material abandonà el DBC fins el present és immediat i respon a l'equació:

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

obtinguda en aïllar la variable  $t$  en l'equació integrada de la llei del decaïment radioactiu (1). Aquesta equació no permet el seu ús immediat perquè el nombre d'àtoms de radiocarboni presents en un material és una magnitud ambigua. Per liquidar l'ambigüitat, **el nombre d'àtoms de radiocarboni s'expressa amb relació a un sistema de referència concret** que normalment és 1 g de carboni; per aquest motiu, a partir d'aquest moment, el nombre d'àtoms de radiocarboni es referirà com a "contingut específic de radiocarboni" o més simplement com a "contingut de radiocarboni" i es representarà per  $D$ . Substituint en l'equació (2), que permet el càlcul del temps transcorregut, el nombre d'àtoms de radiocarboni pel seu contingut específic i representant per  $D_0$  el contingut específic inicial de radiocarboni del material quan formava part del DBC i per  $D_r$  el contingut específic residual de radiocarboni en l'actualitat, l'equació que permet el càlcul del temps transcorregut des que el material abandonà el DBC adopta l'expressió següent:

$$t = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \cdot \ln \frac{D_0}{D_r}$$

**Aquesta equació i la determinació del valor de les seves variables constitueix la pedra angular de la datació per radiocarboni.**

## 2. HIPÒTESIS FONAMENTALS

Tal com pot observar-se a l'equació que permet calcular el temps transcorregut entre el moment en què un material va abandonar el DBC i el present, l'aplicació de la datació per radiocarboni exigeix dos requisits experimentals: la mesura del contingut específic actual o residual del radiocarboni del material,  $D_r$ , i la mesura del contingut específic inicial de radiocarboni,  $D_0$ , del material quan va abandonar el compartiment del DBC d'on procedeix. El primer dels requisits no suposa altra dificultat experimental que la purament analítica, és a dir, mesurar amb la màxima exactitud i precisió aquesta variable química; el segon requisit, tanmateix, comporta seriosos problemes teòrics, ja que, tal com s'acaba de veure, el contingut específic inicial de radiocarboni depèn de la intensitat de la radiació còsmica en el moment en què el material va abandonar el DBC i no hi ha cap raó *a priori* per pensar que aquesta s'ha mantingut rigorosament constant en el transcurs del temps. S'arriba, doncs, a una situació paradoxal en què per calcular el temps transcorregut des que un material abandonà el DBC cal conèixer prèviament el valor d'aquesta variable que és la incògnita que precisament es vol determinar:

$$t = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \cdot \ln \frac{D_0}{D_r}$$

però

$$D_0 = D_0(t)$$

Per tal 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 tots els compartiments del DBC, és a dir, no depèn del compartiment ni del material**

**El contingut específic de radiocarboni en cadascun dels compartiments del DBC s'ha mantingut constant en el transcurs del temps**

L'adopció d'aquestes hipòtesis fonamentals constitueix una simplificació notable perquè permet considerar **un únic valor independent del compartiment i del temps** com a contingut inicial de radiocarboni  $D_0$ , és a dir,

### **$D_0 = \text{Constant}$**

Les hipòtesis fonamentals s'apliquen conscientment assumint el risc que no es compleixin exactament, ja que és l'única solució possible si es vol dur a la pràctica la datació per radiocarboni; el sistema de treball que s'adopta és estudiar el compliment d'aquestes hipòtesis fonamentals i corregir les eventuais desviacions d'aquestes hipòtesis en la mesura en què sigui possible. Plantejada d'aquesta manera, **la datació per radiocarboni només proporcionarà resultats fidels en la mesura en què les hipòtesis fonamentals en què es basa la seva aplicació siguin exactes**. Tanmateix, cap de les dues hipòtesis fonamentals és rigorosament exacta sinó que estan subjectes a desviacions que a continuació s'estudiaran per veure quines són corregibles i quines no.

#### **2.1. Examen del compliment de les hipòtesis fonamentals**

Al compliment de la primera de les hipòtesis fonamentals s'oposen dos fets: un de naturalesa química, **el fraccionament isotòpic**, i un altre de naturalesa geoquímica, **l'efecte compartiment**. Experimentalment, també s'ha pogut demostrar que la segona hipòtesi tampoc no és exacta.

##### *2.1.1. El fraccionament isotòpic*

**El fraccionament isotòpic consisteix en el fet que en tot canvi químic o físic en què participin els distints isòtops d'un mateix element es produeix un enriquiment o un empobriment que depèn de la seva massa atòmica i del canvi químic o físic que experimenti l'element.** En el cas del carboni, per exemple, la fotosíntesi es realitza preferentment sobre els isòtops més lleugers del carboni i per aquest motiu, el contingut de  $^{13}\text{C}$  i  $^{14}\text{C}$  dels vegetals és lleugerament més petit que el de l'atmosfera d'on procedeix el carboni; inversament, la dissolució del diòxid de carboni en aigua es realitza preferentment sobre els isòtops més pesants i per aquest motiu el contingut de  $^{13}\text{C}$  i  $^{14}\text{C}$  en la hidrosfera és lleugerament més gran que a l'atmosfera. Si aquest fenomen no es corregís, s'arribaria a la situació paradoxal que materials contemporanis originats a distints compartiments presentarien edats diferents. Així, en el cas dels dos exemples citats, materials contemporanis formats a la biosfera i als oceans serien, respectivament, més vells o més joves que la mateixa atmosfera. **La magnitud del fraccionament isotòpic és proporcional a la diferència de massa dels isòtops que hi són implicats.** Com que el  $^{12}\text{C}$  i el  $^{13}\text{C}$  són isòtops estables, la seva relació isotòpica és permanent. Si es mesura mitjançant espectrometria de masses l'abundància isotòpica del  $^{13}\text{C}$  amb relació al  $^{12}\text{C}$ , es pot calcular la magnitud del fraccionament isotòpic del  $^{14}\text{C}$ , que és el doble del corresponent al  $^{13}\text{C}$ , i corregir d'aquesta manera l'efecte que el fraccionament isotòpic causa sobre l'edat.



L'abundància isotòpica de  $^{13}\text{C}$  d'un material ( $\delta^{13}\text{C}$ ) s'expressa com la desviació relativa del contingut de  $^{13}\text{C}$  d'aquest respecte a un patró, és a dir,

$$\delta^{13}\text{C} = 1000 \times \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_m - (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_p}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_p}$$

on ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) representen les respectives relacions atòmiques en el material (m) i en el patró (p). El contingut de  $^{14}\text{C}$  d'un material corregit per l'efecte del fraccionament isotòpic,  $D_{rc}$ , es calcula aplicant la senzilla equació següent

$$D_{rc} = D_r \times \frac{1 - 2(25 - \delta^{13}\text{C})}{1000}$$

### 2.1.2. L'efecte compartiment

Abans s'ha vist que el carboni contínuament es transfereix d'uns compartiments als altres i que cada compartiment està caracteritzat pel seu període de residència. **Els diferents períodes de residència del carboni en els diferents compartiments poden originar diferències en el contingut específic de  $^{14}\text{C}$  d'equilibri en cada compartiment.** Plantejant balanços de carboni i radiocarboni per a cadascun dels compartiments que integren el DBC es dedueix una equació que expressa la relació del contingut específic de radiocarboni entre l'atmosfera i els altres compartiments en funció del període de residència:

$$\frac{D_A}{D_B} = 1 + \frac{T_B}{T_{1/2}} \ln 2$$

Aquesta equació mostra que com més petit sigui el període de residència del carboni en un compartiment en relació amb el període de semidesintegració del radiocarboni, més pròxim és el seu contingut específic de radiocarboni al de l'atmosfera. Els períodes de residència dels diferents compartiments són els següents:

Biosfera terrestre	20 anys
Humus	30 anys
Hidrosfera	1.570 anys

Aplicant aquests valors a l'equació deduïda anteriorment s'arriba als resultats següents:

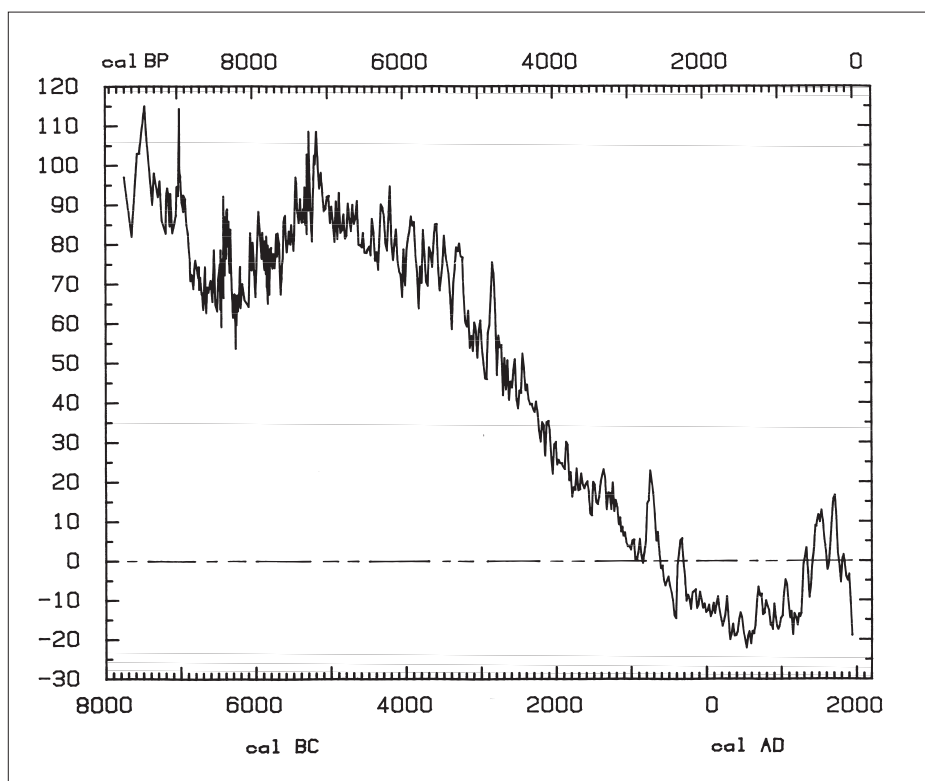


Figura 2. Variació del paràmetre  $\Delta^{14}\text{C}$  que demostra la variació del contingut inicial de radiocarboni en el transcurs del temps (Stuiver et al., 1986; p. 984). Sobre l'eix d'ordenades es representa el paràmetre  $\Delta^{14}\text{C}$ .

$$D_A/D_B = 1,002$$

$$D_A/D_H = 1,004$$

$$D_A/D_{Oc} = 1,190$$

és a dir,

$$D_A \approx D_B \approx D_H > D_{Oc}$$

Aquesta conclusió pot interpretar-se de la manera següent: **a causa dels curts períodes de residència del carboni a la biosfera i a l'humus, el contingut específic de radiocarboni en aquests medis és pràcticament idèntic al de l'atmosfera; tanmateix, el llarg període de residència del carboni en la massa oceànica origina un contingut específic de radiocarboni deficitari respecte als altres compartiments.**

### 2.1.3. Contravencions a la segona hipòtesi

Respecte de la segona hipòtesi que el contingut de radiocarboni a tot el DBC s'ha mantingut constant en el transcurs del temps, s'han trobat evidències experimentals que hi ha hagut fluctuacions del contingut de radiocarboni. Aquestes 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 superposat als anells produïts els anys anteriors; per aquest motiu, el contingut de radiocarboni de cadascun d'aquests anells és un fidel reflex del contingut de radiocarboni atmosfèric en aquell any i en els nous materials formats a partir del radiocarboni atmosfèric. L'estudi minuciós de successions d'anells d'arbres vius i fòssils proporciona un llarg registre cronològic de fusta d'edat exactament coneguda i la mesura del contingut actual de radiocarboni d'aquests anells permet calcular el seu contingut inicial amb la qual cosa s'ha pogut comprovar que aquest no és constant en el temps. Per a la realització d'aquest tipus d'estudi s'utilitza el paràmetre  $\Delta^{14}\text{C}$  definit de la manera següent:

$$\Delta^{14}\text{C} = 1000 \times \frac{D_{\text{rc}}(x) - D_0}{D_0}$$

on  $D_{\text{rc}}(x)$  representa el contingut de radiocarboni inicial corregit pel fraccionament isotòpic corresponent a una edat  $x$  ( $x$ , conegut per dendrocronologia) i calculat a partir del contingut actual  $D_{\text{rc}}$  aplicant la llei del decaïment radioactiu:

$$D_{\text{rc}}(x) = D_{\text{rc}} e^{\lambda x}$$

Si s'obeís la segona hipòtesi, es compliria la condició següent

$$D_{\text{rc}}(x) = D_0$$

i aleshores també es compliria

$$\Delta^{14}\text{C} = 0$$

independentment del temps. La figura 2 mostra el resultat de l'estudi (Stuiver *et al.*, 1986) i revela clarament que el paràmetre  $\Delta^{14}\text{C}$  fluctua en el transcurs del temps la qual cosa demostra que el contingut inicial de radiocarboni al DBC no s'ha mantingut constant en el temps. Poden distingir-se dos tipus de fluctuacions: unes de període curt que es manifesten en forma de pics superposats a altres fluctuacions de període llarg que es manifesten com ondulacions suaus de la corba.

## 2.2. L'escala cronològica radiocarbònica

S'ha pogut veure que la pràctica de la datació per radiocarboni exigeix l'adopció d'unes hipòtesis fonamentals que estan afectades d'unes desviacions que no sempre són corregibles. Conseqüentment, les edats calculades mitjançant aquest mètode també estan afectades de desviacions respecte de les edats reals expressades en l'escala cronològica solar. L'única d'aquestes desviacions que és corregible en tota la seva extensió mitjançant l'espectrometria de masses és el fraccionament isotòpic. En conseqüència, la utilització del mètode de datació per radiocarboni, aplicant la correcció per fraccionament isotòpic, **origina una escala cronològica convencional anomenada escala cronològica radiocarbònica que discrepa de l'escala cronològica solar**. La datació per radiocarboni origina, doncs, la seva pròpia escala cronològica absoluta fruit de les hipòtesis que cal adoptar per fer el mètode practicable. L'equació que defineix l'escala cronològica radiocarbònica, tenint en compte la correcció de l'efecte del fraccionament isotòpic és, doncs

$$R = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \cdot \ln \frac{D_0}{D_{rc}}$$

on per denotar el caràcter convencional de la data radiocarbònica s'utilitza el símbol  $R$  en lloc del símbol  $t$  emprat anteriorment.<sup>3</sup> En resum, el resultat d'una datació per radiocarboni és una magnitud cronomètrica anomenada **data o edat radiocarbònica**, la unitat en què s'expressen les dates radiocarbòniques es denomina "**any BP**" i l'origen de l'escala cronològica radiocarbònica és, per definició, **l'any 1950 dC**.

## 2.3. Característiques de l'escala cronològica radiocarbònica

Conseqüència immediata de la relació que hi ha entre els continguts específics de radiocarboni dels diversos compartiments que integren el DBC

$$D_A \approx D_B \approx D_H > D_{oc}$$

i de la primera hipòtesi fonamental, que considera un mateix contingut inicial de radiocarboni per a tots els compartiments, és a dir,

3. El valor de  $T_{1/2}$  utilitzat per al càlcul de la data radiocarbònica no és el valor actualment admès de 5.730 anys sinó el valor de 5.568 anys adoptat durant els primers temps de la datació per radiocarboni. Per tal d'evitar d'alterar el valor de les dates radiocarbòniques antigues s'ha acordat de mantenir aquest valor malgrat la seva incorrecció; tanmateix l'error que afecta el període de semidesintegració no té cap importància perquè és una contribució més al caràcter convencional de les dates radiocarbòniques.

**D<sub>0</sub>, independent del compartiment,**

és la discordança entre les dates radiocarbòniques de materials contemporanis formats a l'atmosfera, a la biosfera i a l'humus i els formats en medi marí. Així, per a un conjunt de materials contemporanis formats en aquests quatre medis, és a dir, amb la mateixa edat expressada en l'escala cronològica solar es compleix la relació següent:

$$R_A \approx R_B \approx R_H < R_{Oc}$$

és a dir, la datació per radiocarboni proporciona un sistema de dates dual dependent de l'origen del material datat.

L'excés d'edat radiocarbònica d'un material originat en un compartiment deficitari en radiocarboni respecte d'un material originari d'un altre compartiment on aquest defecte no existeixi s'anomena edat aparent del compartiment. L'edat aparent de materials originats a la hidrosfera oceànica referida a una data solar  $x$ ,  $C(x)$ , es calcula de la manera següent:

$$C(x) = R_{Mx} - R_{Tx}$$

on els subíndexs M i R representen els materials d'origen marí i terrestre, respectivament, tots dos amb una edat  $x$ .

Si l'edat aparent d'un compartiment fos constant en el temps i en l'espai, fóra possible la comparació de les dates radiocarbòniques de materials d'origen marí amb les dates radiocarbòniques de materials d'origen terrestre perquè l'edat aparent permetria el càlcul de la data radiocarbònica equivalent d'un material contemporani d'origen terrestre:

$$R_{Tx} = R_{Mx} - C(x)$$

Aleshores, la subtracció de l'edat aparent a les dates radiocarbòniques dels materials d'origen marí permetria reduir els dos sistemes de dates radiocarbòniques a un de sol. Perquè l'edat aparent del medi marí fos constant, caldria admetre una proporcionalitat directa entre el seu contingut de radiocarboni i el de l'atmosfera. És indubtable que el contingut específic de radiocarboni dels oceans depèn del de l'atmosfera, perquè és d'aquesta d'on procedeix el radiocarboni de la hidrosfera, però no hi ha cap raó *a priori* que indueixi a acceptar la proporcionalitat i tampoc que no depengui de la situació geogràfica, ja que la hidrosfera, a causa de la seva grandària, és un compartiment amb una dinàmica molt complexa. Per aquest motiu, la utilització de l'edat aparent per corregir la data radiocarbònica dels materials originats als oceans ha de prendre's com una primera aproximació. La taula I constitueix una il·lustració de la dependència de l'edat aparent de l'origen geogràfic.

**Taula I.** Edat aparent de closques marines segons el seu origen geogràfic

Codi	Origen Geogràfic	Any de recollecció	Edat aparent (anys)
GIF-4064	Illa Maurici	1914	399 ± 35
GIF-4065	Madagascar	1853	350 ± 35
GIF-4066	Congo	1891	290 ± 35
GIF-4067	Algèria	1905	357 ± 35
GIF-4068	Toulon	1837	335 ± 35
GIF-3314	Beaulieu	1907	630 ± 60
GIF-4069	St. Vaast	1900	282 ± 35
GIF-4070	La Rochelle	1889	426 ± 35
GIF-3315	Nord de Bretanya	1844	320 ± 60

### 3. LA MESURA DEL CONTINGUT DE RADIOCARBONI

S'ha vist que la datació per radiocarboni es basa en la utilització de l'equació següent que permet calcular les dates radiocarbòniques:

$$R = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \cdot \ln \frac{D_0}{D_{rc}}$$

on  $D_0$  representa el contingut específic inicial de radiocarboni i  $D_{rc}$  el contingut específic residual corregit per l'efecte del fraccionament isotòpic del material objecte de datació. **El tipus de dependència que estableix aquesta equació fa que l'obtenció d'una data radiocarbònica requereixi el coneixement de la relació d'aquestes dues magnituds.** La primera és constant i coneguda per definició i, per tant, a primera vista, sembla que només fóra necessària la mesura de la segona. Tota mesura experimental pot ésser subjecte d'errors sistemàtics i per aquest motiu, un error sistemàtic que afectés la mesura de  $D_{rc}$  representaria un error en la data radiocarbònica. Tanmateix, si cada laboratori determinés per ell mateix el contingut inicial de radiocarboni en les mateixes condicions experimentals en què es determina el contingut residual, l'error sistemàtic que afectaria aquesta mesura fóra el mateix que el que afectaria la mesura del contingut residual. Així, com que els possibles errors sistemàtics afecten de la mateixa manera els dos membres de la relació, la probabilitat d'error que afecta la relació es minimitza. **Tota datació per radiocarboni requereix, doncs, la mesura d'aquestes magnituds** que són extraordinàriament petites i exigeixen, en conseqüència, mètodes de mesura extremament sensibles i l'aplicació d'una cura exquisida. La mesura del contingut específic inicial de radiocarboni  $D_0$  es fa determinant el contingut específic de radiocarboni d'una substància patró (àcid oxàlic) subministrada pel *National Institute*

of Standards and Technology (USA) que el laboratori de datació tracta i mesura de la mateixa manera que els materials objecte de datació.

El nombre d'àtoms de  $^{14}\text{C}$ , pel fet de tractar-se d'entitats estàtiques, és difícil de mesurar i fins recentment no s'ha disposat de la tecnologia adequada per dur a terme tal mesura. Tanmateix, com que les partícules  $\beta$  emeses en el procés de desintegració del  $^{14}\text{C}$  estan dotades d'elevada energia, són més fàcilment detectables i, per consegüent, més fàcils de comptar. **El nombre de partícules  $\beta$  emeses per unitat de temps s'anomena activitat** i com que cada partícula  $\beta$  procedeix de la desintegració d'un nucli, **l'activitat (A) és igual a la velocitat de desintegració**, és a dir,

$$A = - \frac{dN}{dt}$$

Tenint en compte aquesta equivalència i la llei del decaïment radioactiu,

$$- \frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{dt} = \lambda$$

es dedueix

$$A = \lambda N$$

és a dir, que l'activitat és proporcional al nombre d'àtoms de radiocarboni. Si com a població de referència s'utilitza 1 g de carboni, aleshores l'activitat s'anomena activitat específica i es compleix:

$$A = \lambda D$$

és a dir, l'activitat específica és proporcional al contingut específic de radiocarboni. En conseqüència, la mesura de l'activitat específica del radiocarboni constitueix una mesura indirecta del seu contingut específic. Aquestes consideracions permeten classificar les tècniques de mesura del contingut de radiocarboni en **tècniques directes**, basades en la mesura del nombre d'àtoms de  $^{14}\text{C}$ , i en **tècniques indirectes o radiomètriques** basades en la mesura de la radioactivitat.

Sigui quin sigui el mètode utilitzat per a la mesura del contingut de radiocarboni, cal tenir sempre en compte la presència d'un factor pertorbador: el fons. Per fons s'entén el valor obtingut mitjançant l'instrument de mesura quan es mesura una mostra exempta de radiocarboni en idèntiques condicions que les utilitzades per a la mesura de la mostra objecte de la datació. L'origen del fons és doble: el mateix instrument i la radiació ambiental. Tota mesura de radiocarboni és, doncs, constituïda per dos components additius: el fons i el component degut a la presen-

cia de radiocarboni que és el que realment interessa conèixer per al càlcul del contingut específic de radiocarboni. En una mesura del contingut de radiocarboni amb finalitat de datació, la contribució del fons en la magnitud del senyal és important ja que el contingut de radiocarboni és molt petit; per aquest motiu, el disseny d'un mètode exacte per a la mesura del contingut de radiocarboni ha de tendir a minimitzar el valor del fons i a mesurar-lo amb la major exactitud i precisió possibles.

### 3.1. Tècniques radiomètriques

Quan s'utilitzen tècniques radiomètriques per a la mesura del contingut de radiocarboni, tenint en compte la proporcionalitat entre l'activitat específica i el contingut específic de radiocarboni, l'equació que permet el càlcul de l'edat radiocarbònica s'expressa de la manera següent:

$$R = -\frac{T_{1/2}}{\ln 2} \cdot \ln \frac{A_0}{A_{rc}}$$

on  $A_0$  i  $A_{rc}$  representen, respectivament, l'activitat específica inicial i l'activitat específica residual corregida pel fraccionament isotòpic. La datació per radiocarboni mitjançant mètodes radiomètrics comporta, doncs, la mesura de l'activitat específica del patró d'activitat inicial i l'activitat específica residual del material objecte de datació.

La mesura de l'activitat específica del carboni present a qualsevol material requereix l'aïllament del carboni en forma d'un compost químic estequiomètricament definit i amb una puresa química i radioquímica tan elevada com sigui possible. La puresa química és necessària per dos motius: primer, per poder conèixer amb exactitud la quantitat de carboni implicada en la mesura radiomètrica i poder així calcular exactament l'activitat específica, i en segon lloc, perquè la presència de substàncies estranyes podria provocar errors en el procés de mesura. La puresa radioquímica és necessària per evitar la interferència de radionúclids concomitants que serien mesurats conjuntament amb el radiocarboni.

Un aspecte que cal tenir en compte en la mesura radiomètrica del contingut de radiocarboni és que les partícules  $\beta$  que emet són poc energètiques i que, per tant, tenen poc poder de penetració. Això exigeix, si es vol una detecció eficient, que el material sotmès a mesura estigui inclòs dintre del mateix volum sensible del detector i no que n'estigui separat, com és habitual en la mesura d'altres tipus de radioactivitat, per una finestra. D'aquesta manera s'elimina l'absorció i l'autoabsorció i s'augmenta l'eficiència de la detecció. Els estats físics del material sotmès a mesura que millor compleixen aquests requisits són el gasós i el líquid perquè permeten la detecció en medi homogeni i s'evita l'autoabsorció. En resum, **la datació per radiocarboni mitjançant un tècnica radiomètrica exigeix la transfor-**



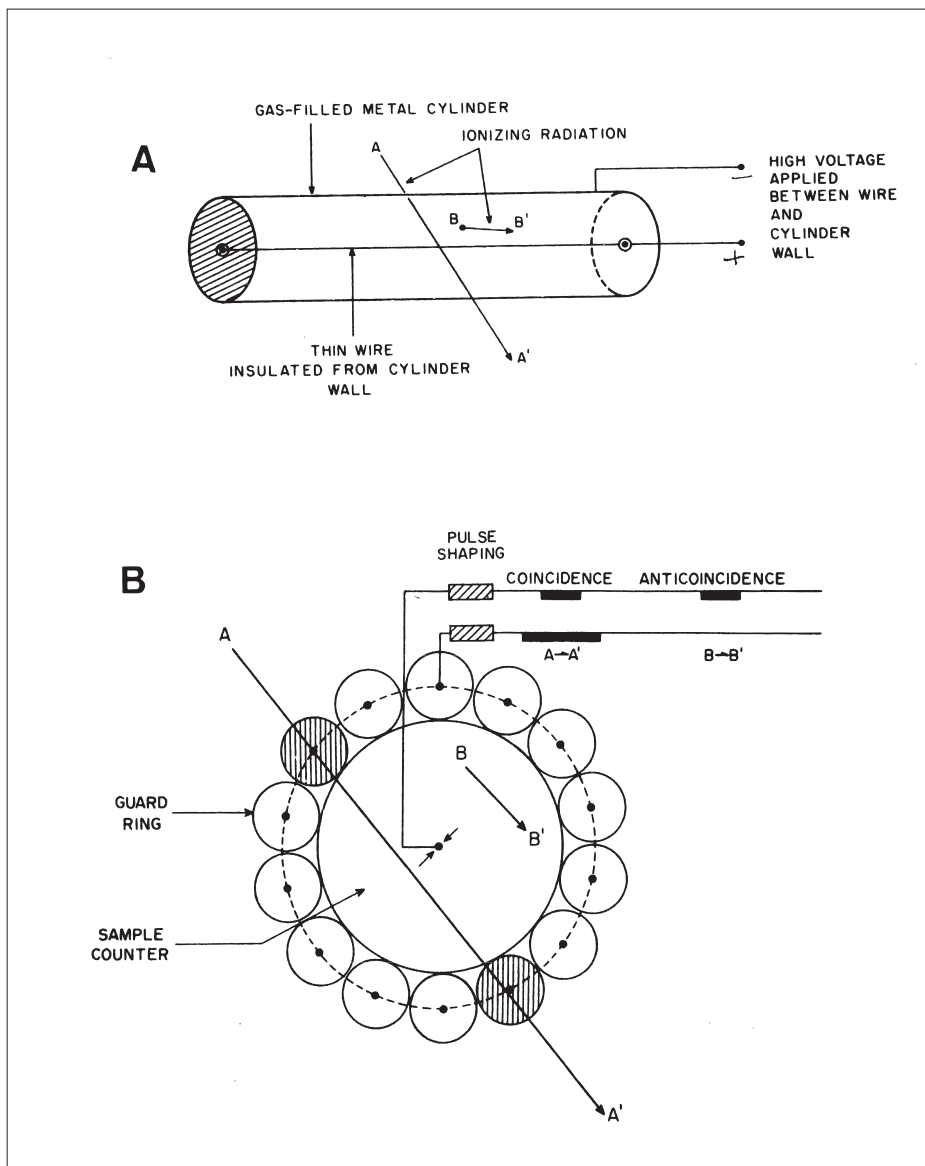


Figura 3. Comptador proporcional

A. Representació esquemàtica del detector (Taylor, 1987; p. 74).

B. Representació esquemàtica del sistema de reducció del fons (Ibidem, p. 81).

**mació del carboni present en el material objecte de datació en un compost químicament definit, químicament i radioquímicament pur i que en les condicions de mesura es trobi en estat gasós o líquid.**

En l'actualitat es disposa de dos mètodes radiomètrics eficaços que compleixen aquests requisits: els mètodes basats en l'ús de comptadors proporcionals i els basats en l'ús de l'escintil·lació líquida. Els primers treballen en fase gasosa i els segons, en fase líquida.

### *3.1.1. Comptadors proporcionals*

La mesura de l'activitat del  $^{14}\text{C}$  amb un comptador proporcional consisteix a transformar el carboni en un compost gasós, generalment diòxid de carboni. El gas s'introdueix en un cilindre metàl·lic travessat axialment per un elèctrode (figura 3A) i entre l'elèctrode (ànode) i les parets (cànode) del cilindre s'aplica una diferència de potencial elèctric elevada amb la qual cosa s'origina un camp elèctric intens a l'interior del cilindre. Quan en el si del gas s'emet una partícula  $\beta$ , aquesta col·lideix amb les molècules del gas i a causa de l'elevada energia cinètica de què està dotada provoca la seva ionització. Els electrons creats per la ionització són accelerats pel camp elèctric i quan han adquirit prou energia cinètica provoquen, al seu torn, altres ionitzacions, els electrons de les quals repeteixen el mateix procés. L'emissió d'una partícula  $\beta$  provoca, doncs, en definitiva, una allau d'electrons que es precipiten sobre l'ànode i originen un impuls elèctric. Els impulsos elèctrics així produïts per cada una de les partícules  $\beta$  són amplificats i posteriorment comptats electrònicament i a través d'aquesta magnitud pot calcular-se l'activitat. Per disminuir el fons del comptador proporcional, aquest s'envolta d'un anell de comptadors de Geiger-Müller que operen en anticoincidència amb ell (figura 3B). D'aquesta manera, qualsevol radiació còsmica incident sobre el comptador proporcional, travessarà els comptadors exteriors i aleshores el circuit d'anticoincidència bloqueja el pas de l'impuls procedent del comptador proporcional i aquest no és comptat com una partícula  $\beta$ . El conjunt constituït pel comptador proporcional i l'anell de comptadors Geiger s'introdueix en l'interior d'un blindatge de plom per disminuir encara més la incidència de la radiació exterior.

### *3.1.2. Comptadors d'escintil·lació líquida*

La mesura de l'activitat per escintil·lació líquida consisteix a dissoldre la mostra l'activitat de la qual es vol mesurar en un líquid d'escintil·lació que constitueix el volum sensible del detector. El líquid d'escintil·lació consta d'un dissolvent aromàtic i d'un solut fluorescent i el mecanisme de funcionament és el següent: les molècules del dissolvent aromàtic absorbeixen l'energia cinètica de què estan dotades les partícules  $\beta$ , la difonen en el si de la solució i la transfereixen a les molècules del solut fluorescent, el qual, finalment, la transforma en energia lluminosa segons el seu espectre de fluorescència característic. Designant per X la molècula

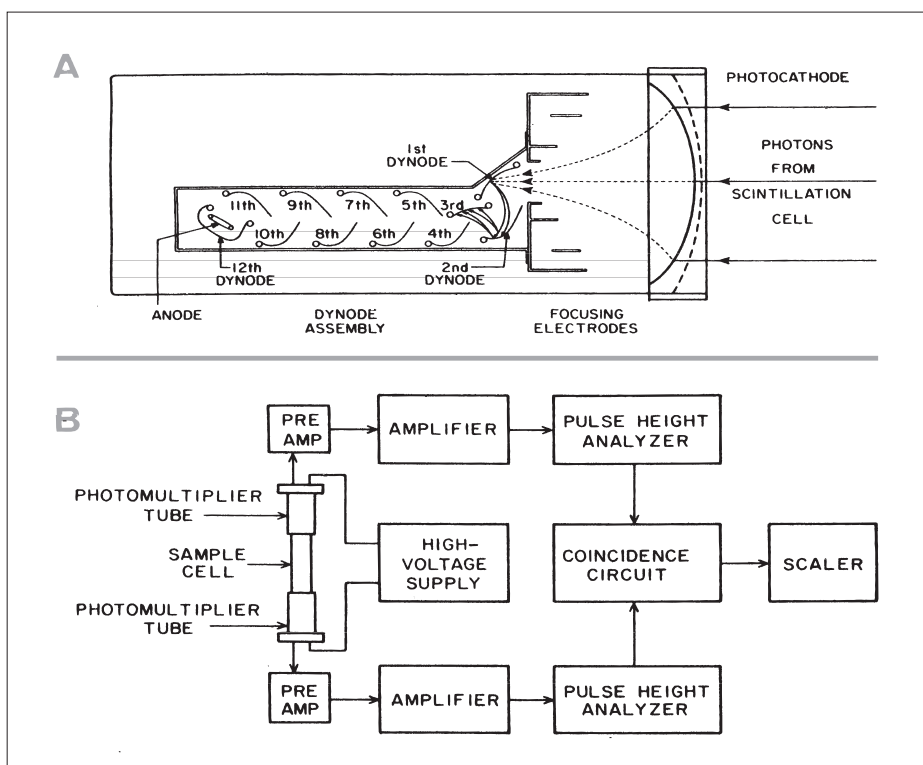
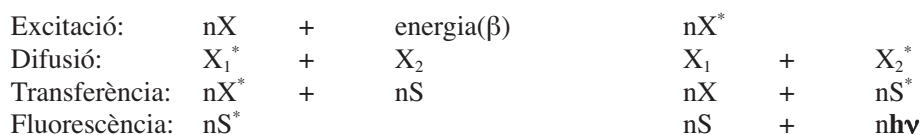


Figura 4. Comptador d'escintil·lació líquida. A. Representació esquemàtica del funcionament del fotomultiplicador (Taylor, 1987; p.87). Els electrons produïts en el fotocàtode pels fotons procedents del líquid d'escintil·lació són conduïts al primer dínode on comença el procés de multiplicació. B. Representació esquemàtica de la disposició dels elements bàsics (Ibídem, p. 88).

del dissolvent aromàtic i per S la molècula del solut fluorescent, les etapes que constitueixen l'escintil·lació líquida poden resumir-se en les equacions següents:



Cada emissió d'una partícula  $\beta$  en el si de la solució escintil·ladora provoca, doncs, una allau de fotons que són detectats per un parell de fotomultiplicadors oposats que operen en coincidència, són transformats en impulsos elèctrics, amplificats i posteriorment comptats electrònicament (figura 4). Que el parell de foto-

multiplicadors operi en coincidència significa que només són considerats i comptats aquells impulsos procedents d'ambdós fotomultiplicadors a la vegada amb la qual cosa es redueix considerablement el fons d'origen electrònic. L'escintil·lació líquida aplicada a la mesura de l'activitat del radiocarboni requereix, doncs, la transformació del carboni contingut pel material objecte de datació en un compost pur soluble en el líquid d'escintil·lació, o bé, per a més simplicitat, es transforma el carboni en el mateix dissolvent aromàtic del líquid d'escintil·lació al qual s'afegeix posteriorment el solut fluorescent. Com que de tots els dissolvents aromàtics, el més fàcil de sintetitzar és el benzè, el carboni del material objecte de datació es transforma en aquest compost químic.

La mesura de l'activitat per escintil·lació líquida presenta alguns avantatges respecte dels comptadors proporcionals. Una és que el volum sensible del comptador, pel fet que es tracta d'una fase condensada, és molt més petit i, per tant, la seva protecció contra la radiació còsmica per disminuir el valor del fons, és més fàcil. Un altre avantatge addicional és la facilitat amb què la mesura de la mostra, del patró d'activitat inicial i el fons poden alternar-se automàticament, i d'aquesta manera s'aconsegueixen unes condicions de mesura quasi simultànies que eliminen l'efecte perniciosos de les derives en l'eficiència i en el fons. Com desavantatges de l'escintil·lació líquida cal citar l'eficiència més petita de detecció i la complexitat més gran del procés químic previ a la mesura radiomètrica.

### 3.2. Mètodes directes

La mesura del contingut de radiocarboni per mètodes radiomètrics implica la mesura de l'activitat i la mesura d'una activitat amb precisió suficient suposa esperar el temps necessari perquè es produeixi un nombre de desintegracions suficients per assolir la precisió adequada. La probabilitat de desintegració d'un nucli de  $^{14}\text{C}$  és molt petita,  $1,21(10^4)$  per any; això significa que per poder comptar un nombre de desintegracions prou gran cal esperar un temps llarg de mesura i una quantitat notable de material (equivalent a 0,5-6 g de C). Els mètodes radiomètrics són mètodes passius en què no es pot fer altra cosa que esperar pacientment que els nuclis de  $^{14}\text{C}$  es vagin desintegrant. Les circumstàncies desfavorables de la mesura radiomètrica millorarien ostensiblement si en lloc de comptar els àtoms de  $^{14}\text{C}$  que es desintegren, es poguessin comptar els àtoms de  $^{14}\text{C}$  presents en el material. Aquestes consideracions es fan evidents amb un càlcul senzill:

*Contingut específic de radiocarboni del carboni modern:*  $D \approx 5 \times 10^{10}$  àtoms  $^{14}\text{C}/\text{g C}$

*Mostra que conté 20 mg de C:*  $N = 1 \times 10^9$  àtoms  $^{14}\text{C}$   
 $\lambda = 2,3 \times 10^{-10} \text{ min}^{-1}$

*Activitat corresponent:*  $A = \lambda N = 0,23 \text{ dpm}$

*Temps de mesura necessari per  
acumular 10.000 desintegracions  
i assolir una precisió de l'1%:*  $t = 10.000/0,23 = 43.478 \text{ min} = 30 \text{ dies}$

Davant la perspectiva de la datació de mostres petites, la disjuntiva és clara: o bé s'espera un llarg temps fins arribar a comptar un nombre prou gran de desintegracions per aconseguir una bona precisió, o bé es procedeix a la separació física dels àtoms de  $^{14}\text{C}$  i després de separats es compten. Tenint en compte que, encara que la mostra sigui petita, el nombre absolut d'àtoms de  $^{14}\text{C}$  és elevat, el compte dels àtoms pot dur-se a terme amb una bona precisió. La separació física dels àtoms de  $^{14}\text{C}$  es fa mitjançant espectrometria de masses després d'accelerar els àtoms a elevades velocitats; per aquest motiu, aquesta modalitat de la datació per radiocarboni es designa amb les sigles AMS (Accelerator Mass Spectrometry). La mesura del contingut de radiocarboni mitjançant AMS comprèn les etapes següents:

1. Ionització del carboni present en el material objecte de datació, prèviament transformat en grafit o diòxid de carboni.

2. Acceleració dels àtoms ionitzats a alta velocitat mitjançant un accelerador de partícules

3. Separació dels àtoms de  $^{14}\text{C}$  de la resta dels isòtops de carboni mitjançant un camp magnètic perpendicular a la trajectòria que desvia els diferents isòtops en un grau més petit com més gran és la seva massa (etapa d'espectrometria de masses).

4. Compte dels àtoms de  $^{14}\text{C}$  dotats d'elevada energia cinètica.

Per a la mesura directa del contingut de radiocarboni s'han fet servir dos tipus d'instruments: els ciclotrons i els acceleradors electrostàtics, però en l'actualitat els primers ja no s'utilitzen. Les etapes de què consta la mesura del contingut de radiocarboni mitjançant un accelerador electrostàtic són les següents (figura 5):

1. Es fa incidir un feix de ions  $\text{Cs}^+$  a alta velocitat sobre el carboni en forma de grafit o diòxid de carboni, amb la qual cosa es produeixen ions  $\text{C}^-$ , juntament amb petites quantitats de ions  $\text{CH}^-$  i  $\text{CH}_2^-$ . Aquests ions se sotmeten a acceleració aplicant una diferència de potencial d'uns 20 KV. Aquesta ionització té l'avantatge que no es produeixen ions de  $^{14}\text{N}$ , isòbars als de  $^{14}\text{C}$ , ja que els ions  $\text{N}^-$  no són estables.

2. El feix de ions negatius se sotmet a l'acció d'un camp magnètic perpendicular a la seva trajectòria i es produeix una primera separació de ions en funció de la seva massa. El resultat és la separació d'un feix iònic de massa 14 que conté els ions següents:  $^{14}\text{C}^-$ ,  $^{13}\text{CH}^-$  i  $^{12}\text{CH}_2^-$ .

3. El feix iònic de massa 14 se sotmet a l'acció d'una elevada diferència de potencial creixent, de l'ordre de 1 MV, amb la qual cosa els ions adquireixen una alta velocitat. Els ions així accelerats es troben amb un núvol d'argó amb els àtoms del qual col·lideixen. L'efecte de la col·lisió és el fet de trencar els radicals iònics en

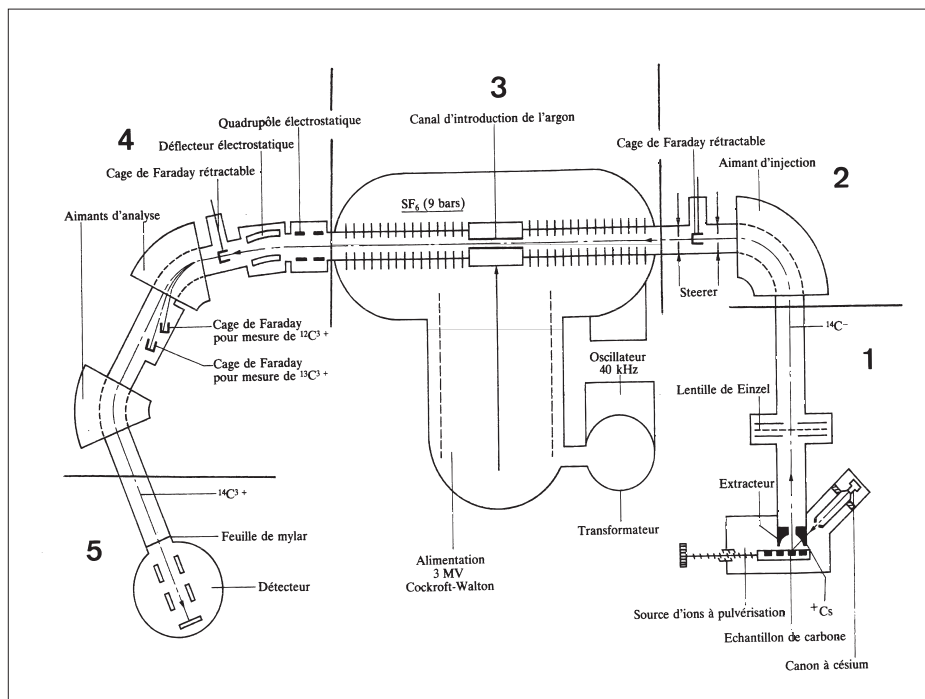


Figura 5. Representació esquemàtica (Duplessy, Arnold, 1985; p. 464) d'un sistema de mesura del contingut de radiocarboni per espectrometria de masses amb accelerador (AMS). Els números fan referència a les etapes del procés de mesura descrites en el text.

els seus constituents C i H i es produeixen els ions positius  $^{14}\text{C}^{3+}$ ,  $^{13}\text{C}^{3+}$  i  $^{12}\text{C}^{3+}$ . Els ions positius així produïts sofreixen una nova etapa d'acceleració sotmetent-los ara a una diferència de potencial decreixent d'1 MV.

4. El feix de ions positius se sotmet a un altre camp magnètic perpendicular a la seva trajectòria que separa els ions de  $^{14}\text{C}$  dels ions dels seus isòtops.

5. Finalment, el feix de ions de  $^{14}\text{C}$  penetra en una cambra de ionització on són detectats i comptats.

L'avantatge més notori de la datació per radiocarboni mitjançant AMS davant els mètodes radiomètrics clàssics és que el temps de mesura necessari és molt més curt — 1-2 hores, davant 1-2 dies — i que la quantitat de mostra requerida és unes 1000 vegades més petita — alguns mil·ligrams, davant d'alguns grams. Tanmateix, cal ser assenyat davant aquesta qualitat tan engrescadora ja que pot ser il·lusòria. En efecte, l'ús dels mètodes directes de mesura fa de la datació per radiocarboni un mètode virtualment no destructiu que permet la datació directa (no per associació) d'artefactes i possibilita la datació de quantitats mínimes de material, com ara un únic fragment de carbó o una única llavor carbonitzada. En aquestes cir-

cumstàncies, però, cal qüestionar-se la representativitat (vegeu apartat 5.3) del material de l'esdeveniment arqueològic que interessa datar, ja que quantitats tan petites de material poden haver arribat accidentalment al nivell o context 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 gran.

#### 4. EXPRESSIÓ DE LES DATES RADIOCARBÒNIQUES

El decaïment radioactiu és un fenomen aleatori i encara que la llei del decaïment radioactiu predigui valors exactes, aquests només s'obtidrien experimentalment després d'infinites mesures. Així, davant d'una població inicial de  $N_0$  àtoms radioactius, després d'haver transcorregut un temps  $t$ , el nombre teòric d'àtoms residuals predit per la llei del decaïment radioactiu es calcula amb l'equació següent

$$N_{\text{teor}} = N_0 e^{-\lambda t}$$

Tanmateix, si es mesurés experimentalment diverses vegades aquesta magnitud, es trobaria una sèrie de valors  $N_i$  lleugerament diferents entre si i fluctuants a l'entorn de  $N_{\text{teor}}$ .

La mitjana dels valors mesurats

$$N = \sum_{i=1}^n N_i$$

fóra una estimació del valor teòric predit per l'equació del decaïment molt més fiable que no pas la mesura obtinguda en cadascuna de les observacions, però només hi hauria una certesa absoluta que el valor estimat o experimental coincidís amb el valor teòric o veritable si es duguessin a terme infinites mesures, és a dir

$$N \rightarrow N_{\text{teor}} \text{ quan } n \rightarrow \infty$$

Com que a la pràctica, fer un nombre de mesures infinit és impossible, **tota mesura de radioactivitat està afectada d'una incertesa** que és més petita com més gran sigui el nombre de mesures realitzades o el temps esmerçat en la mesura. La figura 6 mostra una constatació experimental en una mostra real de la naturalesa aleatòria de la desintegració radioactiva i exhibeix la distribució del nombre de desintegracions detectades en una sèrie d'observacions.

Tota datació per radiocarboni es basa en la mesura del contingut inicial i el contingut residual de radiocarboni en el material objecte de datació que al seu torn requereixen la mesura del fons. Com que totes aquestes mesures estan afectades d'una incertesa, aquesta es transmet i s'acumula en la data radiocarbònica calculada a partir dels resultats primaris. Per aquest motiu, **una data radiocarbònica expe-**

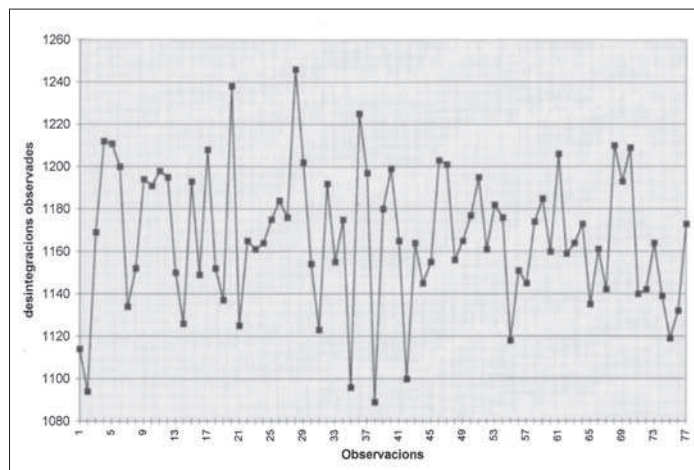


Figura 6. Desintegracions detectades per escintil·lació líquida en una mostra real que conté  $^{14}\text{C}$  en una sèrie d'observacions.

rimental no és més que una aproximació al veritable valor de la data radiocarbònica.

La relació existent entre data experimental i data veritable és una distribució de probabilitat de Gauss centrada en el valor experimental de la data radiocarbònica.

L'equació que descriu la distribució de probabilitat de Gauss associada a una data radiocarbònica és la següent:

$$\varphi(\mathbf{R}_v) = dP/d\mathbf{R}_v = [ 1/\sigma(\mathbf{R}) (2\pi)^{1/2} ] \times \exp [ - (1/2) \{(\mathbf{R}_v - \mathbf{R})/\sigma\}^2 ]$$

on  $\mathbf{R}$  (constant, a l'equació) representa la data radiocarbònica experimental i  $\mathbf{R}_v$  (variable aleatòria) representa el valor veritable de la data radiocarbònica. Aquesta equació permet calcular la probabilitat que la veritable data radiocarbònica es trobi en un interval de temps determinat expressat en l'escala cronològica radiocarbònica. La figura 7 mostra una distribució de Gauss associada a una data radiocarbònica  $\mathbf{R}$  i el càlcul que la veritable data  $\mathbf{R}_v$  es trobi en el segment de temps indicat que correspon a l'àrea subtendida entre la corba i les abscisses de l'extrem del segment de temps.

Per definir completament una data radiocarbònica és necessari, doncs, definir la seva distribució de probabilitat de Gauss associada, la qual es defineix completament per mitjà de dos paràmetres:



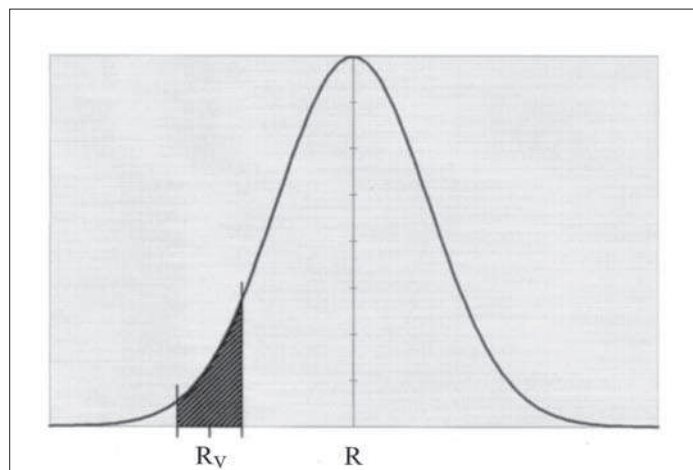


Figura 7. Distribució de Gauss associada a la data radiocarbònica experimental  $R \pm \sigma(R)$ . La probabilitat que la veritable data radiocarbònica  $R_v$  es trobi en el segment indicat és igual a l'àrea ombrejada.

<b>El valor mitjà: data radiocarbònica experimental</b>	<b>R</b>
<b>La desviació típica</b>	<b><math>\sigma(R)</math></b>

Per aquest motiu una data radiocarbònica es representa mitjançant el format  $R \pm \sigma(R)$  on s'expliciten els dos paràmetres que defineixen la distribució de probabilitat de Gauss associada. Com a resum i conclusió de tot això, s'ha de destacar que cal veure una data radiocarbònica no com un valor puntual, sinó com un interval continu de valors associats a una distribució de probabilitat de Gauss.

**El sentit que té la distribució de probabilitat de Gauss associada a una data radiocarbònica és que delimita un espai de temps caracteritzat pel fet que en qualsevol segment de temps inclòs en el seu interior hi ha una probabilitat no nul·la i calculable que contingui el veritable valor de la data radiocarbònica (figura 7).**

El valor experimental corresponent a una veritable data radiocarbònica pot ser, amb una probabilitat més gran o més petita, qualsevol dintre de l'espai de temps que delimita la distribució de probabilitat i la seva desviació típica depèn de les condicions experimentals en què s'hagi dut a terme la mesura. Això significa que una mateixa veritable data radiocarbònica pot tenir expressions diverses. Així, la veritable data radiocarbònica  $R_v$  pot representar-se:

$$R_1 \pm \sigma(R_1)$$

$$R_2 \pm \sigma(R_2)$$

La possibilitat de la multiplicitat de representacions d'una mateixa data radiocarbònica veritable origina dues qüestions diferents que només es plantejaran sense resoldre-les (la seva resolució ocuparia massa espai) però que els usuaris de dates radiocarbòniques han de conèixer:

**Primera qüestió:** Si es té un conjunt de dues o més dates radiocarbòniques, com pot saber-se si aquest conjunt de dates correspon a una mateixa data radiocarbònica veritable; és a dir, si aquest conjunt de dates representa un mateix moment cronològic o no. Si la resposta és afirmativa i es compleixen determinats requisits arqueològics el conjunt de les dates es pot substituir per la mitjana ponderada amb el consegüent benefici en la precisió que això suposa.

**Segona qüestió:** Si es tenen dues dates radiocarbòniques experimentals, quins requisits s'han de complir, perquè aquestes dates representin dos moments distints, és a dir, quina és la mínima diferència de temps que la datació per radiocarboni pot distingir. Aquesta qüestió respon a la necessitat d'avaluar el poder de resolució de la datació per radiocarboni.

## 5. MATERIALS APTES PER A LA DATACIÓ I VALIDESA DE LES DATES RADIOCARBÒNIQUES

Tota data radiocarbònica, com tota mesura analítica, ha de complir una condició ineludible que és la seva validesa. La data radiocarbònica transcendeix al mateix material datat ja que se n'extreuen conclusions cronològiques que s'extrapolen a àmbits molt més extensos i per aquest motiu s'han de complir un conjunt de requisits d'ordres diferents.

Així, quan un arqueòleg proporciona al laboratori una mostra de material carbonós per datar, no li interessa la data radiocarbònica del material sinó que li interessa la data del context arqueològic d'on procedeix el material objecte de la datació. Per aquests motius, per fornir una data radiocarbònica vàlida, els materials han de complir tres ordres de requisits: **requisits quimicofísics** que fan referència al material objecte de datació, **requisits tècnics**, relatius a la mesura del contingut de radiocarboni i **requisits arqueològics**.

### 5.1. Requisits d'ordre quimicofísic

Perquè una data radiocarbònica pugui ser vàlida primer que res cal qüestionar-se la capacitat del material datat per produir una data radiocarbònica vàlida. Perquè un material pugui proporcionar una data radiocarbònica vàlida s'han de respectar dues condicions necessàries:

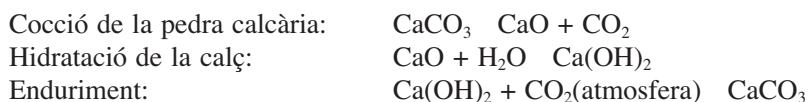
1. Compliment de la primera hipòtesi fonamental en què es basa la datació per radiocarboni: el contingut específic de radiocarboni és el mateix en tot el DBC.
2. Possibilitat d'una eliminació eficaç de la contaminació.

S'ha vist que la segona hipòtesi és complida per l'atmosfera, la biosfera i l'humus i per tant els materials procedents d'aquests compartiments són, almenys teòricament, excel·lents materials per a la datació per radiocarboni. La hidrosfera presenta un contingut de radiocarboni més baix que el dels altres compartiments i per aquest motiu els materials que en procedeixen proporcionen dates més altes que els materials contemporanis originats als altres compartiments. Que la hidrosfera no compleixi la segona hipòtesi no vol dir que els materials que en procedeixen no puguin ser objecte de datació ja que per algunes finalitats l'edat aparent és intranscendent o poden proporcionar seqüències cronològiques regionals. Per corregir l'excés d'edat radiocarbònica que afecta els materials d'origen marí es pot fer servir l'edat aparent, amb les limitacions que ja s'han vist abans (Ap. 2.3) o bé cal recórrer al calibratge de les dates radiocarbòniques, amb les dificultats que això comporta i que es veuran més endavant (Ap. 6.1). La taula II mostra una relació de materials que poden ser objecte de datació per radiocarboni.

**Taula II:** Materials aptes per a la datació classificats en funció del seu origen

Atmosfera	Biosfera	Humus	Hidrosfera
Morter	Fusta Carbó Llavors carbonitzades Pol·len Espart Vímnet Paper Papir Teixits Ossos Banyes Cabells Closques d'ou Cera Cuir Pergamí	Torba	Closques Coralls

El morter constitueix un exemple excel·lent per il·lustrar la importància dels requisits que ha de complir un material per proporcionar una data radiocarbònica vàlida. En efecte, el procés de preparació del morter i el seu enduriment és el següent:

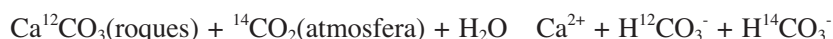


Conseqüentment, el contingut inicial de radiocarboni en el morter hauria de ser el mateix que el de l'atmosfera, però hi ha dos factors que s'oposen a aquesta equivalència:

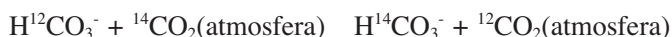
1. Cocció imperfecta de la pedra calcària que deixa restes de carbonat càlcic original al conglomerant
2. Addició d'àrids que continguin materials calcaris

Aquests dos factors, junts o cadascun per separat, provoquen una disminució del contingut inicial de radiocarboni, és a dir, falla la primera condició. A més, la contaminació causada pel carbonat antic d'origen geològic no es pot eliminar per mitjans químics perquè és de la mateixa naturalesa química que el que s'ha format en el procés de l'enduriment, és a dir, falla la segona condició. En qualsevol cas, la data radiocarbònica procedent d'un morter pot estar afectada d'un error per excés i s'ha de considerar com un *terminus post quem*.

Els materials biogènics formats en aigües continentals de regions calcàries tenen un contingut específic de radiocarboni deficitari a causa de la dissolució de les roques calcàries. En efecte, les aigües de pluja contenen diòxid de carboni i per aquest motiu exerceixen una acció dissolvent sobre la roca calcària, exempta ja de radiocarboni per la seva antiguitat, segons la reacció química següent:



Les aigües que contenen la roca calcària dissolta continuen bescanviant diòxid de carboni amb l'atmosfera, segons l'equilibri químic següent:



La primera reacció produeix un efecte empobridor del contingut de radiocarboni al 50% mentre que la segona exerceix un efecte enriquidor del contingut de radiocarboni en una proporció que depèn de les circumstàncies hidrogeològiques particulars. En definitiva, les aigües continentals de les regions calcàries contenen carboni en forma de diòxid de carboni i de ió hidrogencarbonat empobrit en radiocarboni i en conseqüència també la matèria orgànica procedent dels éssers vivents formats en aquest medi tindrà un contingut de radiocarboni deficitari i proporcionarà edats radiocarbòniques més altes.

Es coneixen també materials biogènics terrestres que contravenen la segona hipòtesi fonamental de la datació per radiocarboni. Aquest és el cas de les closques de gastròpodes terrestres en què el carboni assimilat per a la síntesi del car-

bonat càlcic procedeix en part del sòl; per aquest motiu, el contingut inicial de radiocarboni és més baix i proporcionen dates radiocarbòniques també altes.

## 5.2. Requisits d'ordre tècnic

Els requisits d'ordre tècnic que ha de respectar una data radiocarbònica són que compleixi les condicions d'**exactitud** i de **precisió**. Per **exactitud** d'una data radiocarbònica s'entén la bona correspondència entre la veritable data radiocarbònica del material datat i la data radiocarbònica trobada experimentalment pel laboratori de datació. L'exactitud d'una data radiocarbònica és competència del laboratori i depèn de tres factors: de la idoneïtat i la qualitat del procediment aplicat per eliminar la contaminació —l'elecció encertada del qual depèn de la informació subministrada per l'arqueòleg al laboratori—, de la bondat del procediment químic tendint a la mesura del contingut de radiocarboni i de la qualitat de la mateixa mesura del contingut de radiocarboni.

La **precisió** fa referència a l'amplitud de l'espai de temps en què es pot trobar la veritable data radiocarbònica. Com més petita és la desviació típica, més estreta és la distribució de Gauss associada a una data radiocarbònica i, per tant, més precisa és la data. La precisió d'una data depèn de la quantitat de material de què es disposa, de l'antiguitat del material i del temps invertit en la mesura de l'activitat del radiocarboni.

El grau de validesa d'una data radiocarbònica respecte de la seva precisió no és absolut sinó que depèn de la disponibilitat i la precisió d'altres dates referides a la mateixa entitat arqueològica. Així, la primera data radiocarbònica referida a un determinat fenomen arqueològic és vàlida encara que no sigui gaire precisa; una data no gaire precisa també és vàlida si les dates anàlogues tampoc no ho són, però no té gens de validesa si les dates anàlogues són molt més precises que ella. Com més precisa és una data radiocarbònica més ben definida queda la seva exactitud. En termes senzills, però bastant aproximats, pot afirmar-se que una data és exacta quan el seu veritable valor es troba dins de l'interval limitat per la distribució de probabilitat de Gauss, i és inexacta quan cau fora d'aquest interval.

## 5.3. Requisits d'ordre arqueològic

El compliment dels requisits químicofísics i tècnics són una condició necessària però no suficient per a la validesa d'una data radiocarbònica; s'ha de complir una altra condició necessària i és que la data radiocarbònica sigui **representativa** de l'esdeveniment o context arqueològic que es pretén datar. Per **representativitat** d'una data radiocarbònica s'entén la bona correspondència entre la data radiocarbònica del material datat i la data radiocarbònica del context o esdeveniment arqueològic que es pretén datar. La causa d'aquest requisit és el fet que, per la seva

pròpia naturalesa, la datació per radiocarboni data la formació dels materials i no els esdeveniments arqueològics en què participen o els contextos on es troben aquests materials. D'això es dedueix que perquè una data radiocarbònica sigui representativa de l'esdeveniment que es pretén datar, el material datat ha de complir dues condicions necessàries: en primer lloc, que el material mateix o la seva presència en el context arqueològic ha de ser producte de l'activitat del grup humà que creà el context i, en segon lloc, que la seva formació sigui contemporània al context arqueològic. Aquestes dues condicions del material datat s'anomenaran **associació** i **sincronia**, respectivament, i juntes conformen la **representativitat** de la data radiocarbònica. L'associació no comporta necessàriament la sincronia ja que hi pot haver associació sense sincronia. Així, els elements constructius de fusta d'un edifici estan, evidentment, associats a l'edifici, però si la fusta fos reutilitzada, procedent d'una construcció més antiga, mancaria el requisit de la sincronia i la fusta no representaria l'esdeveniment arqueològic que fóra la construcció de l'edifici. Un altre exemple de manca de sincronia el constitueix la datació d'un artefacte d'os perfectament associat al seu context arqueològic, però elaborat sobre una peça d'os ja antiga en el moment de la seva talla; la data trobada correspondria al moment de la formació de l'os i no al moment de l'elaboració de l'artefacte que és la representativa del context. En general, el material objecte de datació té una edat més antiga que el moment en què es va dipositar i va quedar associat al context arqueològic que es pretén datar, és a dir, que els defectes de sincronia produeixen dates radiocarbòniques més altes.

## 6. EL CALIBRATGE DE LES DATES RADIOCARBÒNIQUES

La forma més natural d'expressar quantitativament el transcurs del temps és el calendari solar en què la unitat cronomètrica és el període de rotació de la terra al voltant del sol, és a dir, l'any solar, constituït pel cicle de les estacions i que segons l'origen d'escala adoptat origina les distintes escales cronològiques solars: l'escala aC/dC i l'escala BP<sup>4</sup>. La datació per radiocarboni, a causa de les hipòtesis adoptades, origina la seva pròpia escala cronològica, **l'escala cronològica radiocarbònica** que discrepa de **l'escala cronològica solar**. Amb la finalitat de poder correlacionar la cronologia històrica, expressada en dates solars, amb la cronologia radiocarbònica, expressada en dates radiocarbòniques, és necessari poder transformar les dates radiocarbòniques en dates solars. La transformació de les dates radiocarbòniques en dates solars s'anomena **calibratge de les dates radiocarbòniques**.

Per poder realitzar un calibratge cal disposar d'una correlació empírica entre les dates solars i les seves dates radiocarbòniques corresponents. La representació gràfica de la correlació entre les dates solars i les corresponents dates radiocarbò-

4. L'escala cronològica solar BP té el seu origen en l'any 1950 dC i compta els anys en sentit retrògrad

niques s'anomena **corba de calibratge**. Aquesta correlació pot obtenir-se a través de la datació per radiocarboni de materials d'edat solar exactament coneguda i obtinguda per mètodes independents. Com que la datació per radiocarboni origina un sistema dual de dates: les dates de materials d'origen terrestre i les dates de material d'origen marí, serà també necessari disposar d'una corba de calibratge per a cada tipus de materials.

S'han fet servir dues classes de materials per establir les corbes de calibratge:

**Cel·lulosa:** L'edat solar de la fusta d'on s'extreu pot determinar-se per dendrocronologia

**Coralls:** L'edat solar pot determinar-se mitjançant datació per U/Th

### 6.1. Les corbes de calibratge

La corba de calibratge per a materials d'origen terrestre consta de tres trams:

#### **Tram 1950 dC - 7890 aC**

Obtingut de la datació per radiocarboni de cel·lulosa procedent de fusta l'edat solar de la qual es coneix per dendrocronologia. Mesures contrastades en arbres europeus i americans. Tram d'alta precisió i d'alta exactitud que garanteix la seva aplicabilitat a tot l'hemisferi nord.

#### **Tram 7890 aC - 9400 aC**

Obtingut de la datació per radiocarboni de cel·lulosa procedent de fusta l'edat solar de la qual es coneix per dendrocronologia. Tram d'alta precisió.

#### **Tram 9450 aC - 20000 aC**

Obtinguda de la datació per radiocarboni de coralls l'edat solar dels quals es coneix mitjançant la datació per U/Th. S'aplica una correcció de 400 anys BP a les dates radiocarbòniques per corregir l'edat aparent de la hidrosfera.

La corba de calibratge per a materials d'origen marí consta de dos trams:

#### **Tram 1950 dC - 9400 aC**

Obtingut per càlcul aplicant el model matemàtic de transferència de radiocarboni des de l'atmosfera als oceans a les dates obtingudes per dendrocronologia.

#### **Tram 9400 aC - 20000 aC**

Obtinguda de la datació per radiocarboni de coralls l'edat solar dels quals es coneix mitjançant la datació per U/Th.

La corba de calibratge per a materials d'origen terrestre és universal i es pot utilitzar directament però la corba de calibratge per a materials d'origen marí s'ha

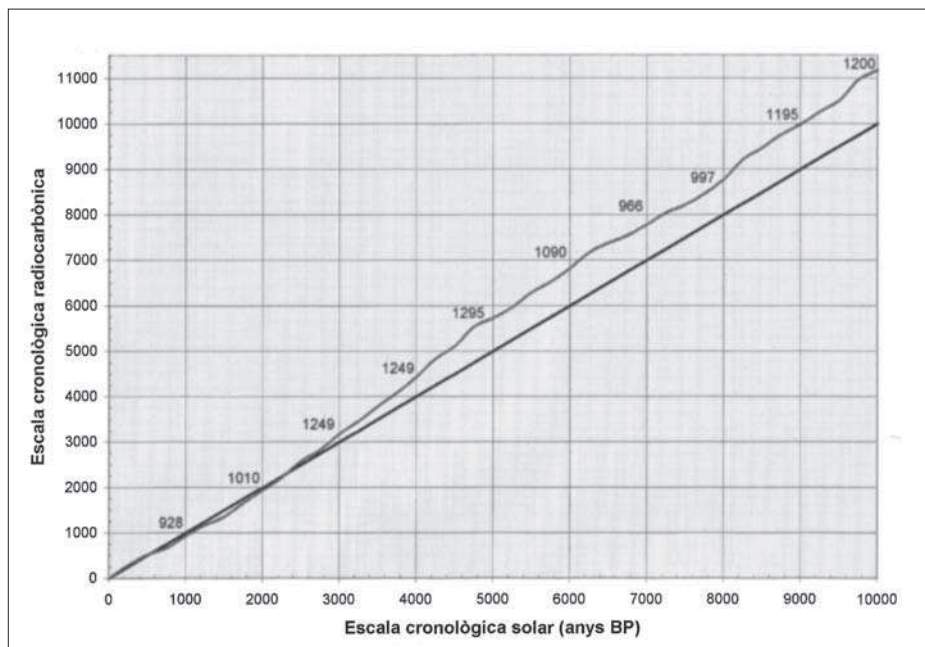


Figura 8. Forma general de la corba de calibratge per a materials d'origen terrestre per als darrers 10.000 anys. L'eix d'abscisses representa l'escala cronològica solar BP (nota al peu 3). Al costat de la corba s'indiquen el nombre d'anys solars corresponents a cadascun dels deu primers mil·lennis de l'escala cronològica radiocarbònica.

d'ajustar empíricament a les condicions locals corresponents a la regió geogràfica d'on procedeix el material datat.

## 6.2. Característiques de les corbes de calibratge

Les corbes de calibratge poden observar-se des de dos punts de vista: des d'un punt de vista global, és a dir per a llargs períodes de temps, i des d'un punt de vista restringit, per a períodes de temps curts. L'observació global revela les tendències generals de la corba de calibratge i les relacions entre l'escala cronològica radiocarbònica i l'escala cronològica solar. La figura 8 mostra, des d'un punt de vista global, la corba de calibratge per a materials d'origen terrestre per als darrers 10.000 anys; en ordenades es representa l'escala radiocarbònica i en abscisses, l'escala cronològica solar BP. Com a tret més característic es confirma que ambdues escales cronològiques no són equivalents, ja que si ho fossin, la correlació entre elles seria representada per la línia recta. Es pot veure també el nombre d'anys radiocarbònics que corresponen als diferents mil·lennis de l'escala radiocarbònica solar va variant.



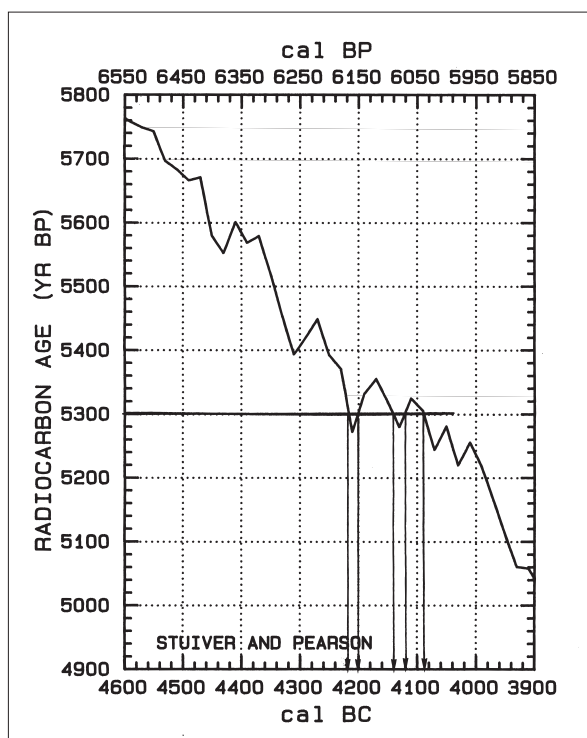


Figura 9. Tram de la corba de calibratge (Pearson, Stuiver, 1993; p. 16) amb indicació de les dates solars relatives a la data radiocarbònica 5300 BP. Les dates solars relatives a una data radiocarbònica corresponen a les interseccions de la data radiocarbònica amb la corba de calibratge.

L'observació des d'un punt de vista restringit (figura 9) de la corba de calibratge mostra que aquesta corba està fortament estructurada ja que presenta pics i valls la qual cosa estableix una relació no unívoca entre l'escala cronològica radiocarbònica i l'escala cronològica solar, en el sentit que a cada data solar correspon una i només una data radiocarbònica, però que a cada data solar pot correspondre més d'una data radiocarbònica. La figura 9 mostra, com a exemple que a la data radiocarbònica 5300 BP li corresponen cinc dates solars.

De l'observació de les corbes de calibratge es poden extreure les conclusions següents:

- L'escala cronològica radiocarbònica no és equivalent a l'escala cronològica solar
- La unitat cronomètrica de l'escala cronològica radiocarbònica, l'any BP, unitat cronomètrica de l'escala cronològica radiocarbònica, no és equivalent a l'any solar i, a més, l'any BP no es manté constant en el transcurs del temps

– No hi ha una correspondència unívoca entre l'escala cronològica radiocarbònica i l'escala cronològica solar: a cada data radiocarbònica pot correspondre més d'una data solar

– També, pel fet de ser ambdues escales cronològiques diferents, és vivament desaconsellable la pràctica habitual de sostreure 1.950 anys a les dates radiocarbòniques amb la finalitat d'expressar-les en cronologia solar aC o dC. L'únic recurs vàlid per transformar una data radiocarbònica en una data solar és el seu 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.**

### 6.3. La pràctica del calibratge de les dates radiocarbòniques

El calibratge d'una data radiocarbònica és un procés complex per tres motius:

– Pel caràcter no puntual sinó probabilístic de la data radiocarbònica, la qual cosa implica que la data calibrada tampoc no sigui puntual, sinó que vagi associada una distribució de probabilitat

– Per la incertesa que afecta la mateixa corba de calibratge, ja que els seus punts són dates radiocarbòniques

– Per la forma complexa de la corba de calibratge.

La distribució de probabilitat de la veritable data calibrada  $T$  s'obté substituint en l'expressió de la distribució de probabilitat de la veritable data radiocarbònica  $R_v$

$$dP/dR_v = \phi(R_v) = [1/\sigma(2\pi)^{1/2}] \times \exp[-(1/2) \times \{(R_v - R)/\sigma\}^2]$$

aquesta variable per la funció empírica que correlaciona les dates radiocarbòniques amb les dates solars:  $R = f\langle T \rangle$

$$dP/dT = \psi(T) = [k/\sigma_T(2\pi)^{1/2}] \times \exp[-(1/2) \times \{(f\langle T \rangle - R)/\sigma_T\}^2]$$

on  $k$  és una constant de normalització i  $\sigma_T$  representa la desviació típica total que inclou la de la pròpia corba de calibratge. La distribució de probabilitat de la data calibrada és complexa a causa de la complexitat de la corba de calibratge  $R = f\langle T \rangle$  que es manifesta per la seva manca de linealitat i el seu caràcter no unívoc: és una distribució de probabilitat multimodal i presenta tantes modes màximes com vegades es compleixi la condició  $f\langle T \rangle - R = 0$ , és a dir, com interseccions

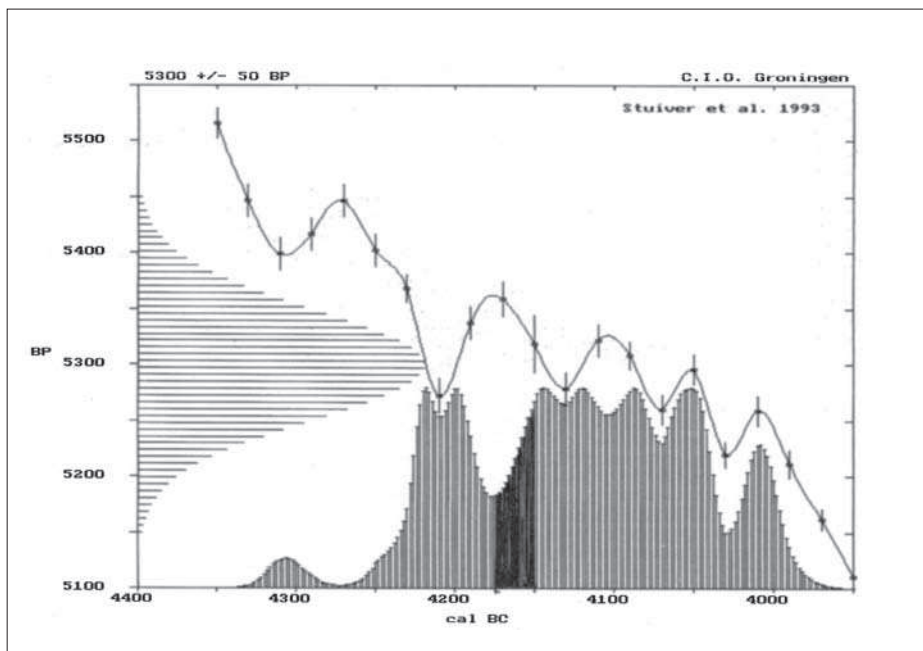


Figura 10. Tram de la corba de calibratge amb indicació sobre l'eix d'ordenades de la distribució gaussiana de probabilitat associada a la data radiocarbònica experimental  $5300 \pm 50$  BP i sobre l'eix d'abscisses la distribució de probabilitat de la veritable data calibrada (van der Plicht, 1993). L'àrea més fosca indica la probabilitat que la veritable data calibrada es trobi dins l'interval de temps marcat.

presenti la corba de calibratge amb la data radiocarbònica. Per aquests motius la distribució de probabilitat de la data calibrada és una distribució de probabilitat no simètrica, és diferent i particular per a cada data radiocarbònica i no està associada a cap expressió matemàtica coneguda.

Com a exemple, la figura 10 mostra un tram de la corba de calibratge, en ordenades la distribució de probabilitat de la veritable data radiocarbònica corresponent a la data radiocarbònica experimental  $5300 \pm 50$  BP i en abscisses la distribució de probabilitat corresponent a la veritable data calibrada. Pot observar-s'hi el caràcter complex de la distribució de probabilitat de la data calibrada, el caràcter multimodal i la seva absoluta falta de simetria. 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 existeix una probabilitat no nul·la i calculable que la veritable data radiocarbònica es trobi en qualsevol segment de temps inclòs en el seu interior.** La figura 10 mostra el càlcul que la veritable data calibrada es trobi en el segment assenyalat.

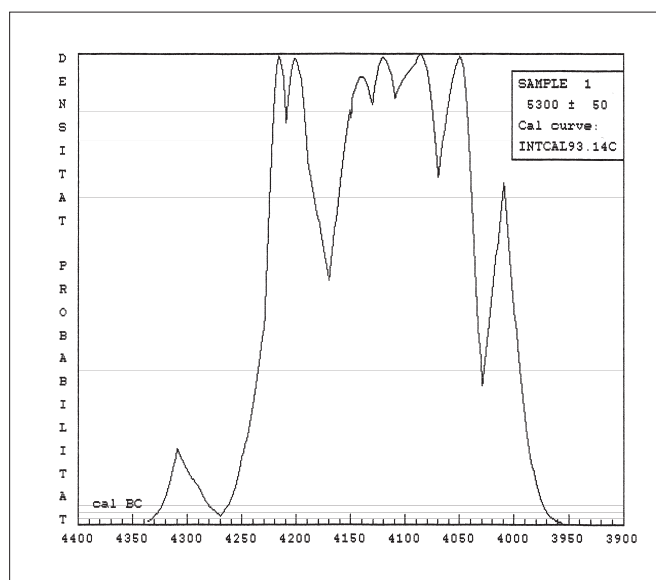


Figura 11. Distribució de probabilitat de la data calibrada corresponent a la data radiocarbònica experimental  $5300 \pm 50$  BP (Stuiver, Reimer, 1993). Pot observar-se el caràcter complex de la distribució de probabilitat, el seu caràcter multimodal i les modes màximes corresponents a la intersecció de la data radiocarbònica amb la corba de calibratge

#### 6.4. L'expressió de les dates calibrades

Com que la distribució de probabilitat de les dades calibrades no respon a cap distribució de probabilitat coneguda associada a una expressió matemàtica i és particular i diferent per a cada data radiocarbònica no és possible l'expressió paramètrica com és el cas de les dates radiocarbòniques que s'expressen amb dos paràmetres:  $R$  i  $\sigma(R)$ . A causa de la complexitat de la distribució de probabilitat, l'expressió més completa i precisa d'una data calibrada és la seva **distribució de probabilitat** i la **corba de probabilitat acumulada**.

La distribució de probabilitat (figura 11) permet apreciar les modes i les regions de probabilitat més alta; la corba de probabilitat integral (figura 12) permet calcular fàcilment la probabilitat que la veritable data calibrada sigui més petita que un valor determinat.

Les corbes de probabilitat acumulada permeten calcular fàcilment la probabilitat que la veritable data calibrada es trobi en un interval de temps determinat com la diferència de les ordenades corresponents als extrems de l'interval. Per aquest motiu, aquestes corbes són molt útils per contrastar hipòtesis cronològiques basades exclusivament en l'evidència arqueològica. Com a exemple de la utilitat i apli-

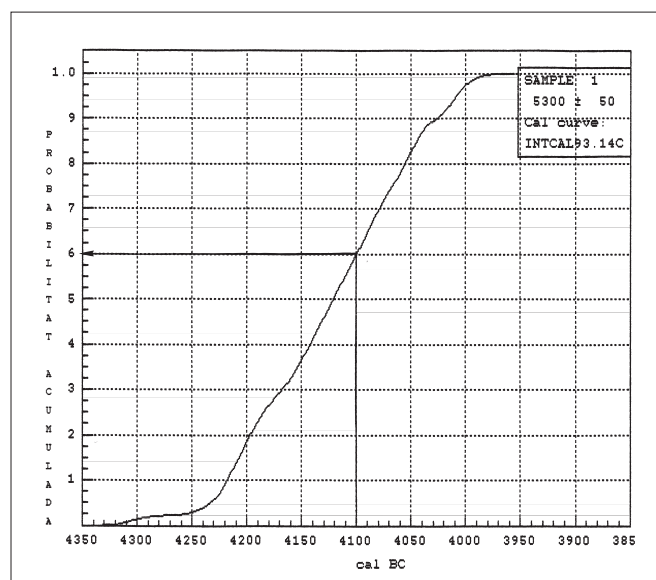


Figura 12. Corba de probabilitat acumulada corresponent a la data radiocarbònica experimental 5300 ( ± 50 BP (Stuiver, Reimer, 1993). Com a exemple del seu significat, es mostra que la probabilitat que la veritable data calibrada sigui anterior a l'any 4100 aC és del 60%.

cació de les corbes de probabilitat acumulada, se cita la data radiocarbònica UBAR-480: 2355 ± 30 BP (Mestres, 1997) corresponent al segon nivell ibèric de L'Esquerda (Les Masies de Roda de Ter, Osona): l'evidència arqueològica atribueix a aquest nivell a l'Ibèric Ple i en particular al segle IV aC; la corba de probabilitat acumulada (figura 13) confirma amb un nivell de confiança apreciable la hipòtesi arqueològica, ja que la probabilitat que la veritable data calibrada es trobi en el segle IV aC és del 80%.

De vegades, la necessitat de tabulació de conjunts de dates calibrades exigeix una **expressió numèrica** senzilla de les dates calibrades. Aleshores, fent un símil amb l'expressió numèrica de les dates radiocarbòniques, es recorre a l'expressió dels intervals de temps que centrats en les modes de la distribució de probabilitat de la data calibrada sumen una probabilitat del 68,3% o bé del 95,4%. L'elecció d'aquests valors de probabilitat és arbitrària però es justifica per analogia amb les dates radiocarbòniques i són els mateixos valors de la probabilitat que la veritable data radiocarbònica caigui en els intervals que centrats en el valor experimental tinguin una amplada de dues o quatre desviacions típiques, respectivament. La manera de calcular aquests intervals és anar abaixant una recta paral·lela a l'eix d'abscisses fins que l'àrea subtendida per la corba i les abscisses dels punts d'in-

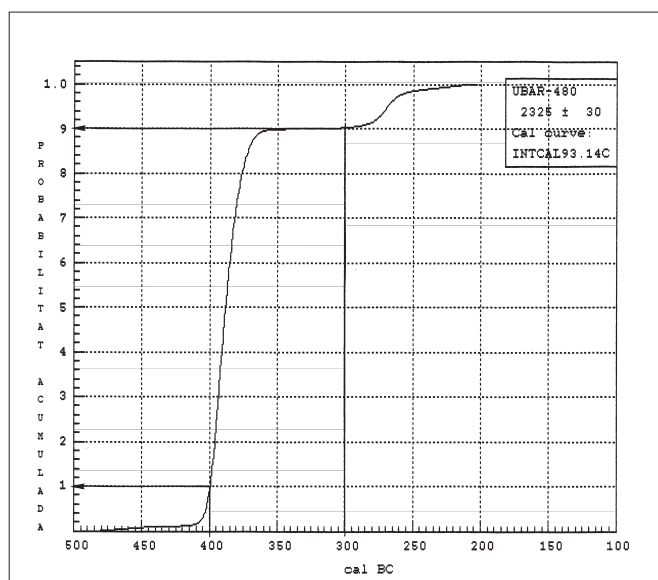


Figura 13. Il·lustració del càlcul de la probabilitat que la veritable data calibrada corresponent a la data radiocarbònica experimental UBAR-480:  $2325 \pm 30$  BP es trobi en el segle IV aC:  $0,90 - 0,10 = 0,80$  (80%).

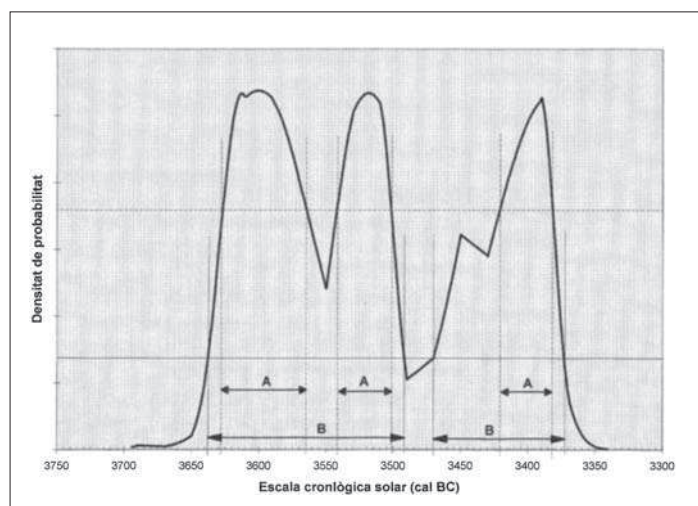


Figura 14. Il·lustració del càlcul dels intervals de probabilitat del 68,3% i del 95,4% de la data calibrada corresponent a la data radiocarbònica experimental  $4750 \pm 50$  BP. Els intervals designats per A sumen una probabilitat del 68,3% que la veritable data calibrada es trobi en un qualsevol d'ells. Anàlogament, els intervals designats per B sumen una probabilitat del 95,4% que la veritable data calibrada es trobi al seu interior.

tersecció siguin els valors indicats. D'aquesta manera es genera un únic interval o un conjunt d'interval de temps en què la probabilitat que les probabilitats que la veritable data calibrada es trobi a dins suma el valor indicat (figura 14). El quadre I mostra un exemple d'expressió numèrica de la mateixa data radiocarbònica calibrada utilitzada a l'exemple del càlcul de la figura 14 amb indicació de les interseccions corresponents a les modes màximes de la distribució de probabilitat i dels intervals corresponents a cadascuna d'aquelles probabilitats amb la seva probabilitat associada.

**Quadre I.** Representació numèrica d'una data calibrada

Data radiocarbònica: 4740 ± 50 BP	
• Interseccions (modes màximes): cal BC 3613, 3600, 3519	
• Intervals per a un 68,3% de probabilitat:	
cal BC 3627 - 3565	p = 30,1%
cal BC 3542 - 3502	p = 19,8%
cal BC 3421 - 3382	p = 18,4%
• Intervals per a un 95,4% de probabilitat:	
cal BC 3638 - 3492	p = 62,0%
cal BC 3471 - 3373	p = 33,4%

## 7. APLICACIONS DE LES DATES RADIOCARBÒNIQUES

El resultat d'una datació per radiocarboni, és a dir, la data radiocarbònica o la data calibrada corresponent, és una font d'informació cronològica que pot utilitzar-se de maneres distintes segons el coneixement que es tingui de l'entitat o context arqueològic a què fa referència la data.

Si l'entitat arqueològica és identificable, la data radiocarbònica s'integra en l'inventari constituït per les altres dates referides a la mateixa entitat arqueològica i, posteriorment, l'anàlisi d'aquest inventari permetrà estimar la duració de la vigència de l'entitat arqueològica en el passat prehistòric i la seva situació dins del marc cronològic, és a dir, permetrà estimar el seu període de vigència. En aquestes condicions les dates radiocarbòniques s'utilitzen amb una finalitat **inductiva**.

Si pel contrari, l'entitat arqueològica és desconeguda o no se li pot atribuir una descripció cronocultural per mitjans exclusivament arqueològics, la seva data radiocarbònica pot comparar-se amb les dates radiocarbòniques ja existents del re-

gistre arqueològic o històric general i inferir així la seva atribució cronocultural o bé establir relacions de sincronia o diacronia amb altres entitats arqueològiques conegudes. En aquestes circumstàncies, la data radiocarbònica s'utilitza amb una finalitat **deductiva**.

La forma més immediata d'utilitzar una data radiocarbònica és la deductiva, però convé observar que la utilització deductiva d'una data radiocarbònica exigeix una anàlisi inductiva prèvia, almenys implícita, dels inventaris de dates radiocarbòniques de què ja es disposa.

### 7.1. Períodes de vigència

La inferència del període de vigència d'una entitat arqueològica, a través de l'inventari de les dates radiocarbòniques pot fer-se d'una manera estadísticament rigorosa mitjançant l'anàlisi probabilística del conjunt de les dates radiocarbòniques que integren l'inventari. Des del punt de vista arqueològic, s'entén per període de vigència d'una entitat arqueològica amb una duració intrínseca l'interval 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 per la seva representativitat de l'entitat arqueològica. **Des del punt de vista estadístic, s'entén per període de vigència d'una entitat arqueològica el període de temps caracteritzat pel fet que en qualsevol segment temporal inclòs al seu interior hi ha una probabilitat no nul·la i calculable que contingui almenys una de les veritables dates radiocarbòniques o solars.**

Per al càlcul del període de vigència, cal tenir en compte que un conjunt de  $n$  dates radiocarbòniques  $R_i \pm \sigma(R_i)$  és en realitat un conjunt de distribucions de probabilitat  $\phi_i(R)$  de les veritables dates radiocarbòniques al voltant dels respectius valors experimentals. Aleshores, la probabilitat  $dp_i$  que la veritable data radiocarbònica  $i$  es trobi en segment de temps limitat per  $R$  i  $R+dR$  és

$$dp_i = \phi_i(R)dR$$

i la probabilitat  $dP$  que una qualsevol del conjunt de les veritables dates es trobi en el mateix segment de temps és

$$dP = \sum_i dp_i = (1/n) \sum_i \phi_i(R)dR$$

Anàlogament, la probabilitat  $dP$  que una qualsevol de les veritables dades calibrades es trobi en un segment de temps limitat per  $T$  i  $T+dT$  és

$$dP = \sum_i dp_i = (1/n) \sum_i \psi_i(T)dT$$

Definit d'aquesta manera, **el període de vigència equival a una distribució**



**de probabilitat expressada en l'escala cronològica radiocarbònica o bé en l'escala cronològica solar** i la relació existent entre les dates que integren l'inventari i el període de vigència és la següent:

$$\text{Escala cronològica radiocarbònica: } dP/dR = \phi(R) = (1/n) \sum_i \phi_i(R)$$

$$\text{Escala cronològica solar: } dP/dT = \Psi(T) = (1/n) \sum_i \psi_i(T)$$

Per a l'establiment del període de vigència poden utilitzar-se tant les dates radiocarbòniques com les dates calibrades i cadascuna d'aquestes presenta avantatges i inconvenients. Així, utilitzant les dates radiocarbòniques s'obtenen els períodes de vigència expressats en l'escala cronològica radiocarbònica, però es té l'avantatge de la facilitat de l'anàlisi inductiva a causa de la relativa senzillesa de l'expressió de les dates radiocarbòniques en comparació amb les dates calibrades. La utilització de les dates calibrades presenta l'avantatge que s'obté el període de vigència expressat en l'escala cronològica solar, però té l'inconvenient que dificulta l'anàlisi inductiva a causa de la complexitat de l'expressió de les dates calibrades.

Com a exemple d'una aplicació inductiva de les dates radiocarbòniques es mostra l'establiment de la vigència dels períodes cronoculturals Pretalaiòtic i Talaiòtic a l'illa de Menorca. L'inventari de dates radiocarbòniques referides a aquesta illa i inequívocament atribuïdes per mitjans exclusivament arqueològics al període pretalaiòtic i al període talaiòtic permeten calcular les distribucions de probabilitat associades a aquests períodes cronoculturals presentats a les figures 13 i 14. Tot i que el període de vigència així definit és un concepte precís, els límits del període de vigència no ho són tant perquè la seva distribució de probabilitat associada tendeix a 0 asimptòticament. Per tal de determinar els extrems es determina un interval de temps que, centrat en la mediana de la distribució, tingui una probabilitat determinada de contenir qualsevol de les dates (radiocarbòniques o calibrades) veritables. Les figures 15 i 16 mostren les corbes integrals de probabilitat que permeten calcular els límits dels períodes de vigència amb una probabilitat determinada i la taula IV indica les expressions numèriques d'aquests períodes de vigència.

**Taula IV.** Expressió numèrica de períodes de vigència: vigència del període pretalaiòtic i talaiòtic menorquí amb un nivell de confiança del 95%

	<b>Escala cronològica radiocarbònica</b>	<b>Escala cronològica solar</b>
<b>Pretalaiòtic</b>	3545 – 2955 BP	1874 – 1136 cal BC
<b>Talaiòtic</b>	3000 – 2035 BP	1224 – 38 cal BC

Com a exemple d'aplicació deductiva de les dates radiocarbòniques es mostra l'a-

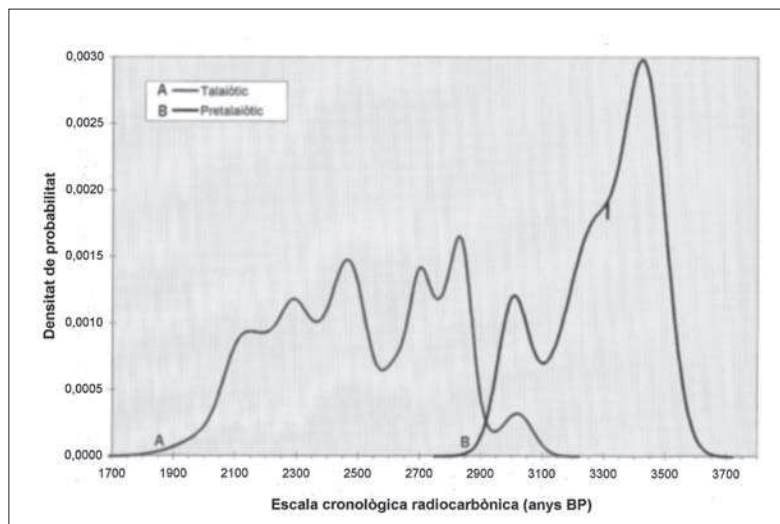


Figura 15. Distribució de probabilitat, en l'escala cronològica radiocarbònica, associada a la vigència dels períodes cronoculturals pretalaiòtic i talaiòtic.

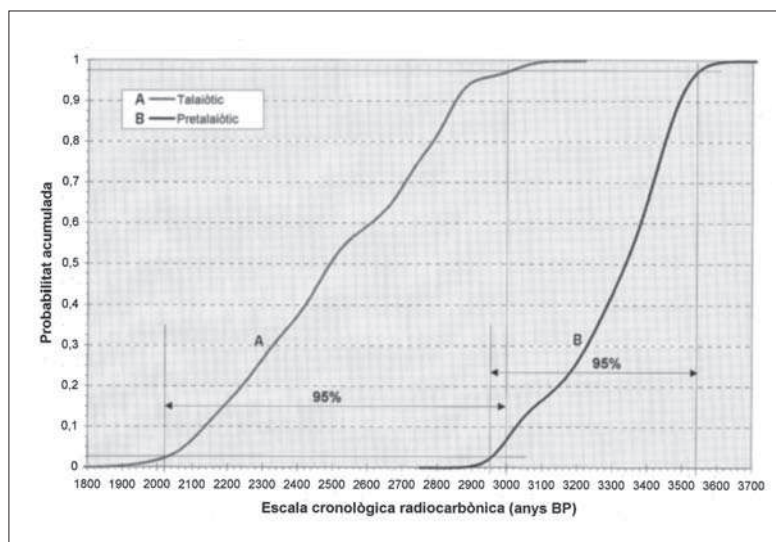


Figura 16. Probabilitat acumulada, en l'escala cronològica radiocarbònica, corresponent a la vigència dels períodes cronoculturals pretalaiòtic i talaiòtic i càlcul dels períodes de vigència amb un nivell de confiança del 95%.

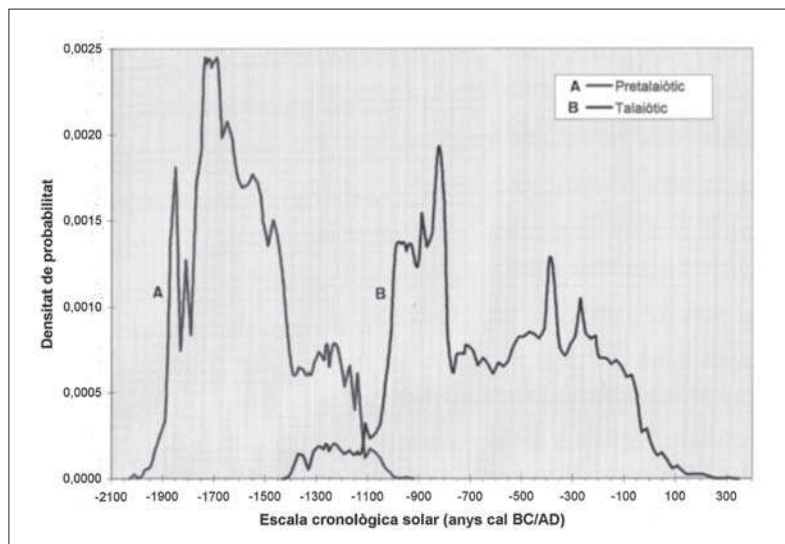


Figura 17. Distribució de probabilitat, en l'escala cronològica solar, associada a la vigència dels períodes cronoculturals pretalaiòtic i talaiòtic.

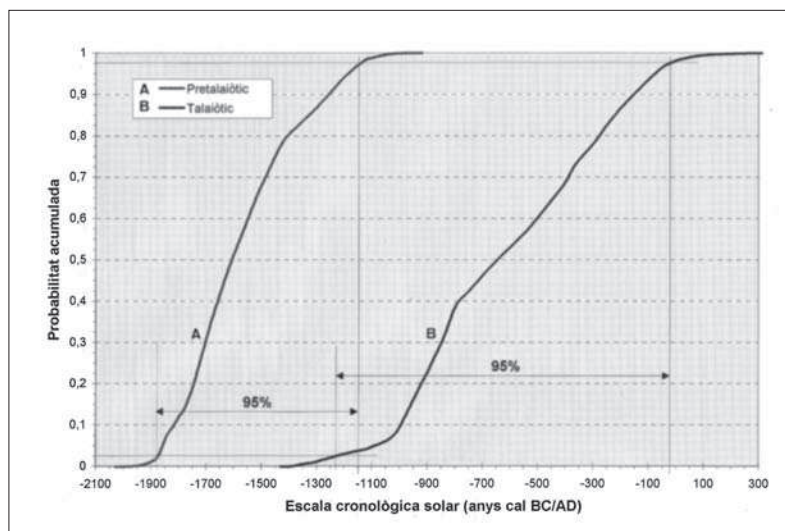


Figura 18. Probabilitat acumulada, en l'escala cronològica solar, corresponent a la vigència dels períodes cronoculturals pretalaiòtic i talaiòtic i càlcul del període de vigència amb un nivell de confiança del 95%.

tribució dels períodes cronoculturals abans establerts a moments de la utilització d'un conjunt de navetes menorquines, la qual no fóra possible per mitjans exclusivament arqueològics basats en la tipologia. La taula V indica la data radiocarbònica de moments de la utilització de navetes i l'atribució del període cronocultural corresponent.

**Taula V.** Exemple d'anàlisi inductiva. Els períodes de vigència establerts anteriorment permeten l'adscripció cronocultural de moments d'utilització de les navetes

Conjunt arqueològic	Codi del laboratori	Data radiocarbònica	Període cronocultural atribuït
Naveta de Son Morell	HAR-3413	2910 ± 100 BP	Transició de Pretalaiòtic a Talaiòtic
Naveta de Binipati Nou	OxA-5815	2900 ± 70 BP	Transició de Pretalaiòtic a Talaiòtic
Naveta de Binipati Nou	OxA-5814	2880 ± 65 BP	Talaiòtic
Naveta de Binipati Nou	OxA-5817	2860 ± 65 BP	Talaiòtic
Naveta de Cotaina	UBAR-424	2860 ± 50 BP	Talaiòtic
Naveta de Binipati Nou	OxA-5813	2770 ± 65 BP	Talaiòtic
Naveta de Binipati Nou	OxA-5816	2770 ± 65 BP	Talaiòtic
Naveta de Son Morell	HAR-2909	2770 ± 100 BP	Talaiòtic
Naveta de Binimaimut	UBAR-425	2760 ± 60 BP	Talaiòtic
Naveta de Binipati Nou	OxA-5812	2750 ± 70 BP	Talaiòtic
Naveta de Cotaina	CSIC-834	2520 ± 40 BP	Talaiòtic
Naveta de Cotaina	IRPA-1046	2575 ± 40 BP	Talaiòtic

## 7.2. Períodes d'ocupació

D'una manera similar poden estudiar-se els períodes d'ocupació d'assentaments o altres entitats territorials i aleshores, si es disposa d'un nombre suficient de dates, de la forma particular de la distribució de probabilitat poden extreure's conclusions sobre les característiques de l'ocupació.

## REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- ARNOLD, J.R.; LIBBY, W.F. (1949). "Age Determinations by Radiocarbon Content: Checks with Samples of Known Age", *Science* **110**, p. 678-680.
- DUPLESSY, J.C.; ARNOLD, M. (1985). "La mesure du carbone 14 en spectrométrie de masse par accélérateur. Premières applications". A: ROTH, E.; POTY, B. [ed.] *Méthodes de datation par le phénomènes nucléaires naturels. Applications*. Ed. Masson.
- MESTRES, J.S. (1997). Informe del Laboratori de Datació per Radiocarboni de la Universitat de Barcelona
- MESTRES, J.S.; NICOLÀS, J.C. DE (1997). "Contribución de la datación por radiocarbono al establecimiento de la cronología de la prehistoria menorquina". A: *Actas del II Congreso Nacional de Arqueometria*. Saragossa, 16-19 de setembre de 1997. (En premsa.)
- PLICHT, J. VAN DER (1993). "The Groningen Radiocarbon Calibration Program". *Radiocarbon* **35**(1), p. 1-23
- PEARSON, G.W.; STUIVER, M. (1993). "High-Precision Bidecadal Calibration of the Radiocarbon Time-Scale, AD 1950-6000 BC". *Radiocarbon* **35**(1), p. 231-237.
- STUIVER, M.; PEARSON, G.W.; BRAZIUNAS, T. (1986). "Radiocarbon age calibration of marine samples back to 9000 cal yr BP". *Radiocarbon* **28**(2B), p. 980-1021.
- STUIVER, M.; REIMER, P. (1993). "Extended <sup>14</sup>C Data Base and Revised CALIB 3.0 <sup>14</sup>C Age Calibration Program". *Radiocarbon* **35**(1), p. 215-230.
- TAYLOR, R.E. (1987). "Radiocarbon Dating. An Archaeological Perspective". Academic Press Inc. (London).