



### **Cronofunciones: modelización estadística de conjuntos de dataciones numéricas para el estudio del Cuaternario: Ejemplos para la Península Ibérica**

*Chronofunctions: statistical modelling of numerical date-sets in Quaternary Research: Examples for the Iberian Peninsula*

Silva, P.G. <sup>(1)</sup>; Roquero, E. <sup>(2)</sup>

(1) Dpto. Geología, Universidad de Salamanca, Escuela Politécnica Superior. Ávila Spain. pgsilva@usal.es

(2) Dpto. Edafología. E.T.S.I.A. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, Spain. elvira.roquero@upm.es

#### **Resumen**

El presente trabajo analiza el uso de funciones matemáticas geocronológicas para el establecimiento de marcos cronológicos teóricos en el análisis de diferentes procesos acaecidos durante el periodo Cuaternario. El progresivo aumento de dataciones absolutas obtenidas mediante diferentes métodos ( $C^{14}$ , TL, OSL, ESR, TH/U, Cosmogénicos, etc.) de yacimientos arqueológicos, sedimentos y formas del relieve (p.ej.: terrazas fluviales) hace posible el desarrollo de funciones geocronológicas cada vez más precisas. Entre las más utilizadas se encuentran las funciones de distribución de probabilidades de fechas  $C^{14}$  (SPD y SPDR), funciones de frecuencias acumuladas y funciones de regresión (lineales, potenciales, logarítmicas y polinómicas). En este trabajo nos centramos en las dos últimas indicando su creciente utilidad para la determinación de periodos de sedimentación, erosión, formación de suelos y su comparación con curvas paleoclimáticas derivadas de análisis isotópicos (p.ej.  $O^{18}$ ), así como la utilización de regresiones logarítmicas y polinómicas de diferente orden para el establecimiento de marcos cronológicos en la evolución de valles fluviales en función de la altura relativa de sus sistemas de terrazas.

**Palabras clave:** Dataciones, Funciones de Frecuencia acumulada, Funciones de Probabilidad, Regresiones estadísticas, Terrazas fluviales, sedimentos, suelos, Cuaternario.

#### **Abstract**

The present work analyses the use of mathematical functions for the establishment of theoretical chronological frameworks for the analysis of different processes during the Quaternary period. The progressive increase of dating by different methods ( $^{14}C$ , TL, OSL, ESR, TH/U, Cosmogenic, etc.) of archaeological sites, sediments, and landforms (e.g., fluvial terraces) makes possible the development of more and more precise



geochronological functions. Among the most used are  $^{14}\text{C}$  date probability distribution functions (SPD and SPDR), cumulative frequency functions and regression functions (linear, power, logarithmic and polynomial). In this work we focus on the last two, indicating their increasing usefulness for the determination of sedimentation periods, erosion, soil formation and their comparison with paleoclimatic curves derived from isotopic analysis (e.g.,  $^{18}\text{O}$ ), as well as the use of logarithmic and polynomial regressions of different orders for the establishment of chronological frameworks for the evolution of fluvial valleys according to the relative height of their terrace systems.

**Key words:** Dating, Cumulative Frequency Functions, Probability Functions, Statistical Regressions, Fluvial terraces, Sediment, Soils, Quaternary.

## 1. Introducción

El aumento del número de dataciones absolutas ( $\text{C}^{14}$ , Th/U, TL, OSL, IRSL, ESR, etc.) durante las dos primeras décadas del siglo XXI, en sedimentos y suelos cuaternarios, así como en yacimientos arqueológicos de diferente edad, ha permitido la implementación de funciones matemáticas para caracterizar una gran variedad de procesos a lo largo del tiempo. Estas funciones geocronológicas, en diferentes versiones estadísticas, establecen ecuaciones de media móvil, curvas de frecuencia acumulada y regresiones lineales, potenciales, logarítmicas o polinómicas (las más complejas) que permiten establecer marcos geocronológicos de referencia a nivel regional. Las ecuaciones de media móvil (más simples) o curva de frecuencia acumulada (más complejas), permiten establecer curvas de máximos y mínimos comparables con curvas de estadios isotópicos marinos (MIS u OIS), admitiendo inferencias de tipo paleoclimático en, por ejemplo, la formación de calcretas (Candy y Black, 2009), y la alternancia de fases de sedimentación, erosión y formación de suelos (Silva *et al.*, 2020; Rodríguez-Lloveras *et al.*, 2020). En grado más complejo, las ecuaciones polinómicas de 2º y 3º orden permiten establecer curvas sinusoidales para calcular la edad teórica de los niveles de terrazas fluviales en función de sus alturas relativas respecto a los thalwegs (Silva *et al.*, 2017). Por un lado, las ecuaciones de regresión lineales, potenciales o logarítmicas más simples, permiten establecer tendencias (trends) en las tasas de elevación, erosión, encajamiento fluvial (Cunha *et al.*,

2008) o formación de suelos (Roquero *et al.*, 2015), entre otras. Estas últimas, han permitido la correlación de las edades de las terrazas con determinados índices de evolución edáfica, técnica esta ensayada desde la década de 1980-1990 en el SW de EEUU (i.e. Harden, 1982; Harden y Taylor, 1983; McFadden y Weldon, 1987) y en la zona Mediterránea (i.e. Alonso *et al.*, 1994; Roquero *et al.*, 1997), encontrándose una revisión y aplicación de los mismos en Sauer (2010) y Roquero *et al.*, (2015). Por otro lado, el cálculo de tasas de sedimentación ha sido aplicado muy intensamente en el análisis y datación de sondeos de zonas lacustres en Pirineos, Cantábrica y Sistema Central, fundamentalmente durante la deglaciación y el Holoceno (i.e. Moreno *et al.*, 2011; 2014; Larasoña *et al.*, 2010; Valero-Garcés *et al.*, 2019), pero también se ha aplicado en sistemas lagunares litorales (i.e. Mediato *et al.*, 2020; Torres *et al.*, 2021). Si bien es cierto, que este tipo de trabajos son aplicados a un solo sondeo o conjunto de sondeos en lagos post-glaciares o litorales de una misma zona, también lo es que pretenden alcanzar conclusiones de carácter regional (p.ej. Turú *et al.*, 2021). En ocasiones este tipo de análisis combinan dataciones de distintos métodos (OSL,  $\text{C}^{14}$ , Th/U) para establecer modelos robustos de edad para el cálculo de tasas de sedimentación (Valero-Garcés *et al.*, 2019), pero no establecen funciones geocronológicas al respecto y queda, por tanto, fuera de los objetivos de este artículo.

Mención aparte, lo constituyen las denominadas “*Summed Calibrated Date Range Dis-*

*tributions*” (SCDRD) o “*Summed Probability Distributions*” (SPD) de fechas  $C^{14}$  ampliamente utilizadas en arqueología (Williams, 2012; Crema *et al.* 2017). Estas distribuciones, se derivan de las curvas de calibración de  $C^{14}$  mediante el programa IntCal03, InCal04 o sucesivas versiones más modernas (Reimer *et al.*, 2013), así como otros programas de calibración de las universidades de Oxford (OxCal), Colonia (CalPal) o Sheffield (Bcal) fundamentados en la estadística Bayesiana (i.e. Weninger *et al.*, 2006; Ramsey, 2017). Una de las versiones más reciente es el paquete de software “*Rcarbon*” (Crema y Bevan, 2020) que permite el análisis de grandes colecciones de fechas  $C^{14}$  calibradas, con especial énfasis en este enfoque de “*fecha como dato*” (*date as data*). Ofrece funciones básicas de calibración, así como un conjunto de tests estadísticos para analizar las fechas calibradas agregadas (e.g. Funciones de Densidad de Kernel), utilizando el método comúnmente conocido como distribuciones de probabilidad sumadas de las fechas de radiocarbono (SPD). En general, estas funciones estadísticas utilizan la gran cantidad de dataciones  $C^{14}$  provenientes de yacimientos arqueológicos de una región o continente, para establecer curvas de probabilidad en forma de distribuciones de frecuencia que ilustren la dinámica de las poblaciones paleolíticas, neolíticas u otros periodos de la Prehistoria. En la Península Ibérica se han llevado a cabo diferentes estudios regionales, destacando por su entidad los realizados por Balsera *et al.* (2015), Drake *et al.* (2017) y Blanco-González *et al.* (2018), sobre la dinámica de las poblaciones neolíticas. El último de los trabajos citados ha sido incluso utilizado para definir la base del último piso del Holoceno (Meghalayense) con referencia a la cuenca del Mediterráneo occidental (Walker *et al.*, 2018).

En cualquiera de los casos comentados, la ventaja de este tipo de cronofunciones es el uso de dataciones publicadas en distintas revistas científicas y enfocadas a diferentes temáticas (paleoclima, paleosismicidad, paleohidrología, datación de yacimientos arqueológicos) para establecer marcos geocronológicos re-

gionales de diferentes procesos. Por tanto, carecen de “*sesgo*” o “*bias*” específicos y pueden considerarse como construcciones matemáticas objetivas. Una vez debidamente clasificadas y agrupadas temporalmente, el conjunto de dataciones disponibles para la zona a estudiar permiten obtener funciones geocronológicas o curvas de probabilidad que reflejan los procesos a analizar con el detalle temporal que permitan las dataciones disponibles. El único pero que se puede hacer a este tipo de análisis matemáticos es que se puedan mezclar fechas procedentes de diferentes métodos de datación. Este problema puede ser parcialmente soslayado incorporando al análisis los niveles de incertidumbre asociados ( $\pm 2\sigma$ ), aunque estos suelen ser muy diferentes entre los diferentes métodos de datación (Silva *et al.*, 2020). No obstante, lo deseable es utilizar fechas del mismo método, como hacen las funciones SCDRD o SPD con fechas  $C^{14}$  (Williams, 2012; Crema *et al.*, 2017) o los análisis de distribución de frecuencias acumuladas con fechas Th/U para la geocronología de formación de calcretas en el SE peninsular realizado por Candy y Black (2009). El problema de las fechas  $C^{14}$  es su pequeño rango de aplicación (últimos 50 ka para las dataciones AMS), lo que deja fuera de su alcance al 98% del periodo Cuaternario. En el caso de las series del Uranio (Th/U), la espectrometría  $\alpha$  alcanza un rango máximo de edad de los 400-500 ka dependiendo del material a datar, aunque su fiabilidad óptima se encuentra por debajo de los 300 ka (Schwarcz, 1989; Simpson y Grün, 1998). La utilización de espectrometría de ionización térmica (TIMS) puede llegar a edades de entre 600 - 800 ka en los casos más favorables (Cheng *et al.*, 2013). No obstante, muchas veces su aplicación a sistemas no completamente cerrados como pueden ser los espeleotemas en algún caso, así como gasterópodos, moluscos u otra biota fósil contenida en terrazas marinas no ofrece la fiabilidad o el detalle suficiente como para poder diferenciar entre subestadios isotópicos (Muhs *et al.*, 2015) y muchas veces es la geomorfología y estratigrafía de detalle de los afloramientos las que permiten discernir los diferentes episodios (e.g. Hillaire Marcel *et*

*al.*, 1996; Zazo *et al.*, 2002). En la actualidad los métodos más aplicables y versátiles para el estudio del Pleistoceno (s.l.) son los basados en la Luminiscencia, ya sea Termoluminiscencia simple (TL), la ópticamente estimulada (OSL), infrarroja, (IRSL) o la resonancia electro-espín (ESR) con la que se puede alcanzar hasta casi los 2 Ma (Duval *et al.*, 2020).

## 2. Metodología

Este apartado lo hemos subdividido siguiendo los tres grandes grupos de procedimientos matemáticos y estadísticos que se utilizan para el desarrollo de los distintos tipos de cronofunciones: **(a)** Curvas de frecuencia acumulada; **(b)** Ecuaciones de regresión lineales, logarítmicas, polinómicas etc. y **(c)** Funciones probabilísticas SCDRD o SPD para fechas  $C^{14}$ . En todos los casos el rango temporal de aplicación de estas cronofunciones dependerá de la extensión temporal, cantidad y calidad de las colecciones de dataciones que se utilicen para su desarrollo. No obstante, en todos ellos las cronofunciones propuestas se podrán extrapolar hacia tiempos más antiguos en los que no se tengan dataciones y su fiabilidad dependerá de los coeficientes de correlación ( $R^2$ ) de las funciones obtenidas. Como ya se ha indicado los casos más favorables serán aquellos en que se utilicen dataciones procedentes de un único método (OSL, Th/U,  $C^{14}$ , etc.), aunque en la mayoría de los casos estas no suelen ser suficientes.

### 2.1. Curvas de Frecuencia acumulada

Cualquier análisis que genere una distribución de frecuencias a partir de datos geocronológicos debe tener en cuenta no sólo las edades en sí, sino las incertidumbres asociadas a cada estimación de edad, es decir los  $\pm$  asociados (Candy y Black, 2009). En la mayoría de los métodos de datación las estimaciones de edad suelen representar los valores medios o centroides de una distribución de datos brutos, mientras que el tamaño de la incertidumbre ( $\pm$ ) refleja la forma y el rango de la distribución en ese conjunto de datos.

Esto es particularmente cierto cuando se mezclan fechas procedentes de distintos métodos de datación (Silva *et al.*, 2020) o incluso cuando se mezclan fechas procedentes de un mismo método de datación, pero con distinta tecnología y diferente grado de precisión analítica, como por ejemplo Espectrometría de Masas Alfa o Espectrometría de Masas Ionizadas Térmicamente (TIMS) en series U/Th (Candy y Black, 2009). La espectrometría Alfa genera incertidumbres mayores (ca. 20 - 30%) que la TIMS para conjuntos de muestras del mismo rango de edad. El factor edad también interviene en los análisis de distribución de frecuencias ya que, por lo general, cuanto más joven es la muestra menor es el grado de incertidumbre, desde unos cientos de años para muestras holocenas hasta decenas de miles de años para muestras pleistocenas y esto es aplicable a la mayor parte de los métodos de datación. Las incertidumbres asociadas reflejarán el grado de dispersión en el conjunto de datos, que puede visualizarse mediante un simple análisis isocronológico de regresión lineal. Así pues, los conjuntos de datos que cuentan con coeficientes de correlación ( $R^2$ ) próximos a uno tendrán menores incertidumbres que aquellos otros con mayor grado de dispersión ( $R^2 \ll 0.8$ ). Por lo general es recomendable utilizar conjuntos de datos con el mismo rango de incertidumbre, sigma 2 a ser posible.

Para tener en cuenta las incertidumbres asociadas al conjunto de dataciones a analizar es necesario ponderar tanto las edades como las incertidumbres dentro de la distribución de frecuencias (Candy y Black, 2009). Para ello, se ha de dividir el período de tiempo cubierto por el conjunto de datos en intervalos temporales homogéneos (bins) acordes al detalle que se busque, por ejemplo 5.000 años (5 ka) para el conjunto de datos pleistocenos (Candy y Black, 2009; Roquero *et al.*, 2019) o 500 años (0,5 ka) para el conjunto de datos Holocenos, (Silva *et al.*, 2020; 2021). La aparición de edades e incertidumbres en un intervalo dado (bin) queda ponderado por una puntuación (score) para cada edad y su incertidumbre asociada a un valor máximo de 3 puntos

(Fig. 1). Como la edad en sí es el resultado más probable de la distribución dentro de una serie de conjuntos de datos, se pondera con la puntuación más alta (score = 3), mientras que el rango de las incertidumbres, al ser una edad potencial menos probable pero aún significativa, se pondera con una puntuación más baja (score = 1). Por lo tanto, cualquier intervalo temporal que contenga una estimación de edad dentro de su rango recibe un score de 3, mientras que cualquier intervalo que se superponga a la incertidumbre asociada ( $\pm$ ) a una sola estimación de edad recibe una puntuación de 1. Por consiguiente, un intervalo (bin) que contenga una edad (3) a la que se le superponga una incertidumbre (1) recibiría un score de 4 (3+1). Como ilustra la Figura 1, un intervalo que contenga dos edades y se le superponga una incertidumbre recibirá un score de 7 (3+3+1) que es la metodología utilizada en las curvas de frecuencia acumulada utilizadas por Candy y Black (2009), Roquero *et al.* (2019) y Silva *et al.* (2020) para series de datos pleistocenas. Cuando los conjuntos de datos son más numerosos y robustos se puede modificar el método considerando bins temporales más

pequeños (500 años) y ponderando los scores a una relación igualitaria entre valor máximo, valor medio y valor mínimo a un 1+1+1 (=3). De esta manera un bin que contenga estos tres valores (incertidumbre muy baja  $\leq \pm 0.05$ ) obtendrá una puntuación de 3, mientras que si solo contiene edad máxima + media o media + mínima se le da un valor de 2 (Silva *et al.*, 2020; 2021). El resto de los intervalos solapados por una incertidumbre solo tendrán un valor de 1.

## 2.2. Curvas de Regresión (lineales, potenciales, logarítmicas, polinómicas)

Estas son comúnmente utilizadas en multitud de estudios morfométricos para el análisis de perfiles longitudinales de ríos, factores de erosividad, índices indicadores de actividad neotectónica, ecuaciones de difusión de fallas y por supuesto, en el establecimiento de tasas de erosión, sedimentación, elevación tectónica y fault slip. Aunque el uso de este tipo de cronofunciones se utiliza desde los años ochenta para el análisis temporal de cronosecuencias edáficas en terrazas fluvia-

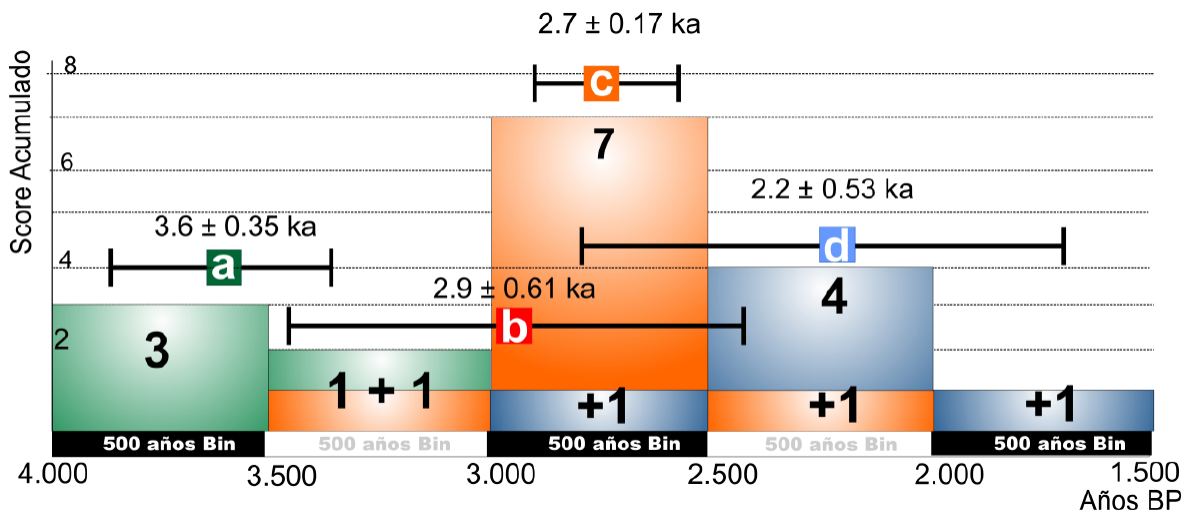


Figura 1: Método utilizado por Candy y Black (2009) para la construcción de curvas de frecuencia acumulada para la formación de calcretas en el SE de España. El valor de la datación otorga la máxima puntuación (score = 3), mientras que el de la incertidumbre ( $\pm$ ) otorga la puntuación mínima (score = 1) a aquellos intervalos temporales (bins) a los que se superponga.

Figure 1: Method used by Candy and Black (2009) for the construction of cumulative frequency curves for calcrete formation in SE Spain. The mean ages of dating give the maximum score (= 3), while the uncertainty values ( $\pm$ ) give the minimum score (= 1) to those time bins (temporal intervals) to which it extends or overlaps.

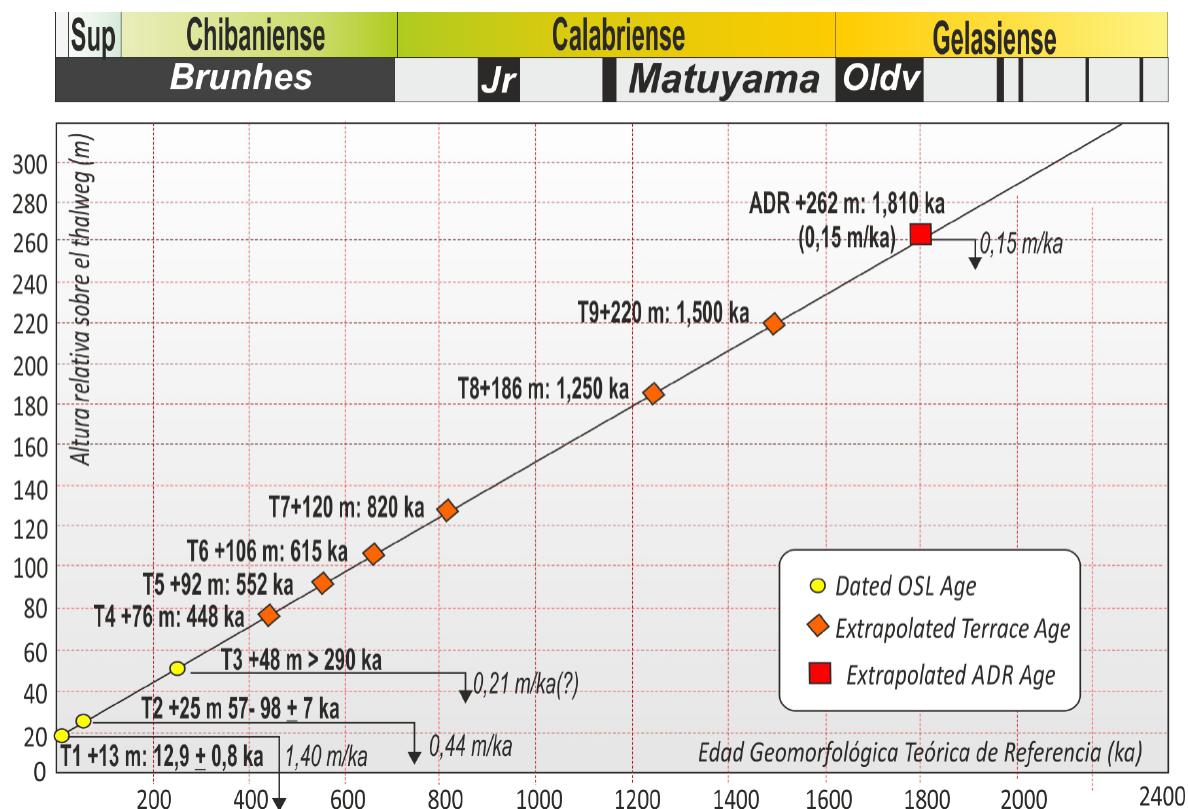


Fig. 2. Extrapolación lineal de las edades de las terrazas fluviales del Duero en función de su altura (rombos) basándose en dataciones OSL (círculos) en la zona portuguesa aguas abajo de Los Arribes. El cuadrado identificado como ADR corresponde a la supuesta superficie de pre-encajamiento. Nótese como desde esta superficie a +262m sobre el cauce, los valores de encajamiento aumentan artificialmente desde 0,15 hasta los 1,4 m/ka correspondientes a la terraza de +13m. Modificado, adaptado y traducido de Cunha *et al.* (2019).

Fig. 2. Linear extrapolation of the ages of the Douro River terraces as a function of their relative height above the thalweg (diamonds) based on OSL dating (circles) in the Portuguese area downstream of Los Arribes. The square identified as ADR corresponds to the presumed pre-incision surface. Note how from this surface at +262m above the thalweg the incision values increase artificially from 0.15 to 1.4 m/ka corresponding to the +13m terrace. Modified, adapted and translated from Cunha *et al.* (2019).

les, marinas, abanicos aluviales, morrenas, etc. (e.g. Sauer 2010), sólo recientemente se han empezado a utilizar para establecer correlaciones entre la edad y la altura relativa de niveles fluviales o litorales e inferir tasas de encajamiento fluvial, rebote isostático, etc. (e.g. Cunha *et al.*, 2008). Por lo general, las aproximaciones matemáticas más simples (lineales o logarítmicas) dan una información local a nivel de valle o sector de un valle particular pero que difícilmente puede extrapolarse al conjunto de una cuenca fluvial o regional. Este sería el caso de las aproximaciones lineales realizadas para los tramos bajos del Tajo y del Duero en Portugal (i.e. Cunha *et al.*, 2008;

2019) o para los ensayos realizados para algunos tramos medios de los ríos Tajo o Henares por Roquero *et al.* (2015) y Silva *et al.* (2017).

Las aproximaciones lineales y logarítmicas asumen tasas de encajamiento fluvial o elevación prácticamente constantes que son irreales y difíciles de encajar en el complejo ritmo de ascensos y descensos del nivel del mar (nivel de base fluvial) durante el Cuaternario (Fig. 2). No obstante, algunos autores continúan realizando este tipo de extrapolaciones lineales irreales para otros tipos de procesos como son las tasas de deslizamiento de una falla (fault-slip) o tasas de elevación tectónica

o isostática (tectonic or isostatic uplift). Estas aproximaciones matemáticas constituyen artefactos geológicamente inconsistentes, pero al mismo tiempo ofrecen valores medios de cierta aplicación conceptual a los procesos naturales que son no-continuos o intermitentes, como pueden ser terremotos, subidas y bajadas del nivel del mar etc. El clásico trabajo de Lajoie (1986) sobre “*coastal tectonics*” ya puso en evidencia que, aun asumiendo tasas de elevación lineales para un litoral, las velocidades de los procesos que se estudian resultan ser variables. Todo ello tiene que ver con el denominado efecto “*Pull of the Present*” (Gardner *et al.*, 1987) que indica que cuanto más jóvenes son los intervalos temporales analizados, a partir de la datación de elementos geomorfológicos, mayores son las tasas que se obtienen. Estos autores indican que las conclusiones basadas en esas comparaciones respecto a los cambios en las tasas a través del tiempo geológico pueden resultar engañosas y que, una variación de  $10^4$  a  $10^5$  años en el intervalo temporal medido puede llegar a representar un cambio de orden de magnitud en la tasa del proceso medida y por tanto afectar sustancialmente a las conclusiones de estos estudios (Gardner *et al.*, 1987). Este problema quedaría claramente ilustrado en el cálculo de las tasas de encajamiento fluvial deducidas para el río Duero en la zona portuguesa (e.g. Cunha *et al.*, 2019) donde se presentan tasas de encajamiento fluvial muy variables y que aumentan ficticiamente hacia el presente de 0,15 m/ka a 1,40 m/ka (Fig. 2).

Por el contrario, las regresiones potenciales, exponenciales y polinómicas nos ofrecen valores de encajamiento fluvial, erosión, etc., variables con el tiempo y más creíbles. No obstante, las funciones exponenciales no suelen dar buenos resultados ya que supondrían aumentos o disminuciones de tasas exponencialmente aceleradas o deceleradas con el tiempo y, por consiguiente, totalmente irrealistas (Silva *et al.*, 2017). Dentro de este conjunto de regresiones, las polinómicas son las que en principio ofrecen mejores resultados y coeficientes de correlación ( $R^2 > 0.85$ ), aumentando estos con el orden de la ecuación.

Los resultados obtenidos indican que, para el conjunto y resolución de dataciones que se tienen hasta la fecha, las aproximaciones con polinómicas de 3<sup>er</sup> orden son satisfactorias para los valles de las dos mesetas (Roquero *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2017; Fig. 3). Una primera aproximación para otros valles fluviales atlánticos de Inglaterra, Francia y Portugal, ensayada preliminarmente por Silva *et al.* (2015), ofrece también correlaciones ( $R^2$ ) superiores a 0,9 para ellos con polinómicas de 3<sup>er</sup> orden. En este caso los ríos ingleses y franceses presentan una curva de regresión muy similar y distinta a las de España y Portugal. Esto es lógico ya que la incisión en las cuencas francesas e inglesas (e.g. Támesis, Sena, etc.) se ha regulado por un mismo sistema fluvial durante el Cuaternario, el antiguo Rhin que durante épocas glaciares desembocaba más allá del Canal de la Mancha (The English Channel) y solo se desconecta en épocas de nivel de mar alto con nivel de base común para ambos (Gupta *et al.*, 2007).

Con los conjuntos de datos que actualmente existen, polinómicas de mayor orden (4, 5, etc.) introducen mayor número de máximos y mínimos en las curvas de correlación, pero no mejoran los resultados obtenidos. Con el tiempo, cuando se tenga un mayor número de dataciones referente a las bases y los techos de los diferentes niveles fluviales, se podrán ensayar aproximaciones de orden 20 y superior. Como se ilustra en la figura 3, estas aproximaciones reflejarían tanto las subidas y bajadas del nivel de base (similares a las de las curvas isotópicas  $\delta O^{18}/\delta O^{16}$ ) como la tendencia general de elevación/incisión de las zonas continentales (Silva *et al.*, 2017). No obstante, nos tememos que puede acabar ocurriendo lo que a la “*ecuación del Geoide*” que responde a la aproximación de orden 33 a la “*fórmula del potencial gravitatorio terrestre de Stokes*”, pero donde su difícil manejo matemático hace que se continúe utilizando las aproximaciones de 2<sup>o</sup> Orden como *Sistema Geodésico de Referencia* (SGR) o *World Geodetic Systems* (WGS) como sistema de referencia planimétrico.

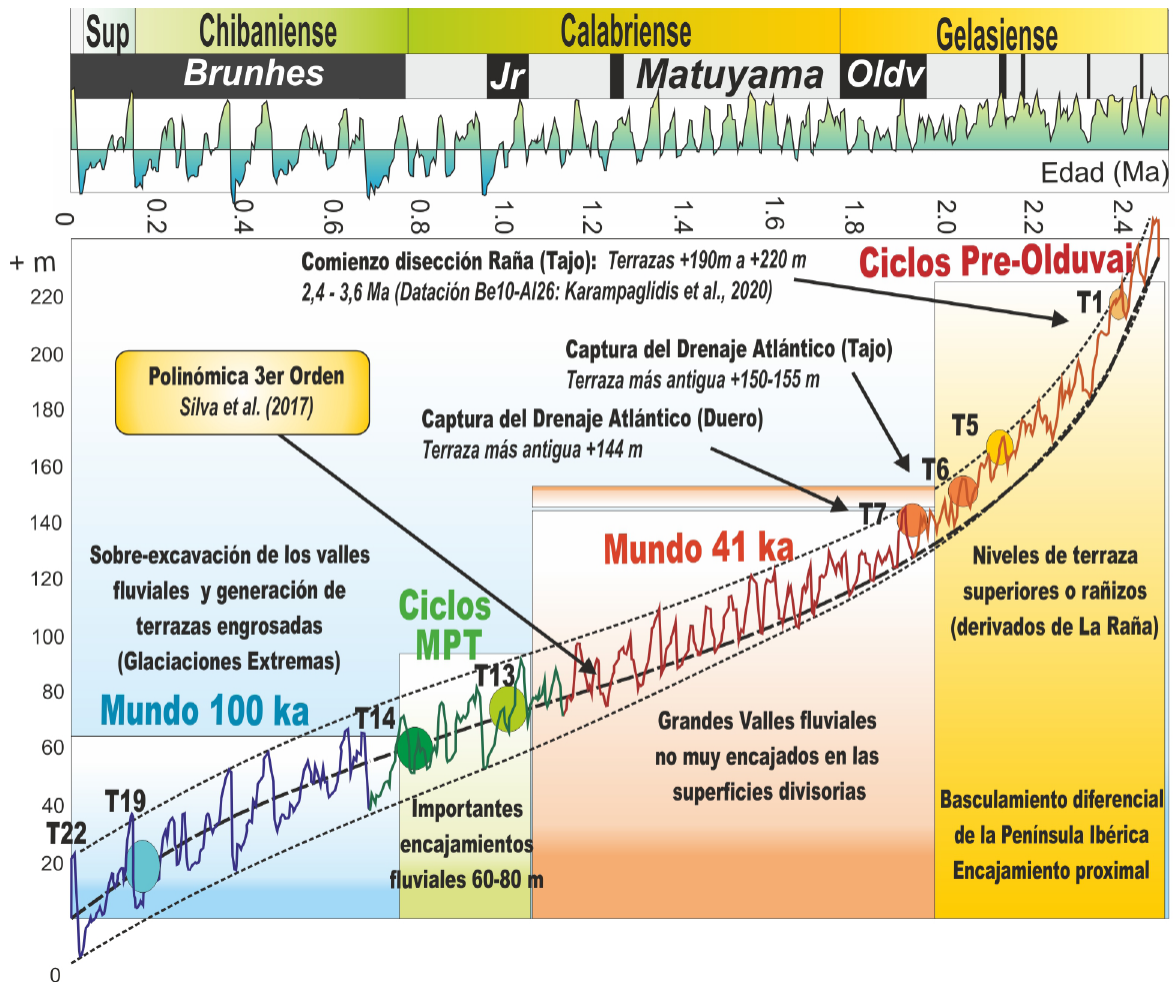


Fig. 3. Comportamiento teórico de incisión-agradación para la formación de terrazas en condiciones de equilibrio dinámico resultante del ajuste de la curva clásica de etapas isotópicas marinas a la función polinómica de 3<sup>er</sup> orden (línea a trazos negra) obtenida por Silva *et al.* (2017) para la España Central. Se destacan los principales eventos en el desarrollo de las terrazas (puntos). Modificado y traducido de Silva *et al.* (2017).

Fig. 3. Theoretical incision-aggradation behaviour for terrace formation on dynamic equilibrium conditions resultant from the adjustment of the classical Marine isotopic stages curve to the 3<sup>rd</sup> order polynomial function (dotted black line) obtained by Silva *et al.* (2017) for Central Spain highlighting main events on terrace development (spots). Modified and translated from Silva *et al.* (2017).

### 2.3. Distribuciones de Probabilidad de fechas $C^{14}$ calibradas (SPD y SCDRD)

Como se ha comentado, este tipo de aproximaciones permite el análisis de grandes colecciones de fechas  $C^{14}$  calibradas, mediante diferentes paquetes de software específicos (IntCal, Oxcal Rcarbon, etc.) que sólo se aplican a fechas de radiocarbono. La metodología para este tipo de funciones es mucho más elaborada que las de distribución de frecuen-

cias del apartado 2.1, pero poseen cierta similitud. Dado que en este volumen especial existe un artículo específico para el método de datación  $C^{14}$ , aquí sólo mencionaremos las características más relevantes.

Esta metodología suele seguir los siguientes pasos (e.g. Crema y Bevan, 2020): **(1)** Recolección de fechas a nivel local, regional o continental (dependiendo del estudio a realizar); **(2)** Calibración homogénea de las dataciones



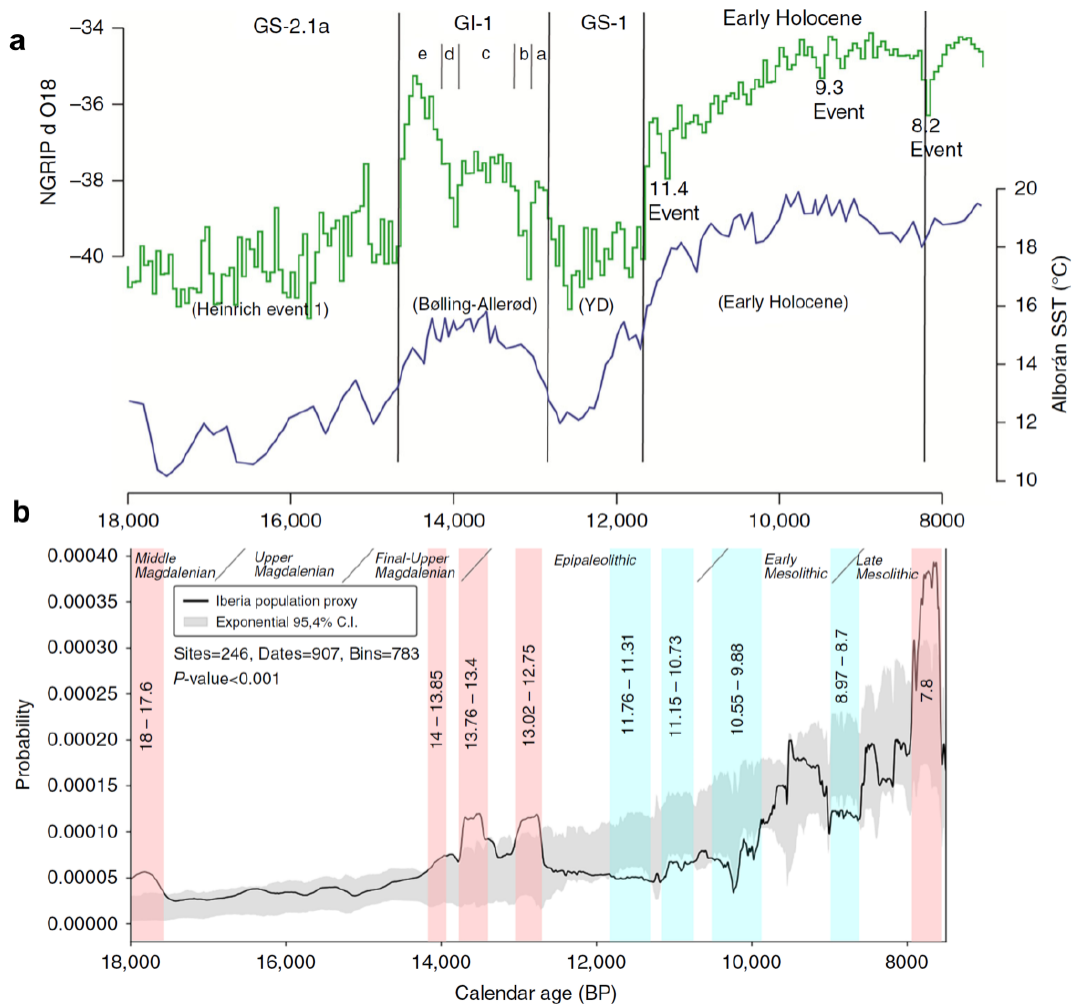


Fig. 4. Cambios en la densidad de población inferidos por el SPD entre 18.000 y 7500 cal BP para la península ibérica en relación con el marco paleoclimático de la transición Último Glacial-Interglacial. **a**) Indicadores climáticos: variación de  $^{18}O$  en el sondeo de hielo NGRIP en relación con la cronología del estratotipo de Groenlandia77 (línea Verde); Temperatura de la superficie del mar basado en el sondeo marino del mar de Alborán MD95-2043 (línea azul). **b**) Distribución de probabilidad sumada (SPD) de las fechas de radiocarbono calibradas como proxy de la evolución de población (línea negra). Las regiones sombreadas en gris denotan las desviaciones positivas y negativas del modelo nulo de crecimiento demográfico exponencial, respectivamente.

Las zonas marcadas en rojo claro y azul claro identifican los picos de máximos y mínimos demográficos (Modificada de Fernández-López de Pablo, 2017).

Fig. 4. Population density changes inferred by SPD between 18,000 and 7500 cal BP for the Iberian Peninsula in relation to the palaeoclimatic framework of the Last Glacial-Interglacial transition. **a**) Climate indicators:  $^{18}O$  variation in the NGRIP ice sounding in relation to the Greenland stratotype chronology77 (Green line); Sea surface temperature based on the Alboran Sea marine sounding MD95-2043 (blue line). **b**) Summed probability distribution (SPD) of radiocarbon dates calibrated as a proxy for population evolution (black line). The light red and light blue shaded regions denote the positive and negative deviations from the exponential population growth null model, respectively. The light red and light blue bars identify the peaks of maximum and minimum demographic stages (Modified from Fernández-López de Pablo, 2017).

mediante un mismo software específico (IntCal, Oxcal, Rcarbon, etc.); **(3)** Cálculo de las probabilidades individuales de las fechas obtenidas para, por ejemplo extraer o analizar las fechas que tengan una probabilidad (e.g.)  $\geq 0,5$  para el periodo de tiempo a analizar; **(4)** Binning o agrupación de las fechas en periodos temporales específicos (bins) mayores o menores dependiendo del conjunto de datos o de la resolución que deseemos obtener; **(5)** Normalización de los datos obtenidos a valores comprendidos entre 0 (mínimos) y 1 (máximos) para la obtención de curvas equilibradas; **(6)** Obtención de las Distribuciones de probabilidad y chequeo estadístico de las mismas (Funciones de Kernel, etc.) para el refinamiento de las aproximaciones estadísticas; y, **(7)** Salidas Gráficas finales (Fig. 4). Este es, de forma sencilla, el proceso que siguen los paquetes estadísticos disponibles en el mercado (la mayoría gratuitos). No obstante, hay algunos autores (Weninger *et al.*, 2008) que indican que la normalización de datos (paso 5) puede producir picos artificiales en las funciones resultantes que tienden a coincidir con las partes más pronunciadas de las curvas de calibración. Debido a esto, en la mayor parte de los trabajos se muestran distribuciones normalizadas y no normalizadas (Crema y Bevan, 2020). Al igual que con cronofunciones anteriores las salidas gráficas de las distribuciones SPD o SCDR pueden compararse con registros paleoclimáticos y polínicos y considerarse como proxies de diferentes tipos de procesos demográficos, arqueológicos o naturales (Fig. 4).

### 3. Rango temporal de aplicación del método

Las cronofunciones, sean del tipo que sean, tendrán un rango temporal de aplicación dependiente del método o conjunto de métodos de datación utilizados para construir las aproximaciones matemáticas. Por otro lado, se pueden construir curvas con las incertidumbres de las fechas analizadas (Silva *et al.*, 2017), y son útiles para extrapolar edades por encima de los límites de edad o no accesibles a los métodos de datación utilizados (Cunha

*et al.*, 2019), e incluso en cuencas fluviales donde se cuente con muy pocas o ninguna fecha disponible (Martín-Martín *et al.*, 2020). En definitiva, son funciones útiles para definir marcos cronológicos teóricos que serán tanto mejores, cuanto mayor y más detallado sea el conjunto de fechas utilizadas.

## 4. Ejemplos para la Península Ibérica

La Península Ibérica ha sido solar de ensayo de todo tipo de cronofunciones anteriormente mencionadas, pero en este apartado tan solo nos centraremos en las funciones de distribución de frecuencias para el establecimiento de proxies paleoclimáticos comparables con las curvas isotópicas, así como en las regresiones potenciales o polinómicas ensayadas en las cuencas fluviales del Tajo y Duero para el establecimiento de la cronología de las secuencias de terrazas fluviales de la zona central de la península.

### 4.1. Aplicación de Curvas de distribución de frecuencias al estudio de periodos de sedimentación, erosión y desarrollo edáfico en el SE de España.

Estos trabajos son muy recientes y recogen todo el conjunto de dataciones existentes en sedimentos, calcretas y suelos calcáreos en el entorno de las Béticas orientales (Silva *et al.*, 2020; 2021) utilizando el precedente metodológico aplicado por Candy y Black (2009) al estudio de calcretas en las cuencas de Sorbas y Tabernas (Almería). Los trabajos se centran en todo el periodo cuaternario, completando un total de 93 dataciones para el entorno de las provincias de Alicante, Murcia y Almería, con 37 dataciones correspondientes a suelos y 56 a sedimentos. Las fechas e incertidumbres utilizadas provienen de diferentes trabajos de carácter paleosísmico o paleoclimático, que integran el conjunto publicado de dataciones TL, OSL, IRSL y  $C^{14}$  (Tabla 2 en Silva *et al.*, 2020). Por el contrario, el conjunto de fechas holocenas son prácticamente todas procedentes de dataciones  $C^{14}$  completan-

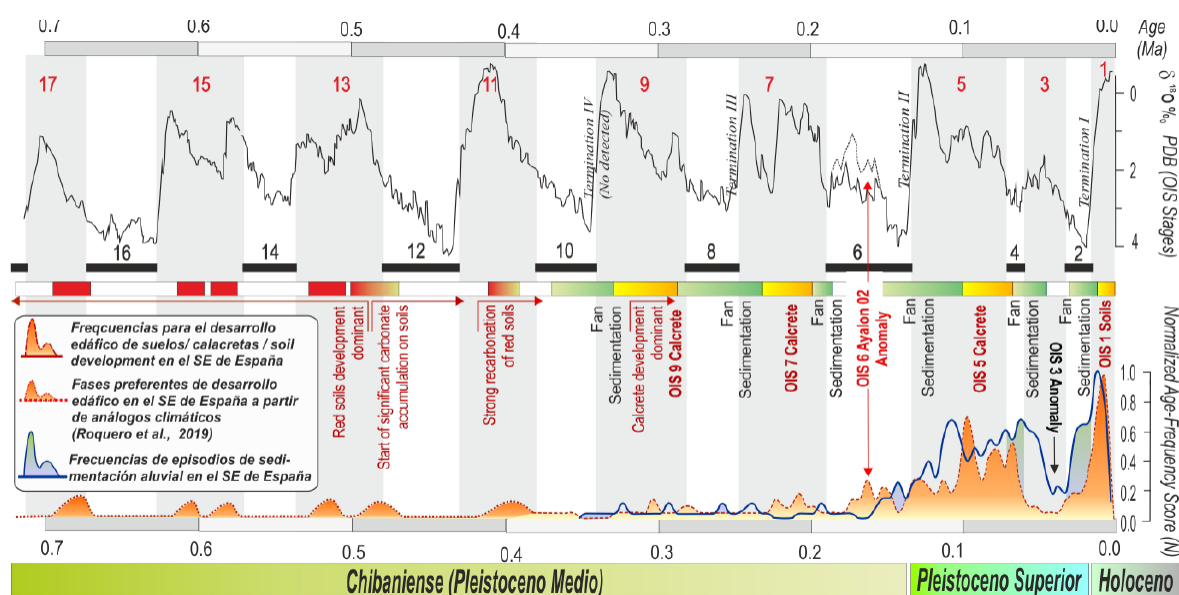


Fig. 5. Curva de distribución de frecuencias normalizadas para los scores acumulados de sedimentos (línea continua azul) y suelos calcáreos (línea punteada roja) para los últimos c. 700 ka obtenidos por Silva *et al.* (2020). El gráfico superior representa la curva OIS global convencional en función de los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  de los registros oceánicos. Modificada de Silva *et al.* (2020).

Fig. 5. Normalized frequency distribution curve for sediment (blue solid line) and soil calcrete (red dotted line) scores for the last c. 700 ka calculated by Silva *et al.* (2020). The upper graph represents the conventional global OIS curve in function of the  $\delta^{18}\text{O}$  values from oceanic records. Modified from Silva *et al.* (2020).

do 75 datos, 60 de ellos correspondientes a sedimentos y 15 a suelos y calcretas (Tabla 3 en Silva *et al.*, 2020; 2021). El análisis de todo el conjunto de datos cuaternarios permite diferenciar las fases de sedimentación y las de formación de suelos, que claramente se identifican con periodos más fríos - húmedos y más cálidos respectivamente. Esto es, con estadios isotópicos pares la sedimentación e impares la formación edáfica (Fig. 5).

Los resultados obtenidos indican que en el SE de España la génesis de los suelos tiene lugar durante las últimas fases de los periodos interglaciares cálidos (MIS impares) y la sedimentación con el final de las glaciaciones (MIS pares). Esto último, fundamentalmente durante las llamadas "terminaciones" (deglaciaciones). Estos datos permiten extrapolar hacia el pasado la alternancia de episodios de desarrollo edáfico y sedimentación aun no poseyendo datos de edades numéricas o paleomagnéticas en secuencias de paleosuelos bien establecidas. Este es el caso del estudio

de la secuencia de ocho paleosuelos afectados y desplazados por la falla de Palomares en el límite de las provincias de Murcia y Almería (La Escarihuela) publicado por Roquero *et al.* (2019). Como se observa en la zona más antigua de la figura 5, estas secuencias de paleosuelos pueden utilizarse como "proxies paleoclimáticos" y encajarlos con las curvas isotópicas del  $^{18}\text{O}$ , para así construir marcos cronológicos teóricos en los que poder situar eventos de deformación, paleosismos, tasas de actividad de fallas, tasas de erosión y sedimentación, paleoinundaciones, etc. Estas prácticas de extrapolación, aunque no realmente muy ortodoxas, son de especial utilidad para aquellas zonas donde no se disponga de dataciones, bien porque no existan o bien por que se escapan a los métodos de datación más convencionales. Este es el caso de dataciones Th/U en calcretas donde, por encima de los 450 ka, nos es imposible avanzar (Candy y Black, 2009). De acuerdo con estos autores, en el SE semiárido de la península los episodios más importantes de generación

de calcretas son los estadios isotópicos MIS 9, 7, 5 y 1, siendo el caso del Interstadial MIS3 una anomalía (Silva *et al.*, 2021). Además, el trabajo de Roquero *et al.* (2019) detecta que hay importantes procesos de recarbonatación de antiguos suelos rojos durante estadios cálidos anteriores MIS11 y 13 (Fig. 5) y que los suelos rojos mediterráneos eran típicos en el SE de España con anterioridad al MIS 13 (C. 500 ka), produciéndose a partir de esta fecha una aridificación progresiva que favorece el desarrollo de calcretas y continúa hasta la actualidad (Fig. 5). Por el contrario, el conjunto de datos es más numeroso para las épocas más recientes, permitiendo análisis más robustos y detallados para el Holoceno con segmentos temporales (bins) de 500 años. Como se observa en la curva de frecuencias de la figura 5 en el Pleistoceno Superior y Holoceno se producen los mayores picos tanto de suelos como de sedimentación ya que hay más datos. Nótese que es una función normalizada, por tanto, los picos de máximos y mínimos no son artefactos matemáticos. Ello permite identificar con claridad los límites de los pisos recientemente establecidos dentro del Holoceno (Groenlandiense, Norgripiense y Magalayense) que puede consultarse en (Silva *et al.*, 2020; 2021).

#### 4.2. Obtención de Curvas de regresión potenciales, logarítmicas y polinómicas para el establecimiento de marcos cronológicos en secuencias de terrazas fluviales

Hasta mediados de la década de 1990 las dataciones numéricas y paleomagnéticas de las secuencias de terrazas fluviales eran prácticamente inexistentes o anecdóticas en España. Basta con citar dos casos: (a) En 1994 se publica la primera secuencia paleomagnética en el valle del Guadalquivir (Baena y Díaz del Olmo, 1994), y en 1995 en el nivel de +60 m del Valle del Tajo identificando la inversión Matuyama-Brunhes (límite Pleistoceno inferior medio; Pinilla *et al.*, 1995); (b) En 1998 se publican las primeras dataciones numéricas mediante Th/U de niveles de terrazas tobá-

ceas en la cuenca alta del río Henares (Benito-Calvo *et al.*, 1998). La publicación masiva de fechas numéricas no se produce hasta la década del 2000, y principalmente a partir del año 2010, cuando los métodos de datación TL, OSL y anecdóticamente ESR comienzan a aplicarse a las secuencias de terrazas de los valles del Jarama, Manzanares, Tajo y Arlanzón (ver Silva *et al.*, 2017). Con anterioridad, la cronología de los sistemas de terrazas era totalmente relativa, basándose en el contenido faunístico y lítico en las mismas, así como en cronosecuencias edáficas representativas (p. ej. Roquero *et al.*, 1997). Son precisamente este tipo de secuencias de suelos las que ofrecen los primeros valores numéricos en forma de índices de evolución edáfica, que pueden correlacionarse con la cronología de las terrazas surgiendo así las primeras funciones de regresión geocronológicas, basadas fundamentalmente en las desarrolladas en EEUU durante la década de 1980 (Harden, 1982; McFadden, y Weldon, 1987). Estas se hacen en dos pasos, primero comparando los valores de los índices edáficos con las alturas relativas de las terrazas, y segundo, comparando estas últimas con los primeros conjuntos de datos cronológicos numéricos publicados estadísticamente representativos. Estas correlaciones se ensayan para diferentes valles de las cuencas del Tajo y Duero en España central (Fig. 6), mostrando que las relaciones Altura/Suelo pueden ajustarse razonablemente a ecuaciones lineales con índices de correlación razonablemente buenos ( $R^2 \geq 0.8$ ), mientras que las relaciones Edad (ka)/Suelo poseen muy buen ajuste ( $R^2 \approx 0.9$ ) a regresiones logarítmicas para datos regionales (Roquero *et al.*, 2015).

Con colecciones de dataciones más amplias, Silva *et al.* (2017) presentan un estudio regional de relaciones Altura relativa/Edad para las terrazas fluviales de las cuencas del Duero y del Tajo, recogiendo también datos de sus cursos fluviales en el tramo bajo en Portugal (p.ej. Cunha *et al.*, 2008). En ese estudio, se consideran conjuntos de dataciones numéricas y paleomagnéticas publicadas hasta principios del año 2016. La inclusión de da-

tos paleomagnéticos se debe al hecho de que para esas fechas las dataciones numéricas para edades superiores al millón de años eran muy escasas, de manera que se complementaron con este medio de datación indirecto. El estudio obtuvo una buena correlación para el conjunto de datos de España central con ecuaciones polinómicas de 2º Orden para ambos conjuntos de datos (Fig. 7) y una Polinómica de 3º orden para el total de datos numéricos (Fig. 7). Ambas regresiones ofrecían muy buen ajuste ( $R^2 \geq 0.98$ ) hasta los 1.8 - 2.0 Ma (Olduvai), ya que no se tenían edades superiores. No obstante, la polinómica de 2º orden para los datos paleomagnéticos ofrecía un buen ajuste hasta los 2,3 Ma, casi el comienzo del piso Gelasiano (Fig. 7).

En el presente trabajo se han introducido las edades obtenidas por cosmogénicos ( $^{10}\text{Be}$ - $^{26}\text{Al}$ ) para los niveles fluviales encajados en la Raña a +190 y +220 m publicadas por Karampaglidis *et al.* (2020) obteniéndose una polinómica de 4º Orden que presenta un ajuste ( $R^2$ ) de 0,99 para todo el periodo Cuaternario, mejorándose los resultados de la polinómica de 3º orden publicada por Silva *et al.* (2017). También se han incluido las curvas polinómicas para las incertidumbres ( $\pm$ ) asociadas con buenos ajustes por encima de 0,94 (Fig. 7). Estas curvas de error se han construido con las edades máxima y mínima resultantes de las incertidumbres publicadas para cada fecha utilizada (barras de error en Fig. 7). Como puede observarse las barras de error de los datos paleomagnéticos ocupan toda la extensión del subchron que identifican (Olduvai, Jaramillo, etc.) lo que afecta al ajuste de las regresiones resultantes, indicando errores progresivamente mayores para fechas progresivamente más antiguas. En un trabajo reciente Benito-Calvo *et al.* (2022) presenta regresiones exponenciales para la cuenca alta del Ebro abordando el problema de las incertidumbres mediante el uso del intervalo de confianza del 95% de las mismas. (Silva *et al.*, 2017, pág. 198). El problema de estas regresiones es que su extrapolación temporal para edades superiores al subchron Jaramillo (c. 1,1 M.a.) pueden llegar a predecir edades

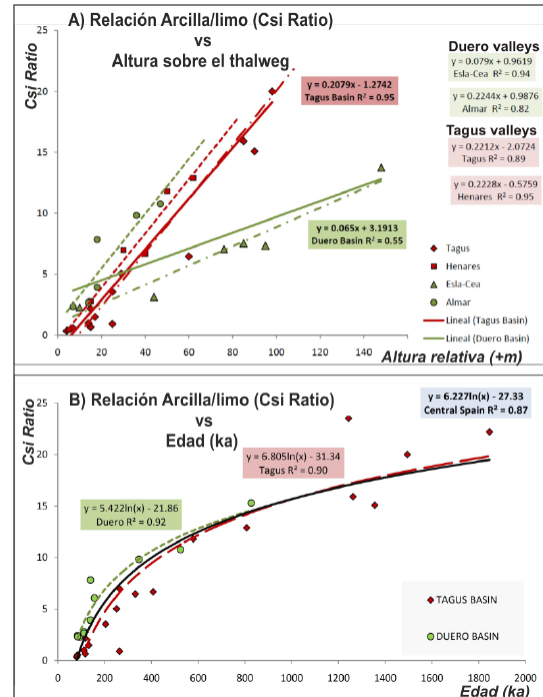


Fig. 6. A) Relaciones de mayor ajuste Altura / Suelo (regresiones lineales) para el índice arcilla/limo (índice de envejecimiento del suelo), aplicadas a valles fluviales individuales y a sectores regionales de las cuencas fluviales del Tago y del Duero. B) Relaciones de mayor ajuste Edad / Suelo (regresiones logarítmicas) para el índice arcilla/limo (índice de envejecimiento del suelo), aplicadas a los datos regionales de las cuencas fluviales del Tago y del Duero (líneas discontinuas) y al conjunto de datos globales del centro de España (línea sólida). Para todos los casos, las funciones de regresión ilustran la tendencia en el desarrollo del suelo con el tiempo para España Central a partir de los datos texturales de los horizontes Bt (modificado de Roquero *et al.*, 2015).

Fig. 6. A) Best-fit Height / Soil relationships (linear regressions) for the clay/silt ratio index (soil ageing index), applied to individual river valleys and regional Tagus and Duero fluvial basin sectors. B) Best-fit Age / Soil relationships (logarithmic regressions) for the clay/silt ratio (soil ageing index) applied to regional data from Tagus and Duero fluvial basins (dashed lines) and overall data set for Central Spain (solid line). For all cases regression functions illustrate the trend of soil development with time for Central Spain based on textural data from Bt horizons (modified from Roquero *et al.*, 2015).

pre (potenciales) o post-Gelasianos (exponenciales) poco creíbles para niveles por encima de los c. +120 m (Fig. 8). En el caso de las potenciales las edades pronosticadas

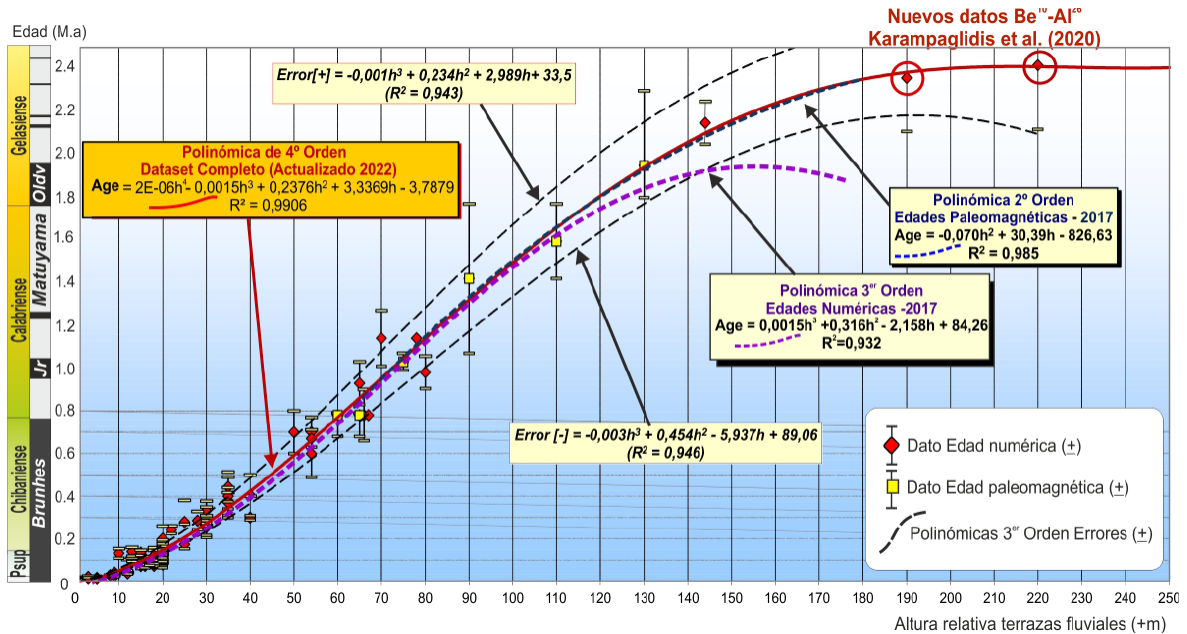


Fig. 7. Ecuaciones de regresión edad-altura de mayor ajuste que ilustran las relaciones entre las funciones polinómicas de 2º orden para las edades paleomagnéticas, la función polinómica de 3º orden para las edades numéricas y la función polinómica de 4º orden actualizada en este trabajo para el conjunto completo de datos (incluyendo las edades de Karampaglidis *et al.* (2020) para los niveles superiores de las terrazas de la cuenca de Madrid). Esta última ecuación representa la función de transferencia altura-edad resultante actualizada a partir de Silva *et al.* (2017). También se incluyen las funciones polinómicas de 3º orden correspondientes a las incertidumbres ( $\pm$ ).

Fig. 7. Best-fit regression equations illustrating the relationships between 2<sup>nd</sup> order polynomial functions for paleomagnetic ages, the 3<sup>rd</sup> order polynomial function for the numerical ages and the 4<sup>th</sup> order polynomial function updated in this work for the complete dataset (including the Karampaglidis *et al.* (2020) ages for the upper terrace levels in the Madrid basin). This last represents the resultant height-age transference function updated from Silva *et al.* (2017). The 3<sup>rd</sup> order polynomial functions corresponding to the uncertainties ( $\pm$ ) are also included.

difícilmente llegarían a superar los 1,4 - 1,6 M.a., quedando el conjunto de terrazas de los valles situadas por debajo del Subchron Olduvai, mientras que en las exponenciales ocurre a la inversa (Fig. 8). En cualquiera de los casos este tipo de extrapolaciones van en contra de las edades paleomagnéticas obtenidas para niveles superiores a los 1,1 M.a. en la península (i.e. Silva *et al.*, 2017) o con las recientes fechas por cosmogénicos obtenidas para los niveles más altos de la Cuenca del Tajo (> +150 m) encajados en la Raña que los sitúan entre los 2.1 - 2.4 M.a. (Karampaglidis *et al.*, 2020) por encima del Subchron de Olduvai (Fig. 7). No obstante, funciones potenciales y exponenciales pueden ofrecer buenos resultados para valles individuales o segmentos particulares de los mismos, especialmente para niveles de terraza inferiores a los +120 m

o con rangos de edad inferiores a los 1,1 M.a. (Silva *et al.*, 2017).

No obstante, Benito-Calvo *et al.* (2022) a pesar de ajustar la Cuenca del Ebro a una regresión exponencial para niveles inferiores a los +140 m, proponen un modelo de curva sigmoideal (teórica) de morfología muy similar a las regresiones polinómicas propuestas por Silva *et al.* (2017) que abarcaría todo el Cuaternario. Este tipo de regresiones corresponden a funciones matemáticas de tipo sigmoide o logísticas que son casos de particulares de la "Función de Gompertz" muy utilizadas para describir el crecimiento de una variable a lo largo de una serie temporal acotada (poblaciones, tumores, epidemias etc.). Son casos especiales de funciones exponenciales que comienzan y terminan en trayectorias asin-

tólicas de las series temporales, que indican un crecimiento muy decelerado o nulo de la variable (Fig. 8). En nuestro caso la variable a considerar sería la incisión fluvial y las trayectorias asintóticas indicarán no incisión. La rama asintótica inicial nos indicaría el estadio previo a la incisión de la red de drenaje y la rama final tan solo nos indica un estadio teórico de equilibrio actual (Benito-Calvo *et al.*, 2022), pero que se reactivará con la futura bajada del nivel del mar en el próximo ciclo glacial, es decir cuando añadamos más tiempo a la trayectoria final de la asíntota del presente, y las llanuras aluviales actuales se conviertan en una nueva terraza. Los mecanismos detrás de la altimetría actual de las antiguas llanuras aluviales de los ríos están en

relación con los efectos de retroalimentación de los movimientos eustáticos (oceánicos) e isostáticas (continentales) relacionados con la generación de valles fluviales durante el Cuaternario: bajadas y subidas del nivel del mar vs elevación isostática por descarga erosiva (Silva *et al.*, 2017).

La polinómica de 4º orden propuesta en el presente trabajo (Fig. 7) resuelve los problemas que presentan las curvas exponenciales o potenciales con un ajuste de ( $R^2$ ) de 0,996. Esta curva indica que el comienzo (edad media) de la disección de las antiguas cuencas neógenas (Tajo y Duero) se produce a partir de  $2,4 \pm 0,26$  Ma. No obstante, la incisión fluvial efectiva, es decir la captura atlántica de

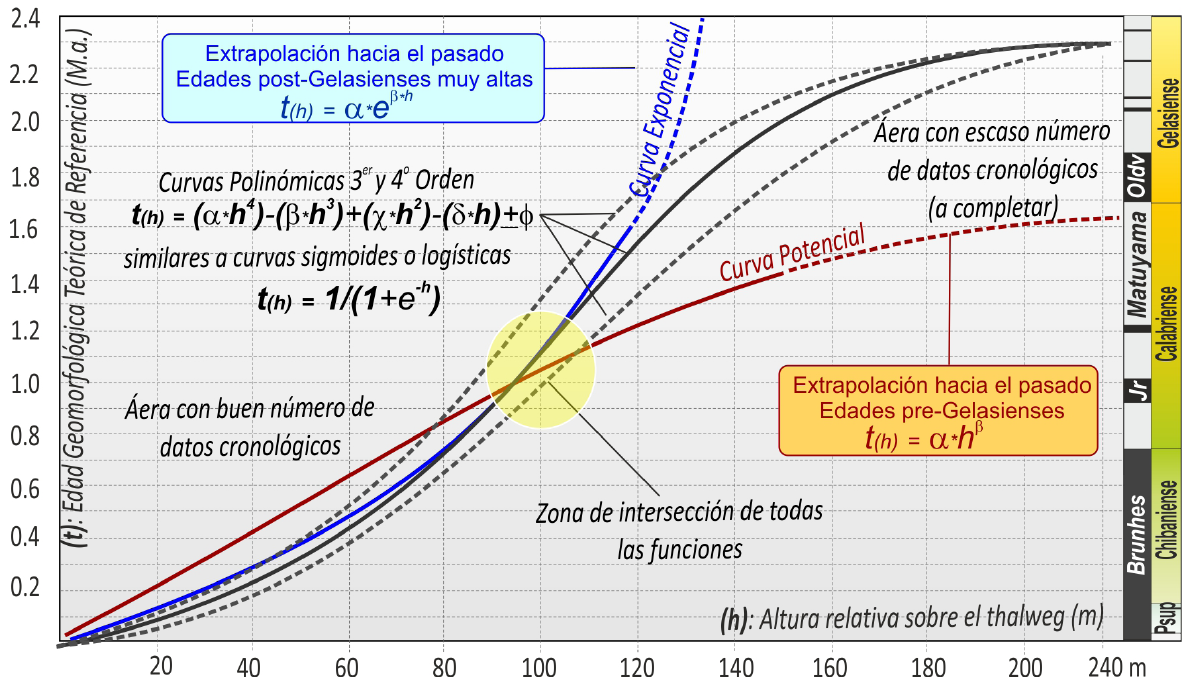


Fig. 8. Comparativa teórica de la geometría de las regresiones exponenciales, potenciales, polinómicas y sigmoides (funciones logísticas) para las relaciones edad(t)/altura(h) de las terrazas fluviales en la Península Ibérica. Nótese la convergencia de las curvas de regresión para edades jóvenes y su divergencia para edades más antiguas (condicionada por la falta de datos en este rango de edades). La zona de convergencia entre las dos áreas del gráfico corresponde a edades situadas entre 1.0 y 1.2 M.a. y alturas de relativas de +100-120 m. En el caso de intercambiar las variables (t y h) en los ejes x/y las morfologías de las curvas de regresión serían correlativamente inversas.

Fig. 8. Theoretical comparison of the geometry of exponential, potential, polynomial and sigmoid regressions (logistic functions) for the age(t)/height(h) relationships of fluvial terraces in the Iberian Peninsula. Note the convergence of the regression curves for young ages and their divergence for older ages (conditioned by the lack of data in this age range). The convergence zone between these two areas of the graph corresponds to ages between 1.0 and 1.2 M.y.a. and relative heights of +100-120 m. In the case of interchanging the variables (t, h) on the x/y axes, the morphologies of the regression curves would be correlatively inverse.

las mismas, no se produce hasta el subchron normal de Olduvai (1,8 - 2,0 Ma) al final del Gelasiense cuando se forman las primeras terrazas fluviales s.s. a +150-155 m en el Tajo y a +144 m en el Duero (Fig. 3). La polinómica de la figura 7 ilustra claramente como la pendiente de la curva es muy suave para tiempos anteriores a Olduvai (bajas tasas de encajamiento) aumentando a partir del final de este subchron (encajamiento acelerado), que parece decelerarse para los últimos 250 ka.

## 5. Resumen y Conclusiones

El uso de cronofunciones, aunque no muy extendido hasta la fecha, se revela como una potente herramienta matemática para el establecimiento de marcos cronológicos en el análisis de distintos tipos de procesos geológicos (erosión, sedimentación, formación de suelos, incisión fluvial, etc.) íntimamente relacionados con la evolución del relieve a lo largo del tiempo. Con toda certeza, sustituyen a los antiguos marcos cronológicos relativos basados en fauna fósil, industria lítica y/o cronosecuencias edáficas entre otras, aunque las últimas continúan ofreciendo información numérica relevante de aplicación paleoclimática. La posibilidad de utilizar dataciones en suelos y sedimentos para calcular curvas de frecuencias acumuladas y compararlas con curvas isotópicas de carácter paleoclimático ( $^{18}\text{O}$ ; paleotemperaturas, nivel del mar, etc.), ofrecerá mejores resultados que conforme aumente el número de dataciones publicadas. No cabe duda de que las funciones de frecuencia acumulada serán sustituidas, en un futuro, por las distribuciones de probabilidad acumuladas (SCDRD o SPD) de fechas  $\text{C}^{14}$  para análisis similares correspondientes a los últimos 50.000 años (límite de datación del método) ya que presentan mejor precisión y un mejor tratamiento de las incertidumbres. No obstante, las funciones de frecuencias acumuladas seguirán siendo de aplicación, al permitir añadir más datos (TL, OSL, ESR, Cosmogénicos, etc.) a las fechas de  $\text{C}^{14}$ , así como explorar y extrapolar los datos a periodos más antiguos dentro del Pleistoceno. Como se ha

puesto de manifiesto, estos métodos pueden tener importancia para establecer marcos teóricos en paleosismología, paleohidrología y actividad sedimentaria, entre otros, para fechas superiores a los 350-400 ka (p.ej. Roquero *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2021) de las cuales las dataciones publicadas son más escasas.

Por otro lado, las cronofunciones basadas en análisis de regresión muestran una muy buena utilidad para el establecimiento de marcos cronológicos teóricos para las secuencias de terrazas fluviales, suelos asociados y, en definitiva, para el análisis de la evolución de los valles fluviales durante el Cuaternario. Para abarcar todo este periodo es necesario combinar dataciones numéricas de distintas metodologías (Th/U, TL, OSL, ESR, etc.) con dataciones paleomagnéticas y otras más recientes de carácter cosmogénico que alcanzan y superan los 2,5 M.a. (Karampaglidis *et al.*, 2020). Las regresiones potenciales, exponenciales y lineales (en menor medida), muestran utilidad para el análisis de valles fluviales individuales, o segmentos de estos, con niveles de terrazas situados por debajo de los c. +120 m sobre el thalweg. Por encima de estas cotas relativas es necesario la aplicación de funciones polinómicas de distinto orden para el conjunto total de datos, siendo las de mejor ajuste razonable las polinómicas de 3<sup>er</sup> Orden (Silva *et al.*, 2017; Martín Martín *et al.* 2020). En el presente trabajo se han introducido las fechas  $\text{Be}^{10}$  -  $\text{Al}^{26}$  para las terrazas por encima de los + 190 - 220 m obtenidas por Karampaglidis *et al.* (2020), una polinómica de 4<sup>o</sup> orden con un índice de correlación ( $R^2$ ) de hasta 0,996 (Fig. 7). Se han ensayado polinómicas de 5<sup>o</sup> y 6<sup>o</sup> orden, pero con el conjunto de datos publicados hasta la fecha no ofrecen ajustes más significativos que las de 3<sup>er</sup> y 4<sup>o</sup> orden.

Para comprobar el grado de ajuste que presentan las cronofunciones propuestas se han comparado las edades ESR (Ti-Center) propuestas por Parés *et al.* (2021) para las terrazas altas del Ebro (+85 a +144 m) en la zona de Miranda con las teóricas obtenidas por la nueva polinómica de 4<sup>o</sup> orden (PO4). La compara-



Tabla 1. Comparativa entre edades e incertidumbres ESR (Ti-Center) obtenidas por Parés *et al.* (2021) en el valle del Ebro y las edades teóricas que proceden de la aplicación de la función polinómica de 4º orden obtenida en este trabajo (modificada de Silva *et al.*, 2017). (\*) La edad MIR1601 corresponde a una determinación ESR (Al-center) a la que Parés *et al.* (2021) atribuyen una mayor fiabilidad que a la muestra MIR1602 (Ti-Center) ambas correspondientes a la terraza T1.

*Table 1. Comparison between ESR ages and uncertainties (Ti-Center) obtained by Parés et al. (2021) in the Ebro valley and the theoretical ages that come from the application of the 4th order polynomial function obtained in this work (PO4, modified from Silva et al., 2017). (\*) The age of the sample MIR1601 corresponds to an ESR (Al-center) determination which Parés et al. (2021) considers to be more reliable than sample MIR1602 (Ti-Center), both corresponding to the T1 terrace.*

Muestra 2021	Altura terraza +m	Edad (ka) ESR (Ti-Center)	Edad PO4 (ka) Polinómica 4º Orden	Diferencia PO4-ESR (ka)	Diferencia Errores PO4-ESR
MIR1601*	T1 (+144m)	1.686,0 ± 227	1.784,6 ± 309	+98,9	± 82
MIR1602	T1 (+142m)	1.531,0 ± 155	1.776,3 ± 189	+248,2	± 34
MIR1603	T2 (+90m)	1.263,0 ± 123	1.258,8 ± 178	-4,2	± 55
MIR1604	T2 (+88m)	1.207,0 ± 106	1.227,5 ± 161	+20,6	± 55
MIR1605	T3 (+85m)	1.120,0 ± 163	1.180,2 ± 137	+59,7	± 26

tiva ofrece edades teóricas muy similares con diferencias respecto a las ESR de entre -4,19 y +98,59 ka (Tabla 1), con incertidumbres también muy similares a la publicadas por Parés *et al.* (2021). Solo la muestra MIR1602 correspondiente a la T1 presenta una diferencia de edad importante ( $\pm 248$  ka) aunque considerando las incertidumbres asociadas llegan prácticamente a solaparse en torno a la edad de 1,6 M.a (Tabla 1). Estos resultados son relevantes ya que se aplican las funciones obtenidas para cuencas atlánticas (Tajo y Duero) a una cuenca mediterránea (Ebro) alcanzando edades muy próximas a las de métodos absolutos más sofisticados, laboriosos y costosos.

El futuro aumento del número de dataciones en sistemas de terrazas fluviales permitirá realizar sin duda, funciones matemáticas de mayor precisión, incluyendo quizá las de distribución de probabilidades. Estas funciones geocronológicas también podrán ser aplicables a otros elementos geomorfológicos cuya edad sea dependiente de la altitud (relativa o absoluta) como pueden ser por ejemplo las terrazas marinas o las morrenas glaciares. Quizá el único inconveniente que se pueda poner a estas metodologías es que utilizan edades procedentes de distintos métodos de datación, pero esto también podrá solucionarse a largo plazo con el aumento de fechas

publicadas. En este sentido, las familias de fechas de radiocarbono ( $C^{14}$ ), luminiscencia (TL, OSL, IRSL, ESR) y cosmogénicos (Berilio, Aluminio, Neón) presentan individualmente muy buenas perspectivas.

### Agradecimientos

Esta publicación es parte de los proyectos I+D+i PID2021-123510OB-I00 (QTECTIBERIA) y CGL2015-67169-P (QTECSPAIN) financiados por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España MCIN/AEI/10.13039/501100011033/. Los autores agradecen los comentarios y sugerencias realizadas por Rafael Baena (US) y Alfonso Benito (CENIEH) que han ayudado a mejorar el trabajo. Es una contribución del Grupo de trabajo GQM-AEQUA.

### Bibliografía

- Alonso, P., Sierra, C., Ortega, E., Dorronsoro, C. (1994). Soil development indices of soils developed on fluvial terraces (Peñaranda de Bracamonte, Salamanca, Spain). *Catena*, 23, 295-308. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(94\)90074-4](https://doi.org/10.1016/0341-8162(94)90074-4)
- Baena, R.; Díaz del Olmo, F. (1994). Cuaternario aluvial de la Depresión del Guadalquivir: episodios geomorfológicos y cronología paleo-

- magnética. *Geogaceta* 15:109-111. <https://hdl.handle.net/11441/52486>
- Balsera, V., Díaz-del-Río, P., Gilman, A., Uriarte, A., Vicent, J. M. (2015). Approaching the demography of late prehistoric Iberia through summed calibrated date probability distributions (7000-2000 cal BC). *Quaternary International*, 386, 208-211. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.06.022>
- Blanco-González, A., Lillios, K. T., López-Sáez, J.A., Drake, B. L. (2018). Cultural, Demographic and Environmental Dynamics of the Copper and Early Bronze Age in Iberia (3300-1500 BC): Towards an Interregional Comparison at the Time of the 4.2 ky BP Event. *Journal of World Prehistory*, 31, 1-79. <https://doi.org/10.1007/s10963-018-9113-3>
- Benito-Calvo, A., Pérez-González, A., Santonja, M., 1998. Terrazas rocosas aluviales y travertínicas del valle alto del río Henares (Guadalajara, España). *Geogaceta* 24, 55-58.
- Benito-Calvo, A., Moreno, D., Fujioka, T., López, G.I., Martín-González, F., Martínez-Fernández, A., Hernando-Alonso, I., Karampaglidis, T., Bermúdez de Castro, J.M., Gutiérrez, F. (2022). Towards the steady state? A long-term river incision deceleration pattern during pleistocene entrenchment (Upper Ebro River, Northern Spain), *Global and Planetary Change*, 2022, 103813. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103813>
- Candy, I., Black, S. (2009). The timing of Quaternary calcrete development in semi-arid southeast Spain: Investigating the role of climate on calcrete genesis. *Sedimentary Geol.*, 218, 6-15. <https://doi.org/10.1016/j.sed-geo.2009.03.005>
- Crema, E.R., Bevan, A. Shennan, S. (2017). Spatio-temporal approaches to archaeological radiocarbon dates. *Journal of Archaeological Science*, 87, 1 - 9. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2017.09.007>
- Crema, E.R., Bevan, A. (2020) Inference from Large Sets of Radiocarbon Dates: Software and Methods Radiocarbon. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.95>
- Cunha, P.P., Martins, A., Huot, S., Murray, A.S., Raposo, L. (2008). Dating the Tejo River lower terraces in the Ródão area (Portugal) to assess the role of tectonics and uplift. *Geomorphology*, 102, 43-54. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.11.001>
- Cunha, P.P., Martins, A.A., Gomes, A., Stokes, M., Cabral, J., Lopes, F.C., Pereira, D., De Vicente, G., Buylaert, J.P., Murray, A.S. (2019). Mechanisms and age estimates of continental-scale endorheic to exorheic drainage transition: Douro River, Western Iberia. *Glob. Planet. Change* 181, 102985. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.102985>
- Cheng, H., Edwards, R.L., Shen, C.C., Polyak, V.J., Asmerom, Y., Woodhead, J., Hellstrom, J., Wang, Y., Kong, X., Spötl, C., Wang, X., Alexander, E.C. Jr. (2013). Improvements in 230Th dating, 230Th and 234U half-life values, and U-Th isotopic measurements by multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Earth and Planetary Science Letters*, 371-372, 82-91. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.04.006>
- Drake, B. L., Blanco-González, A., Lillios, K. T. (2017). Regional dynamics in the Neolithic transition in Iberia: Results from summed calibrated date analysis. *Journal of Archaeological Method and Theory*, 24(3), 796-812. <https://doi.org/10.1007/s10816-016-9286-y>
- Duval, M., Arnold, L.J., Rixhon, G. (2020). Electron spin resonance (ESR) dating in Quaternary studies: Evolution, recent advances and applications. *Quaternary International*, 2020, 556, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.07.044>
- Gardner, T.W., Jorgensen, D.W., Shuman, C. and Lemieux, C.R. (1987). Geomorphic and tectonic process rates: effects of measured time interval. *Geology*, 15: 259-261. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1987\)15<259:GATPR E>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1987)15<259:GATPR E>2.0.CO;2)
- Gupta, S., Collier, J. S., Palmer-Felgate, A., Potter, G. (2007). Catastrophic flooding origin of shelf valley systems in the English Channel. *Nature*. 448 (7151), 342-345. <https://doi.org/10.1038/nature06018>
- Harden, J. (1982). A quantitative index of soil development from field description: examples from a chronosequence in Central California. *Geoderma*, 28, 1-28. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(82\)90037-4](https://doi.org/10.1016/0016-7061(82)90037-4)
- Harden, J. W., Taylor, E. M., 1983. A quantitative comparison of soil development in four climatic regimes. *Quaternary Research*, 20, 342-359. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(83\)90017-0](https://doi.org/10.1016/0033-5894(83)90017-0)
- Hillaire-Marcel, C., Gariepy, C., Ghaleop, B., Goy, J.-L., Zazo, C., Barcelo, J.C., 1996. U-series measurements in Tyrrhenian deposits from Mallorca-further evidence for two last interglacial high sea levels in the Balearic Islands. *Quaternary Science Reviews*, 15, 53-62. [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(95\)00079-8](https://doi.org/10.1016/0277-3791(95)00079-8)

- Karampaglidis, T., Benito-Calvo, A., Rodés, A., Braucher, R., Pérez-González, A., Parés, J.M., Stuart, F., Di Nicola, L., Bourles, D. (2020). Pliocene endorheic-exhoreic drainage transition of the Cenozoic Madrid Basin (Central Spain). *Global and Planetary Change*, 194, 103295. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103295>
- Lajoie, K.R. (1986). Coastal tectonics. En: Wallace, R.E. (Ed.), *Active Tectonics. Studies in Geophysics*. National Academic Press, Washington, DC, pp. 136-147.
- Larasoaña, J.C., Ortuño, M., Birks, H.H., Valero-Garcés, B., Parés, J.M., Copons, R., Camarero, L., Bordonau, J. (2010). Palaeoenvironmental and palaeoseismic implications of a 3700-year sedimentary record from proglacial Lake Barrancs (Maladeta Massif, Central Pyrenees, Spain). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 294, 83-93. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.04.003>
- McFadden, L. D., Weldon, R. J. (1987). Rates and processes of soil development on Quaternary terraces in Cajon Pass, southern California. *Geological Society of America Bulletin*, 98, 280-293. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1987\)98<280:RAPOSD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1987)98<280:RAPOSD>2.0.CO;2)
- Martín-Martín, I., Silva, P.G., Martínez-Graña, A., Elez, J. (2020). Geomorphological and geochronological analysis applied to the Quaternary landscape evolution of the Yeltes River (Salamanca, Spain). *Sustainability*, 12(19), 7869; <https://doi.org/10.3390/su12197869>
- Mediato, J.F. Santisteban, J.I., del Moral, B., Mediavilla, R., Dabrio, C.J. (2020). Aridity events during the last 4000 years in Western Mediterranean marshes (Almenara and Benicasim marshes, E Spain). *Quaternary International*, 566-567, 303-314. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.04.021>
- Moreno, A., López-Merino, L., Leira, M., Marco-Barba, J., González Sampérez, P., Valero-Garcés, B., López-Sáez, J.A., Santos, L., Mata, P., Ito, E. (2011). Revealing the last 13,500 years of environmental history from the multiproxy record of a mountain lake (Lago Enol, northern Iberian Peninsula). *Journal of Palaeolimnology*, 46, 327-349. <https://doi.org/10.1007/s10933-009-9387-7>
- Moreno, A., Svensson, A., Brooks, S.K., Connor, S., Engels, S., Fletcher, W., Genty, D., Heiri, O., Labuhn, I., Persoiu, A., Peyron, O., Sadori, L., Valero-Garcés, B.L., Wulf, S., Zanchetta, G., 2014. A compilation of Western European terrestrial records 60-8 ka BP: towards an understanding of latitudinal climatic gradients. *Quaternary Science Reviews*, 106, 167-185. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.06.030>
- Muhs, D.R., Simmons, K.R., Meco, J., Porat, N. (2015). Uranium-series ages of fossil corals from Mallorca, Spain: The “Neotyrrenian” high stand of the Mediterranean Sea revisited. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 438, 408-424. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.06.043>
- Parés, J.M., Duval, M., Soria-Jáuregui, A., González-Amuchástegui, M.J. (2021). First Chronological Constraints for the High Terraces of the Upper Ebro Catchment. *Quaternary*, 4, 25. <https://doi.org/10.3390/quat4030025>
- Pinilla, L., Pérez-González, A., Sopena, A., Parés, A. (1995). Fenómenos de hundimientos sinsedimentarios en los depósitos cuaternarios del río Tajo en la Cuenca de Madrid (Almoguera-Fuendidueña de Tajo). Monografías C. CC. Medioambientales, 3. CSIC, Madrid, 125-140.
- Ramsey, C.B. (2017). Methods for summarizing Radiocarbon datasets. *Radiocarbon*, 59 (6), 1809 - 1833. <https://doi.org/10.1017/RDC.2017.108>
- Reimer, P. J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Blakwell, P. G., *et al.* (2013). Intcal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 55(4), 1869-1887. [https://doi.org/10.2458/azu\\_js\\_rc.55.16947](https://doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16947)
- Rodríguez-Lloveras, X., Machado, M.J., Sánchez-Moya, Y., Celler, M., Medialdea, A., Sopena, A., Benito, G. (2020). Impacts of sediment connectivity on Holocene alluvial records across a Mediterranean basin (Guadalentín River, SE-Spain). *Catena*, 187, 104321. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104321>
- Roquero, E., Goy, J.L., Zazo, C. (1997). Nuevos índices cronológicos de evolución de suelos en terrazas fluviales. *Estudios Geológicos*, 53, 3-15. <https://doi.org/10.3989/egeol.97531-2242>
- Roquero, E., Silva, P.G., Zazo, C., Goy, J.L., Massana, J. (2015). Soil evolution indices in fluvial terrace chronosequences of Central Spain (Tagus and Duero fluvial basins). *Quaternary International*, 376, 101-113. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.11.036>
- Roquero, E., Silva, P.G., Rodríguez-Pascua, M.A., Bardají, T., Elez, J., Carrasco, P., Giner-Robles, J.L. (2019). Geomorphology and pedology of faulted fan surfaces and paleosols in the Palomares Fault Zone (Betic Cordillera, SE Spain): paleoclimatic and paleoseismic implications.

- Geomorphology*, 342, 196 - 209. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.06.003>
- Sauer, D. (2010). Approaches to quantify progressive soil development with time in Mediterranean climate—I. Use of field criteria. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 173, 822-842. <https://doi.org/10.1002/jpln.201000136>
- Schwarcz, H.P. (1989). Uranium series dating of Quaternary deposits. *Quaternary International* 1, 7-17. [https://doi.org/10.1016/1040-6182\(89\)90005-0](https://doi.org/10.1016/1040-6182(89)90005-0)
- Silva, P.G., Roquero, E., López-Recio, M., Huerta, P., Martínez-Graña, A. (2015). Valley incision trends and subsequent chronosequences of fluvial terraces for Atlantic large rivers in the Iberian Peninsula and Northern Europe. Progress in Quaternary archive studies in the Iberian Peninsula, 91-92.
- Silva, P.G., Roquero, E., López-Recio, M., Huerta, P., Martínez-Graña, A. (2017). Chronology of fluvial terrace sequences for large Atlantic rivers in the Iberian Peninsula (Upper Tagus and Duero basins, Central Spain). *Quaternary Science Reviews*, 166, 188-203. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.05.027>
- Silva, P.G., Roquero, E., Bardají, T., Medialdea, A. (2020). Pleistocene to Holocene phases of sedimentation and soil formation in the semiarid SE Spain (Eastern Betic Cordillera). *Cuaternario y Geomorfología*, 34 (1-2), 41-61. <https://doi.org/10.17735/cyg.v34i1-2.78815>
- Silva, P.G., Roquero, E., Elez, J., Bardají, T., Medialdea, A. (2021). Phases of sedimentation and soil formation in SE Spain during the Holocene (Eastern Betic Cordillera). *Geotemas*, 18, 1027 - 1030.
- Simpson, J.J. y Grün, R. (1998). Non-destructive gamma spectrometric U-series dating. *Quaternary Science Reviews* 17: 1009-1022. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(97\)00088-7](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(97)00088-7)
- Torres, T., Ortiz, J.E., Sánchez-Palencia, Y., Ros, M., Navarro, F., López-Cillad, I., Galáne, L., A., Rámalo, S., Rodríguez-Estrella, T., Blázquez, A. (2021). The Pleistocene and Holocene records of the Mazarrón Basin (SE Spain). *Quaternary International*, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.03.019>
- Turú, V., Carrasco, R.M., López-Saéz, J.A., Pontevedra-Pombal, X., Pedraza, J. Luelmo-Lautenschlaeger, R., Pérez-Díaz, S. *et al.* (2021). Palaeoenvironmental changes in the Iberian central system during the Late-glacial and Holocene as inferred from geochemical data: A case study of the Navamuño depression in western Spain. *Catena*, 207. 105689. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105689>
- Valero-Garcés, B.L., González-Sampériz, P., Gil-Romera, G., Benito, B.M., Moreno, A., Oliva-Urcia, B., Aranbarri, J., García-Prieto, E., Frugone, M., Morellón, M., Arnold, L.J., Demuro, M., Hardiman, M., Blockley, S.P.E., Lane, C.S., (2019). A multi-dating approach to age-modelling long continental records: The 135 ka El Cañizar de Villarquemado sequence (NE Spain). *Quaternary Geochronology* 54, 101006. <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2019.101006>
- Walker, M., Head, M.J., Berkelhammer, M. Björck, S. *et al.* (2018): Formal ratification of the subdivision of the Holocene Series/Epoch (Quaternary System/Period): two new Global Boundary Stratotype Sections and Points (GSSPs) and three new stages/ subseries. *Episodes*, 41 (4), 213-223. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2018/018016>
- Williams, A.N. (2012). The use of summed radiocarbon probability distributions in archaeology: a review of methods. *Journal of Archaeological Science*, 39, 578-589. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.07.014>
- Weninger, B., Jöris, O., Danzeglocke, U. (2008). *CalPal-2007: Radiocarbon Calibration & Palaeoclimate Research Package*, University of Cologne, Germany. <http://www.calpal.de>
- Zazo, C., Goy, J.L., Hillaire-Marcel, C., Gillot, P.Y., Soler, V., González, J.A., Dabrio, C.J., Ghaleb, B., 2002. Raised marine sequences of Lanzarote and Fuerteventura revisited - a reappraisal of relative sea-level changes and vertical movements in the eastern Canary Islands during the Quaternary. *Quaternary Science Reviews*, 21. 2019-2046. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(02\)00009-4](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(02)00009-4)

Recibido el 7 de marzo de 2022

Aceptado el 31 de agosto de 2022