



## Introducción

El examen del registro de radiocarbono permite identificar y caracterizar un tipo específico de mínimo solar prolongado de tipo Spörer que solo se ha producido cuatro veces en los últimos 11.000 años. Cada uno de estos eventos solares coincide con uno de los cambios climáticos más significativos del Holoceno. Utilizando una reconstrucción de la temperatura del Holoceno, un análisis de Monte Carlo calcula que la probabilidad de que esta alineación se produzca por casualidad es de solo el 0,05%, lo que sugiere claramente una relación causal. Un examen detallado de las anomalías climáticas asociadas a estos períodos revela un patrón consistente de reorganización atmosférica, que incluye cambios en el gradiente de temperatura, modificaciones en los sistemas monzónicos y alteraciones en la circulación oceánica y atmosférica. Estos hallazgos respaldan la existencia de un ciclo solar-climático a escala milenaria y proporcionan pruebas de un mecanismo indirecto, no lineal y acumulativo por el cual los cambios prolongados en la actividad solar influyen en el clima. Este mecanismo, que actualmente no está representado en los modelos climáticos, ofrece nuevos conocimientos sobre la variabilidad climática del pasado y tiene implicaciones potenciales para comprender las tendencias climáticas durante los períodos de alta actividad solar sostenida.

## Métodos

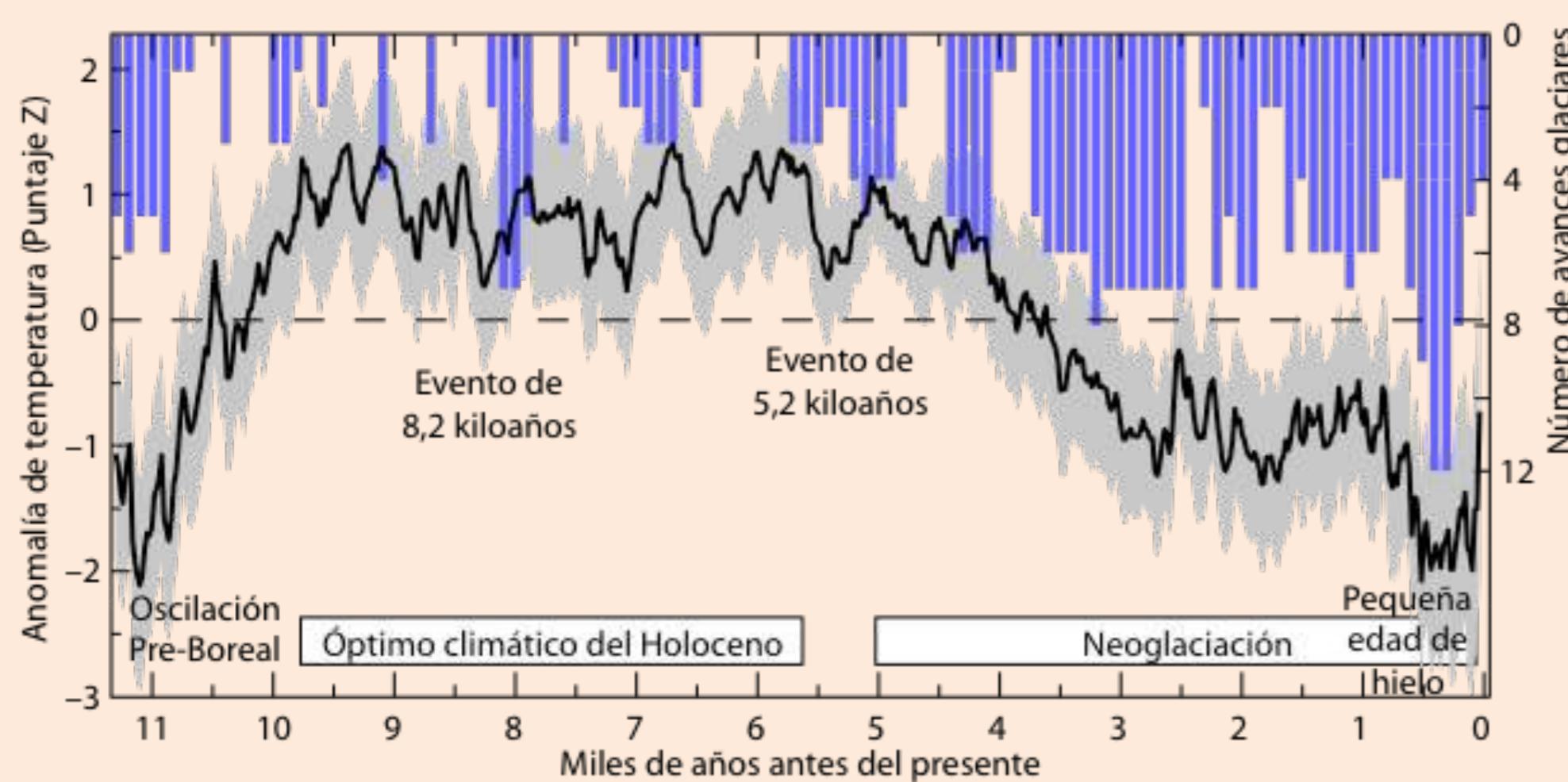
La curva de calibración de la edad del radiocarbono IntCal20 (Reimer et al., 2020) se obtuvo de intcal.org. Se analizaron los datos de  $\Delta^{14}\text{C}$  (variación de la relación  $^{14}\text{C}/\text{C}$ ) que abarcan desde hace 11.700 años AP hasta el presente.

Se analizaron los registros paleoclimáticos de 73 proxies utilizados por Marcott et al., 2013. Los datos de temperatura se calcularon como anomalías en relación con la media de cada proxy. A continuación, se calculó la media y la incertidumbre  $1\sigma$  de todos los proxies disponibles en cada punto temporal y se expresaron como puntaje Z, que representan su desviación de la media global.

Se identificó un patrón característico común a los **grandes mínimos solares (GMS)** Preboreal (10.250 AP), Sumerio (5340 AP), Homero (2790 AP) y Spörer (560 AP). Este patrón describe un aumento del  $\Delta^{14}\text{C}$  del 0,2% por década durante siete décadas, seguido de un siglo con valores que se mantienen por encima del 1,5%, alcanzando un máximo del 2% durante aproximadamente 20 años, y concluyendo con una disminución del 0,24% por década durante los últimos 50 años, lo que da una duración total de  $220 \pm 10$  años.

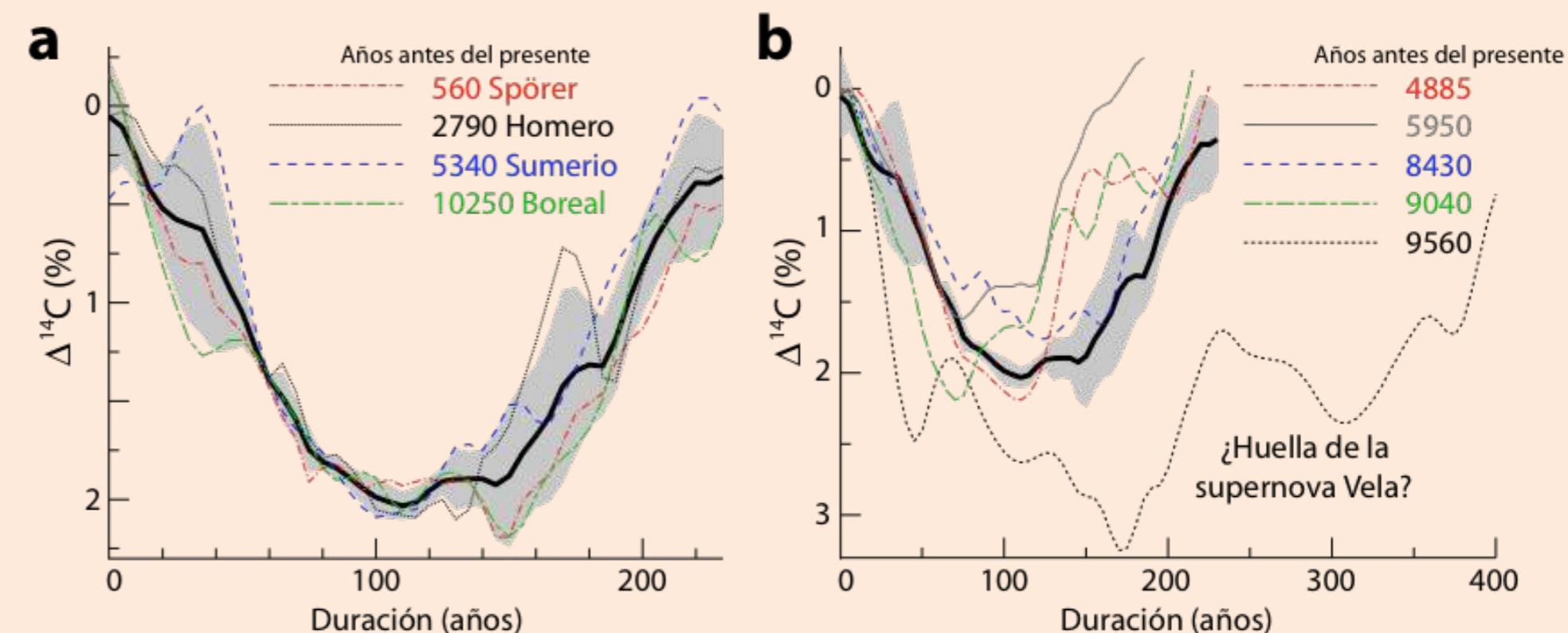
La reconstrucción de la temperatura revela once **eventos climáticos abruptos (ECA)**, que han sido ampliamente estudiados en investigaciones anteriores. De los siete mayores ECA, cuatro coinciden con los cuatro GMS de tipo Spörer.

Una simulación de Monte Carlo entre una serie climática con los siete ECA fijados y una serie solar con los cuatro GMS aleatoriamente distribuidos, sin solapamiento, arrojó un valor  $p$  de 0,0047 (0,5%) tras 10.000 simulaciones, lo que indica que la probabilidad de que la coincidencia observada entre los ECA y los GMS se debe al azar es extremadamente baja, rechazándose a un nivel de confianza del 99% ( $p < 0,01$ ).

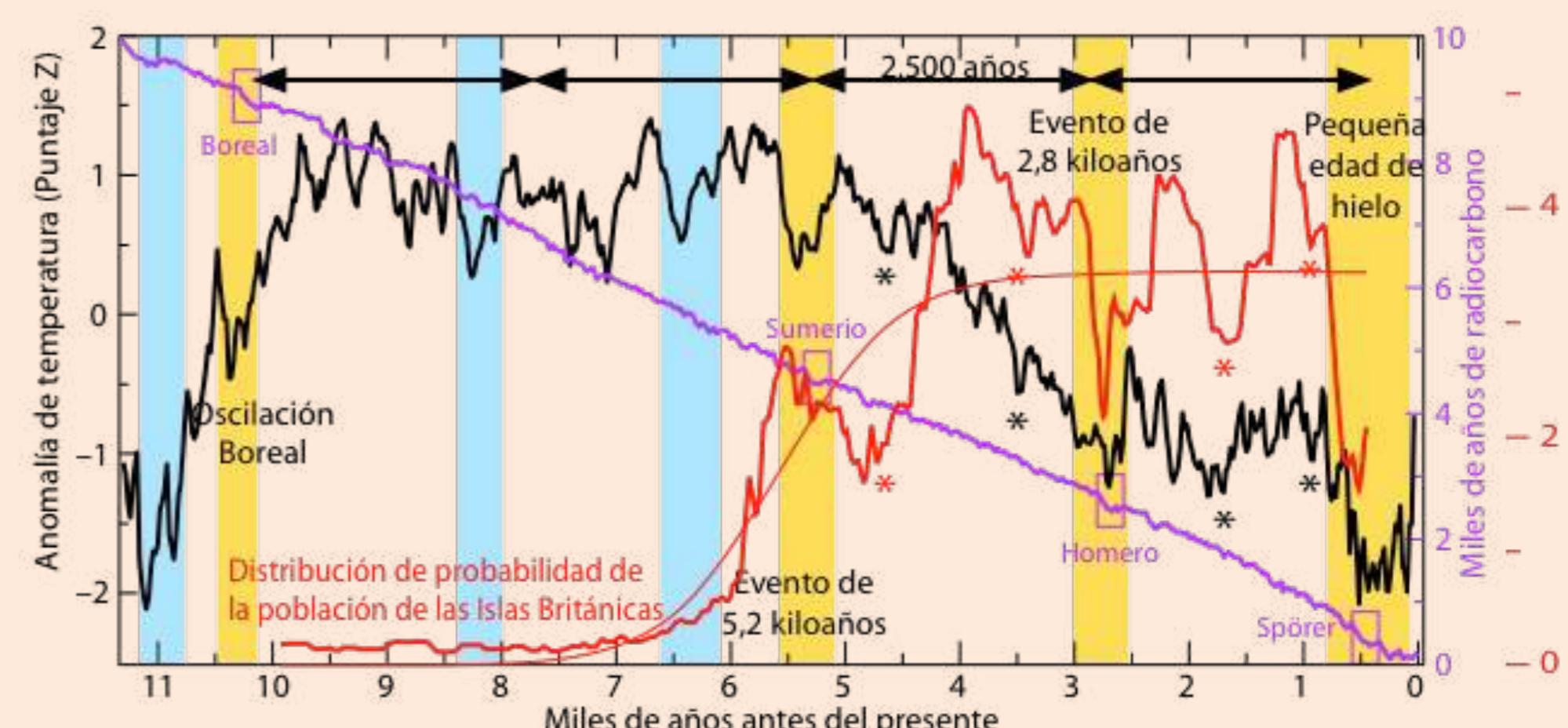


**Figura 2.** Reconstrucción de la evolución de la temperatura global a lo largo del Holoceno, expresada como puntaje Z, basada en 73 proxies globales (línea negra) con un rango de incertidumbre de  $1\sigma$  (área gris). Las barras azules invertidas representan el número de regiones del mundo, de un total de 17, que experimentaron avances glaciares en cada siglo del Holoceno (Solomina et al., 2015). Los recuadros blancos resaltan dos períodos climáticos del Holoceno, y se indican cuatro ECA, identificables tanto en el registro de temperaturas como en los avances glaciares.

## Resultados



**Figura 1.** (a) Alineación de los cuatro GMS de tipo Spörer del Holoceno, cada uno con un perfil  $\Delta^{14}\text{C}$  similar, junto con su media (línea gruesa) y su desviación estándar (área gris). Las fechas corresponden al inicio de cada mínimo en años antes del presente. (b) Comparación del perfil medio  $\Delta^{14}\text{C}$  de los GMS de tipo Spörer con cinco períodos adicionales de elevada producción de  $^{14}\text{C}$ , que muestran perfiles diferentes. El eje vertical se ha invertido para mayor claridad.



**Figura 3.** Reconstrucción de los cambios globales de temperatura durante el Holoceno (curva negra) junto con la curva de calibración del radiocarbono IntCal20 (curva violeta) (Reimer et al., 2020), que relaciona los años de radiocarbono con los años calibrados. Las barras verticales marcan los siete ECA más significativos identificados en la reconstrucción. Cuatro de estos eventos (barras naranjas) coinciden con un GMS de tipo Spörer (rectángulos), que aparecen como baches en la curva de radiocarbono. Las flechas horizontales de 2500 años enfatizan la naturaleza cuasiperiódica de los GMS de tipo Spörer. La curva roja es la distribución de probabilidad de las fechas de radiocarbono de yacimientos arqueológicos en las Islas Británicas, utilizadas como proxy de la población (Bevan et al., 2017). Los asteriscos indican mínimos relativos adicionales coincidentes en ambas curvas.

## Conclusiones

- Se ha identificado una clase característica de GMS, cuyo tipo es el mínimo de Spörer, con una duración de 220 años y un aumento medio de  $\Delta^{14}\text{C} \geq 1,5\%$  que se mantiene durante un siglo. En los últimos 11.000 años se han registrado cuatro mínimos de esta clase.
- Estos cuatro GMS se repiten a intervalos de aproximadamente  $2425 \pm 200$  años, formando un ciclo solar recién identificado compuesto exclusivamente por este tipo específico de mínimo.
- Los cuatro GMS de tipo Spörer coinciden con cuatro de los ECA más significativos del Holoceno. Un análisis estadístico de Monte Carlo indica una probabilidad >99% de que esta correlación no se deba al azar.
- Los ECA vinculados a los GMS de tipo Spörer han coincidido con cambios sociales y demográficos significativos en las sociedades humanas, lo que establece una cadena causal entre las variaciones de la actividad solar, los cambios climáticos y las transformaciones sociales.



## Bibliografía

- Bevan, A., Colledge, S., et al., 2017. Holocene fluctuations in human population demonstrate repeated links to food production and climate. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 114. <https://doi.org/10.1073/pnas.1709190114>
- Marcott, S.A., Shakun, J.D., et al., 2013. A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years. *Science* 339, 1198–1201. <https://doi.org/10.1126/science.1228026>
- Reimer, P.J., Austin, W.E.N., et al., 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon* 62, 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
- Solomina, O.N., Bradley, R.S., et al., 2015. Holocene glacier fluctuations. *Quat. Sci. Rev.* 111, 9–34. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.11.018>