



5.
Paleoclimatología

5.1.

El interés de la paleoclimatología

La constatación de que la temperatura media del planeta ha aumentado a nivel global entre 0,3 y 0,6°C en los últimos 100 años, el aumento en el nivel de los mares y la sucesión en los últimos decenios de eventos climáticos de carácter extraordinario, amplificadas muchas veces por los medios de comunicación pero que en ocasiones suponen récords absolutos dentro del registro instrumental de datos meteorológicos, han puesto en alerta a buena parte de la comunidad científica más directamente implicada en el tema así como a los diversos organismos nacionales e internacionales y en general a toda la sociedad en relación con la posibilidad de que actualmente estemos asistiendo a un momento de variación global de las condiciones climáticas.

Estos cambios recientes estarían relacionados con la alteración en la composición atmosférica que ha supuesto la masiva emisión antrópica de gases con efecto invernadero desde el inicio de la Revolución Industrial, gases que como el CO₂, el CH₄ y el N₂O están presentes de forma natural en la atmósfera pero que desde el siglo XIX han aumentado su proporción en un 30%, 145% y 15% respectivamente, propiciando junto a otros gases de origen antropogénico como los clorofluorocarbonados (CFCs) un forzamiento radiativo positivo y con ello un incremento del efecto invernadero que parece estar detrás de los cambios en los patrones climáticos globales.

Pero lo cierto es que el clima cambia y más allá de esa interferencia antrópica reciente sobre su evolución, éste ha variado a lo largo de la historia geológica del planeta y lo ha hecho de forma natural, en función de factores como la disposición de océanos y masas continentales, las variaciones en la composición atmosférica o los cambios en la radiación solar incidente en relación con la posición de la Tierra respecto del Sol. Estos cambios se han producido a distintas escalas temporales, desde la milenaria a la secular y decenal, con consecuencias que en ocasiones han tenido carácter global y que se han manifestado en enfriamientos de hasta 8°C y calentamientos de 5°C en relación a la temperatura media de superficie actual cuantificada en 15°C.

Las primeras evidencias sobre cambios climáticos de alcance global se han señalado para dos momentos distintos del Precámbrico, hace entre 2.400 y 2.200 MA (millones de años) el primero y 950-650 MA el segundo. También en el Pérmico, hace 250 MA, encontramos restos geológicos relacionados con la presencia de masas glaciares que hablarían, de forma inequívoca, de condiciones más frías.

Esas fases alternarían con largos periodos más cálidos con una variabilidad interna que, en ambos casos, no resulta bien conocida dada la escasez de restos encontrados y las dificultades de datación. Como periodo cálido singular destacaría el Cretácico, donde hace entre 100 y 65 MA la temperatura media del planeta se situó 6 °C por encima de la media actual, hasta alcanzar los 21 °C en el contexto de una atmósfera con una elevada concentración de CO₂.

El Cuaternario, el último periodo geológico, se configura como un momento relativamente frío en el contexto de los 4.600 MA de historia de la Tierra. Los algo más de 1,6 MA que ocupa este periodo se caracterizan por mostrar una secuencia cíclica de fases frías o glaciares de una duración de entre 50.000 y 100.000 años, separadas por intervalos más breves y cálidos, conocidos como interglaciares, de una duración de entre 5.000 y 10.000 años, el último de los cuales, el Holoceno, correspondería con el actual postglacial y se extendería a lo largo de los últimos 11.000 años. Las oscilaciones térmicas entre esas fases glaciares e interglaciares llegaron a alcanzar los 10 °C, con descensos de hasta 8 °C respecto de la media actual e incrementos de hasta 2 °C en los interglaciares cálidos, produciéndose en ocasiones transiciones relativamente rápidas, de unos centenares de años, desde las condiciones frías a otras más cálidas.

Sea cual sea su magnitud y escala temporal, estos cambios en el clima llevaron aparejadas importantes consecuencias ambientales que han dejado huellas evidentes en los procesos bióticos y abióticos que se desarrollan en la superficie terrestre. Éstas evidencias constituyen así indicadores, signos claros, de que en algún momento del pasado las condiciones climáticas diferían de las que se observan en la actualidad. Sólo en virtud de la existencia de un clima distinto podría explicarse la presencia, por ejemplo, de restos de actividad glaciar en nuestras latitudes a altitudes sobre el nivel del mar escasamente por encima de los 800 mts, o evidencias fósiles de fauna y vegetación propias de climas más cálidos o fríos.

La paleoclimatología es la ciencia que se encarga del estudio en interpretación de toda esa información que, genericamente, los investigadores denominan como *proxy-data*. A través de ella se puede conocer, datar y cuantificar las oscilaciones del clima en el pasado, en particular aquellas que han tenido lugar en el Cuaternario más reciente en virtud de la mayor cantidad, calidad y variedad de las fuentes de información paleoclimática conservadas. Estas son, al menos potencialmente, abundantes en relación con los impactos que los cambios en el clima tiene sobre los procesos que se desarrollan en la superficie terrestre. Pero la información resultante será de distinta calidad y resolución temporal, desde la información cualitativa que sobre los grandes periodos fríos y cálidos del Cuaternario pueden suministrar los restos glaciares o las etapas de desarrollo de terrazas fluviales a los datos cuantitativos sobre precipitación y temperatura que con una resolución estacional pueden aportar los estudios dendrocronológicos sobre el clima del último milenio. Dirección e intensidad de los vientos, presión atmosférica y composición del aire o eventos extremos de precipitación, son otras variables sobre las que se puede obtener información a través del estudio de los depósitos eólicos, restos de polen, cores de hielo, etc (tabla 9).

Los métodos de investigación que conducen a la interpretación de todos estos proxy-data en términos paleoclimáticos son complejos, siendo necesario en muchas ocasiones contar con grupos de trabajo de carácter multidisciplinar. Sin embargo, detrás de todos estos métodos opera siempre el conocido como principio del actualismo, según el cual las condiciones ambientales y dentro de ellas las

climáticas necesarias para que funcionen determinados procesos en el pasado serían las mismas que en la actualidad. Por tanto, conocida la relación proceso-clima en el presente, podremos deducir en qué condiciones se desarrollaron en el pasado los procesos estudiados siempre que estos tengan una analogía con otros funcionales en la actualidad.

ORIGEN		TIPO DE FUENTE
GEOLÓGICAS	MARINAS	Depósitos marinos
		Formas asociadas a cambios en el nivel del mar
	CONTINENTALES	Formas y depósitos periglaciares
		Formas y depósitos glaciares
		Terrazas fluviales
		Dinámica de laderas y fondos de valle
		Depósitos eólicos
		Morfologías lacustres
		Paleosuelos
		Travertinos
		Espeleotemas
		Cores de hielo
		BIOLÓGICAS
CONTINENTALES	Polen y esporas	
	Macrofósiles de plantas	
	Restos de insectos	
	Restos de moluscos	
Anillos de crecimiento anual de los árboles		
HISTÓRICAS	DOCUMENTALES	Observaciones meteorológicas históricas, registros históricos de fenómenos naturales dependientes de otros meteorológicos, registros fenológicos y biológicos
	INSTRUMENTALES	Observaciones instrumentales históricas

Pero el interés de esta disciplina no radicaría sólo en la lógica curiosidad científica por conocer e interpretar el clima del pasado, su resultado seguramente más inmediato, o en la búsqueda de una explicación a múltiples procesos bióticos o abióticos funcionales o no en la actualidad, aspectos ambos ya de por sí interesantes y que justificarían su existencia. El conocimiento de la evolución del clima a escala secular o milenaria nos ayuda a situar mejor la realidad climática actual, recordemos que en una atmósfera fuertemente intervenida por la actividad antrópica, contextualizando su evolución en un marco temporal más amplio que el que permiten los datos meteorológicos instrumentales. Y por otro lado, los modelos matemáticos desarrollados para prever la futura evolución del clima en diferentes escenarios (referidos estos al rango de valores que pueden adoptar las variables que conforman e interactúan dentro del sistema climático terrestre) precisan de información paleoclimática para poder ser validados. La razón es sencilla: si los modelos son capaces de reproducir con exactitud el clima del pasado, conocido a partir del estudio sobre proxy-data, podremos sin lugar a dudas confiar en mayor medida en las previsiones que efectúen para las próximas décadas. De ahí el interés de los estudios paleoclimáticos y los notables avances que esta disciplina ha experimentado en las últimas décadas, tanto en el ámbito metodológico como en el de resultados.

Tabla 9. Fuentes de información paleoclimática. Los cambios climáticos dejan señales en los procesos bióticos y abióticos que se desarrollan en la superficie terrestre que podemos interpretar en términos paleoclimáticos con objeto de obtener información sobre la evolución del clima. Derivada de esta idea, la posibilidad de encontrar fuentes de información paleoclimática es potencialmente abundante.

5.2.

Evolución del clima en Aragón

Aragón no ha permanecido ajeno a este interés por conocer las condiciones climáticas de su territorio en el pasado. Los estudios se han centrado, fundamentalmente, en el Cuaternario y sobre todo en su tramo final, al ser el que más evidencias acumula sobre fluctuaciones del clima.

Desde la década de los años 20 del siglo pasado hay trabajos dispersos con referencia a diferentes aspectos del Cuaternario, pero a nivel de disciplina plenamente científica será a partir de la década de los años 70 cuando desde el Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza, el Instituto Pirenaico de Ecología del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, y años más tarde desde el Departamento de Ciencias de la Tierra de esa misma Universidad, comienzan a proliferar trabajos y tesis doctorales (relacionados en la síntesis bibliográfica que acompaña a esta obra) sobre distintos aspectos relacionados con la evolución paleoambiental y paleoclimática cuaternaria en Aragón.

Actualmente hay dos Grupos de Investigación reconocidos por el Gobierno de Aragón: Geomorfología y Cambio Global y Paleoambientes del Cuaternario, que dedican su labor investigadora a temas paleoambientales, tanto en Aragón como en otros lugares del mundo, por lo que la investigación de los paleoclimas en Aragón como parte de la evolución de los ambientes y paisajes del Mediterráneo Occidental cuenta con un alto nivel investigador. Por otra parte, el Grupo de Investigación Clima, agua y cambio global, dedicado de forma más específica al estudio del clima actual, se adentra también en la reconstrucción de las condiciones climáticas de los últimos siglos a partir de información documental y dendrocronológica, de manera que sus resultados sirven de nexo de unión entre la paleoclimatología de etapas más antiguas, basada en multitécnicas de análisis de amplio espectro y baja resolución temporal, con métodos de mayor resolución y precisión para el último milenio que enlazarían con el periodo instrumental, basado en datos plenamente reales.

En las páginas siguientes trataremos de sintetizar algunos de los resultados más interesantes obtenidos por estos Grupos de Investigación en relación a la paleoclimatología de Aragón, con objeto de ofrecer un resumen sobre los acontecimientos climáticos más importantes y una imagen sobre su evolución en el pasado, haciendo especial hincapié en el Holoceno y sobre todo en su tramo final.

La dinámica glacial e interglacial a lo largo del Pleistoceno

La diversidad altitudinal y morfoestructural del relieve aragonés y su ubicación en el Mediterráneo Occidental, aunque muy cerca de las influencias atlánticas, han propiciado una evolución geomorfológica a lo largo del último millón de años rica en formas erosivas y acumulativas, resultado de una sucesión de condiciones paleoambientales y paleogeográficas que pueden relacionarse con los grandes cambios climáticos acaecidos a lo largo del Pleistoceno, periodo geológico que ocupa la mayor parte del Cuaternario y que precede al Holoceno actual. Estos cambios se manifiestan en una sucesión de fases glaciares (frías) e interglaciares (cálidas) que confieren personalidad propia a este periodo dentro de la historia geológica y climática terrestre.

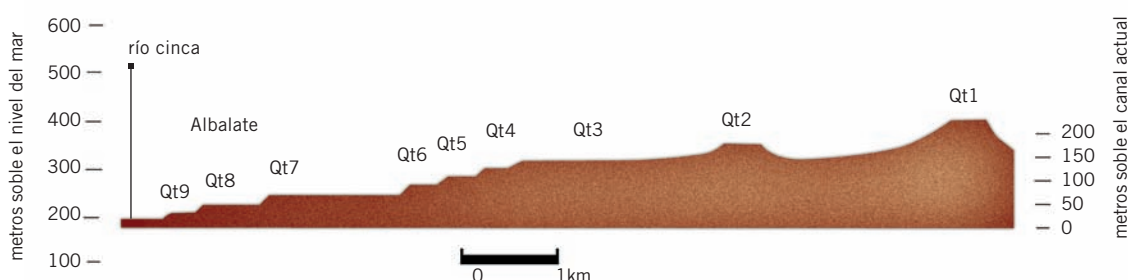


Fig. 41. La formación de terrazas fluviales está relacionada con la sucesión de fases glaciares e interglaciares ocurrida en el Cuaternario. Las fases de agradación (formación de terrazas) corresponden, en general, con episodios fríos. En la figura aparece el perfil transversal de las terrazas fluviales de la orilla izquierda del valle del Cinca en la zona de Albalate. La Qt1 representa la terraza más antigua, localizada en la actualidad en torno a 200 m por encima del cauce actual.

Elaboración: J.L. Peña-Monné

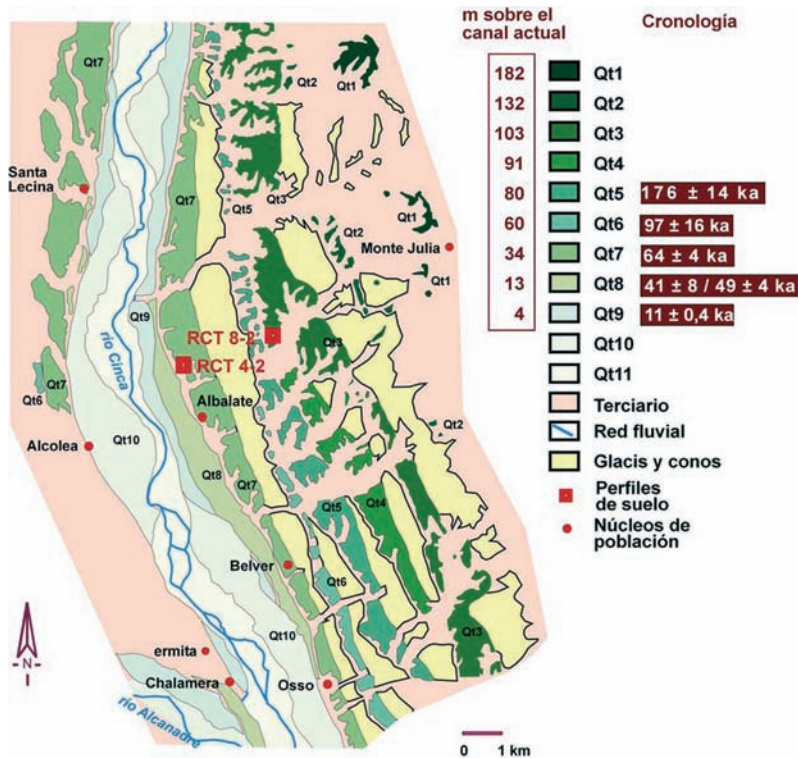
La influencia de estos cambios sobre los sistemas naturales y en especial sobre la dinámica geomorfológica de los ríos y las zonas de montaña, constituyen un factor determinante en la configuración de los paisajes actuales. Su estudio y análisis desde una perspectiva paleoclimática se nos ofrece como un potente indicador de la evolución del clima sobre el solar aragonés en el pasado, en una escala temporal que alcanzaría centenares de miles de años.

En el caso de la dinámica fluvial, los grandes cambios en el clima se han manifestado en el desarrollo de complejos sistemas de terrazas, conos aluviales y glacis, cuya máxima extensión y etapas conservadas se alcanza en la depresión del Ebro y en las cuencas interiores Ibéricas y Pirenaicas. Las terrazas fluviales no son sino restos de antiguas llanuras aluviales de inundación, seccionadas por la propia dinámica fluvial posterior a las fases de acumulación sedimentaria, que en la actualidad observamos colgadas en distintos niveles respecto al lecho actual.

La identificación de estos niveles así como su datación y correlación, constituyen una importante fuente para el estudio del clima del pasado en función de las relaciones que existen entre su formación y los grandes cambios climáticos pleistocenos y más en concreto con la sucesión de periodos glaciares e interglaciares.

La explicación es relativamente sencilla. Las grandes variaciones climáticas del Cuaternario afectaron a las relaciones entre la carga sedimentaria transportada por el sistema fluvial y la descarga de agua. Así, un incremento en la carga sedimentaria que arrastra el río conlleva, generalmente, su depósito en determinadas zonas del curso fluvial y, con ello, la formación de niveles de terraza. Un aumento de la descarga de agua favorece, por el contrario, el encajamiento del cauce sobre esos sedimentos, que fruto de la incisión quedarán colgados respecto del nuevo lecho en una posición topográficamente más elevada.

Aunque existe cierta controversia, es mayoritaria la opinión entre los geomorfólogos y paleoclimatólogos de que las etapas de agradación, es decir, de depósito



sedimentario y formación de terrazas, corresponden con periodos de descarga importante de agua y sedimentos en condiciones de clima frío y carácter glacial. Durante los interglaciares más cálidos se produce, por el contrario, un encajamiento del cauce fluvial sobre esos sedimentos.

En Aragón los sistemas de terrazas estudiados en los ríos Cinca y Gállego han ofrecido información interesante desde el punto de vista cronológico y paleoclimático. La secuencia más completa y mejor conservada la encontramos en el río Cinca en el que la terraza más antigua que ha podido datarse (figuras 41 y 42) corresponde con la Qt3, situada unos 130 m por encima del cauce actual. Mediante el análisis de nucleidos cosmogénicos, método de datación que ofrece resultados óptimos para las escalas temporales referidas al Cuaternario, ha podido datarse esta terraza en 590-580 ka BP (miles de años antes del presente, referido este al año 1950), informando así de condiciones frías para este periodo que situaríamos a mediados del Pleistoceno.

Las dataciones realizadas mediante luminiscencia ópticamente estimulada (OSL) de los demás niveles de terraza, arrojan edades de 176±14 ka BP para la Qt5, cronología que podemos hacer corresponder con el tramo final de la glaciación Mindel; 97±16 ka BP para la Qt6, cronología que relacionamos con fases frías del Riss; 64±4 ka BP para la Qt7 y 49±4 ka BP para la Qt8, que coinciden en ambos casos con distintas fases frías del Würm (Würm Primitivo) y 11±0,4 ka para la Qt9, que corresponde con momentos fríos en el Würm tardío.

En el tramo final del río Gállego, en el entorno de Villanueva de Gállego y Villamayor, así como en su cuenca media entre Concilio y Gurrea y en la cuenca alta en las cercanías de Sabiñánigo, se han datado acumulaciones de terraza, correspondientes por tanto con episodios fríos, en una cronología que oscila entre los 180 ka BP y los 130 ka BP, que cronológicamente coincidiría con la terraza Qt5 del Cinca que relacionamos con la glaciación Mindel pero en este caso también con las primeras fases del Riss. En la cuenca alta y media de este río se han datado

Fig. 42. La interpretación en términos paleoclimáticos de las etapas de formación de terrazas fluviales ha de ir acompañada de una datación precisa de las encontradas a distinta cota altitudinal. Esa datación nos aportará información cronológica sobre la ocurrencia de fases frías. En la figura aparecen cartografiadas las terrazas del río Cinca en el sector de Albalate. Se señala la datación obtenida en ka (miles de años) para las terrazas Qt5 a Qt9. Elaboración: J.L. Peña-Monné



Fotos 28 y 29. ▲ La precisión en las dataciones es fundamental para la interpretación paleoclimática de las terrazas fluviales así como de cualquier otra fuente de información proxy sobre el clima del pasado. En las fotografías aparece el proceso de toma de muestras para dataciones OSL en una terraza del río Cinca en Chalamera, Huesca. Foto: JLPM

también distintos niveles de terraza en 70 ka BP y 45 ka BP correspondiendo cronológicamente con el Würm primitivo.

De esta forma, podemos ver cómo la información paleoclimática aportada por los sistemas de terrazas de estos dos grandes ríos pirenaicos nos indican momentos de agradación y por tanto de condiciones frías en Aragón que coincidirían con grandes eventos fríos cuaternarios identificados a escala global. Las fechas que arrojan estas dataciones de niveles de terraza en el Cinca y el Gállego coinciden con las de tres periodos glaciares: Mindel, Riss y Würm según la terminología utilizada generalmente en Europa, eventos fríos que según estas evidencias también tuvieron especial significación en el solar aragonés.

La información sobre estos eventos fríos, en especial para sus fases más recientes y que son previas al postglacial actual, podemos completarla en Aragón mediante el análisis de las formas y depósitos derivados de los procesos glaciares que llevaron aparejados.

Durante las fases frías cuaternarias el descenso de las temperaturas, seguramente más que un aumento significativo de la innivación, propició la acumulación de nieve en los Pirineos y su posterior transformación en hielo, que lentamente se deslizaba hacia los valles principales para dar lugar a grandes glaciares de lengua, hoy reducidos a su mínima expresión en las zonas más altas de cumbres y sólo en orientaciones favorables. Sin embargo, en los momentos de mayor extensión del glaciario pirenaico, estas masas de hielo llegaron a superar los 30 km de longitud, con un espesor que en ocasiones superaba los 60 m. La menor altura del Sistema Ibérico aragonés limitó la formación de glaciares a su macizo más elevado, el Moncayo, y quizá de forma anecdótica a la Sierra de Albarracín.

Los cambios climáticos cuaternarios alteraron el balance de innivación y fusión de estas masas glaciares, lo que se tradujo en expansiones y avances del hielo en los momentos fríos y retrocesos hacia altitudes superiores en los cálidos. Estas variaciones pueden estudiarse a partir de la identificación en el paisaje y datación cronológica de los depósitos abandonados por los glaciares, fundamentalmente morrenas frontales y laterales, que nos permiten reconstruir algunas de las etapas de evolución del clima en el Cuaternario.

Lamentablemente esta reconstrucción sólo puede ser parcial. Las formas producidas por la erosión glacial son fruto de una larga evolución y no permiten establecer con claridad una sucesión de etapas. Pero por otro lado, los depósitos morrenicos son demasiado frágiles y no soportan bien el paso del tiempo debido a los procesos de erosión fluvial y a la inestabilidad de las laderas. Además el avance de un glaciar en respuesta a un nuevo evento frío puede llegar a borrar



casi todos o incluso todos los restos dejados por avances anteriores de menor extensión, eliminando cualquier resto que permita la datación de fases glaciares anteriores a las del máximo.

Los restos mejor conservados de actividad glaciaria en el Pirineo están relacionados con la última de las fases frías cuaternarias, el Würm. El estudio e interpretación en términos paleoclimáticos de las terrazas fluviales de los ríos pirenaicos han mostrado evidencias de fases frías al menos también durante el Mindel y el Riss, que han sido constatadas en el alto Pirineo por la presencia de bloques de granito dispersos en el Valle de la Sía, a unos 8 km del valle del Gállego y fuera del contexto erosivo-sedimentario que podemos relacionar con las fases frías del Würm. Esos depósitos quedan colgados unos 60 mts respecto del cauce actual del río Aragón, conectando con las morrenas más externas del complejo de Castillo de Jaca. Materiales similares localizados en la cuenca del Gállego en el entorno de Sabiñánigo han sido datados en una cronología que se relaciona con la glaciación Riss.

Pero como decíamos, es el último periodo glaciario, el correspondiente al Würm, el que ha sido mejor caracterizado a partir de la interpretación de los depósitos glaciares. Su posición geomorfológica sugiere un máximo glaciario pirenaico durante el Würm que fecharíamos en el 65.000-60.000 BP, no existiendo vestigios de una actividad importante durante el Máximo Glaciario Global datado en el 20.000-18.000 BP. Esta falta de sincronía entre el máximo glaciario identificado a nivel global y el obtenido para Pirineos suele relacionarse con la posición más meridional de la Península Ibérica, que se traduciría en anomalías pluviométricas causadas por modificaciones en los patrones generales que rigen la circulación atmosférica en el Atlántico Norte, existiendo coincidencias crecientes entre la cronología pirenaica y los resultados obtenidos en otros macizos montañosos de los Pirineos.

Tras este máximo glaciario pirenaico en torno al 60.000 BP se sabe de la presencia de reavances posteriores, es decir, de momentos en los que las condiciones frías se hacen más severas, reactivando el avance glaciario hacia los valles. Destaca en este sentido el datado en torno al 25.000 BP, conocido como Fase de Glaciares de Valle, que supuso una reactivación importante de la actividad glaciaria, y reavances menores en el 16.000-15.000 BP, 14.000-13.000 BP y el último hacia el 11.000 BP (Dryas Reciente), último avance glaciario antes del postglaciario holoceno actual. Estos

Foto 30. ▲ Los depósitos morrénicos fruto de la actividad glaciaria constituyen una valiosa fuente de información sobre las grandes fases glaciares pleistocenas, permitiendo la datación de los momentos de máximo avance glaciario sobre los valles Pirenaicos. En la fotografía aparecen morrenas frontales en la cubeta de Castillo-Villanúa, en el valle del río Aragón. En esta cubeta encontramos varios arcos correspondientes a fases de avance y estabilización. Al fondo, morrena lateral derecha. El sentido del flujo glaciario era de izquierda a derecha de la foto. Foto JMGR



Foto 31. ▼ Los depósitos de origen glaciar suelen ser muy frágiles y sensibles a los procesos de erosión o a la inestabilidad de las laderas. En la fotografía aparece un depósito glaciolacustre situado cerca Linás de Broto, en el barranco de Sorrosal, afluente del río Ara. En esta acumulación de más de 60 m alternan sedimentos típicamente glaciolacustres con otros fluviales, reflejando diferentes condiciones paleoambientales. El encajamiento posterior del barranco de Sorrosal ha destruido buena parte de ese depósito, pero permite ver parcialmente sus características.

Foto JMGR

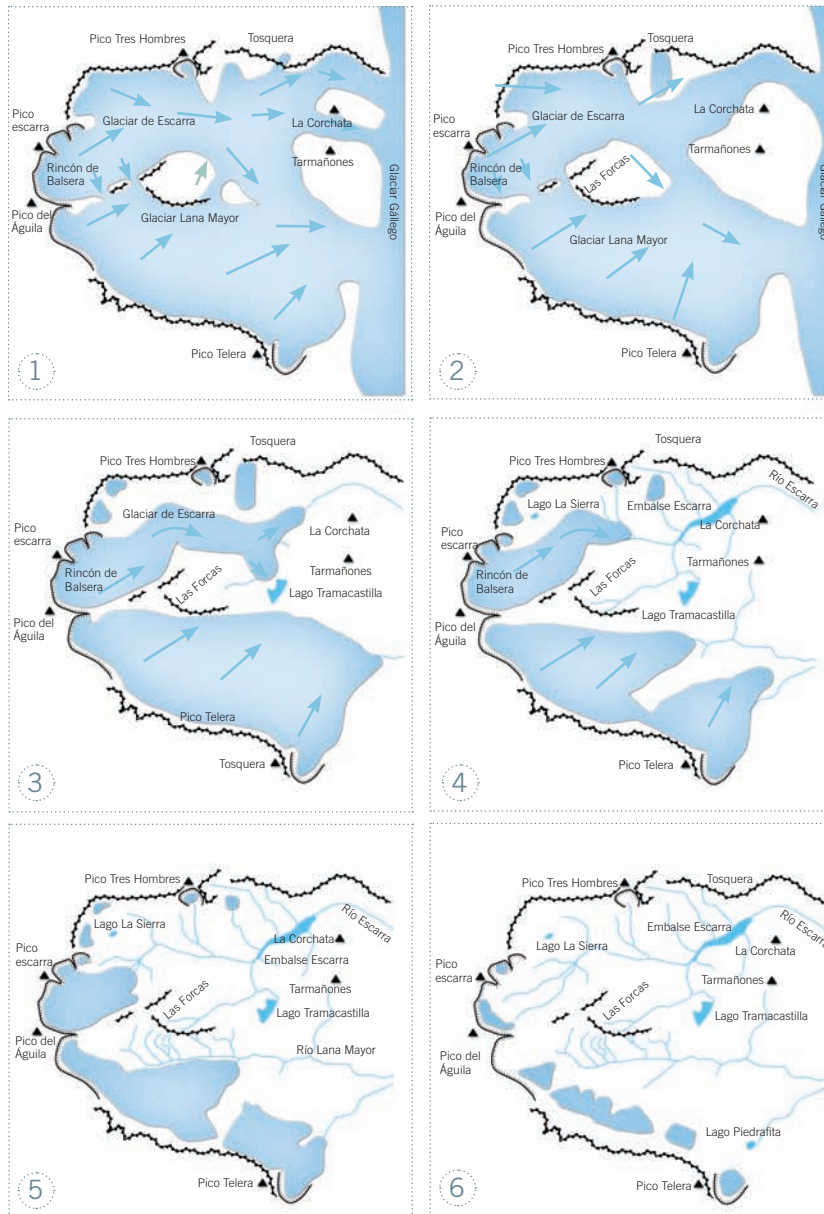
restos de actividad glaciar en el área pirenaica, nos hablan pues de la presencia de condiciones frías en Aragón en distintos momentos del Cuaternario que coinciden con eventos fríos a nivel global, apareciendo especialmente bien representadas las fases glaciares del Mindel, Riss y Würm (según la terminología alpina). Estos datos coincidirían y completarían la información que sobre los periodos glaciares en el solar aragonés arroja el estudio de las terrazas fluviales. Aspecto interesante sobre esta última glaciación, la más reciente y mejor estudiada por la mayor variedad de restos encontrados, es la asincronía existente entre el momento de máxima expansión del glaciario pirenaico durante esta fase, en torno al 60.000 BP, y el Máximo Glaciar a nivel global, fechado en el 20.000-18.000 BP.

Sin embargo, con la información paleoclimática disponible en nuestra región difícilmente podemos aproximarnos al conocimiento de la dinámica interna de estas fases frías, bien secuenciada no obstante a nivel global a través de otros proxy-data, como las muestras de hielo extraídas en el Ártico a gran profundidad o el análisis de sedimentos marinos. Terrazas y glaciares tampoco nos dicen demasiado sobre la cronología de los eventos cálidos, información que sí podemos obtener para Aragón a partir del análisis de los registros morfosedimentarios de origen kárstico, tanto de los sistemas kársticos carbonatados en condiciones externas (tobas calizas) como internas (espeleotemas de cuevas).

Los periodos de acumulación de tobas y espeleotemas suelen conectarse con cambios climáticos de baja frecuencia relacionados con fases cálidas cuaternarias, en particular del Pleistoceno superior y del Holoceno, asociadas a periodos que a escala global y según conocemos de estudios realizados en otros ámbitos geográficos, se definen por temperaturas elevadas en el contexto del Cuaternario, es decir, por interglaciares.

El interés de los registros kársticos como indicadores paleoclimáticos para el Cuaternario se asocia con la posibilidad de registrar periodos de tiempo de cierta continuidad, establecer buenas secuencias cronológicas mediante la utilización de distintas formas de datación (series de desequilibrio de isótopos de uranio y radiocarbono) y contener excelente información paleoambiental que puede interpretarse en términos paleoclimáticos a partir de las relaciones isotópicas del oxígeno (O18/O16) para el estudio de las temperaturas y del carbono (C13/C12) para el análisis de la cubierta vegetal y la influencia de la actividad biológica en el precipitado de carbonatos.

Para el desarrollo de los sistemas kársticos tanto exteriores como interiores, es necesario que en el sistema se produzcan entradas importantes de agua con gran cantidad de CO₂ disuelto que son capaces de disolver masas significativas



de caliza y como consecuencia alcanzar la saturación en calcita, permitiendo su posterior precipitación química. Esto se traduce en la necesidad de un clima caracterizado por altas temperaturas y lluvias abundantes, que permita el desarrollo de suelos y cubierta vegetal y por tanto altas tasas de infiltración de agua química agresiva por el CO_2 procedente de la actividad microbiológica del suelo.

El agua sobresaturada en calcita que se incorpora a los sistemas kársticos externos e internos es sometida a procesos de desgasificación relacionados con distintos mecanismos. En el caso de las tobas calizas, la extracción del CO_2 por agitación del agua y por fotosíntesis, junto con la fijación orgánica del precipitado, favorecen el desarrollo de acumulaciones tobáceas en forma de edificios fluviales, lacustres y surgencias. La formación de espeleotemas estaría relacionada con la diferencia de presión del CO_2 en el agua que llega a la cueva y la atmósfera interna, de manera que el goteo e impacto de gotas desarrolla estalactitas y estalagmitas, la circulación del agua en paredes y fondos genera cortinas, coladas y gours, mientras que el resque de agua en techos y paredes conforma distintos tipos de excéntricas.

Fig. 43. Extensión de los glaciares en los valles de Escarra y Lana Mayor (alto valle del Gállego) durante el máximo würmense y las fases posteriores de retirada. 1) Máximo pleniglacial; 2) Máximo pleniglacial interno; 3) Fase de glaciares de valle; 4) Fase de glaciares de valle en altitud; 5) Fase de glaciares de circo; 6) Fase final (glaciares de pared y glaciares rocosos). Elaboración: José María García Ruiz



Foto 32. ▲ Los registros kársticos constituyen una notable fuente de información proxy en relación con los episodios cálidos pleistocenos que alternan con las fases glaciares. En la fotografía aparece la cascada tobácea del río de la Fuente del Berro, en Calamarde, Teruel. Foto JLPM

Foto 33. ▼ Los sistemas endokársticos constituyen excelentes indicadores de palotemperaturas. El análisis de la relación isotópica del oxígeno contenido en la calcita informa sobre la temperatura en el interior de la cuenca en el momento de su precipitación química, dato que suele tomarse como referencia de la temperatura media exterior. En la fotografía aparece formaciones espeleotémicas de la Cueva de Molinos (Teruel), de innegable valor paleoambiental pero sin duda también estético.



En territorio aragonés, las condiciones morfoestructurales del Sistema Ibérico han favorecido la formación de sistemas kársticos importantes, habiéndose obtenido información paleoclimática relevante en los sistemas tobáceos fluviales asociados con los ríos Guadalaviar, Mijares y Martín, así como de los registros espeleotémicos de la Cueva de las Graderas en Molinos.

A partir de ellos ha sido posible deducir la existencia en Aragón de periodos cálidos en torno al 340.000 BP, fase cálida anterior al Gunz (primera glaciación definida según la clásica secuencia alpina de cuatro episodios glaciares mayores); 220.000 BP, que se correspondería con el interglacial Gunz-Mindel (periodo cálido que separa esas dos fases glaciares); otra fase cálida en torno al 95.000 BP, que es la más importante y que se configura como el momento de mayor actividad tobácea durante el Pleistoceno y como la fase más cálida durante el último ciclo climático, coincidiendo con el interglacial Riss-Würm; y por último 40.000 BP, correspondiente con el Laufen, fase cálida interna a la glaciación Würm.

La presencia de estas fases cálidas entre periodos glaciares completaría la secuencia climática obtenida para el Pleistoceno en nuestra región y que, como cabía esperar, ofrece un alto grado de correlación con la evolución observada a nivel global. Se han detectado evidencias de fases frías coincidentes con las glaciaciones Mindel, Riss y de distintas fases frías dentro del Würm.

Entre ellas, se ha constatado la existencia de periodos cálidos anteriores al Mindel, entre el Riss y el Wurm y momentos de recuperación térmica dentro de esta última glaciación. Destacaría, en todo caso, la ya señalada falta de sincronía entre el momento de máximo avance glaciar en Aragón situado en torno al 65.000-60.000 BP y el asumido como Máximo Glaciar a nivel general del 25.000 BP.

Evolución del clima a lo largo del Holoceno

El actual postglacial al que denominamos Holoceno, cubre los últimos 11.000 años de historia de la Tierra. Este periodo hemos de enmarcarlo en un contexto climático anterior caracterizado por una sucesión de fases glaciares frías e inter-



glaciares cálidas a la que ya hemos aludido anteriormente, sobre las que existen evidencias identificadas, datadas y analizadas según su significación paleoambiental y paleoclimática en distintos puntos y ambientes del territorio aragonés.

El Holoceno sucede a la última fase glaciaria cuaternaria, el Würm según la terminología alpina. Ha sido considerado tradicionalmente como un intervalo temporal en el que las posibilidades de obtención de proxy-data con los que construir una historia del clima eran escasas, debido a su consideración de periodo de características muy similares a las actuales, asumiéndose que el clima se había mantenido más o menos estable, sin grandes fluctuaciones, a lo largo de estos 11 milenios.

Sin embargo, estos supuestos son pronto superados y ya desde finales de la década de los setenta del siglo pasado diversos grupos de geomorfológicos, climatólogos, arqueólogos e historiadores, comienzan a interesarse por la evolución del clima en el Holoceno, periodo fundamental en la génesis de muchos de los paisajes que en la actualidad vivimos y percibimos, cuyo origen y evolución no podemos explicar si no es por la conjunción de factores ambientales, relacionados fundamentalmente con el clima, junto a otros de carácter antrópico.

En el estudio de la evolución paleoambiental y paleogeográfica del Holoceno convergen pues distintos intereses que van a dinamizar la investigación sobre la evolución del clima en ese periodo. Además, los avances realizados en los métodos de datación de carácter radiométrico, fundamentalmente el carbono 14 y OSL, han permitido situar cronológicamente cada vez con mayor precisión y seguridad las evidencias holocenas de cambios ambientales.

El estudio geomorfológico del Holoceno en Aragón y la interpretación de su evolución morfogenética en términos paleoclimáticos se deriva, fundamentalmente, de dos tipos de fuentes de información: la dinámica de laderas y los rellenos de fondos de valle de cursos fluviales secundarios.

En el caso de las laderas, la evolución holocena se caracteriza por una sucesión de fases de acumulación que llegan a regularizar y estabilizar su perfil longitudinal, alternando con etapas de incisión que destruyen total o parcialmente las morfologías regularizadas en la fase anterior mediante procesos erosivos muy activos.

El significado paleoclimático es muy evidente en el caso de las fases de regularización, ya que esta sólo es posible en condiciones más húmedas y frías que las

Foto 34. ▲ Depósito típico de una fase de regularización de laderas localizado en el cerro del castillo de Alfambra (Teruel). Esa regularización está relacionada con la ocurrencia de episodios fríos y húmedos dentro del Holoceno que posibilitan una dinámica geomorfológica favorable a la estabilización de las laderas. Los restos arqueológicos presentes en estos sedimentos son un elemento clave para su datación, señalando una cronología que iría desde la Edad del Bronce y Hierro hasta época Ibérica.. Foto JLPM



Foto 35. ▼ Los procesos de incisión y acumulación de fondos de valle holocenos en el sector central del Valle del Ebro están relacionados en los últimos dos milenios con cambios en las condiciones climáticas. Su análisis y datación constituyen una herramienta importante para entender y situar esas variaciones en los últimos milenios. En la imagen aparecen distintos niveles de terraza y el encajamiento posterior del barranco de la Val de las Lenas, en María de Huerva. Foto MASS

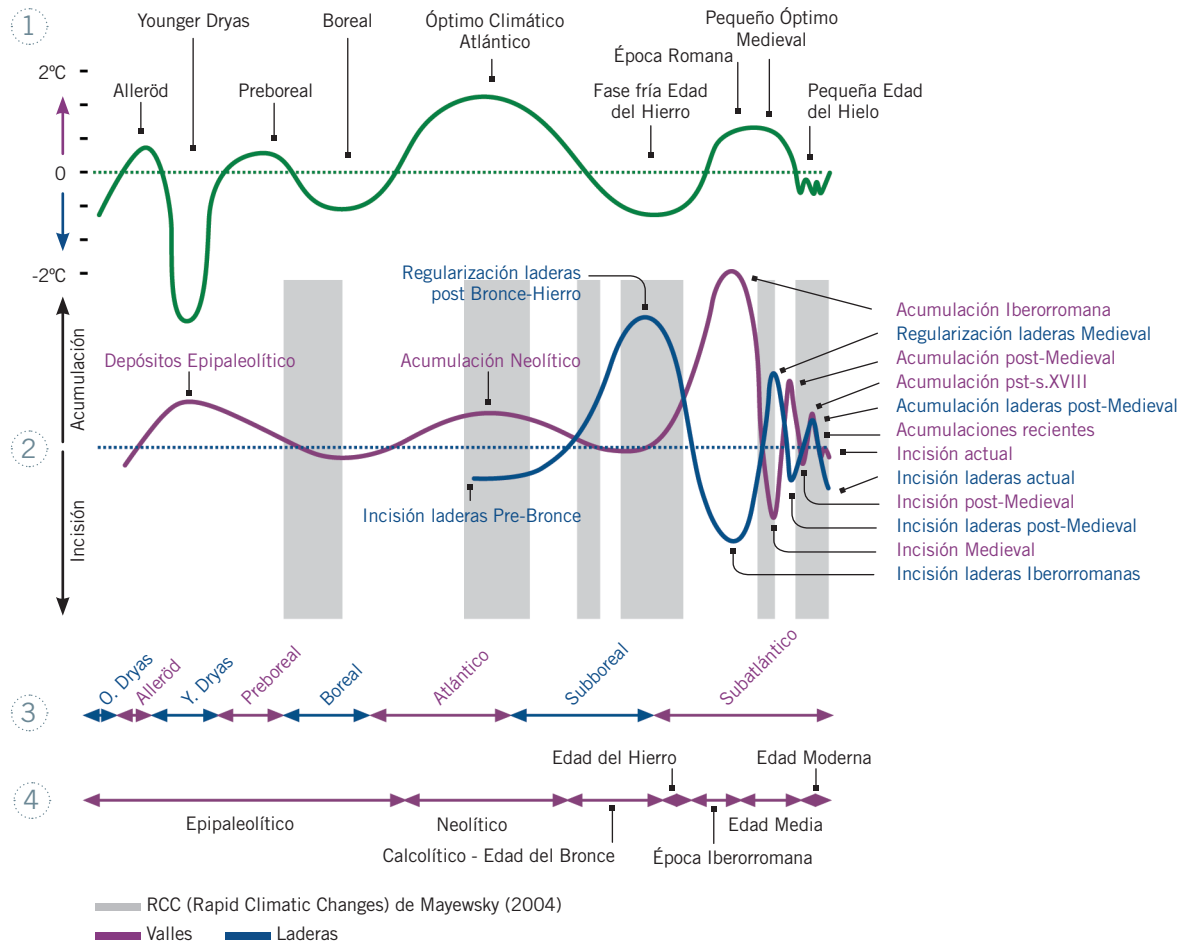
actuales, favorecedoras de una mayor cubierta vegetal y de la acción de procesos en las laderas que, como la soliflucción, permiten esa regularización de los perfiles. Las reactivaciones erosivas nos marcan momentos climáticos más cercanos a las condiciones actuales, con mayor concentración de caudales por lluvias de alta intensidad. Es difícil sin embargo separar en el caso de las fases de incisión la influencia del clima con el papel del hombre en el desencadenamiento de estos procesos en función de su acción deforestadora sobre las laderas, aunque son seguramente ambas causas actuando de forma conjunta las que han facilitado el funcionamiento de los procesos de erosión y destrucción de la ladera.

Por su parte, los rellenos de fondos de valle de los cursos fluviales secundarios, relacionados con el funcionamiento de pequeñas cuencas en las que existen cursos de auga longitudinales, responden desde el punto de vista evolutivo a los estímulos climáticos de toda la cuenca vertiente, aunque se encuentren sometidos, además, a la actuación de factores más locales. En estos valles se ha producido durante el Holoceno reciente una sucesión entre procesos de agradación e incisión, que han dado lugar a verdaderas terrazas fluviales de edad holocena. Éstas permiten establecer y datar distintas etapas de acumulación e incisión, cuya interpretación en términos paleoclimáticos es más difícil que en el caso de las laderas, aunque suele asumirse que al menos para los últimos 2.000 años las etapas de acumulación y por tanto de desarrollo de fondos planos en los barrancos, se corresponden con fases frías, mientras que las de incisión se relacionan con episodios más cálidos.

La interpretación conjunta de la información aportada por ambos procesos morfogenéticos, tanto los desarrollados sobre las laderas como los que han modelado algunos fondos de valle de cursos secundarios, han permitido reconstruir una serie de eventos climáticos acaecidos a lo largo del Holoceno en Aragón, a pesar de las lógicas limitaciones e incertidumbres que se derivan de unas cronologías parciales y la interferencia humana sobre esos procesos, más importante conforme progresamos hacia el momento actual. Incluso a partir de estos proxy-data han podido inferirse acontecimientos climáticos acaecidos a lo largo de los últimos 1.000 años y que aquí señalaremos, aunque sea este un periodo sobre el que nos referiremos de forma más detallada en un apartado posterior.

En la figura 44 se ha intentado resumir gráficamente cuáles son las principales etapas de incisión y acumulación desarrolladas en los dos ámbitos morfogenéticos a lo largo del Holoceno en Aragón, junto a las etapas climáticas definidas a nivel global para este periodo y una valoración cualitativa de sus condiciones de temperatura en relación a los valores actuales.

La información más antigua nos lleva hasta el 8.000-6.000 BP y la podemos obtener a partir del estudio de las primeras capas sedimentarias depositadas en el



fondo de valles durante el Holoceno inferior. Existen dos dataciones precisas de sedimentos en valles de fondo plano tributarios del Huerva en el entorno de Zaragoza: la Val de las Lenas y la Val de la Morera. Mediante C14, restos de carbón encontrados en ambas vales permiten datar los sedimentos en su parte basal en el 6.015 ± 75 BP en las Lenas y 5.910 ± 270 BP en la Morera, cronología que podemos considerar similar (figuras cortes).

Comenzaría pues en torno a esas fechas el relleno de la morfología irregular del fondo de los barrancos generada durante la dinámica geomorfológica de momentos anteriores. Dada la cronología obtenida a partir de las dataciones, podemos establecer una relación entre esa nueva dinámica acumulativa, en la que cabe señalar que no se aprecian evidencias de procesos de incisión, con el clima más seco y cálido del Óptimo Climático Atlántico, deduciéndose para esas fechas en torno al 6.000 BP condiciones climáticas más cálidas también en Aragón.

Esta fase acumulativa, es decir, de sedimentación de materiales en el fondo de estos pequeños valles tributarios de otros cauces de mayor entidad, se extendería de forma prácticamente ininterrumpida hasta época postromana (siglos IV-V d.C.), no aportando su evolución información paleoambiental o paleogeográfica que podamos interpretar en términos climáticos. Buena parte de este proceso continuado de acumulación y relleno de fondos de valle habría de relacionarse desde el 4.000 BP, más que con factores de tipo climático con la mayor presión antrópica sobre el territorio y fundamentalmente con el continuado proceso de deforestación que alcanzará su momento de mayor intensidad durante época romana, por lo que no podemos extraer de su dinámica conclusiones de carácter paleoclimático.

Fig 44. Gráfica que recoge las etapas de ladera y rellenos de valle en Aragón durante el Holoceno. 1. Etapas climáticas del Holoceno. 2. Curvas de variación erosión/sedimentación en fondos de valle y en laderas, con las etapas diferenciadas. 3. Fases climáticas del Holoceno. 4. Etapas culturales del Holoceno. En gris, las fases de RCC diferenciadas por Mayewsky (2004). Elaboración: José Luis Peña Monné.



Foto 36. ▼ Relleno de fondo de valle de época postromana cubriendo las casas ibéricas de los Castellazos de Mediana de Aragón (Zaragoza). Su construcción es anterior a los procesos que favorecieron el depósito de esos materiales sedimentarios en el fondo de valle. Foto JLPM

Sin embargo, la información aportada por el estudio de la dinámica de las laderas proporciona, esta vez sí, datos valiosos de carácter paleoambiental, que nos van a servir para desarrollar una secuencia de distintas fases climáticas a lo largo de los últimos cuatro milenios.

Así, entre el 3.800 y 2.600 BP se observa una etapa de regularización de laderas generalizada en todo Aragón, siendo ejemplos significativos los analizados en el valle del río Alfambra y en el bajo valle del Cinca. Climáticamente se corresponde con una fase fría y húmeda que se corresponde con el Subboreal (según la terminología aplicada para las fases climáticas del Holoceno) y que, como señalábamos, es la que permite esa regularización de las laderas. Desde un punto de vista histórico corresponde con la Edad del Bronce y rompe con las condiciones más cálidas que caracterizaron el Óptimo Climático Atlántico. Cabe destacar que se trata de un momento frío identificado a nivel global y que coincide con un brusco cambio en las condiciones del clima.

Finalizado ese episodio frío comienza el Subatlántico, periodo climático que se extiende hasta la actualidad a lo largo de más de dos milenios. Arrancaría, desde el punto de vista geomorfológico, con una fase generalizada de predominio de la incisión, es decir, de destrucción de las laderas regularizadas en la fase fría anterior y que se interpreta como proceso propio de condiciones más cálidas, secas y torrenciales. Esta fase cálida se extendería desde el siglo VI-V a.C., hasta el siglo XIV de nuestra era y en muchos momentos ofrecería caracteres climáticos muy similares a los actuales. Ha de reseñarse que la variabilidad interna que es propia de estos episodios, condicionaría la aparición de otros más fríos de carácter secular, sobre los que sin embargo no existen evidencias analizadas en Aragón. La identificación de estas condiciones climáticas mediante diferentes proxy-data para los siglos X y XI hicieron que este periodo se conociera como Óptimo Climático Medieval.

Estamos pues ante un nuevo periodo cálido, de menor duración que el Óptimo Climático Atlántico, pero suficiente como para alterar la dinámica geomorfológica de las laderas. Los fondos de valle, en los que recordemos la acumulación sedimentaria se mantiene hasta el siglo IV-V d.C., comienzan a responder con un acelerado proceso de incisión a esas condiciones más cálidas, que aunque interrumpido por dos fases posteriores en las que de nuevo dominará una dinámica acumulativa (de gran significación paleoclimática como veremos posteriormente), se extiende hasta la actualidad.

La primera de esas interrupciones se produce en el siglo XIV, coincidiendo con un periodo más frío y húmedo dentro de ese contexto general más cálido, que llega a condicionar la aparición en algunos fondos de valle de terrazas encajadas en el anterior nivel correspondiente a época postromana y que se manifiesta también

en una temporal interrupción de la dinámica destructiva que se observa sobre las laderas, dando paso a una breve fase de regularización.

La segunda etapa de agradación significativa en los fondos de valle se ha datado en el siglo XVI-XVII y coincide también con procesos de regularización de laderas consecuencia de procesos propios de ambientes más fríos y húmedos. Esta estabilización del proceso de incisión en fondos de valle y regularización ha sido puesta en relación con el enfriamiento relacionado con la Pequeña Edad del Hielo (PEH), un periodo frío dentro del Subatlántico sobre el que nos detendremos con mayor profundidad en el apartado siguiente, pero que habría de señalarse ahora que se extiende entre los siglos XV y XIX adquiriendo, su mayor intensidad en los siglos XVI-XVII.

En definitiva, una dinámica de evolución del clima a lo largo del Holoceno que no difiere en cuanto a la cronología de las grandes fases frías o cálidas con la observada en espacios cercanos, y que nos habla de condiciones más cálidas cuyo inicio no podríamos datar en Aragón pero que se prolongarían hasta la crisis fría que comienza en torno al 3.800 BP; un descenso de las temperaturas que se extendería desde entonces hasta el siglo V a.C. y que se corresponde con el Subboreal; comienzo posterior del Subatlántico con un primer episodio cálido que se ve interrumpido por una crisis fría en el siglo XIV y que se asocia al Óptimo Climático Medieval y finalmente una crisis fría importante dentro del Subatlántico que se conoce como la Pequeña Edad del Hielo y que tiene su máxima expresión en los siglos XVI y XVII, tras de la cual se da paso a una nueva etapa de incisión propia de condiciones más cálidas todavía funcional en la actualidad.

La evolución en Aragón de las temperaturas precipitaciones y sequías a lo largo de las últimas centurias

La información aportada por la dinámica de las laderas y de los fondos de valle ofrece información interesante sobre la evolución del clima en el último milenio, en particular sobre la existencia de una fase fría importante dentro del Subatlántico de especial intensidad en torno a los siglos XVI y XVII que se ha venido a denominar como la Pequeña Edad del Hielo (PEH) y que junto al actual proceso de calentamiento constituye uno de los acontecimientos climáticos más importantes de los últimos 2.000 años.

La PEH es sin embargo más compleja. Se trata de una larga pulsación fría que se extiende entre los siglos XVI y XIX, en la que el avance generalizado de los glaciares de montaña y la abundante información documental conservada en el continente europeo sobre crisis frías, nevadas extraordinarias o malas cosechas, hicieron pensar a los investigadores sobre el clima del pasado en un alcance global de este episodio. Sin embargo, los avances metodológicos realizados sobre las distintas fuentes de información paleoclimática y el mayor número de reconstrucciones realizadas, han demostrado que este episodio no tuvo un carácter global ni tampoco supuso un descenso continuado y uniforme de las temperaturas a lo largo de esos cuatro siglos.

La PEH se caracterizó, por el contrario, por una sucesión de crisis frías de una duración que oscila entre una y tres décadas en que las temperaturas medias anuales quedaban más de 0,5 °C por debajo de las actuales, con descensos que estacionalmente podían superar los 1,5 °C durante varios años. Estos notables descensos térmicos iban acompañados de anomalías pluviométricas: sequías de larga duración y episodios de precipitaciones intensas.



Foto 37. ▲ Secuencia de anillos de crecimiento anual de un ejemplar de *Pinus sylvestris* L. de la Cordillera Ibérica. Su anchura está relacionada con las condiciones ambientales de su año de formación, siendo uno de los parámetros más importantes el clima. Las secuencias de anillos anuales constituyen así auténticos registros sobre las condiciones climáticas en que se ha desarrollado el árbol. Foto JCN



Foto 38. ▲ En el caso de ejemplares vivos la muestra que contiene la secuencia de anillos de crecimiento se extrae mediante una barrena hueca de 5 mm de sección y 400 mm de largo. La herida producida en el árbol es sellada con una pasta antibacteriana para evitar el deterioro del ejemplar. En la imagen, extracción de una muestra en la Sierra de Gúdar. Foto MASS

Este periodo ha sido analizado en Aragón mediante la aplicación de técnicas basadas en la dendroclimatología y el análisis de documentación histórica.

La dendroclimatología se configura como una de las técnicas que mejores resultados ofrece en la reconstrucción de los climas de época preinstrumental, fundamentalmente en el contexto temporal del último milenio, sirviendo como nexo de unión entre la información climática extraída a partir de proxy-data y los datos meteorológicos de carácter instrumental.

Esta metodología analiza la relación que se establece entre el crecimiento radial de los árboles en latitudes templadas, manifestado por los anillos anuales, y las variables climáticas, en especial la temperatura y la precipitación. La interpretación de esa relación a partir de la definición de la respuesta actual de la planta al clima, constituye la base de las reconstrucciones. El crecimiento anual de los árboles funcionaría como variable dependiente de un conjunto de variables independientes de carácter climático, compuesto por la temperatura y la precipitación registradas en el año del crecimiento y en los últimos meses del año anterior. Con esas variables, se construye un modelo matemático que explica el crecimiento radial de una población forestal en un año concreto en función del clima de los meses anteriores, señalando el modelo qué variables son las que, matemáticamente, más influencia positiva o negativa han tenido en ese crecimiento.

El modelo puede hacerse reversible, de forma que el clima quede explicado en función de los crecimientos. Esto nos permitirá reconstruir hacia atrás en el tiempo, tantos años como tengan los árboles analizados, las variables climáticas que más influyan en el crecimiento de esa masa forestal. El resultado final del proceso es información plurisecular reconstruida de la temperatura en grados celsius y de la precipitación en milímetros, unos datos que son continuos en el tiempo, de una correcta datación absoluta y con una resolución generalmente estacional.

Como puede deducirse, la consecución de una reconstrucción plurisecular de temperatura y precipitación mediante técnicas dendroclimáticas requiere de la utilización de muestras del crecimiento radial de árboles vivos de varios cientos de años de edad.

En el caso de Aragón la tarea no es fácil. Nuestro territorio se encuentra desde antiguo intensamente humanizado. El hombre ha hecho uso del suelo talando bosques para conseguir materias primas así como terrenos agrícolas o ganaderos, lo que ha hecho que sean pocos los árboles que, al menos en zonas accesibles, alcancen una elevada longevidad.

Además, los árboles utilizados han de estar en unas condiciones ambientales determinadas para poder ser utilizados como predictores del clima. Así, debemos analizar muestras de ejemplares situados cerca de su límite altitudinal o latitudinal de distribución natural, sobre suelos pocos desarrollados y sin alteraciones físicas o antrópicas que puedan haber introducido variaciones en el crecimiento. Sólo ejemplares encontrados en estas condiciones contendrán señal climática suficiente en su registro de crecimientos anuales para abordar el proceso metodológico posterior de reconstrucción de variables climáticas.

Las especies utilizadas son mayoritariamente coníferas del género *Pinus* (*Pinus nigra*, *P. sylvestris*, *P. uncinata* y *P. pinaster*). También se utilizan en la reconstrucción dendroclimática muestras de haya (*Fagus sylvatica*), abeto (*Abies alba*) y en el sector central de la depresión de *Juniperus thurifera*, las centenarias sabinas que todavía podemos encontrar en algunos espacios de Monegros.

A pesar de las limitaciones señaladas, ha sido posible encontrar en áreas de Pirineos, Sistema Ibérico y en algunas zonas del sector central de la Depresión del Ebro, suficientes ejemplares de árboles centenarios para la reconstrucción del



clima de Aragón desde el siglo XVI. En concreto, pudo reconstruirse para el periodo 1500-1950 la temperatura y la precipitación de la época fría del año (desde octubre hasta marzo) y de la época cálida (desde abril a septiembre), así como los promedios térmicos y totales pluviométricos anuales de un observatorio aragonés situado en el sector central del Valle del Ebro, Pallaruelo de Monegros (Huesca), al pie de la ladera norte de la Sierra de Alcubiere. Unos datos reconstruidos que al conjugar información de carácter macroclimático podemos hacer extensible a todo el sector central de la Depresión del Ebro y no sólo al área más cercana al observatorio.

En la reconstrucción podemos observar cómo la evolución del clima en este periodo se ajusta al patrón definido antes señalado la PEH en otros ámbitos geográficos. No se percibe un enfriamiento continuado entre los siglos XVI y XIX, pero sí intensas crisis frías de unas décadas de duración, especialmente bien manifestadas en Aragón en el primer tercio del siglo XVI y en la segunda mitad del siglo XVII. También se detectan crisis frías de menor magnitud en las décadas de los sesenta y setenta del siglo XVI, tercio final del XVII y tras una recuperación de las temperaturas en el siglo XVIII, durante buena parte del XIX. Unas crisis frías que, como decíamos, manifiestan un descenso térmico sostenido durante unas décadas de entre 0,5 °C y 1 °C en el caso de los promedios anuales y superior en los semestrales. Descensos térmicos que por su duración e intensidad, se tiene la constancia de que llegaron a afectar a los sistemas naturales (se produce por ejemplo el avance de algunas masas glaciares) e incluso fueron percibidos como algo extraordinario por sus contemporáneos.

Las precipitaciones, por su parte, ofrecen anomalías importantes: periodos de menor pluviometría que podían extenderse durante años en los que, sin embargo, no resultaba inhabitual encontrar puntualmente años o semestres muy lluviosos. Y frente a ellos, periodos más húmedos en los que tampoco era extraña la presencia de alguna sequía puntual pero intensa, sin efectos graves en estos casos para los sistemas naturales pero sí para la agricultura de la época.

Fotos 39 y 40. ▲ Arriba, bosque denso de hayas (*Fagus sylvatica*) salpicado por ejemplares de abeto (*Abies alba*) en el Pirineo Occidental (foto MASS). Izquierda, bosque de pino negro (*Pinus uncinata*) en el Pirineo Central (foto JVM). Los árboles localizados en condiciones ecológicas limitantes, en zonas con notables limitaciones edáficas o cerca de su límite de distribución natural tienen una mayor sensibilidad a las condiciones climáticas y, por tanto, son más válidos para la reconstrucción paleoclimática. Los ejemplares que se encuentran en el hayedo apenas registran señal climática en sus series de crecimiento anual. No sucede lo mismo con el pino negro, que situado sobre un canchal es más sensible a condiciones climáticas difíciles en un año concreto.

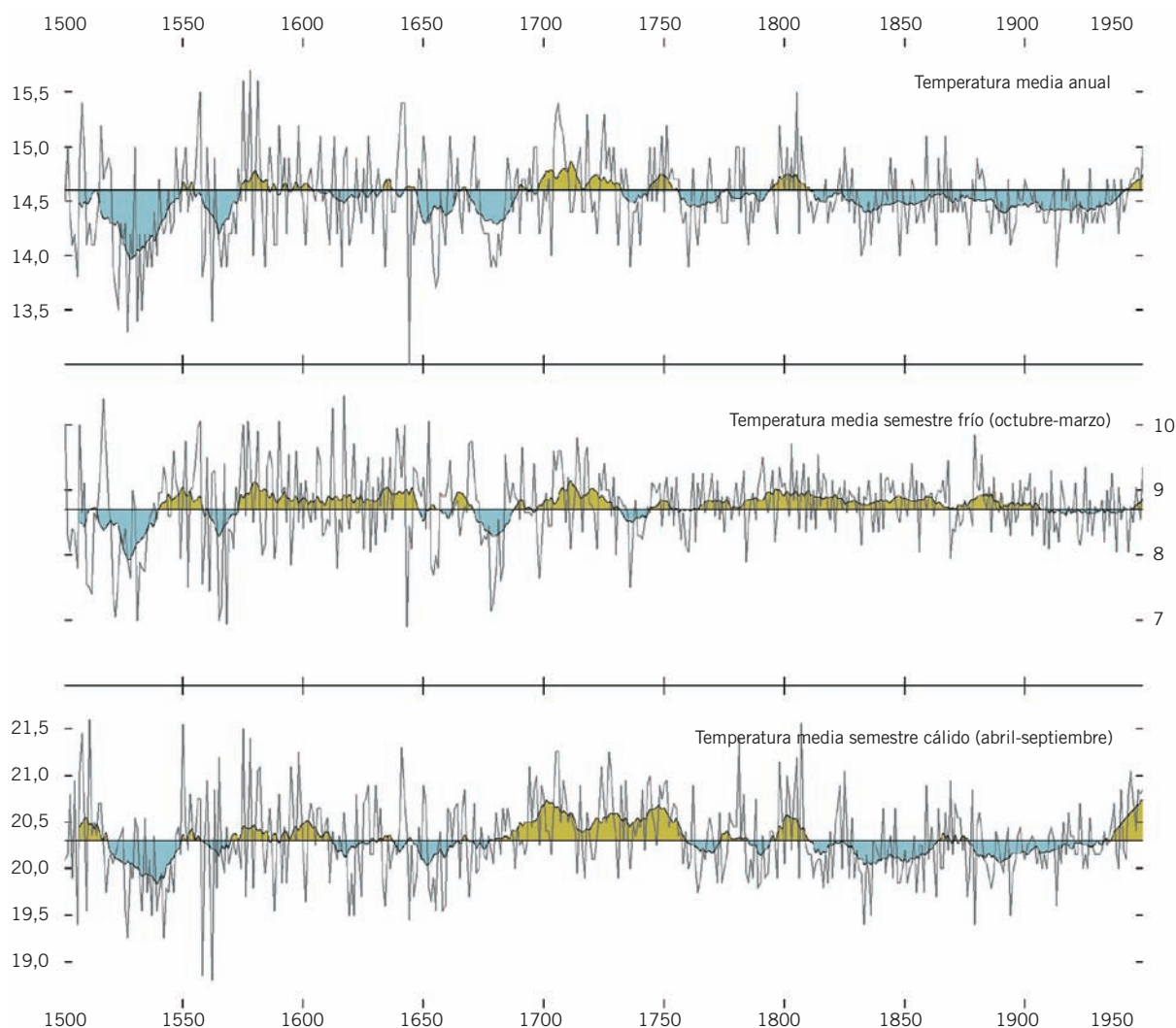
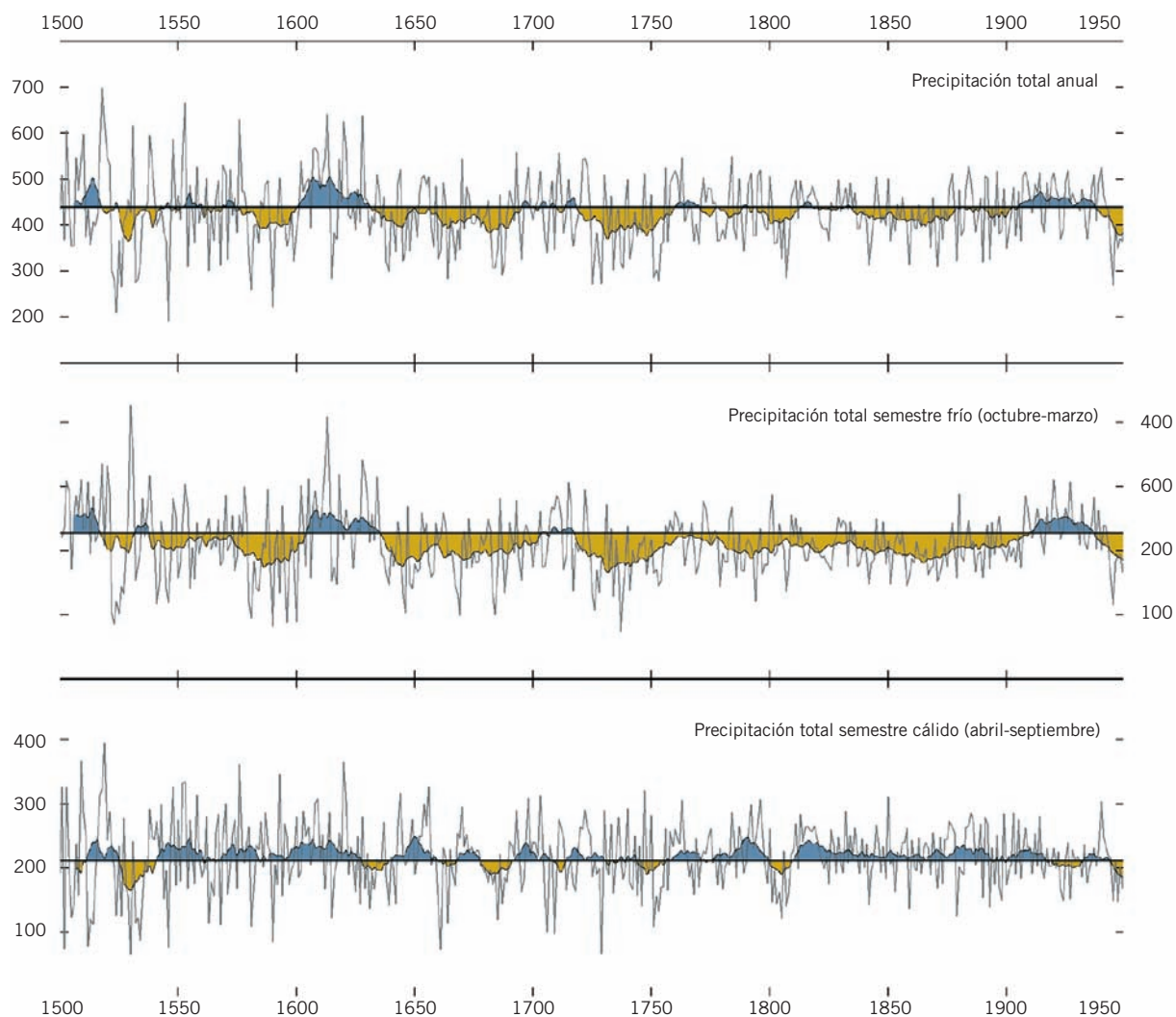


Fig. 45. ▲ Series reconstruidas de la temperatura media anual y de las temperaturas medias del semestre frío (octubre-marzo) y del semestre cálido (abril-septiembre). Los datos reconstruidos, en grados celsius, han sido suavizados mediante media móvil de 15 años. La línea recta representa la temperatura media del periodo de referencia 1850-1950.

La segunda mitad del siglo XVII y la primera del XVIII constituyen los periodos secos de mayor duración e intensidad, destacando también la segunda mitad del XVI y todo el siglo XIX.

Como puede verse en las figuras, el mayor descenso de las precipitaciones en Aragón durante la PEH frente al periodo posterior (1850-1950) se registra en la época fría del año, desde octubre a marzo, quedando los valores de época cálida siempre más cerca de la media.

Estas anomalías térmicas y pluviométricas no son acontecimientos identificados únicamente en la reconstrucción realizada en Aragón, sino que aparecen descritos en otros estudios realizados en distintas regiones europeas. Las crisis frías del siglo XVI, en las que se suele identificar el comienzo de la PEH (si bien hay autores que adelantan su comienzo al siglo XV e incluso al XIV), el deterioro térmico del tercio final del XVII, que podemos relacionar con el Mínimo Maunder, extensamente documentado en muchos puntos de Europa, o las crisis frías menos intensas del XIX, en las que parece localizarse el final de este episodio, son jalones térmicos que se han identificado en otros puntos de España y Europa, confirmándose la sincronía que, según muchos autores, existe a escala continental entre las crisis frías más importantes de la PEH.



Cabe destacar sin embargo que frente a lo descrito en buena parte de Europa, el momento de mayor enfriamiento no se produce en el siglo XVII, sino que es en Aragón el primer tercio del siglo XVI el que alberga el mayor descenso térmico, característica que también muestran otras zonas de la mitad norte de España.

La evolución de la variabilidad interanual de las temperaturas y las precipitaciones muestra también claramente el carácter anómalo del clima durante la Pequeña Edad del Hielo, en especial durante el siglo XVI, centuria en la que las variaciones del clima entre años consecutivos eran mayores. Durante los siglos XVII y XVIII, la variabilidad desciende progresivamente. Sin embargo, dentro de esa tendencia descendente de los niveles de variabilidad se observan repuntes significativos, coincidentes con crisis frías a nivel continental. La variabilidad ofrece los niveles más bajos en el periodo temporal analizado durante el siglo XIX, repuntando nuevamente en las décadas centrales del siglo XX, momento en el que a la variabilidad natural del clima se añade la que han podido inducir las actividades antrópicas.

Esta evolución de la variabilidad interanual del clima y la presencia de anomalías térmicas y pluviométricas en el siglo XIX de menor magnitud que en centurias anteriores nos obligaría a rechazar la idea de un final abrupto de la PEH frente a un más que posible paulatino final de este episodio a lo largo de todo el siglo XIX.

Fig. 46. ▲ Series reconstruidas de la precipitación total anual y de la precipitación total del semestre frío (octubre-marzo) y del semestre cálido (abril-septiembre). Los datos reconstruidos, en mm, han sido suavizados mediante media móvil de 15 años. La línea recta representa la media de la precipitación del periodo de referencia 1850-1950

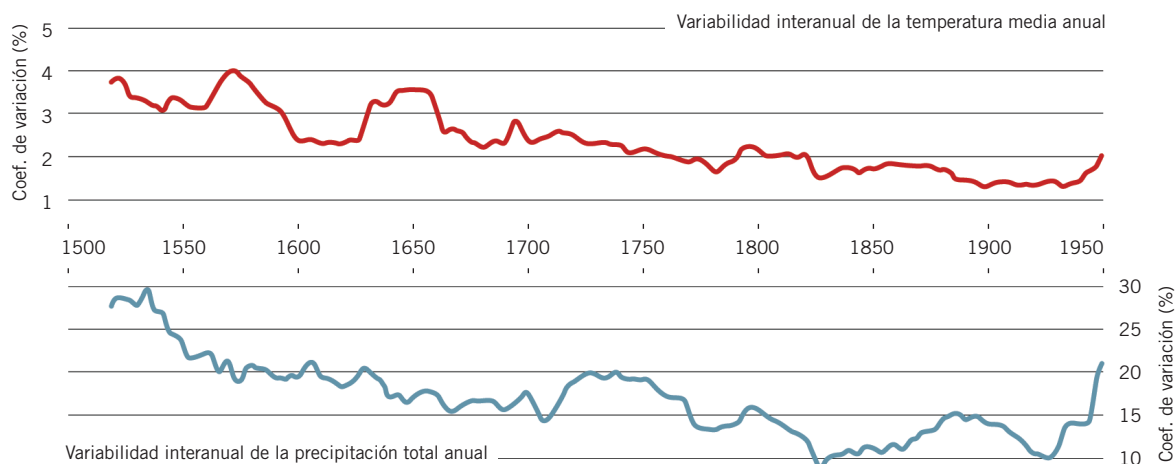


Fig. 47. Evolución de la variabilidad interanual de la temperatura media y de la precipitación total en Pallaruelo de Monegros mediante la representación del coeficiente de variación calculado para ventanas móviles de 31 años. La variabilidad del clima es alta durante las fases más intensas de la Pequeña Edad del Hielo, descendiendo, no libre de repuntes, hasta mediados del siglo XIX, momento en el que podemos dar por terminado este episodio climático.

Pero como ya señalábamos, la abundante documentación conservada en los archivos históricos aporta también información interesante sobre la evolución del clima en las últimas centurias que puede completar la visión que sobre el clima de ese periodo aportan las reconstrucciones dendroclimáticas.

Una de las fuentes documentales más utilizadas lo constituye el registro de rogativas pidiendo el fin de una sequía (rogativas pro pluviam) o para que finalizasen una lluvias catastróficas (pro serenitatem). El registro documental minucioso de las ceremonias, con sus características, datación, duración e información complementaria sobre el estado de los cultivos y la ganadería ha conformado la mayor acumulación de información climática disponible en el patrimonio documental español.

Su credibilidad, como manifestación de un trastorno meteorológico, está garantizada por la participación en el proceso de diferentes instituciones (gremiales, municipales y eclesiásticas) que analizaban la situación y deliberaban antes de tomar cualquier tipo de decisión. Esta cuestión permite establecer tipologías de ceremonias según la intensidad del fenómeno, gracias a la existencia de un ritual muy bien definido y tipificado. Las rogativas ofrecen, además, la posibilidad de comparar espacialmente los resultados, debido a que el sistema jerárquico de la Iglesia seguía en numerosos aspectos las directrices de la autoridad papal y las aplicaba en diferentes territorios con total homogeneidad.

La abundante documentación de los archivos históricos y, sobre todo, el detalle de sus registros sobre sucesos meteorológicos, o derivados de éstos, ha permitido la recopilación sistemática y continua de los períodos de sequía desde el siglo XVI hasta comienzos del XX, y conocer una dinámica climática plurisecular de Aragón que complementa la información obtenida a partir de otras fuentes de información proxy como la dendroclimatología.

Por otra parte, al ser la sequía un fenómeno de implantación temporal prolongado, las rogativas presentaban una clara intensificación a medida que transcurrían los meses con escasas o nulas precipitaciones. Esto se reflejaba en la elaboración de diferentes tipos de ceremonias religiosas, acordes con la gravedad de la situación, que nos permiten obtener una imagen más detallada de cada episodio de sequía, con su intensidad y duración. En el ámbito de Aragón se pueden distinguir hasta cinco tipos distintos de rogativas según el nivel o intensidad de la sequía. El material disponible se ha agrupado en índices parciales para elaborar un índice de sequía para el conjunto del territorio estudiado, lo que permite obtener series analizables estadísticamente, tal como si se tratara de registros instrumentales y explicar el comportamiento del clima del pasado, que ha tenido la siguiente evolución:



Foto 41. Rogativa “Ad petendam pluviam” en Zaragoza con el Santo Cristo de La Seo recorriendo las principales calles de la ciudad. Año 1929. El minucioso registro documental de las ceremonias convierte este tipo de material histórico en una fuente de información fundamental para conocer el clima de los últimos siglos. Archivo JMCP

Las primeras rachas secas de importancia se observan en las décadas centrales del siglo XVI. Los decenios posteriores, desde 1580 a 1630, se caracterizan por una significativa reducción de los períodos secos, que fue generalizada en buena parte de España y que guarda notable correspondencia con una de las manifestaciones más frías de la Pequeña Edad del Hielo en Europa Central. El mismo comportamiento se observa entre 1820 y 1860, período en el que prevalecieron los años húmedos, coincidiendo también con una fase de temperaturas bastante frías. Las situaciones anormales de ausencia de lluvias no dejaron de registrarse, pero las realmente severas fueron escasas.

Desde mediados del siglo XVII hasta finales del XVIII la situación es bastante diferente, pues las sequías fueron noticia en más de la mitad de los años, tanto por su intensidad, como en ocasiones por su duración. Entre ellas destacan las ocurridas entre 1680-1683, 1701-1703, 1718-1720, 1730-1734, 1750-1754 y 1802-1803. Al igual que los demás episodios secos, su aparición no es regular, presentan gran variabilidad y las tendencias son muy poco definidas. Respecto a su distribución espacial, sobrepasa en muchas ocasiones el ámbito aragonés y alcanza amplias zonas de la Península, pero en particular la región catalana, con la que existen momentos de clara coincidencia en la frecuencia y duración. Uno de ellos corresponde con la denominada Pulsación Maldá, desde mediados del XVIII hasta principios del XIX, que se caracterizó en Cataluña por una fuerte irregularidad climática, el aumento de la variabilidad interanual y el incremento simultáneo de la frecuencia de rogativas pro lluvia, hidrometeoros catastróficos e inundaciones. Las mismas condiciones extremas y de parecida intensidad se dieron en Aragón, donde hubo una rápida sucesión de fenómenos contrastados: sequedad prolongada en 1779-1781 y 1796; lluvias torrenciales, con inundaciones extraordinarias del río Ebro en 1787 y 1788, que dieron lugar a frecuentes rogativas pro serenitatem; olas de calor que acentuaban la gravedad de la falta de agua; y varias nevadas en la ciudad de Zaragoza, en 1789.

La precipitación, con su comportamiento variado y extremado, se erigió siempre en factor socioeconómico decisivo en comunidades con importantes limitaciones técnicas y organizativas, como fueron las sociedades del Antiguo Régimen. Este hecho era especialmente significativo en los momentos de ausencia prolongada de lluvia, por los graves impactos que ocasionaba sobre la actividad económica y sobre la vida cotidiana.

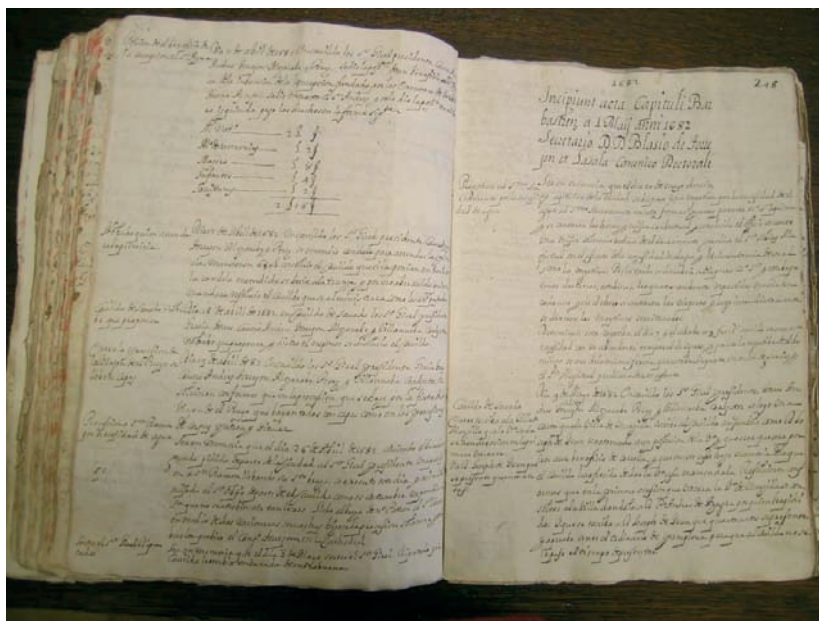
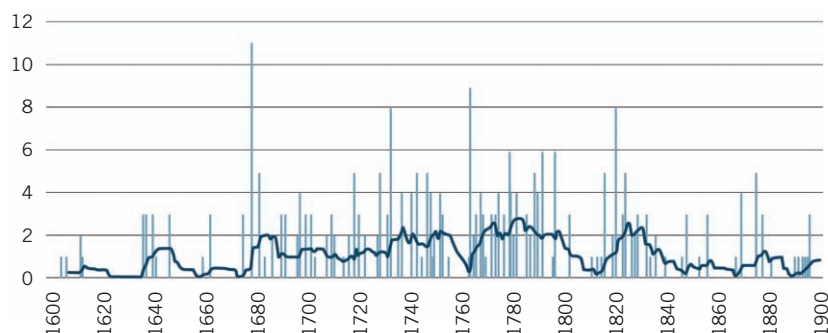


Foto 42. Acta documental de la Catedral de Barbastro donde se recoge la realización de una rogativa pro pluvial en la última década del siglo XVII. Foto JMCP

Lógicamente, las sequías clasificadas en el nivel máximo son las que provocaban las situaciones más críticas. En los registros documentales quedan identificadas por su elevado grado de solemnidad y por la repercusión colectiva de las ceremonias litúrgicas desarrolladas. Por lo general, consistían en peregrinaciones fuera de la ciudad a santuarios con advocaciones muy veneradas, o dentro de la urbe con exposiciones del intercesor durante varios días. En el Somontano barbastrense se trasladaba el Crucifijo de los Milagros en procesión desde la catedral de Barbastro hasta el Santuario de Nuestra Señora de El Pueyo y se traían ambas imágenes para ser expuestas en el altar mayor catedralicio. En el obispado de Huesca era la cabeza de San Vitorián, venerada en el monasterio de Montearagón, y otras reliquias, las que se llevaban procesionalmente a santa María de Salas, extramuros de Huesca. Aquí era costumbre, en el curso de las rogativas, practicar el llamado rito de la mojadura, mojar reliquias de santos. Durán Gudiol (1994) lo narra así: “Eran varias las comarcas altoaragonesas que practicaban el rito de la mojadura del cuerpo del santo titular a manera de piadosa coacción para obligarle a abrir las nubes y conceder la lluvia. Era creencia general que no fallaba tan original práctica, consistente en sumergir el cuerpo incorrupto del eremita en una balsa próxima a su iglesia”. En Zaragoza las rogativas extraordinarias se realizaban con la imagen del Santo Crucifijo del Trascoro del Templo de la Seo, que era llevado en procesión hasta la basílica del Pilar, donde permanecía junto a la Virgen en la Santa Capilla durante varios días, nueve en la mayor parte de los casos, aunque este periodo podía prolongarse cuando no se conseguía la lluvia deseada.

Por su frecuencia y graves consecuencias, estos episodios secos constituyen uno de los aspectos más sobresalientes del clima de Aragón, e indudablemente uno de los de mayor impacto ambiental en el quehacer de sus habitantes, hasta el punto de constituir una constante de su historia. Por las referencias encontradas, las sequías más graves se dieron estos años: 1589, 1683, 1691, 1701-1703, 1709, 1713, 1716, 1720, 1730, 1734, 1738, 1753-1754, 1838, 1848, 1878 y 1924. Su impacto ha quedado reflejado muchas veces en los documentos, que son un claro testimonio de las dificultades económicas y sociales que provocaban: cosechas deficitarias, crisis de subsistencia, carestía de productos básicos, episodios de especulación y acaparamiento, mortalidad directa por falta de alimentos, etc. El relato de la situación que en el Libro de Gestis de la catedral de Barbastro se hace de la sequía de 1713 resulta muy ilustrativo: “... aviendo llegado a tal extremo la comun necesidad y miseria que por la gran seca y por ella poca o ninguna esperanza de cosecha, aviendo sido tan corta la del año pasado, no se hallaba pan por ningun precio valiendo como valia en el almudi a veinte reales la fanega.”



Texto de una rogativa “ad petendam pluviam” extraído del Libro de Gestis del Archivo de la Catedral de Barbastro, t. 8, fol. 252:

“Continuando en el año 1754 la casi universal sequía que desde julio del anterior se venía sintiendo de un modo tan deplorable que llegó a producir el abandono de campos por parte de los barbastrenses, resolvió el Ayuntamiento, después de hechas las rogativas de costumbre y con acuerdo del Cabildo, la traslación de la imagen de Nuestra Señora del Pueyo de su santuario a la iglesia catedral, como se verificó el 28 de febrero, mediante una Procesión General, en la que tomaron parte mas de 13.000 personas, venidas de 32 pueblos... Era una escena imponente”.

Fig. 48. Evolución del índice de sequía entre 1600 y 1900 para el conjunto de Aragón. (Barras grises: IMCS, Línea negra: media móvil de 25 años).

Las evidencias analizadas en Aragón señalan, como hemos visto en las páginas anteriores, la existencia de variaciones importantes en el clima a distintas escalas temporales. Episodios fríos y cálidos de distinta duración e intensidad que afectaron a los sistemas naturales y cuyas huellas sobre el paisaje, interpretadas en términos paleoclimáticos, nos han servido para señalar en el tiempo una sucesión de eventos que coinciden en cuanto a signo y cronología con los señalados a nivel global, inscribiéndose la evolución del clima observada en Aragón en un contexto espacial más amplio.

Así, hemos visto cómo la dinámica glacial-interglacial del Pleistoceno queda bien definida en Aragón a partir del estudio de las terrazas fluviales, los depósitos de origen glacial, las tobas y los espeleotemas. Estos *proxy-data* han aportado información especialmente relevante sobre el Würm, última de las fases glaciares pleistocenas, y en especial sobre la disincronía existente entre el máximo avance de los glaciares en este episodio a nivel global y el identificado sobre el solar aragonés.

Buena parte de la evolución del clima en el Holoceno ha quedado también bien registrada gracias al análisis de los procesos morfogenéticos que se dan en laderas y fondos de valle, habiendo quedado patente la variabilidad del clima a lo largo de este periodo, en el que lejos de la pretendida homogeneidad que se le atribuía, se detectan periodos más fríos y húmedos frente a otros que, como el actual, se caracterizan por ser más cálidos y secos. Periodos como el Atlántico, el Subboreal o el actual Subatlántico de escala temporal milenaria, pero dentro de los que alternan episodios pluriseculares más breves en los que, como en la Pequeña Edad del Hielo, identificada y caracterizada en Aragón a través de la dendroclimatología y la documentación histórica, se producen variaciones en las condiciones termohigrométricas capaces de alterar la dinámica ambiental del territorio. Estos episodios de carácter secular constituyen una importante fuente de información para el análisis y comprensión de la situación climática actual y de los posibles efectos sobre los sistemas naturales de las variaciones en la temperatura y la precipitación.

En definitiva, una evolución del clima que nos ayuda a comprender e interpretar mejor muchos de los paisajes que vivimos y percibimos, pero cuyo conocimiento preciso resulta además fundamental para contextualizar mejor el clima actual, en una atmósfera intervenida por la actividad antrópica, así como su evolución reciente y la magnitud e importancia real de las anomalías termoplumiométricas y tendencias positivas o negativas que puedan detectarse.

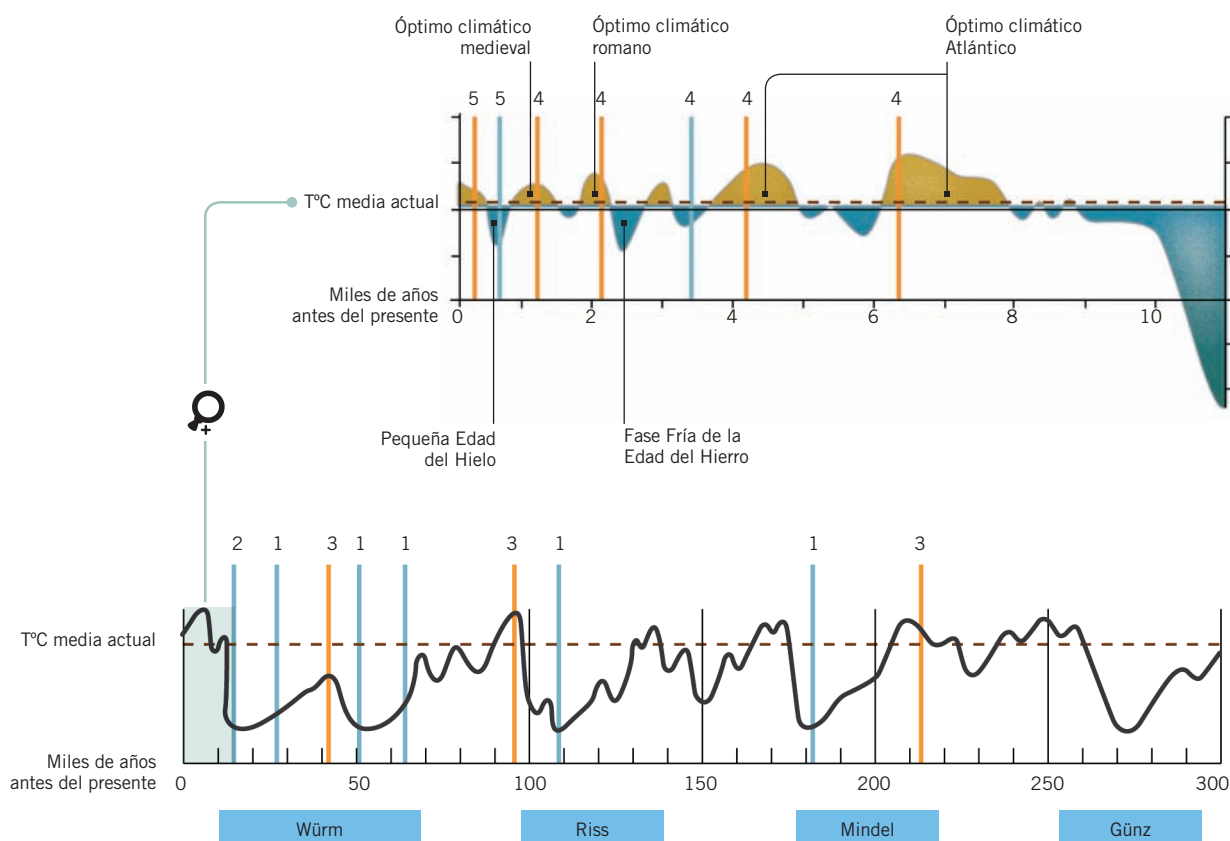


Fig. 49. ▶ La evolución del clima en Aragón a lo largo de los últimos centenares de miles de años es, a grandes rasgos, similar a la reconstruida para espacios regionales más amplios. En la figura aparecen reconstrucciones realizadas para la evolución de las temperaturas en Europa en los últimos 300.000 años, habiéndose detallado más la evolución observada en el Holoceno. Las líneas verticales que se han superpuesto sobre esas figuras corresponden con aquellos eventos climáticos de los que, según se ha referenciado en el texto, existen referencias en Aragón. Los naranjas corresponden

con eventos de carácter cálido, mientras los azules están relacionados con la identificación de eventos fríos. En todos los casos vemos que coinciden en cuanto a signo con las anomalías identificadas a una escala territorial más amplia. Hemos querido además referir el tipo de fuente de información proxy a partir del que se ha obtenido este dato paleoambiental. Así con un 1 se señalan los eventos detectados a partir de la dinámica fluvial, con un 2 los relacionados con restos de glaciación, con un 3 a partir de espeleotemas, con un 4 a partir de la dinámica de laderas y fondos de valle y con un 5 a partir de información documental o dendrocronología.