

RECONSTRUCCIÓN DE LA DINÁMICA DEL
FUEGO DURANTE EL MIS5e (ca. 130-115 ka
BP) EN LA CUENCA DE LA LAGUNA DE EL
CAÑIZAR DE VILLARQUEMADO (TERUEL),
SU RELACIÓN CON CAMBIOS
PALEOCLIMÁTICOS E IMPACTO EN LA
VEGETACIÓN.



AUTORA: INMACULADA GARRIDO SÁNCHEZ
DIRECTORES: GRACIELA GIL ROMERA, PENÉLOPE GONZÁLEZ SAMPÉRIZ E IGNACIO
CANUDO SANAGUSTÍN
CURSO: 2023-2024 MÁSTER EN GEOLOGÍA: TÉCNICAS Y APLICACIONES
UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

Índice

Abstract.....	2
Resumen	2
1 Introducción.....	2
2 Marco geográfico y geológico.....	7
2.1 Situación geográfica	7
2.2 Geología	8
2.3 Clima	11
2.4 Vegetación.....	13
2.5 Síntesis sobre la estratigrafía y contexto sedimentológico de la secuencia.....	14
2.6 Síntesis palinológica de la secuencia de Villarquemado.....	17
3 Hipótesis inicial y objetivos	19
4 Metodología.....	20
4.1 Trabajo bibliográfico.....	20
4.2 Trabajo de laboratorio	21
4.3 Trabajo de gabinete	26
5 Resultados.....	27
6 Discusión	30
7 Conclusión.....	44
8 Agradecimientos.....	45
9 Bibliografía.....	46

Abstract

The analysis of the record from the Cañizar lagoon in Villarquemado has provided valuable insights into the possible causes of the forest collapse that occurred approximately 125 ka BP. This study explored a previously unconsidered hypothesis based on the analysis of microcharcoal particles, shedding light on fire activity during that period. In addition to counting microcharcoals, the obtained series was compared with the palynological sequence previously studied by other authors. This comparison has enabled a better understanding of how vegetation during the Eemian responded to disturbances such as wildfires.

Resumen

El análisis del registro de la laguna del Cañizar de Villarquemado ha permitido aportar información relevante sobre las posibles causas del colapso forestal ocurrido hace aproximadamente 125 ka BP. En este estudio, se ha explorado una hipótesis previamente no considerada, basada en el análisis de partículas de microcarbones, lo que ha permitido investigar la actividad del fuego en dicho periodo. Además del recuento de microcarbones, se ha comparado la serie obtenida con los datos de la secuencia palinológica previamente estudiada por otros autores. Esta comparación ha facilitado una mejor comprensión de cómo la vegetación durante el Eemiense respondió ante perturbaciones como los incendios.

1 Introducción

El estudio de secuencias Cuaternarias (desde hace 2,59 millones de años BP-notación que se empleará de ahora en adelante como miles de años calibrados antes del presente, por sus siglas en inglés “Before Present”), es fundamental para comprender y actuar sobre el actual Cambio Global, el cual se entiende como el conjunto de cambios biofísicos y socioeconómicos que están transformando el Sistema Tierra, afectando a fenómenos globales como el uso del suelo, el clima, los ecosistemas o los ciclos biogeoquímicos, entre otros, pudiendo provocar alteraciones abruptas o irreversibles (Steffen *et al.*, 2007; Álvarez-Lires *et al.*, 2017).

El Cuaternario es especialmente interesante porque presenta una situación de contorno análoga a la actualidad en términos de configuración de continentes, océanos,

fauna y flora, además de ser el periodo geológico en el que se desarrolla el género *Homo* y nuestra propia especie.

La disposición de las masas de agua y corrientes oceánicas ha desempeñado un rol crucial en la regulación del clima global y los patrones de diversidad durante todo el periodo Cuaternario.

El clima cuaternario viene marcado por numerosas fluctuaciones asociadas esencialmente a variaciones en parámetros orbitales como la insolación, la oblicuidad, la excentricidad y la precesión, dando lugar a periodos fríos o glaciaciones intercalados con otros cálidos o interglaciales (Olmos *et al.*, 2011; Baker y Fritz, 2015; Ganopolski, 2024; Stott, 2024).

En concreto las glaciaciones sucedidas durante el Pleistoceno (2,59 millones de años hasta 11,7 ka BP) están muy bien estudiadas y los mecanismos planetarios que las han provocado y puesto término se conocen cada vez mejor, como es el caso de los ciclos de Milankovitch.

Durante los periodos de enfriamiento, enormes capas de hielo cubrieron vastas regiones del hemisferio norte (Delgado y Romero, 2007) y la temperatura global y el nivel del mar fueron significativamente más bajos en comparación con los periodos interglaciales.

Esta intensa variabilidad climática de escala milenaria transformó radicalmente el paisaje vegetal, puesto que la existencia de grandes glaciares y masas de hielo continentales crearon barreras naturales para la vegetación y, como contrapartida, áreas refugio donde acantonarse en los momentos más desfavorables, determinando así los patrones de distribución geográfica de la biodiversidad posteriores (Rodríguez-Sánchez, 2011; Aravena, 2024). Tanto la flora como la fauna se vieron forzadas a desplazarse o adaptarse a las nuevas condiciones, lo que fomentó la diversificación y especialización de las especies (Rodríguez-Sánchez, 2011; Gillespie *et al.*, 2020).

En el marco de esa intercalación de periodos glaciales e interglaciares del Cuaternario, nos encontramos con que el último ciclo comprende aproximadamente los últimos 130 ka BP de historia de nuestro planeta. Dentro de este extenso intervalo temporal, el presente estudio se centra en el Estadio Isotópico Marino MIS 5 (por sus

siglas del inglés, Marine Isotopic Stage), y más concretamente en el periodo de expansión forestal interglacial o Eemiense ocurrido durante el MIS5e.

Tanto el MIS 5 en su totalidad como el Eemiense en particular (que en este trabajo se va a considerar análogo del MIS5e, aunque realmente, a pesar de coincidir frecuentemente, el Eemiense representa el periodo de máximo desarrollo forestal en el último interglacial Sánchez Goñi *et al.*, (2005)), son periodos que exhiben patrones, transiciones y respuestas ecológicas que facilitan la comprensión de escenarios climáticos análogos al cambio climático actual y mejoran nuestra capacidad para anticipar posibles cambios futuros, como exponen González-Sampériz *et al.*, (2020) en su trabajo sobre la reconstrucción paleoambiental de la secuencia de El Cañizar de Villarquemado (Teruel), objeto de este estudio.

Durante el MIS 5 (ca. 130-80 ka BP), se han identificado tres periodos cálidos prolongados (MIS 5a, 5c y 5e) que permitieron, sobre todo en centro y sur de Europa, la expansión de grandes bosques debido a unas condiciones climáticas cálidas y húmedas, intercalados con dos episodios más cortos y fríos (MIS 5b y 5d). Mientras que los periodos cálidos del MIS 5 se caracterizan por esa expansión forestal, durante los episodios MIS 5b y 5d los bosques se redujeron considerablemente como consecuencia del descenso de temperaturas, que también implicó cierto avance de los glaciares en cotas altas, como los de las montañas de Fennoscandia (Helmens, 2014). Además, estos periodos fríos son identificables en penínsulas europeas meridionales Grecia e Italia (Milner *et al.*, 2016), con las cuales se puede comparar de manera más adecuada la PI.

El Eemiense (MIS5e), por su parte, fue descrito inicialmente cerca del río Eem en los Países Bajos y está asociado con depósitos marinos que contienen moluscos de aguas cálidas de las regiones lusitanas y mediterráneas. (Harting, 1875). Cronológicamente tuvo lugar hace 130 y 115 ka BP aproximadamente (Dahl-Jensen *et al.*, 2013), registrándose el máximo desarrollo forestal en torno a 125-120 ka BP (de Pedraza, 2006; Oppo *et al.*, 2006; González-Sampériz *et al.*, 2020 y referencias incluidas en este trabajo).

En este contexto, la investigación del MIS5 y sus estadios es particularmente significativa debido a su asociación con cambios climáticos rápidos (Milner *et al.*, 2016) y a la existencia de un registro geológico claro que permite su análisis.

La flora del Cuaternario, por su parte, muestra una evolución y adaptación a las fluctuaciones climáticas que caracterizan al periodo y, que fueron el motor fundamental para los cambios dinámicos de los biomas durante las glaciaciones (Comes y Kadereit, 1998). Estudiar los registros paleobotánicos permite reconstruir antiguos paisajes y entender cómo las comunidades vegetales se organizaron en respuesta a los cambios ambientales.

Además de la flora, atendiendo a la fauna; el Cuaternario también es testigo de la coexistencia y evolución de muchas especies que aún persisten en la actualidad, así como de la extinción de otras (Cuenca-Bescós *et al.*, 2005).

El análisis de ambas dinámicas ofrece una perspectiva valiosa sobre cómo las especies respondieron a cambios climáticos y ambientales, proporcionando paralelos útiles para entender las actuales amenazas de extinción y pérdida de biodiversidad.

A pesar de considerar esta época como un buen análogo al cambio actual, es importante destacar que también hay diferencias significativas en lo que compete a un factor determinante en el cambio global actual: la ocupación humana.

Como se ha mencionado anteriormente, este periodo también es crucial desde una perspectiva antropológica, ya que marca la emergencia de nuestra especie. Así, la investigación de las secuencias cuaternarias ofrece una visión integral de la evolución humana y las interacciones de nuestros antepasados con su entorno, aportando conocimientos esenciales sobre la resiliencia y adaptabilidad de la humanidad frente a los cambios climáticos y ambientales del pasado. Esto, a su vez, enriquece nuestra comprensión de las posibles respuestas humanas a los desafíos ambientales actuales y futuros.

Para estudiar este periodo de manera que se pueda generar un conocimiento aplicable a las situaciones de emergencia ambiental actual se necesita un registro continuo, que permita una alta resolución cronológica. Las secuencias lacustres revisten una importancia crucial en este sentido debido a su capacidad para proporcionar una sedimentación continua, lo que permite el análisis del dinamismo ambiental de una manera diacrónica. Además, permiten la extracción de múltiples indicadores ambientales tanto geológicos como biológicos, registrando con alta resolución temporal las

condiciones climáticas y ambientales del pasado (Burjachs *et al.*, 1996; Valero-Garcés *et al.*, 2011; Corella y Martín-Puertas, 2022; entre otros), y ayudando a trazar líneas de base coherentes para abordar el actual cambio global.

La península Ibérica (PI) es una de las zonas más vulnerables de la región mediterránea al cambio climático (Andrade *et al.*, 2021; Pereira *et al.*, 2021), ya que, entre otros factores, está sometida a perturbaciones ambientales de gran intensidad, entre las que destacan las sequías y, como consecuencia de estas, los incendios forestales.

El fuego y los grandes incendios forestales en la actualidad, según Castellnou *et al.*, 2007 se han convertido en los principales gestores de nuestros paisajes vegetales, además de la existencia de amplias zonas de cultivo e infraestructuras lineales y urbanas que fragmentan estos entornos. Esta idea se ve apoyada por otros autores como Bond y Keeley (2005), que defienden igualmente que el fuego es una de las perturbaciones más importantes que afectan la dinámica de la vegetación mediterránea, pudiendo tener estos incendios un papel rejuvenecedor siempre y cuando la incidencia de fuegos esté dentro de un régimen adaptado a cada tipo de hábitat. Un ejemplo del papel beneficioso del fuego es el que se expone en el trabajo de Kunst y colaboradores (2003), defendiendo que una ausencia de fuego prolongada permite la acumulación excesiva de biomasa aérea de la especie dominante, lo que influye negativamente sobre la diversidad de herbáceas acompañantes.

En la actualidad, se le atribuye al fuego un papel predominantemente negativo, ya que las actividades humanas han aumentado el número y la intensidad de los incendios forestales en muchas regiones, lo que, sumado a cambios en los usos del suelo, también ha provocado cambios en la recurrencia (Pausas, 2020) diezmando la vida en los ecosistemas. Esta percepción no refleja la realidad completa y hay evidencias que demuestran que el fuego ha sido un agente crucial en la configuración de los ecosistemas incluso mucho antes de la intervención humana (Scott, 2000; Pueyo Morer *et al.*, 2019; Rodríguez *et al.*, 2024). De hecho, la relación vegetación-fuego se remonta hasta hace 420 millones de años, en el Silúrico (Carvajal, 2023; Rodríguez *et al.*, 2024). Durante este periodo, la Tierra estaba colonizada por plantas y los niveles de oxígeno llegaron a ser del 19% superiores a la actualidad (Rodríguez-Trejo, 2012), sumándose a esto que durante el Silúrico hubo un clima seco de transición. Estas condiciones hicieron que los

incendios afectasen a las poblaciones vegetales quedando registrados (Rodríguez-Trejo, 2012).

En cualquier caso, la visión del fuego como un agente únicamente destructivo es una simplificación errónea. El fuego ha sido históricamente tanto un destructor como un creador de vida, facilitando procesos ecológicos vitales como la germinación de ciertas especies vegetales adaptadas al fuego y el reciclaje de nutrientes (Mataix-Solera y Guerrero, 2007; Ramos Rodríguez, 2010). Comprender este equilibrio es esencial para la gestión efectiva de los incendios en el contexto actual de cambio climático, donde la actividad humana amplifica los riesgos y las consecuencias de los incendios forestales.

Para estudiar estos periodos y sus dinámicas en la PI se ha tomado como caso de estudio el registro del Cañizar de Villarquemado (Valero-Garcés *et al.*, 2019; González-Sampérez *et al.*, 2020), una secuencia lacustre única ya que se trata de la más larga existente hasta la fecha en el interior del NE de Iberia datada de forma absoluta y que recoge los últimos 135 ka BP de historia paleoambiental (Valero-Garcés *et al.*, 2019).

El completo estudio multidisciplinar llevado a cabo en este registro (González-Sampérez *et al.*, 2013, 2020; Aranbarri *et al.*, 2014; Valero-Garcés *et al.*, 2019) incluye el análisis de una batería de indicadores sedimentológicos enfocados a la reconstrucción paleohidrológica, y un estudio del contenido palinológico (granos de polen y esporas fósiles) que ha permitido la reconstrucción de la dinámica de la vegetación durante todo el Pleistoceno Superior y Holoceno. Hasta el momento, no se había considerado el contenido en microcarbones del sedimento ni la posible influencia del fuego durante el anterior interglaciar Eemiense, por lo que la aportación de este Trabajo Fin de Master es pionera y arroja los primeros datos en este sentido completando una ventana temporal concreta.

2 Marco geográfico y geológico.

2.1 Situación geográfica

La laguna de El Cañizar de Villarquemado se localiza en el noreste de la Península Ibérica, en la provincia de Teruel, a aproximadamente 5 kilómetros de la localidad de Villarquemado, y entre los municipios de Singra y Cella como se observa en la Fig. 1 (Rubio y del Valle, 2005). Esta laguna, situada a 987 metros sobre el nivel del mar, se

encuentra en la Cordillera Ibérica Meridional, en el noreste de España, con coordenadas 40°30'N y 1°18'W.

El paleolago de Villarquemado poseía una gran dimensión ya que alcanzaba aproximadamente 11,3 km² (Rubio y del Valle, 2005) y constituía uno de los humedales esteparios de agua dulce más extensos de España, caracterizado por su alta concentración de carbonatos y aguas perennes. Los aportes hídricos que recibía este lago provenían principalmente de descargas subterráneas (como se explicará a continuación), facilitados por varios factores que impedían la llegada de agua por otras vías, como la baja pendiente del lecho, la gran superficie ocupada por agua y su ubicación geográfica. A pesar de su importancia e interés la laguna del Cañizar de Villarquemado fue desecada en el s. XVII alegando problemas de paludismo, y ha sido tradicionalmente cultivada en su mayor parte. Desde hace unos años existe un proyecto de recuperación del humedal y una fundación que defiende su interés y conservación.

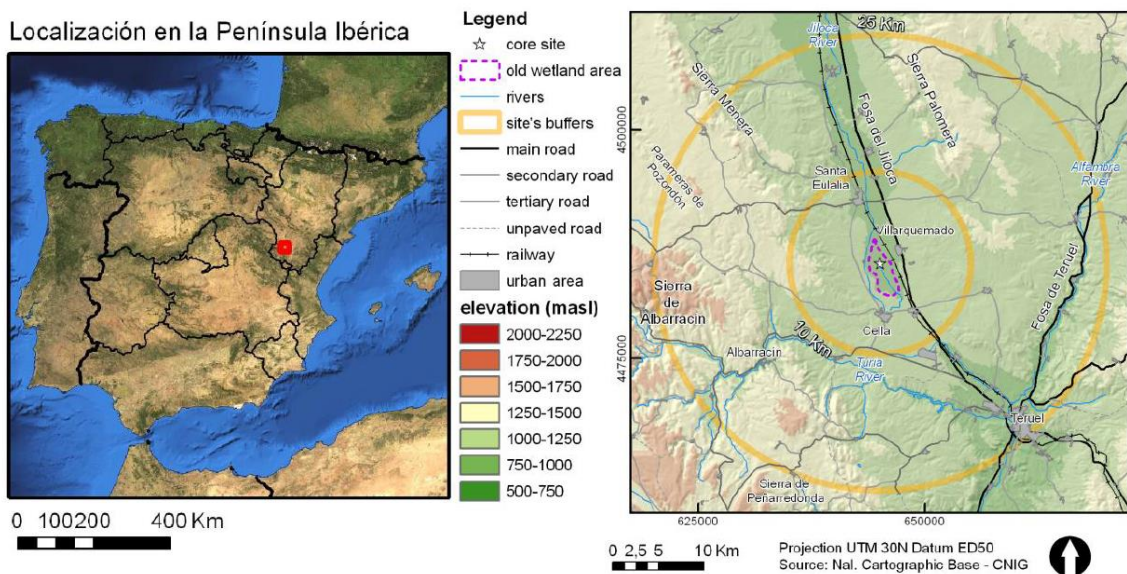


Figura 1. A la izquierda mapa de localización en la Península Ibérica. A la derecha mapa topográfico con los principales enclaves colindantes. En línea morada discontinua se representa el área de extensión del paleohumedal. La estrella marca el lugar del sondeo. Tomada de García-Prieto (2015).

2.2 Geología

Desde una perspectiva geológica, la laguna del Cañizar de Villarquemado se sitúa en la rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica, específicamente en la depresión del Jiloca, que presenta unas dimensiones aproximadas de 60 km de longitud y entre 6 y 10 km de ancho. Esta fosa se caracteriza por su marcada asimetría y su orientación NNO-SSE

(Fig.2), controlada por tres fallas principales dispuestas en un sistema de relevo diestro en su margen oriental: las fallas de Calamocha, Sierra Palomera y Concud (Simón *et al.*, 2010). Estas son responsables de generar el campo de esfuerzos que propició el desarrollo de la cuenca. Además de definir la dirección general de la fosa, la actividad de estas fallas produjo una dinámica neotectónica de carácter distensivo durante el periodo Plio-Cuaternario (Simón, 1983).

En cuanto a su origen, la formación de la fosa del Jiloca ha suscitado diversas interpretaciones. La primera, propuesta por Simón en 1983, sugiere que la fosa se formó en un contexto de expansión neógeno vinculado al *rifting* del surco de Valencia, y que el hundimiento de la misma ocurrió durante el Neógeno. Posteriormente, Cortés y Casas (2000) y Casas y Cortés (2002) argumentaron que tanto la fosa del Jiloca, donde se encuentra el paleolago, como la fosa de Teruel (aledaña a la del Jiloca), constituían cubetas residuales localizadas en áreas sinclinales, manteniendo una continuidad evolutiva con las cuencas paleógenas.

García *et al.*, (2003) reinterpretaron el origen de la fosa del Jiloca y propusieron que podría tratarse de un polje, originado a finales del Plioceno e inicios del Cuaternario. Según esta hipótesis, aunque la subsidencia tectónica habría influido en la ubicación y el desarrollo inicial de la fosa, el proceso dominante habría sido el hundimiento kárstico, causado por la disolución de materiales susceptibles a este proceso y resultando en un rebajamiento de hasta 300 metros.

Pese a las diferencias entre estas hipótesis, la primera propuesta, que postula un desarrollo de la fosa en un contexto de cuenca extensional, se mantiene como la más robusta. No obstante, se reconoce una influencia del fenómeno kárstico, aunque no como causa principal de la formación de la fosa del Jiloca.

Durante el Neógeno y el Plio-Cuaternario, las cuencas intramontañosas de la Cordillera Ibérica, desarrolladas en el marco del segundo pulso extensional, incluida en la que se encuentra el paleolago, experimentaron un cambio al integrarse en la red de drenaje externa, lo que transformó sus condiciones iniciales de endorreicas a exorreicas (Simón *et al.*, 2010; Casas-Sainz y de Vicente, 2009). Sin embargo, en la zona centro-sur

de la fosa, precisamente en el área donde se ubica la laguna, las condiciones endorreicas se preservaron (Rubio, 2004).

La delimitación hidrográfica de la cuenca está establecida al este por la cresta de la Sierra de Palomera, al oeste por las parameras de la Sierra de Albarracín, al norte por el Alto de Singra y al sur por la divisoria hidrográfica de la cuenca del Turia en el puerto de Cella (Rubio y Valle, 2005).

Desde una perspectiva hidrogeológica, la laguna está vinculada a dos importantes acuíferos pertenecientes a las unidades hidrográficas de Cella-Molina de Aragón y del Valle del Jiloca (Arqued y San Román, 1999, citados en López y Rubio, 2004). Por un lado, se encuentra el acuífero detrítico pliocuaternario, que agrupa los depósitos cenozoicos que cubren el fondo del valle del Jiloca; este acuífero es libre en su parte inferior (López y Rubio, 2004) y está delimitado regionalmente por formaciones del Keuper y por pizarras y cuarcitas paleozoicas (Olivé *et al.*, 1983). Además, otra característica del acuífero es su alta permeabilidad granular (López y Rubio, 2004).

Por otro lado, el acuífero jurásico se extiende ampliamente a lo largo de la Sierra de Albarracín. Una parte de las descargas de este acuífero alimenta tanto la fuente de Cella como la laguna de Villarquemado, aunque los aportes subterráneos a la laguna son significativamente mayores desde el acuífero detrítico pliocuaternario.

En consecuencia, la laguna recibe recargas subterráneas provenientes de la unidad hidrogeológica Cella-Molina de Aragón, sobre el sustrato pliocuaternario en el sector sur de la laguna.

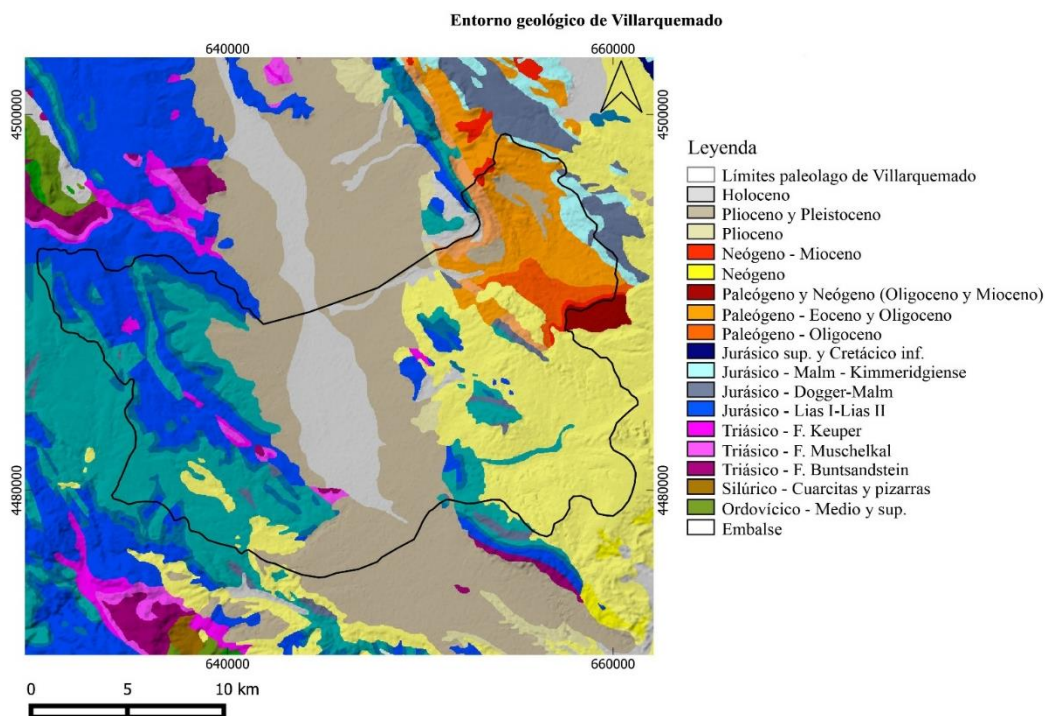


Figura 2. Mapa geológico de la zona de Villarquemado. Se presentan las unidades geológicas aflorantes además de los límites de la cuenca hidrológica de la Laguna del Cañizar. Límite tomado de Rubio y del Valle (2005). En los anexos se observa con una mayor calidad y desarrollo de las facies en la leyenda.

2.3 Clima

Como exponen Rubio y del Valle, (2005) la zona de estudio se caracteriza por un clima mediterráneo con una marcada influencia continental, con una temperatura media anual de 10°C y amplias variaciones en las temperaturas diurnas y estacionales. Los inviernos son largos e intensos, siendo enero el mes con menor registro de precipitaciones (del Valle, 2017).

Las lluvias son escasas, alcanzando un máximo de 418 mm en Santa Eulalia, con un ligero incremento en los márgenes del valle (Rubio y del Valle, 2005). Anualmente se han registrado en la estación de Cella (1023 m.s.n.m) 370 mm y en la estación de Griegos (1604) 740 mm (Fig. 3).

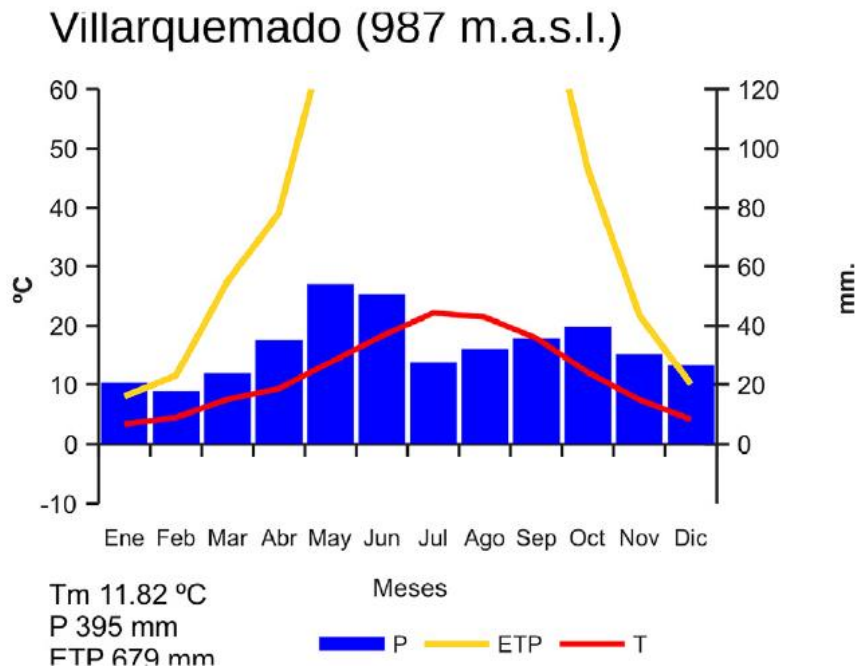


Figura 3. Datos climáticos de la zona de Villarquemado: fuente ACDPI (Ninyerola *et al.*, 2005). Evapotranspiración potencial calculada mediante el método de Thornthwaite (latitud).

La limitada cantidad de precipitaciones en esta región puede explicarse por su ubicación en el interior de la península y la presencia de las sierras ibéricas en su perímetro, factores que dificultan el acceso de masas de aire húmedo y frentes lluviosos. Las perturbaciones de origen atlántico que ingresan desde el noroeste llegan debilitadas tras recorrer largas distancias, mientras que las sierras de Gúdar y Maestrazgo actúan como barrera para las masas húmedas provenientes del Mediterráneo. Asimismo, los temporales del suroeste deben atravesar prácticamente toda la península, lo que permite lluvias significativas en el sector occidental del Sistema Ibérico; pero, sin embargo, al alcanzar el valle del Jiloca, estas perturbaciones ya han perdido gran parte de su humedad debido al desgaste adicional provocado por las sierras de Albarracín, los Montes Universales y la Sierra Menera, generando un marcado efecto de sombra pluviométrica (Del Valle, 1993).

En la zona meridional de la cuenca del Jiloca, este efecto de sombra de lluvias se intensifica debido a la mayor continentalidad, lo que genera una diferencia con el típico clima mediterráneo. La época de mayor lluvia deja de estar claramente definida en primavera, y el verano llega a igualarla o incluso superarla (del Valle, 2017).

2.4 Vegetación

Las formaciones vegetales actuales están condicionadas por factores climáticos y antrópicos, en función de la altitud, la exposición y el tipo de suelo (Rivas-Martínez y Armaiz, 1984; García Prieto (2015). En las zonas bajas de la laguna sin actividad agrícola, predominan los carrascales (*Quercus ilex*, L) y quejigares (*Quercus faginea*, LAM 1785), acompañados de matorrales xerofíticos (*Thymus vulgaris* (L, 1753), *Genista scorpius* (L), etc). En las inmediaciones de la laguna y a mayor altura, se encuentran las comunidades de pinar de rodeno (*Pinus pinaster* AIT). En áreas de mayor altitud, destacan los sabinares conformados por *Juniperus thurifera* (L., 1753), pino laricio (*Pinus nigra*, J.F. Arnold), y el roble melojo (*Quercus pirenaica*, Willd).

La relación entre geología y vegetación es notable: las parameras calcáreas favorecen el desarrollo de sabinares (Sainz Ollero y van Staaldin, 2012 en García-Prieto 2015), mientras que los suelos arenosos están asociados a pinares de pino de rodeno y formaciones de jaras (Cistaceae, Juss) García Prieto (2015). Estas asociaciones se sitúan en el piso bioclimático mesomediterráneo (Rivas-Martínez y Armaiz, 1984). En altitudes superiores, correspondientes al piso supramediterráneo, predominan el pino royo (*Pinus sylvestris*, L), el boj (*Buxus sempervirens*, L 1753) y las sabinas rastreras (*Juniperus sabina* sbsp *nana*, L) García Prieto (2015).

Alrededor de la laguna predominan las zonas de cultivo de secano, así como reforestaciones de *Populus nigra* (L. 1753) y plantas pertenecientes al género *Tamarix* (L).

En la figura 4 se puede ver geográficamente la disposición de esta vegetación en relación con el área de la laguna.

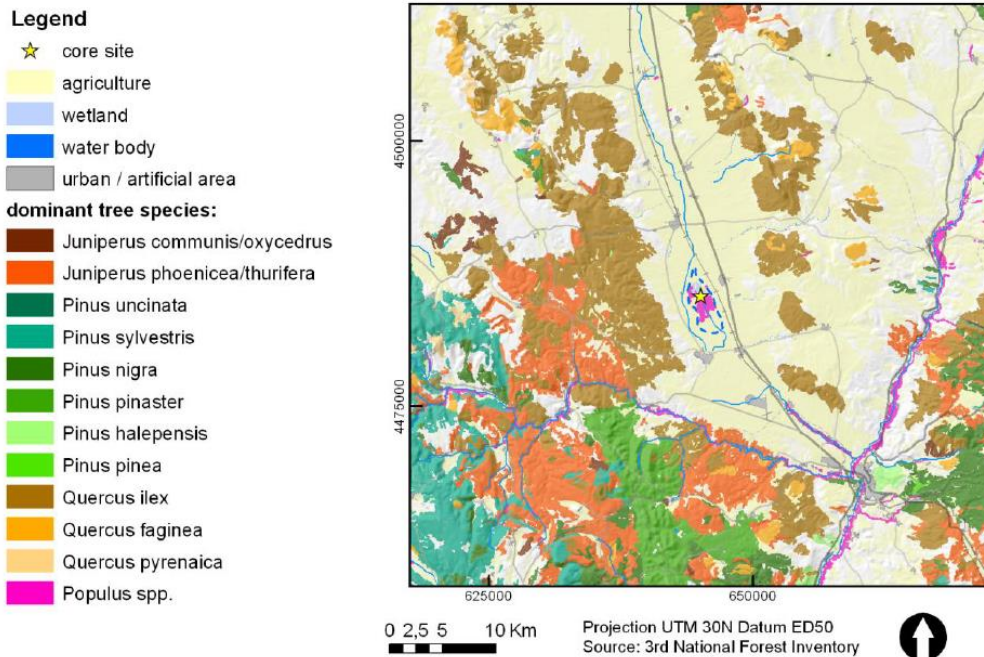
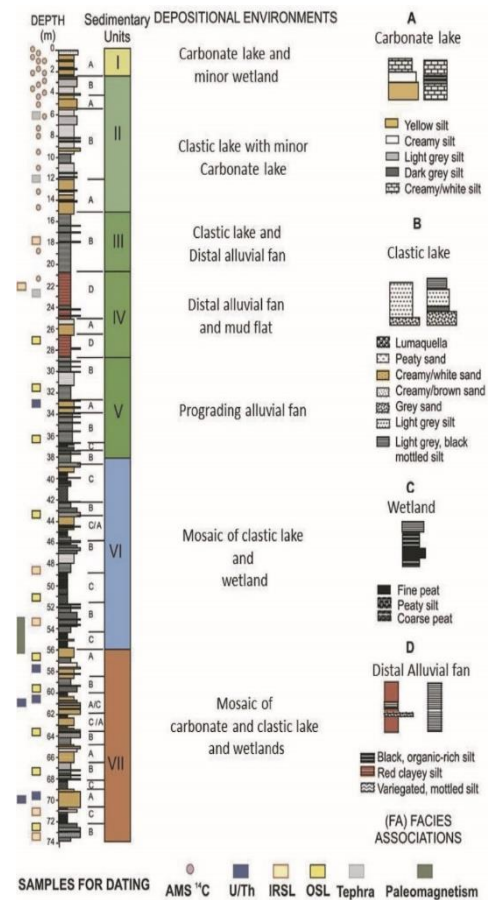


Figura 4. Mapa extraído del 3er Inventario Forestal Nacional (2004) señalando las áreas de distribución de los principales taxa arbóreos predominantes en la actualidad. Tomado de García-Prieto (2015).

2.5 Síntesis sobre la estratigrafía y contexto sedimentológico de la secuencia.

Se identificaron y describieron detalladamente 20 facies sedimentarias (Moreno *et al.*, 2012; Valero-Garcés; Fig. 5) mediante el análisis de su composición, textura, color, mineralogía, composición química y observaciones microscópicas de preparaciones de frotis, siguiendo el enfoque propuesto por Schnurrenberger *et al.*, (2003).

Figura 5. Representación esquemática de los diferentes ambientes sedimentarios registrados en la secuencia de la laguna del Cañizar de Villarquemado. Este gráfico muestra las unidades sedimentarias en función de la profundidad (en metros) y las asociaciones de facies correspondientes a diversos ambientes, incluyendo lagos carbonatados, lagos clásticos, humedales y abanicos aluviales distales. Cada unidad sedimentaria está representada en una columna con etiquetas que indican su composición y color. Las muestras para datación se indican con diferentes símbolos, y se utilizan técnicas como AMS, U/Th, IRSL, OSL, tefras y paleomagnetismo. Tomado de Valero-Garcés *et al.*, (2019).



Estas facies se caracterizaron en cuatro categorías texturales distintas (arenas, limo grueso, limo fino y material rico en materia orgánica) y se organizaron en cuatro asociaciones de facies (AF) junto con sus correspondientes ambientes sedimentarios interpretados.

La secuencia de Villarquemado está conformada esencialmente por turberas, abanicos aluviales y depósitos lacustres carbonatados. En los momentos en los que el lago carbonatado (designado con la letra A) domina se dan los mayores valores de calcio (Ca), un alto valor en carbono inorgánico total (TIC) y valores más bajos de susceptibilidad magnética (MS). Cuando la turbera (denominada con la letra C) es el ambiente dominante se registran las mayores concentraciones de carbono orgánico total (COT) y la menor MS. Por último, cuando impera el ambiente de abanico aluvial (D) y, por tanto, el lago clástico (B), el contenido en carbonato y el TOC son menores pero la MS es mayor. Moreno *et al.*, 2012, Valero-Garcés *et al.*, 2019. Estas relaciones se pueden observar en la Fig. 6

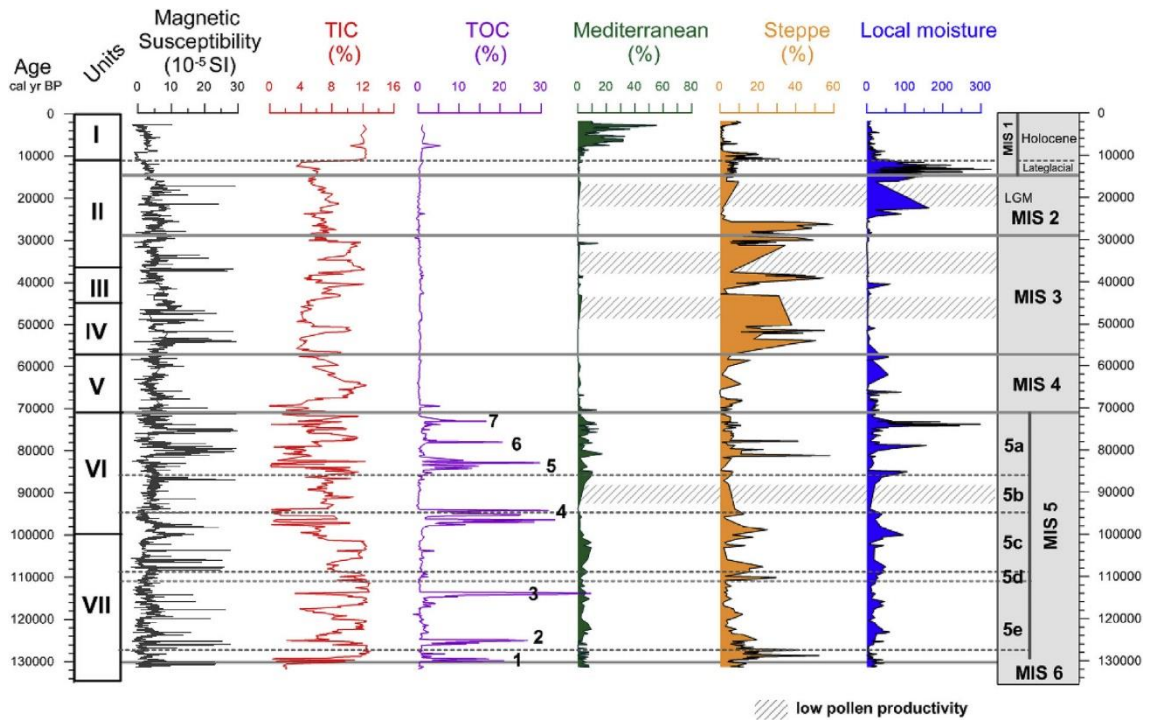


Figura 6. Datos geoquímicos y palinológicos principales de la secuencia VIL representados en función de la edad, con las unidades sedimentológicas (a la izquierda) y los períodos MIS (a la derecha) indicados. Los límites cronológicos para los períodos MIS siguen a Lisiecki y Raymo (2005) y Rasmussen *et al.* (2014), mientras que los estadiales e interestadiales dentro de la cronología del MIS 5 siguen a Martrat *et al.* (2004). Los grupos polínicos están compuestos por los siguientes taxones: Mediterráneo incluye *Quercus perenne*, *Viburnum*, *Buxus*, Oleaceae, *Pistacia*, *Rhamnus*, *Myrtus*, Thymelaeaceae, *Arbutus unedo*, Cistaceae y *Helianthemum*. Estepa incluye los tipos *Ephedra distachya* y *E. fragilis* y Chenopodiaceae.

Humedad local está formada por acuáticas y Pteridophyta: Cyperaceae, Typhaceae, *Juncus*, *Sparganium*, *Thalictrum*, *Lythrum*, *Stratiotes*, *Utricularia*, *Ledum palustre*, *Ranunculus*, *Pedicularis*, *Myriophyllum*, *Lemna*, *Nymphaea*, *Nuphar*, *Potamogeton*, *Isoetes*, *Alisma*, *Callitriche*, *Asplenium*, Monolete, Trilete, *Polypodium*, *Botrychium*, *Pteris*, *Equisetum* y *Selaginella*. Las bandas grises sombreadas muestran intervalos con baja productividad polínica en MIS 5b, MIS 3 y MIS 2. Tomado de Valero-Garcés *et al.*, 2019.

Las muestras analizadas en este TFM pertenecen a niveles basales del registro y cronología del MIS5 en torno al interglaciar Eemiense y se corresponden con asociaciones de facies tipo A, B y C, las cuales representan ambientes intercalados de turbera, lago carbonatado y lago clástico. Por lo tanto, en el presente TFM se describirán exclusivamente estas tres basándose en la información aportada por García-Prieto (2015).

Sección A: Asociación de facies del lago carbonatado

Esta sección corresponde a la asociación de facies típica de un lago carbonatado, compuesta por arenas, limos gruesos y finos, turba limosa ocasional y limos orgánicos negros. Según García-Prieto (2015), dicha asociación es característica de ambientes sedimentarios lacustres someros con un amplio desarrollo litoral. Estos sistemas presentan una alta productividad de carbonato, atribuida al crecimiento de prados de carofitas, y representan transiciones entre lagos someros, humedales y los sectores distales de abanicos aluviales, los cuales serían la fuente de los aportes detríticos finos.

Las facies de este tipo se identifican por elevados valores de Calcio (Ca) y Carbono Inorgánico Total (TIC). La formación de carbonatos en estos ambientes requiere condiciones de pH elevado y alta alcalinidad en las aguas, parámetros que dependen en gran medida de la composición del sustrato. Además, intervienen procesos externos como la actividad biológica de las carofitas. La formación de carbonatos lacustres está, por tanto, estrechamente vinculada a la hidrología y al clima (Alonso-Zarza, 2003). Este proceso de precipitación se vio favorecido por las condiciones de humedad durante el Eemiense y por la marcada estacionalidad de dicho periodo.

Sección B: Asociación de facies del lago clástico

Esta asociación se caracteriza por arenas, limos siliciclásticos gruesos y finos. En este ambiente se encuentran tres tipos de asociación de facies diferentes. Predomina el

lago clástico detrítico, el lago clástico profundo laminado y, en menor medida, el lago detrítico con influencia de potentes abanicos aluviales distales.

Sección C: Ambiente de turbera-humedal

Este ambiente corresponde a un sistema de turbera-humedal, caracterizado por la presencia de turba masiva, suelos encharcados o anegados, turba retrabajada, arenas bioclásticas y limos finos ricos en materia orgánica. Estos depósitos representan niveles muy bajos dentro del lago y son típicos de entornos extremadamente someros, donde predomina la acumulación de materia orgánica (TOC). En este contexto, la anoxia desempeña un papel crucial, favoreciendo la preservación de la materia orgánica.

La mayor concentración de materia orgánica se produce en áreas donde los aportes detríticos son muy limitados y donde predomina el desarrollo de vegetación litoral y palustre. En el caso de El Cañizar, un lago históricamente somero, no es adecuado vincular la anoxia del fondo con una estratificación de la columna de agua. Por lo tanto, los procesos responsables de la formación de las facies turbosas parecen estar relacionados principalmente con la distribución espacial de las áreas dominadas por vegetación palustre.

Las fases turbosas de El Cañizar probablemente se desarrollaron bajo láminas de agua muy someras pero permanentes, es decir, sin llegar a un estado completamente seco. Estas condiciones, caracterizadas por la ausencia de aportes detríticos significativos, permitieron el desarrollo de vegetación hidro-higrófitas, cuya descomposición, junto con la actividad microbiana reductora, facilitó la acumulación y preservación de materia orgánica en estos sedimentos.

A su vez, como se observa en la Fig. 5 se definieron siete unidades sedimentarias basándose en las distribuciones y asociaciones de facies. La unidad sedimentaria en la que se registra el periodo Eemiense del MIS5e, objeto de estudio de este TFM, es exclusivamente la unidad VII, que engloba desde el metro 74 al 56.

2.6 Síntesis palinológica de la secuencia de Villarquemado

En 2020 González-Sampérez y su equipo realizaron un estudio de la secuencia polínica de Villarquemado. Analizaron 400 muestras recolectadas en los 74 metros de

sondeo y de ellas, 39 muestras fueron descartadas para los análisis debido a que se trataban de niveles estériles, que conformaban cuatro intervalos temporales (ninguno de ellos afectando al presente estudio).

El análisis del registro polínico abarca un período aproximado de 130 mil años, fundamentándose en dataciones que van desde 131,3 ka BP (la muestra más antigua) hasta 1,6 ka BP (la más reciente). Los datos obtenidos evidencian una vegetación dominada principalmente por especies del género *Juniperus*, seguidas por las del género *Pinus*. Asimismo, se observan fluctuaciones en la representación de taxones característicos de estepas, vegetación leñosa (*Quercus perenne* y *semicaducifolio*), arbustos mediterráneos, mesófitos...así como especies acuáticas e higrófitas. Estas variaciones están estrechamente vinculadas a las dinámicas hidrológicas a lo largo del período estudiado.

En total se identificaron 15 zonas polínicas basadas en los cambios de los taxones y de las agrupaciones ecológicas. Dichas zonas se encontraban correlacionadas con unidades sedimentarias y límites cronológicos de los MIS, confirmando la consistencia de la estratigrafía de la secuencia VIL.

La notación que se le dio a las muestras que se encuentran comprendidas en la edad de este estudio es de VIL-15, abarcando desde el final del MIS 6 hasta la transición al MIS5e.

Dado que VIL-15 incluye las muestras contemporáneas a las estudiadas en este TFM, se va a realizar una síntesis sobre la información palinológica aportada en el estudio de González-Sampérez *et al.*, (2020), aunque en su trabajo original se puede observar la información desde el MIS6 hasta el Holoceno.

VIL-15 abarca desde hace 131,3 hasta hace 127 ka BP, es decir, el final del MIS 6 y la transición al MIS 5e. En esta sección los análisis palinológicos han determinados que los taxones leñosos (excluyendo a *Pinus*) llegaron a alcanzar valores de aproximadamente 40% y que fueron disminuyendo. *Juniperus* se trataba del componente arbóreo principal, aunque se encontraba acompañado de mesófitos como los son los *Quercus* entre otros. En cuanto a las herbáceas, Poaceae era muy importante alcanzando hasta el 50%. Se determinó que los taxones característicos de la estepa fluctuaban, incrementándose a medida que se acercaban al MIS 5e. Otro género conocido es el de

Artemisa, que era notable a pesar de que su presencia era baja y rara vez llegaba a ser más del 15%. Atendiendo a su vez a las especies acuáticas, estas y los helechos representaban una cantidad mínima que no llegaba al 1% y además exhibían cambios rápidos.

Toda esta información aporta una pincelada de cómo era la asociación vegetal de la zona de la laguna de Villarquemado apenas 2000 años antes del periodo objeto de estudio.

3 Hipótesis inicial y objetivos

Uno de los mejores indicadores de las variaciones climáticas que ha experimentado el entorno de la Península Ibérica durante los últimos 130 ka BP años es la temperatura de la superficie del mar de Alborán que muestra la alternancia de fases frías y cálidas desde el MIS 6 al MIS 1. Cuando la temperatura superficial del mar ascendió, se detectó una consecuente expansión de plantas leñosas (Fig 7). Sin embargo, este no es el caso en el registro de Villarquemado durante el MIS 5, donde una mayor temperatura tiene asociada una gran variabilidad que incluye fases intensas de reducción de las comunidades leñosas.

En el artículo de González-Sampéris *et al.*, (2020), se presenta un análisis multiproxy de la secuencia estudiada, que demuestra que uno de los factores más determinantes en la dinámica del paisaje durante el periodo interglaciar habría sido la continentalidad del clima.

En particular, este estudio se centra en el Eemiense, donde los resultados indican que la región de Villarquemado experimentaba un clima muy continental, caracterizado por períodos prolongados de sequías, déficit hídrico y temperaturas extremas, con veranos muy cálidos e inviernos fríos.

El objetivo de este trabajo es explorar el fenómeno del colapso forestal durante el Eemiense testando una hipótesis inicial que se despliega en dos alternativas no excluyentes y que no desestima otras posibilidades complementarias. Por una parte, se plantea que una mayor continentalidad, es decir, un balance hídrico negativo, más que una menor temperatura media anual, podría haber contribuido significativamente a una retracción forestal, lo cual, a su vez, habría reducido la actividad de incendios debido a la

disminución del combustible disponible. Por otro lado, se considera la posibilidad de que una actividad del fuego exacerbada que fuera originada por un pronunciado estiaje hubiese inducido la retracción forestal, posicionando al fuego como el factor limitante de la vegetación leñosa.

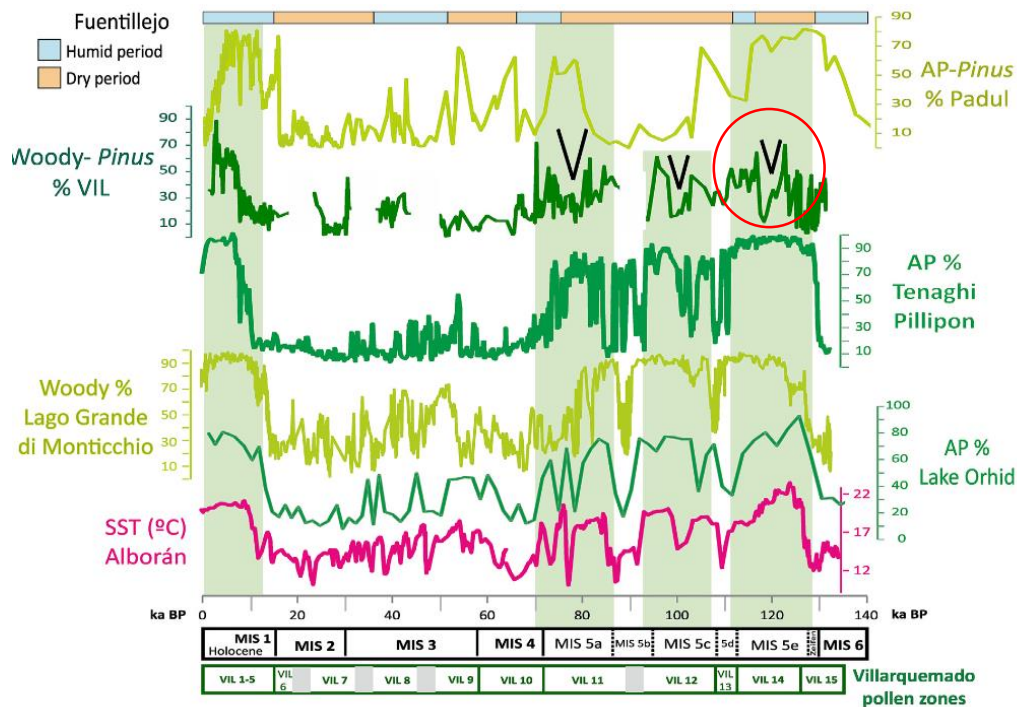


Figura 7. Gráfica comparativa que muestra la evolución de la biomasa leñosa en distintas secuencias palinológicas del sur de Europa y el Mediterráneo, junto con la identificación de periodos húmedos y secos en el registro de Fuentillejo (a techo) y la reconstrucción de la temperatura superficial del mar (SST) de Alborán (en la base) durante los últimos 140.000 años (ka BP). También aparecen indicados en la base de la figura los diferentes estadios isotópicos o MIS, junto a la cronología, y las zonas palinológicas identificadas en el registro de Villarquemado. Respecto a las curvas de las secuencias palinológicas, por orden descendente, los registros representados son: Padul, Villarquemado (VIL), Tenaghi Philippon, Lago Grande di Monticchio y Lago Ohrid. Esta figura es un extracto de otra completa publicada en González-Sampérez *et al.*, (2020)

4 Metodología

4.1 Trabajo bibliográfico.

Como se ha comentado anteriormente esta secuencia es excepcional debido a que constituye un registro paleoambiental de los últimos 130 ka BP años, siendo una de las pocas secuencias continentales disponibles para el sur de Europa.

Se recuperaron 74 metros de sedimento mediante el uso de un camión de geotécnica durante una campaña llevada a cabo en septiembre de 2005 por el equipo de

“Paleoambientes Cuaternarios” del IPE-CSIC (García-Prieto, 2015). La zona seleccionada para el sondeo se basó en varios criterios, especialmente en el potencial de relleno y el nivel topográfico más deprimido de la cuenca lacustre.

La secuencia ha sido estudiada durante más de una década y ha dado como fruto numerosas aportaciones al conocimiento ambiental de la zona (Moreno *et al.*, 2012; González-Sampériz *et al.*, 2013, 2020; Aranbarri *et al.*, 2014; Valero-Garcés *et al.*, 2019).

El registro recuperado ha permitido la elaboración de un modelo cronológico robusto (Valero-Garcés *et al.*, 2019), basado en una aproximación de datación multitécnica a partir de radiocarbono, luminiscencia ópticamente estimulada, luminiscencia infrarroja estimulada e intentos con isótopos de U/Th, paleomagnetismo y tefrocronología. Gracias a la aproximación bayesiana realizada combinando las diferentes dataciones obtenidas se dispone de un modelo de edad, que permite correlacionar la información obtenida en estudios anteriores con los datos aportados por el actual estudio de microcarbones.

En el marco de trabajo de este TFM, se realizó una visita a la Laguna del Cañizar de Villarquemado con el objetivo de conocer la zona y hacer un registro fotográfico (Fig.8)

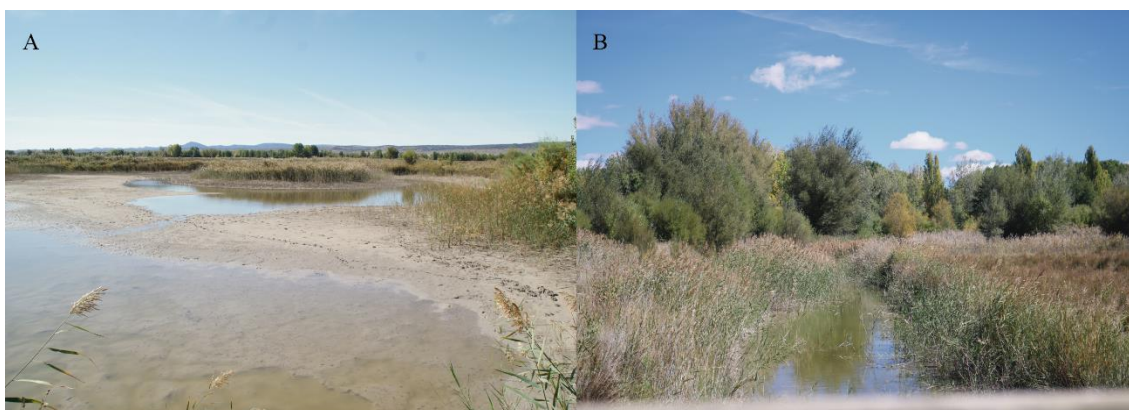


Figura 8. Imágenes de la Laguna del Cañizar de Villarquemado tomadas en 2024 en el marco de este TFM. En la imagen A se observa como la laguna está casi seca tras todo el verano. En la imagen B se observa vegetación en los alrededores de la zona con agua.

4.2 Trabajo de laboratorio

4.2.1 Apertura de testigos y toma de muestras

La primera etapa del proceso consistió en la reapertura de los testigos sedimentarios y la toma de muestras en las secciones correspondientes a la cronología objeto de estudio. Los testigos recuperados han estado siempre guardados en una cámara refrigerada a 4°C en las instalaciones del IPE-CSIC. Algunas imágenes de las secciones re-muestreadas y su estado de conservación se pueden visualizar en la Fig. 9. A pesar de su cuidadosa preservación, la antigüedad de los sondeos (casi 20 años), el tipo de material/facies de algunos niveles y los numerosos estudios realizados ya en el material de la secuencia sedimentaria durante este tiempo, han provocado un delicado estado de conservación del registro. Por este motivo, los testigos se re-abrieron de manera cuidadosa para lograr preservar la integridad de los sedimentos y evitar la pérdida de registro. En la selección de muestras concretas se consideraron niveles - secciones que presentaran datos del contenido en granos polen y esporas, de modo que pudiera realizarse una comparativa entre las partículas de carbón encontradas y la vegetación existente en cada momento.

El total de muestras de carbón estudiadas ha sido de 53 (tabla 1 de los anexos) y para su extracción se utilizaron herramientas adecuadas como espátulas metálicas, que, tras cada uso, en cada muestra, eran lavadas con agua destilada para evitar la contaminación cruzada entre capas. La cantidad de muestra que se extrajo por nivel fue de 2 cm³ aproximadamente. Una vez tomadas las muestras se colocaron en recipientes estériles y se etiquetaron de forma correcta para su posterior tratamiento y análisis.

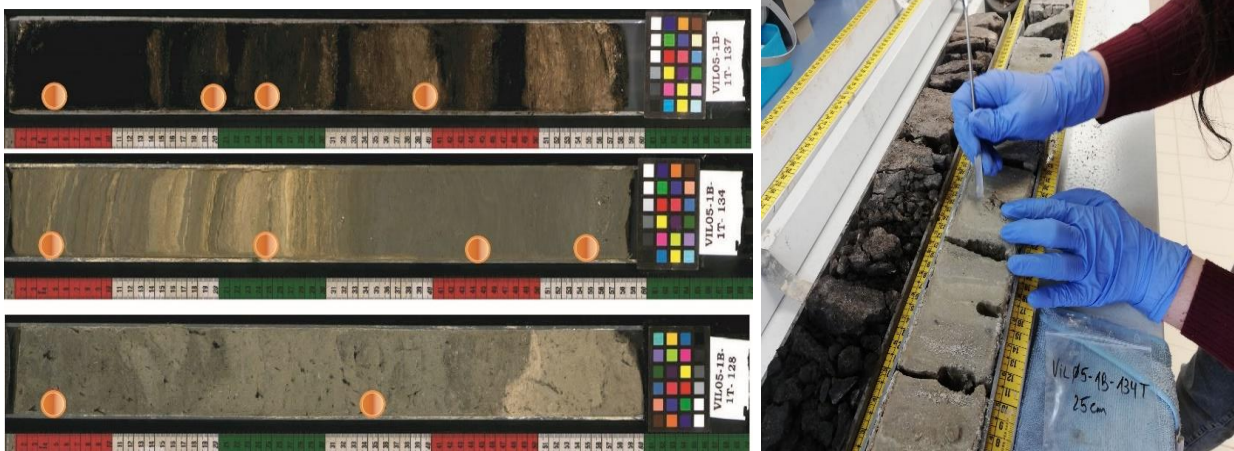


Figura 9. Ejemplos de diferentes secciones de la secuencia sedimentaria de Villarquemado. A la izquierda, imágenes de 3 secciones en el momento de su apertura inicial hace casi 20 años. A la derecha, estado actual del sondeo siendo muestreado para este trabajo.

4.2.2 Tratamiento de las muestras

Tratamiento con Agua Oxigenada (H₂O₂)

Las 53 muestras seleccionadas se someten a un tratamiento con agua oxigenada (H₂O₂) durante 24 horas. El objetivo de este tratamiento es el de oxidar la materia orgánica que se encuentra en la muestra resaltando significativamente en contraposición con el color negro que presenta el carbón. De esta forma, se facilita la identificación y cuantificación de las partículas de carbón. En ocasiones las muestras pueden reaccionar rápidamente de modo que se rebaja la concentración del agua oxigenada y así se minimiza la excesiva reactividad, además de asegurar que el tratamiento sea efectivo sin llegar a dañar ninguna de las partículas de carbón. Este caso se dio en las muestras de la sección 137. En la Fig. 10 se observan 9 muestras en H₂O₂.

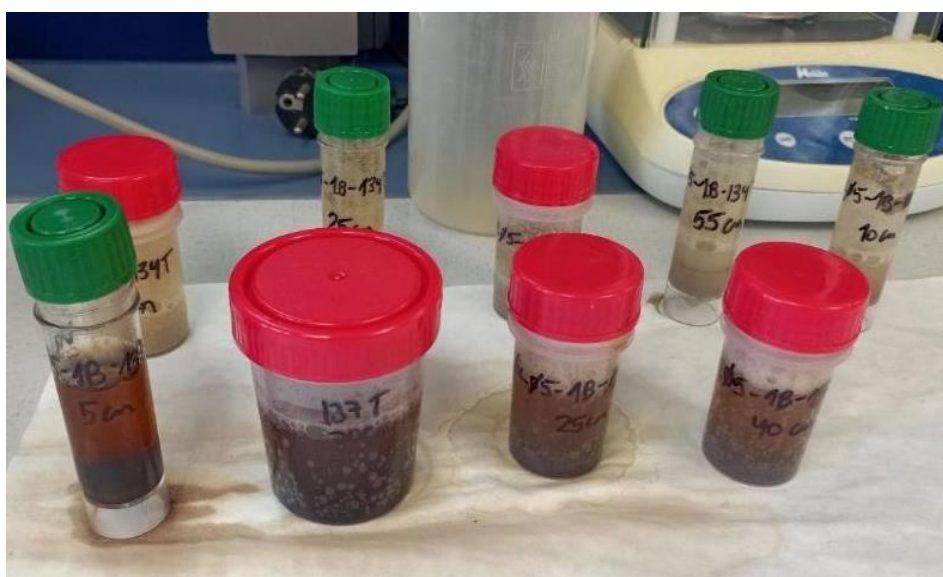


Figura 10. Imagen de 9 de las muestras analizadas en el registro sedimentario de la secuencia del Cañizar de Villarquemado para aislar el contenido en micro-carbones, en plena digestión con H₂O₂. Obsérvese la diferencia de color y tamaño, relacionada con el distinto contenido en materia orgánica de cada nivel.

Tratamiento adicional con Pirofosfato Sódico (Na₄P₂O₇)

El Na₄P₂O₇ ayuda a disgregar la materia orgánica más resistente permitiendo que la digestión con H₂O₂ sea más fácil. Como las muestras de la sección 137 presentaban

una cantidad de materia orgánica considerable y el H_2O_2 no era suficiente para poder oxidarla y disgregarla, se optó por utilizar un tratamiento extra con pirofosfato sódico al 40% durante 24 horas, y una vez este proceso hubiese acabado, volver a tratar esas muestras con H_2O_2 durante otras 24 horas. En la Fig. 11 se observa una de las muestras, que tuvo una reacción notable.



Figura 11. Imágenes de la muestra VIL05-1B-1T-137-0cm: en la de la izquierda, se observa cómo el bote está repleto de burbujas resultantes de la reacción; en la de la derecha, una vez terminada la reacción y lavada la muestra, se observa la gran cantidad de materia orgánica existente todavía

Tamizado con agua destilada

Una vez concluye el tratamiento químico, las muestras se someten a un proceso de lavado y tamizado, finalizando el proceso. El lavado se realiza con agua destilada, y se procede a tamizar empleando diferentes tamaños. La luz del tamiz responde a un criterio relacionado con la tafonomía de las partículas del carbón ya que el tamaño de las partículas está relacionado con variables del régimen de incendios (distancia, tamaño, intensidad) (Clark, 1988a, 1988b). Simultáneamente, hallazgos recientes que calibran las relaciones carbón-área de incendio, no parecen arrojar un resultado definitivo sobre el papel que juegan el tamaño en definir la proximidad de los eventos de fuego (Adolf *et al.*, 2018). Por tanto, en este trabajo, inicialmente, se utilizó un tamiz con una luz de malla de 100 micras, sin embargo, debido a que algunas muestras presentaban una fracción de partículas más pequeña, se optó por tamizar de nuevo con una luz de malla más fina, de 61 micras. Las muestras que fueron tamizadas con luz de malla de 100 micras son las presentes en la tabla 1.

Profundidad (cm)	Edad (ky BP)
6515	120190,6
6553	120787
6606	121607,20
6649	122274,40
6675	122671,20
6693	122942,90
6711	123213,80
6721	123363,90

Tabla 1. Se expone en la tabla las 8 muestras que fueron tratadas con un tamiz de luz de malla de 100 micras. Se presenta la profundidad y la edad de cada una de ellas. El resto fueron todas tamizadas con una luz de 64 micras

4.2.3 Recuento de microcarbones

Las muestras tamizadas se reservan en tubos de ensayo falcon de 15ml recuperándose la fracción de partículas de carbón suspendidas en agua destilada. De este modo, están listas para ser contadas bajo la lupa binocular o microscopio estereoscópico. Para ello se utilizaron lupas binoculares Nikon de luz transmitida y reflejada (SMZ745) con aumentos variables entre x100 y x500. Las lupas fueron facilitadas por el IPE-CSIC y por el departamento de geología de la Universidad de Zaragoza.

Las partículas de carbón contabilizadas (4124 en las 53 muestras) aportan información sobre la historia del fuego, pero de ellas no se puede deducir parámetros del régimen de incendios como intensidad, tamaño o frecuencia porque para ello, en lugar de muestreos aislados, hubiera sido necesario aislar partículas de carbón de manera continuada en el sedimento, centímetro a centímetro, garantizando que ningún evento potencial de fuego se perdía en el análisis (Higuera *et al.*, 2010). Sin embargo, con el conteo de carbones en las 53 muestras seleccionadas y el posterior trabajo numérico, sí podemos trazar anomalías de fuego y asociarlas a la respuesta de la vegetación registrada en el análisis palinológico previo (González-Sampériz *et al.*, 2020). La estrategia de muestreo seguida en este TFM ha sido adaptada para las condiciones de esfuerzo humano y tiempo disponibles.

Es importante destacar que las muestras de carbón no fueron recolectadas de manera continua, por lo que los datos deben interpretarse con esta consideración en mente. Además, tres muestras tomadas al inicio del estudio fueron descartadas: dos de ellas (correspondientes a las profundidades de 5951 y 7011 cm) debido a la ausencia de información palinológica, y una tercera muestra fue excluida por considerarse un dato anómalo, probablemente como resultado de una fractura de las partículas reales de carbón contenidas en la muestra. Esta última muestra registró un total de 2380 partículas y se encontraba a una profundidad de 6190 cm.

4.3 Trabajo de gabinete

En este apartado se detalla tanto el trabajo cartográfico como el de los análisis cuantitativos.

El mapa geológico se realizó empleando los datos disponibles en GEODE50, seleccionando la subcapa geo200k_litologías, descargadas de GDAL. Dicho mapa se realizó empleando el programa QGis 3.28.

La aproximación llevada a cabo en este TFM con el análisis de microcarbones en una selección de muestras discretas de una cronología determinada permite reconstruir la actividad del fuego y realizar una estimación de la biomasa quemada en cada muestra analizada.

Para reconstruir la actividad y las anomalías del fuego es necesario estandarizar las muestras en dos aspectos: promediar su representatividad por el tiempo y profundidad acumulada en cada cm, es decir, estimar su flujo (partículas/año cm²) y, para calcular anomalías de fuego, normalizar la serie temporal. Para lo primero, es necesario determinar la concentración de carbón (partículas de carbón / cm³). Esta concentración se estandariza según la tasa de sedimentación de cada muestra (años/cm)

El siguiente paso es la obtención de los Z scores utilizando la media y la desviación estándar de un periodo base definido y siguiendo la siguiente formula:

$$Z_i = (c_i - c(xka)) / s_c(xka)$$

$Z_i \rightarrow$ Z score de la i-ésima muestra,

$c_i \rightarrow$ valor original de la i-ésima muestra,

$c(xka) \rightarrow$ valor medio del carbón reescalado y transformado durante un periodo base de X años,

$S_c(xka) \rightarrow$ desviación estándar durante el mismo periodo.

Para poder capturar las posibles relaciones entre la vegetación y el fuego reduciendo el número de dimensiones en la colección de datos, se optó por aplicar técnicas multivariantes. Se testó un Análisis de Componentes Principales (PCA) pero los resultados mostraban una fuerte reducción del primer eje, probablemente debido a que el PCA es un método de ordenación lineal sin restricciones que se basa implícitamente en las distancias euclídeas entre las muestras. Por ello, el PCA no es adecuado para conjuntos de datos composicionales heterogéneos que contienen una gran cantidad de ceros, una situación común en datasets ecológicos donde muchas especies están ausentes en numerosas muestras. La longitud del eje 1, sin embargo, estaba próxima al doble de la desviación estándar de la matriz de correlación necesaria para realizar un PCA, lo que permite el uso de Curvas Principales (PrC).

En datasets ecológicos complejos, como el caso que se tiene de distribuciones de especies a lo largo de gradientes ambientales, las relaciones entre las variables pueden no ser lineales. Las PrC pueden describir mejor como varían las abundancias de especies en relación con factores ambientales complejos (De' ath 1999). Este análisis se trata de una extensión del PCA típico, y la ventaja que ofrece en este caso es que, a diferencia del PCA que busca identificar direcciones lineales en los datos, el PrC permite identificar patrones no lineales en conjuntos de datos multidimensionales.

Las gráficas se han planteado combinando el uso de R (paquete Rioja de Steve Juggins) y Excel en su versión 2016.

5 Resultados

Los valores de los z-score se entienden como anomalías de fuego que permiten estimar cuándo se daba una mayor actividad del fuego, lo que se traduce en un mayor número de incendios o una mayor entidad de estos (Fig. 12). El rango que cubren las anomalías tiene su mínimo en 0 y su máximo en 1,3.

En cuanto a la información preexistente del contenido palinológico del registro para el periodo de estudio, González-Sampértiz y colaboradores (2020) realizaron un

análisis en el que se mostraba que el paisaje vegetal estaría conformado esencialmente por *Juniperus* esencialmente, además de *Pinus*, *Quercus*, otros árboles caducifolios y arbustos mediterráneos. En cuanto al estrato herbáceo, dominan Poaceae, *Artemisia*, Cichoroideae y Chenopodiaceae (ver González-Sampériz *et al.*, 2020 para espectro polínico completo). Estos taxones, junto a algunos grupos representativos son los representados en la Fig. 12 para establecer relaciones con la información obtenida en este TFM sobre microcarbones y la incidencia del fuego en el paisaje del entorno de Villarquemado.

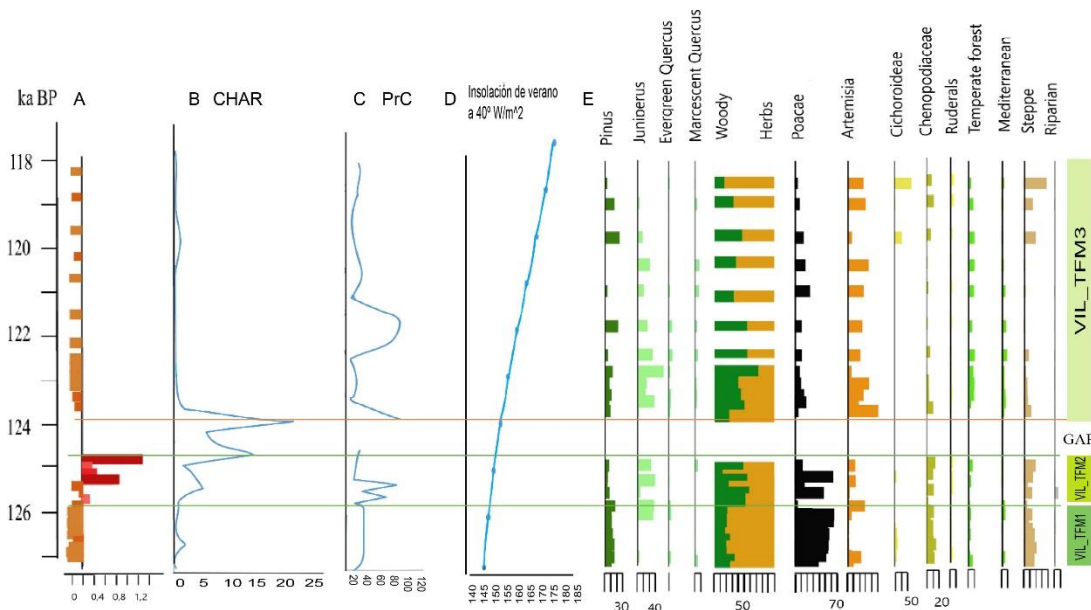


Figura 12. Gráfico que muestra la relación entre la actividad del fuego y la vegetación dominante en el intervalo de tiempo 127-118 ka BP en la secuencia de El Cañizar de Villarquemado. El eje Y indica el tiempo en kilo años (ka) BP, mientras que el eje X es específico para cada grupo de datos: de izquierda a derecha a) Z-SCORE del contenido en microcarbones; b) CHAR: número de partículas por muestra analizada; c) PrC: Curvas principales realizada con 30 muestras de polen d) comparación con la curva de insolación de verano a 40° N W/m² (Laskar *et al.*, 2004,) e) histograma polínico que representa valores porcentuales de una selección de taxones palinológicos de la secuencia de Villarquemado (datos extraídos de González-Sampériz *et al.*, 2020).

Zona VIL_TFM1 (127-125.5 ka BP)

Durante este primer intervalo, las anomalías de fuego fueron prácticamente inexistentes con valores de 0 a 0,2, en correspondencia con la baja intensidad de CHAR y la escasa variación en el PrC. Asimismo, la curva de insolación muestra los valores más

bajos registrados en el periodo analizado. Este segmento se caracteriza por una dominancia de especies herbáceas, que representan aproximadamente entre el 60% y el 80% de la vegetación, en comparación con las especies leñosas. Dentro del grupo dominante, el género más frecuente es *Poaceae*, mientras que en el grupo de las leñosas predominan los pinos, acompañados de manera esporádica por especies de *Quercus* (aproximadamente el 10%), exceptuando la etapa final en la que el género predominante es *Juniperus* (40%).

En el grupo de las herbáceas las *Chenopodiaceae* se mantienen constantes en todo este intervalo con una presencia de aproximadamente un 10%.

- Zona VIL_TFM2 (125.5 - 124.8 ka BP)

En este intervalo se presenta la mayor anomalía positiva de fuego además de observarse un incremento en la actividad de incendios que coincide temporalmente con un ligero incremento en la curva de la insolación estival (Fig. 12). Coetáneamente a estos, el PrC muestra una variación mayor que en el anterior intervalo, seguramente motivado por las perturbaciones causadas por el fuego, ya que estas hacen que haya modificaciones en la vegetación.

La vegetación exhibe un nivel de abundancia más equilibrado entre el componente leñoso y el herbáceo, con una relación es de aproximadamente 50-60% de herbáceas frente a 50-40% de leñosas.

En este momento el género dominante en las leñosas es *Juniperus*, siendo la cantidad de pinos menor a la del episodio anterior. Mientras, en el grupo de las herbáceas las gramíneas siguen dominando mientras que las *Chenopodiaceae* se mantienen constantes con una presencia de aproximadamente un 10% en todo este intervalo.

- Zona de *gap* (124.8 - 123.5 ka BP)

En esta área, identificada como *gap*, aunque se cuenta con evidencia de actividad del fuego debido al registro de carbones, la ausencia de datos palinológicos limita la posibilidad de interpretar el impacto de los incendios en la vegetación. Esto es debido a que las dos únicas muestras con polen de esta zona son la que marcan sus límites (Tabla 2), y no hay ninguna que registre la vegetación durante ese lapso de tiempo. No obstante, se plantea la hipótesis de que la respuesta de la vegetación habría sido similar a la

observada durante VIL_TFM2, dado que en la zona de *gap* los valores de CHAR llegan a alcanzar niveles más elevados.

Profundidad	Edad
6735,00	123573,20
6827,00	124848,80

Tabla 2. Únicas muestras seleccionadas para el periodo de *gap* las cuales se tratan de los límites del intervalo.

- Zona VIL_TFM3 (123.5 – 118 ka BP)

En este intervalo las anomalías vuelven a ser mínimas con valores que van desde 0 hasta 0,2, al igual que el CHAR, que de nuevo exhibe valores bajos. En cuanto a la variación en la PrC esta es notable alrededor de 122 ka BP, aunque esta vez claramente no está relacionado con la actividad del fuego a diferencia de la zona anterior (VIL_TFM2).

En cuanto a la vegetación, se registran fluctuaciones y en torno a hace 122,8 ka BP, se observa que llegan a dominar las leñosas (especialmente por los valores de *Juniperus*, y en menor medida *Pinus*). A partir de este momento comienza una apertura del paisaje gradual, con un componente herbáceo en el que Poaceae dejan de ser dominantes, tomando el relevo *Artemisia*. Por otro lado, Cichoridaceae registra un porcentaje máximo a techo del intervalo de estudio, igual que Chenopodiaceae, en menor medida y un poco antes.

6 Discusión

La dominancia de una vegetación herbácea resulta coherente con las condiciones ambientales predominantes entre 127 y 115,5 ka PB, ya que, como se ha mencionado previamente, una característica distintiva del entorno de Villarquemado es su elevado grado de continentalidad, que se traduce en un marcado déficit hídrico, promoviendo paisajes abiertos que, si bien permiten sostener una flora leñosa, no facilita la existencia de bosques densos, especialmente de quercíneas.

Leñosas durante VIL_TFM1

En el caso de las leñosas, el género *Pinus* (al cual se referirá como P. en adelante) probablemente estaría representado por tres especies: *P. pinaster*, *P. nigra* y *P. sylvestris*.

Pinus pinaster, también conocido como pino negral, resinero o ródano, es un componente esencial de la flora ibérica considerado uno de los árboles mejor adaptados a una variedad de ambientes (Blanco *et al.*, 1997). En las áreas mediterráneas predomina la subespecie *hamiltoni*, la cual tiene una distribución amplia en la PI y se ha propuesto que el sistema Ibérico podría haber sido su área de origen (Blanco *et al.*, 1997).

Desde un punto de vista ecológico, esta especie exhibe una notable plasticidad, siendo capaz de adaptarse tanto a regímenes de alta como de baja precipitación, así como a periodos prolongados de sequía (Blanco *et al.*, 1997).

La segunda especie, *Pinus nigra*, conocida como pino salgareño comúnmente, es considerada como una de las más antiguas de Europa, con registros que datan del Cretácico inferior. La mayor parte de sus bosques se localizan en ambientes submediterráneos fríos y continentales, favorecidos por un alto déficit hídrico y bajas temperaturas (Blanco *et al.*, 1997).

En relación con la última especie de pino presente en la zona de estudio, *Pinus sylvestris*, o pino albar, es capaz de desarrollarse en condiciones de alta continentalidad. El bioclima que más favorece su crecimiento es el frío, que puede variar desde húmedo hasta extremadamente frío. Adicionalmente, esta especie requiere climas soleados y altamente luminosos. El pino albar posee una notable capacidad de adaptación a diversas condiciones ecológicas (Blanco *et al.*, 1997).

En VIL_TFM1 se encuentra otro género de leñosas, *Quercus*. Su presencia es mínima, ya que estas plantas son más demandantes en cuanto a humedad y precipitaciones y necesitan que la tasa de evapotranspiración sea menor que la que se alcanza en Villarquemado (Rodríguez-Calcerrada *et al.*, 2005).

En relación con la dinámica del fuego, ninguno de estos taxones tiene una respuesta post-incendio clara, si bien *P. pinaster* es una especie germinadora no obligada, es decir, medra en ambientes abiertos germinando desde semilla bien cuando los incendios no son muy intensos o son, sobre todo, de matorral y no de copa. Además, *Q. faginea* es una especie rebrotadora que puede alcanzar éxito reproductivo rápido tras un incendio. La baja intensidad de la actividad del fuego durante este periodo podría haber

apoyado la presencia esporádica de estos taxa, que en ningún caso habrían dominado el paisaje.

Herbáceas durante VIL_TFM1

En contraposición a este grupo se encuentran las herbáceas, que son mucho más numerosas.

Entre las plantas herbáceas dominan las gramíneas, que poseen una notable capacidad de adaptación a una amplia variedad de hábitats, ya que se consideran cosmopolitas (Campbell, 2024). Los pastizales naturales, que se caracterizan típicamente por una topografía suavemente ondulada y, en ocasiones, por la presencia de animales en pastoreo (en este contexto este papel sería desarrollado por los animales que conformaban la megafauna del Pleistoceno) presentan condiciones edáficas especiales que favorecen el crecimiento de las gramíneas (Campbell, 2024). Según lo planteado por González-Sampérez *et al.* (2013), dentro del dominio de las gramíneas, una proporción significativa del espectro polínico podría corresponder a *Phragmites*. Estas plantas, al ser higrófitas, no forman parte de la vegetación típica de ambientes secos, a diferencia de otras especies de gramíneas. En el contexto ecológico de Villarquemado, durante el periodo analizado, esta distinción no parece tener un impacto significativo, dado que las perturbaciones aún no habían comenzado. Sin embargo, en fases posteriores, caracterizadas por registros de actividad del fuego, la menor exposición y susceptibilidad de *Phragmites* a estos episodios podría haber contribuido a un registro aparente de abundancia de Poaceae más elevado de lo que sería real. Este sesgo se origina en la dificultad para diferenciar entre especies de gramíneas a partir de su polen, una limitación metodológica que fundamenta esta hipótesis en observaciones de la vegetación actual en la Laguna del Cañizar.

Por otro lado, el género *Artemisia*, que forma parte de la familia de las Asteraceas, también presenta claras adaptaciones a la xericidad, tanto en extremos cálidos como fríos, y es parcialmente dominante del estrato herbáceo, aunque también puede serlo del leñoso. *Artemisia* fue disminuyendo en la primera mitad de VIL_TFM1 quizá debido al aumento de la insolación y de las condiciones de xericidad, a pesar de que este género ha desarrollado en gran medida adaptaciones que les permiten tolerar la sequía y el estrés hídrico (como se ha comentado anteriormente).

El Cañizar de Villarquemado durante VIL_TFM1

Al final de este periodo la imagen que tendría la zona de Villarquemado sería la de un paisaje semiabierto, con parches de vegetación leñosa representada por pinos, y con amplias áreas de vegetación herbácea, quedando cada vez menos leñosas y más herbáceas.

Leñosas durante VIL_TFM2

La creciente insolación de verano en la estepa que conformaría el entorno de Villarquemado en este periodo inicial del MIS5e, a pesar de la vegetación matorralizada y abierta, habría facilitado una intensificación de diferentes aspectos del régimen de incendios (intensidad, frecuencia, área quemada). Al comienzo de VIL_TFM2, las leñosas no se ven tan afectadas sino favorecidas por estos primeros episodios más intensos en diferentes dimensiones, pudiendo radicar en que esa actividad de fuego consumiera principalmente herbáceas que serían de pequeña entidad, permitiendo que siguiesen desarrollándose e incluso aumentando el número de leñosas. La disminución en estas herbáceas permitió que *Artemisia* volviese a ocupar nichos libres. Además, *Juniperus*, muy probablemente *J. thurifera* (sabina) aprovechó los nichos ecológicos libres y cobró gran protagonismo.

Juniperus thurifera, comúnmente conocido como sabina albar, sabina vera o sabina blanca, es un árbol que habita una amplia variedad de ecosistemas, siendo la PI su principal área de distribución natural. Su resistencia y amplitud ecológica son notables, ya que puede desarrollarse en altitudes que oscilan entre los 140 y los 3,000 metros sobre el nivel del mar, como se observa en Marruecos. Además, este árbol tolera excelentemente las significativas variaciones de temperatura que se producen a lo largo de las distintas estaciones. *Juniperus thurifera* es capaz de prosperar en condiciones extremas de continentalidad y en suelos de baja calidad, lo que resalta su gran versatilidad (Blanco *et al.*, 1997). Para soportar el estrés hídrico esta especie ha desarrollado un sistema radicular extenso y robusto, en contraste con su copa relativamente pequeña, lo que le permite optimizar la utilización de los escasos recursos hídricos disponibles.

Sin embargo, cabe destacar que las semillas de esta especie presentan una baja tasa de viabilidad y germinación, atribuida a las altas tasas de partenocarpia, aborto y

depredación (Montesinos Torres, 2007). Además, esta especie exhibe un marcado carácter heliófilo, es por ello que la estructura de los sabinares es abierta y clara, facilitando la penetración de la luz y permitiendo la colonización de otras plantas en los espacios vacíos entre los árboles.

Si las sabinas pasaron a tener una mayor relevancia en el paisaje bajo condiciones de mayor intensidad de incendios, no es porque la especie presente una estrategia post-incendio. La interpretación (como se ha comentado anteriormente) es que los eventos de fuego hacían arder sobre todo gramíneas (combustible fino) y es posible que, como se ha comentado, la sabina hubiera medrado con una mejor competencia por los recursos hídricos. Este es un fenómeno frecuente en otros biomas, que, con otro cortejo florístico, presentan una co-dominancia entre herbáceas y leñosas, como sucede en las sabanas (Gil-Romera *et al.*, 2010^a; 2010b, Keely y Pausas, 2022)

Juniperus communis, también conocido como enebro común, también podría estar presente en el paisaje vegetal del entorno del Cañizar de Villarquemado. Se trata de una especie con polinización de tipo anemófila, lo que le otorga la ventaja de que, en zonas afectadas por fuego, sus esporas pueden distanciarse y salvarse en zonas seguras. Sin embargo, esta especie presenta una baja producción de semillas viables, ya que algunos estudios han desvelado que en numerosos lugares de la PI presentan más del 65% de las semillas vacías o no viables García *et al.*, (2000). Esto no excluye que en zonas donde las condiciones son más favorables la producción de semillas viables sea mayor. En cualquier caso, y al no poder diferenciar el polen de *Juniperus*, un principio de parsimonia hace que se interprete que la dominancia de *Juniperus* en la zona se correspondería con *Juniperus thurifera*.

Todas estas características permitieron que *Juniperus* fuese el género de conífera principal ya que era más competente que *Pinus*. En este momento (alrededor de 125,6 ka PB) es cuando ambos géneros están en uno de sus máximos.

A partir de estos primeros incendios comienza un breve periodo, de unos 200-300 años aproximadamente, en el que hay una alternancia de paisaje más abierto y más cerrado basado en qué grupo de vegetación predomina.

Alrededor de 125,1 ka BP comienza a darse la mayor anomalía positiva de incendios, coincidiendo con un momento en el que el paisaje comenzaba a contener una mayor proporción de biomasa leñosa. El fenómeno de los incendios está asociado típicamente con períodos de elevadas temperaturas y condiciones de sequía, especialmente en áreas con una alta producción de biomasa leñosa (Boquera *et al.*, 2024), lo que explicaría que se tratase de la mayor anomalía de incendios registrada. El conjunto de todas estas características provocó que los incendios fuesen de mayor entidad, en términos de área, cobertura y/o temperatura, y que ocurriesen con mayor frecuencia.

Simultáneo a las anomalías positivas de fuego se observa como *Pinus* descende, lo que puede estar debido a la ausencia de una respuesta post-incendio clara por parte de las coníferas de la zona, de manera que una intensificación de la actividad del fuego de manera sostenida bajo condiciones de alta temperatura implicaría una nueva apertura del paisaje.

Es importante señalar que la vegetación no responde a un único evento, como un gran incendio, sino a un régimen de incendios. En otras palabras, las plantas no están adaptadas al fuego de manera aislada, sino a un régimen de incendios que sigue ciertos patrones específicos (Pyne, 2012). Son estos patrones los que han impulsado a las especies a desarrollar una variedad de mecanismos de defensa adaptativa (Pyne, 2012).

A pesar de que es bien conocido que el fuego es una perturbación que ha favorecido al género *Pinus* a lo largo del tiempo, ya que muchas de las especies han desarrollado adaptaciones a él, este no es el caso de las especies que probablemente habitaban en el entorno de la laguna del Cañizar de Villarquemado. En el caso de *Pinus pinaster* según Fernandes y Rigolot (2007), el rasgo principal que le confiere resistencia al fuego es su corteza, que es relativamente gruesa y se desarrolla rápidamente, siendo más gruesa en la base del tronco. A diferencia de las otras dos especies de *Pinus* presentes, durante la combustión, las capas externas de la corteza se exfolian, lo que ayuda a disipar el calor. Además, el follaje es menos susceptible a daños, permitiendo que la especie resista incendios de baja y media intensidad.

En términos de estrategias post-incendio, los individuos de esta especie suelen florecer entre los 7 y 8 años, aunque en poblaciones frecuentemente afectadas por incendios, pueden florecer a los 4 años. Los conos no seróticos suelen caer 2 o 3 años

después de madurar, mientras que los serótinicos pueden permanecer en la copa durante aproximadamente 40 años, con semillas viables hasta por 30 años. Estos conos comienzan a abrirse a temperaturas de alrededor de 50 °C, con lo que, sin ser germinadores obligados por el fuego, se ven favorecidos por las altas temperaturas y su morfología protege las semillas, las cuales no soportan el calor ni se benefician de altas temperaturas para su germinación. A pesar de estas adaptaciones, la variabilidad intraespecífica en los conos es muy alta, con un porcentaje de conos cerrados que oscila entre el 2% y el 97%, esto ha provocado que no se tome a la especie como serótinica.

Las comunidades de *Pinus pinaster* suelen regenerarse de manera más eficaz que, por ejemplo, las de *Pinus nigra* (Ordoñez, 2004).

Pinus nigra se considera una especie germinadora obligada y no posee mecanismos especiales de adaptación contra los incendios, debido a que su corteza no es demasiado gruesa y carece de capacidad de rebrote. Además, sus conos no son serótinicos, liberando las semillas a finales del invierno y primavera, quedando expuestas durante los periodos más fríos y calurosos. Además, el tamaño intermedio de sus semillas hace que muchas de ellas sean consumidas por roedores y aves. Es decir, el conjunto de factores como la rápida liberación de las semillas, su tamaño y la falta de mecanismos de protección frente a incendios hacen que *Pinus nigra* sea una de las especies con menor capacidad de regeneración tras un incendio del género *Pinus*. (Ordoñez, 2004).

Por otro lado, las semillas de *Pinus sylvestris* se dispersan de manera anemófila lo que permite que recorran grandes distancias, una ventaja en ambientes donde el fuego es común. La tasa de germinación de esta especie es alta, alcanzando el 85%, sin embargo, si esta especie se viese envuelta en un incendio, los choques térmicos no estimularían ni inhibirían la germinación. Es sabido que las semillas pueden perdurar si la temperatura no es muy alta o el tiempo de exposición no es prolongado, pero, incluso en la fase de plántula, esta especie no tiene capacidad de rebrote. Es por esto que, *Pinus sylvestris* tampoco se considera una especie adaptada específicamente a los incendios Blanco *et al.*, (1997).

De las tres especies de pino presentes en Villarquemado, la que menos afectada se vería por estos incendios sería seguramente *Pinus pinaster* siendo este el posible representante del género durante el intervalo en el que los incendios fueron registrados.

Este género presenta una tendencia clara hacia la disminución durante todos los episodios de fuego (VIL_TFM2), pero en contraposición, el género predominante *Juniperus* muestra una tendencia totalmente opuesta, manteniéndose constante casi durante todo el intervalo.

A pesar de que estas dos especies se tratan de plantas resistentes a estas condiciones de sequía, y temperaturas extremas, ninguna de ellas es considerada como planta pirófitas, ya que las semillas que conforman el banco seminal se encuentran en la superficie, que es una zona fácilmente afectada, y estas no logran sobrevivir a los incendios (García *et al.*, 1996) haciendo que se vean muy afectadas por estas perturbaciones.

Es en este momento donde se plantea la duda de que si el fuego afecta negativamente al género *Juniperus* ¿por qué este aumenta cuando estas perturbaciones aparecen y además se mantiene en el tiempo?

Es posible que al tener dispersión anemófila muchas de las semillas acabaran depositándose en zonas cercanas sin que se viesen afectadas por el fuego y así mantuviesen un número elevado de sabinas y enebros. Además, la estructura de los sabinares podría haber jugado un papel importante evitando que se propagaran los fuegos, a diferencia de los pinares, que acostumbran a tener una estructura más cerrada con copas que se tocan facilitando la propagación. A esto se le añade los nichos ecológicos que han quedado libres, de forma que aprovechan el espacio dejado por los pinos y *Quercus* durante VIL_TFM1, ya que al ser especies menos competitivas en estas circunstancias disminuyeron cuando empiezan los incendios.

Herbáceas durante VIL_TFM2

A medida que ocurren nuevos incendios, motivados por las características del ambiente y por la disponibilidad de biomasa, las gramíneas y Chenopodiaceae tienden a aumentar o, al menos, a mantener su abundancia. Este patrón se explica por la capacidad del fuego para abrir nuevos espacios, los cuales las herbáceas colonizan fácilmente debido a su notable habilidad para rebrotar y expandirse de manera eficiente, a diferencia de las especies leñosas, que además habrían empezado una notable contracción en este periodo entre 125,5 y 124,4 ka PB.

Es decir, además de que se den las condiciones climáticas de tener una temperatura alta, una sequía pronunciada y una gran cantidad de biomasa disponible, fue la presencia de una gran cobertura de herbáceas lo que favoreció que los primeros incendios fuesen de baja magnitud permitiendo que las leñosas ocuparan un mayor espacio hasta que se alcanzaron unas condiciones climáticas y de cobertura vegetal ca. 125,5 ka BP que facilitaron los grandes incendios.

En el caso del género *Artemisia*, a diferencia de las demás herbáceas, los incendios tienen un impacto negativo. Un aumento en la frecuencia de incendios puede favorecer el crecimiento de hierbas invasoras, que compiten por los recursos con los arbustos de *Artemisia*, además de destruir parte de su hábitat. La lenta recuperación de este género tras estas perturbaciones, que requiere un mínimo de 35 años, indica que estas plantas no están adaptadas a este tipo de episodios, lo que explicaría la disminución de *Artemisia* significativa en respuesta a los incendios (Baker, 2006).

Durante la fase de mayor anomalía de incendios es cuando se observa además una mayor variabilidad de las PrC, lo que apuntaría a una mayor tasa de cambio en los gradientes ambientales que definen las comunidades vegetales; o lo que es lo mismo, el ensamblado de comunidades tras las perturbaciones de los fuegos se renueva con frecuencia dando lugar a comunidades variables y noveles durante este periodo.

El Cañizar de Villarquemado durante VIL_TFM3

Tras este periodo de fuegos se observa que, durante la VIL_TFM3, los incendios no parecen tener relevancia, dado que no se registra la presencia de carbones. Según los datos obtenidos, las herbáceas constituyen el grupo dominante la mayor parte del tiempo, aunque en algunos episodios las protagonistas fueron las leñosas (aproximadamente hace 122,8 ka BP). En el grupo de las herbáceas el género más destacado dejó de ser Poaceae, siendo reemplazado por *Artemisia*, lo que refuerza la ausencia de incendios.

Estos resultados plantean una nueva cuestión, que implica darle una explicación a porqué las anomalías de fuego vuelven a ser negativas cuando la vegetación y el clima son aún favorables para estos eventos. Este periodo sigue siendo un interglaciar cálido, con temperaturas extremas, y la zona de estudio sigue poseyendo unas características

análogas a las de hace 125 ka PB, además de tener suficiente biomasa como para que las perturbaciones de fuego siguiesen dándose en la zona.

Esto puede explicarse con cómo actúan los regímenes de fuego en zonas ya afectadas. Se parte de que el área de Villarquemado había sido sacudida por incendios de gran tamaño y con una mínima recurrencia. La vegetación cambió su configuración y con ese cambio varió el potencial que posee la matriz de combustible vegetal para propagar incendios (McKenzie *et al.*, 2011).

A pesar de que las herbáceas ocupaban un área amplia, ésta estaba compartimentada por los pequeños sabinares. La estructura abierta de estos pudo influir en que los incendios disminuyesen ya que servían de barrera frente a los pequeños incendios que podían tener lugar (debido a que el combustible principal que consumían era fino). Esto se debe a que las plantas leñosas se tratan de combustibles gruesos que poseen menor inflamabilidad debido a que la relación superficie/volumen es menor, teniendo un menor nivel de ignitabilidad y consumabilidad que las herbáceas. (Gill y Zylstra, 2005; Jaureguiberry *et al.*, 2011).

Es decir, el combustible fino ocasionaría incendios de muy pequeña entidad que no serían problema para la vegetación leñosa, y a pesar de consumir parte de las herbáceas, muchas de ellas no se habrían visto afectadas debido a su localización entre los sabinares.

El papel de la megafauna y el género Homo.

Además, hay otros factores que se pueden tener en cuenta a la hora de modificar el ambiente y que podrían haber suavizado la acción del fuego, como por ejemplo la presencia de megafauna.

El Pleistoceno Medio es una época importante en la historia evolutiva de los mamíferos pues, a grandes rasgos supone la desaparición de las faunas «plio/pleistocenas» y su sustitución por las actuales (Cuenca-Bescos *et al.*, 2005). En la provincia de Teruel, se han encontrado restos de esta megafauna. Algunos ejemplos son el hallazgo en las terrazas del Río Martín de una defensa de *Paleoxodon* (Barco *et al.*, 2001), o los restos encontrados en la cueva en las inmediaciones de Obón hayándose una

asociación de megafauna compuesta por carnívoros y herbívoros. Esto indica qué tipo de animales habitaban la zona de Villarquemado a finales del Pleistoceno medio (Cuenca-Bescos *et al.*, 2005). Según esta autora y sus colaboradores, esta asociación presentaba varias familias de carnívoros: Familia Canidae (*Canis lupus*, *Vulpes Vulpes*), Familia Felidae (*Felis sylvestris*) y la Familia Hyaenidae. Por otro lado, los ungulados también se encontraban con varias familias de perisodáctilos como lo son la Familia Rhinocerotidae (*Stephanorhinus cf. Hemitoechus*), Familia Equidae (*Equus sp. Gr. E. mosbachesis*); y con familias de artiodáctilos, con ejemplares como *Cervus elaphus priscus*, o distintos tipos de bóvidos. Esta megafauna, compuesta por grandes herbívoros, habría jugado un papel crucial en la configuración del paisaje, ya que estos animales, al consumir y desarraigar plantas, contribuirían a mantener un mosaico de pastos y bosques abiertos (Montserrat-Martí y García, 2019; Wei *et al.*, 2021).

Además, la asociación de Obón es característica de espacios abiertos en los cuales vivirían, el rinoceronte, proboscídeos, el caballo, los bóvidos y los carnívoros, aunque también habría grupos aislados de árboles (los sabinares) y arbustos en los que se refugiarían *Erinaceus* y *Apodemus* (Cuenca-Bescós *et al.*, 2005). La escasez de microfauna ayuda a pensar que estos espacios serían abiertos y por lo tanto estos animales no podrían refugiarse (Cuenca-Bescós *et al.*, 2005). Esta asociación faunística podría extrapolarse a la que se encontraría en la zona de Villarquemado.

Además de la megafauna del Pleistoceno, la presencia de homínidos debe de ser tomada en cuenta ya que podrían haber contribuido aunque sea de manera superficial a la estructura del paisaje. La dispersión de los neandertales en la región podría haber alterado la composición vegetal, principalmente a través de la recolección y el uso del fuego el cual ya dominaban desde hace aproximadamente unos doscientos mil años (Rasco, 2014), aunque hay autores que proponen que ya lo utilizaban hace 400.000 años (García, 1991). Los neandertales habitaban en áreas cercanas, como es el caso del asentamiento "Las Callejuelas" ubicado en las inmediaciones de Monteagudo del Castillo, Teruel, a unos 37 kilómetros de distancia (aunque actualmente están separados por 55 km si se sigue la carretera) (Domingo *et al.*, 2017), pero su impacto en el ecosistema debió ser limitado (Pearce *et al.*, 2023; Wei *et al.*, 2021), debido a que sus grupos eran reducidos (Yazgin,

2022) y nómadas ya que no practicaban la agricultura ni la domesticación de animales, actividades que surgieron hace unos 7000 años en la región (Utrilla y Domingo, 2017)

En conclusión, la reducción de incendios en la zona de estudio podría haber estado directamente relacionada con la estructura de la vegetación, que, al estar organizada formando un paisaje semiabierto, disminuyó la acumulación de material combustible.

Además, la presencia y actividad de la megafauna contribuyó significativamente a mantener abierta la región, ya que estos animales ayudaron a controlar el crecimiento de vegetación baja y evitaron la formación de estratos densos de hojarasca seca. En conjunto, estos factores crearon un ambiente menos propenso a incendios, favoreciendo la estabilidad ecológica y la regeneración natural del ecosistema, aunque en ciertos momentos la asociación florística se vería renovada como se observa en la PrC.

El Eemiense como análogo al Holoceno

Dadas las características ambientales que se han descrito, el interglaciar Eemiense es ampliamente considerado un análogo adecuado para comprender los efectos ambientales del cambio climático contemporáneo (Pedraza, 2006). Durante el MIS 5e, al igual que en el presente interglaciar, se observó un notable aumento en el nivel del mar y un calentamiento significativo de la temperatura superficial de los océanos. Este periodo se caracterizó por condiciones de estabilidad y transición, particularmente hace aproximadamente entre 132 y 125 ka BP años, cuando el nivel del mar se mantuvo elevado. A pesar de una breve fase de regresión, el nivel marino volvió a aumentar rápidamente, primero con una subida de alrededor de 2 metros, seguida de un incremento adicional de entre 3 y 4 metros. Entre los ca.120 y 115 ka BP, el nivel del mar había experimentado un aumento total de entre 6 y 9 metros. Posteriormente, la transición del MIS 5e al MIS 5d estuvo marcada por un descenso en el nivel del mar, asociado al cambio de un clima cálido a uno más frío (Hearty *et al.*, 2007).

Durante el Eemiense, las temperaturas superaron los niveles actuales y el clima del continente se caracterizó por una humedad notablemente mayor (Muñoz García *et al.*, 2008). Este incremento térmico fue significativo, con Groenlandia experimentando aumentos de entre 5 y 10 °C en comparación con los valores actuales (Urieta, 2000). En su fase más cálida (126-120 ka), el Eemiense registró los máximos en cuanto al nivel del

mar y los mínimos en cuanto a la cantidad y extensión de hielo continental en todo el Cuaternario (Urieta, 2000). Este periodo, más cálido, coincide precisamente con las mayores anomalías de incendios en la región de Villarquemado. Además, en lo que respecta a esta zona, el estudio de Moreno *et al.*, (2012) destaca que los valores más altos de carbono orgánico total (TOC) se alcanzaron durante el Holoceno y el MIS 5, coincidiendo con los periodos de mayor desarrollo de humedales en toda la secuencia, caracterizados por la alternancia de turberas y lagos carbonatados de poca profundidad.

Al igual que en el Eemiense, el Holoceno experimenta, además del incremento de temperaturas, condiciones de sequía (más notable en algunas zonas como la orla mediterránea) que representan una amenaza significativa para las plantas. El rápido aumento térmico limita el tiempo disponible para que las especies vegetales se adapten, reduciendo su capacidad de supervivencia y restringiendo su distribución geográfica. Aunado a las temperaturas elevadas, la disminución de las precipitaciones, especialmente en la región mediterránea, agrava estas condiciones. Estos cambios climáticos bruscos y acelerados afectan directamente la productividad de las plantas, esenciales para el equilibrio de los ecosistemas. En el caso de Villarquemado, se ha caracterizado la vegetación predominante durante el Eemiense, la cual incluía áreas dominadas por herbáceas y arbustos del género *Artemisia*, junto con parches de vegetación leñosa de coníferas propia de los sabinares y pequeños grupos de pinos en zonas específicas.

Aunque esta composición vegetal parece contrastar con el carácter húmedo del Eemiense, esta particularidad se explica por el elevado grado de continentalización de la región, que confiere a su vegetación un carácter distintivo adaptado a condiciones locales.

Este estudio alerta que las condiciones actuales en Villarquemado son similares a las que prevalecían en el momento de los incendios históricos, lo que subraya que sigue siendo una zona vulnerable a estos episodios. Además, hoy en día se suma el riesgo de que este entorno alberga centros urbanos poblados.

Asimismo, el paisaje ya no presenta la estructura semiabierta que existía durante el Eemiense, pues ha sido modificado por intervenciones humanas en repetidas ocasiones.

Durante el Imperio Romano, los pinares fueron talados, y en el siglo XVIII el antiguo lago fue desecado para crear tierras de cultivo y reducir las zonas pantanosas afectadas por la malaria (Aranbarri *et al.*, 2014).

Estudios como este permiten conocer que el fuego impactó en Villarquemado cuando la vegetación era aún natural, lo que indica que la región tiene altas probabilidades de enfrentar nuevamente episodios de incendios, acentuados ahora por el impacto de la actividad humana.

Estudios futuros

Los estudios sobre la dinámica de la vegetación en relación con los eventos de fuego y las variaciones climáticas durante periodos prehistóricos aún presentan importantes desafíos y áreas por explorar. Aunque se ha logrado una correlación visual entre series temporales de la vegetación y de la incidencia de incendios, un paso clave hacia un entendimiento más preciso radica en la cuantificación de estas respuestas.

En este sentido, sería fundamental desarrollar metodologías que permitan realizar correlaciones cruzadas detalladas, las cuales no solo relacionen los incendios con la vegetación en términos generales, sino que también identifiquen eventos específicos de fuego y su impacto directo sobre las comunidades vegetales en distintos momentos temporales.

Para llevar a cabo este tipo de análisis, sería necesario contar con una mayor cantidad de muestras de polen y otros indicadores biológicos de la vegetación que permitan un registro más detallado y preciso de las fluctuaciones ecológicas en respuesta a las perturbaciones causadas por el fuego.

Por otro lado, otro ámbito que requiere de un mayor esfuerzo investigativo es la cuantificación de la dinámica climática, en este caso, sobre el Eemiense. Aunque se han hecho avances en la reconstrucción de las condiciones climáticas pasadas a través de proxies como los registros de isótopos y el análisis de sedimentos, es necesario un enfoque más robusto y multidisciplinar para comprender mejor cómo las variaciones climáticas a diferentes escalas temporales han influido sobre la respuesta de la vegetación y, particularmente, sobre su capacidad para regenerarse tras incendios. Una caracterización más precisa del clima, considerando no solo las temperaturas y precipitaciones, sino también los patrones de variabilidad climática a nivel global y regional, permitiría

desentrañar las complejas interacciones entre estos factores y la vegetación, y mejoraría nuestra comprensión de los mecanismos de resiliencia ecológica frente al fuego.

Finalmente, los estudios sobre la interacción entre los seres humanos y el entorno durante estos períodos prehistóricos también juegan un papel crucial en la reconstrucción de estos procesos. En particular, sería de vital importancia el realizar estudios más completos sobre los patrones de ocupación humana, tanto de *Homo sapiens* como de otras especies como los neandertales.

Estos estudios permitirían explorar más a fondo el papel que los homínidos desempeñaron en la alteración de los ecosistemas, ya sea a través de la práctica del fuego, la recolección de plantas, o incluso mediante su impacto directo sobre la modificación del paisaje. Analizar estos factores en conjunto podría ofrecer una visión más integral de las dinámicas ecológicas y cómo las actividades humanas, en sus diversas formas, pudieron haber influido sobre los procesos ecológicos de regeneración vegetal y sobre la respuesta ante perturbaciones naturales como el fuego.

En resumen, los estudios futuros deben centrarse en la mejora de las técnicas de cuantificación de la respuesta de la vegetación ante el fuego, la profundización en la comprensión de la dinámica climática y la expansión de las investigaciones sobre los patrones de ocupación humana y su impacto sobre los ecosistemas. Sólo a través de un enfoque interdisciplinario y más detallado se puede desentrañar las complejas interacciones entre el clima, el fuego, la vegetación y la especie humana en los períodos prehistóricos, avanzando así en la comprensión de los mecanismos ecológicos subyacentes.

7 Conclusión

Se presenta una serie temporal de actividad de incendios para el periodo de 127 a 118 ka BP, basada en 30 muestras de polen y 53 muestras de carbón obtenidas del registro sedimentario lacustre de la Laguna del Cañizar de Villarquemado. Este archivo corresponde a un registro sedimentario que muestra una alternancia de facies lacustres y turbosas, con evidentes fases de desecación.

Hace aproximadamente 125ka años, el paisaje de Villarquemado tenía características propias de un paisaje abierto tipo mosaico, con temperaturas extremas y marcada aridez, dominado por formaciones de coníferas (sabinares) con alternancia de

matorrales y formaciones de estepa. Esta variabilidad coincide con el periodo de mayor actividad de incendios en toda la secuencia, lo cual pudo favorecer la presencia de especies más adaptadas a condiciones continentales, como las sabinas y los enebros.

Las condiciones climáticas, atípicas para el Eemiense si se compara con otros registros de esta edad estudiados en otras localizaciones, de intensa continentalidad de aquel periodo, caracterizadas por sequía y abundante biomasa antes de que ocurriesen los grandes incendios, facilitaron que se diese la ocurrencia de incendios, que desempeñaron un papel clave en la configuración del paisaje. En cierto modo, este trabajo podría confirmar que aproximadamente hace 125 ka BP el colapso forestal sí pudo estar ocasionado por los grandes incendios que ocurrían en Villarquemado, pero para el resto del periodo, se debería haber tratado de un conjunto de factores entre los que no se puede obviar el posible papel de la megafauna.

Este estudio confirma que, en Villarquemado, una región caracterizada por la ausencia de vegetación adaptada al fuego, el riesgo de incendios en algunos momentos, como durante el Eemiense, ha sido elevado y continúa siendo significativo en la actualidad. Este riesgo se ha visto acentuado por el incremento de la actividad humana, que ha contribuido a un aumento en la frecuencia de estos eventos. Por tanto, resulta fundamental reconocer esta condición y, con base en el conocimiento de la historia ecológica de la zona, implementar estrategias efectivas para mitigar y prevenir futuros episodios de incendios.

8 Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, cuyo apoyo incondicional ha sido fundamental en cada decisión que he tomado. Gracias por estar siempre a mi lado, dándome el ánimo y la confianza necesarios para seguir adelante. A ti, Josué, gracias por tu paciencia y por ofrecerme tu apoyo. No puedo dejar de mencionar a Vanessa, María e Isabel, quienes durante este tiempo me han animado y escuchado cuando más lo necesitaba. Su compañía y palabras de aliento han hecho que esta etapa sea mucho más bonita. Gracias a todos de corazón.

En cuanto a los agradecimientos fuera del ámbito personal, este TFM no hubiera sido posible sin el apoyo, colaboración y trabajo brindado por el personal técnico de

apoyo del Laboratorio de Paleoindicadores Biológicos del IPE-CSIC, así como de buena parte del grupo de Paleoambientes Cuaternarios, ya que diferentes personas han facilitado el traslado de las secciones del registro de El Cañizar de Villarquemado, su muestreo y tratamiento físico-químico de aislamiento de microcarbones.

9 Bibliografía

- Adolf, C., Doyon, F., Klimmek, F., y Tinner, W. (2018): Validating a continental European charcoal calibration dataset. *The Holocene*, 28(10): 1642-1652
- Alonso-Zarza, A.M. (2003a): Palaeoenvironmental significance of palustrine carbonates and calcretes in the geological record. *Earth-Science Reviews*, 60 (3–4): 261–298.
- Alonso-Zarza, A.M. (2003b): Palaeoenvironmental significance of palustrine carbonates and calcretes in the geological record. *Earth-Science Reviews*, 60 (3–4): 261–298.
- Álvarez-Lires, M. M., Arias-Correa, A., Lorenzo-Rial, M. A., y Serrallé-Marzoa, F. (2017): Educación para la sustentabilidad: cambio global y acidificación Oceánica. *Formación universitaria*, 10(2): 89-102.
- Andrade, C., Contente, J., y Santos, J. A. (2021): Climate change projections of aridity conditions in the Iberian Peninsula. *Water*, 13(15): 2035.
- Aranbarri, J., González-Sampériz, P., Valero-Garcés, B., Moreno, A., Gil-Romera, G., Sevilla-Callejo, M., García-Prieto, E., Di Rita, F., Mata, M. P., Morellón, M., Magri, D., Rodríguez-Lázaro, J., y Carrión, J. S. (2014): Rapid climatic changes and resilient vegetation during the Lateglacial and Holocene in a continental region of south-western Europe. *Global and Planetary Change*, 114: 50-65.
- Aravena, D. (2024): Jardines de Biodiversidad: Representaciones Atmosféricas y Diseño de Sistemas de Restauración y Conservación de Los Refugios Climáticos de Biodiversidad en el Valle de Vodudahue. Máster tesis, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Baker, P. A., y Fritz, S. C. (2015): Nature and causes of Quaternary climate variation of tropical South America. *Quaternary Science Reviews*, 124: 31-47
- Baker, W. L. (2006): Fire and restoration of sagebrush ecosystems. *Wildlife Society Bulletin*, 34(1): 177-185.

- Barco, J. L., Cuenca Bescós, G., Gutierrez Santolalla, F., Rubio, C., y Rubio, C. J. (2001): Restos de elefante (Proboscidea, Mammalia) en el Pleistoceno de Obón (Cordillera Ibérica, Teruel). *Geogaceta*, (30): 231-234.
- Blanco, B. C., González, M. Á. C., Tenorio, M. C., Bombín, R. E., Anton, M. G., Fuster, M. G., Manzanaque, A. G., Manzanaque, F. G., Moreno-Saiz, J. C., Juaristi, C. M., Pajares, P. R. y Ollero, H. S. (1998): Los bosques ibéricos: una interpretación geobotánica. Planeta. Barcelona
- Bond, W. J., y Keeley, J. E. (2005): Fire as a global ‘herbivore’: the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in ecology & evolution*, 20(7): 387-394.
- Boquera, M. L. E., Jiménez, O. C., y Salas, M. D. U. (2024): Incendios en Michoacán a partir de series MODIS (2015-2022) y su relación con el clima. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15(84): 54-80.
- Burjachs, F., Giralt, S., Riera, S., Roca, J. R., y Julià, R. (1996): Evolución paleoclimática durante el último ciclo glacial en la vertiente mediterránea de la Península Ibérica. *Notes de Geografia Física*, 25: 21-39.
- Campbell, C. S. (en línea). Poaceae. *Encyclopedia Britannica*, 2024 (fecha de consulta: 19/09/2024). Disponible en: < <https://www.britannica.com/plant/Poaceae> >
- Carvajal, Y. (2023): Fuegos y biodiversidad. *Cuadernos Médico Sociales*, 63(1): 45-46.
- Casas-Sainz, A. M., y Cortés-Gracia, A. L. (2002): Cenozoic landscape development within the central Iberian Chain, Spain. *Geomorphology*, 44(1-2): 19-46.
- Casas-Sainz, A. M., y De Vicente, G. (2009): On the tectonic origin of Iberian topography. *Tectonophysics*, 474(1-2): 214-235.
- Castellnou, M., Nebot, E., y Miralles, M. (2007): El papel del fuego en la gestión del paisaje. En: 4th International Wildland Fire Conference, Seville, Spain. 13-17
- Clark, J.S., (1988a): Particle motion and the theory of charcoal analysis: Source area, transport, deposition, and sampling. *Quaternary Research* 30: 67–80.
- Clark, J.S., (1988b): Particle motion and the theory of charcoal analysis: Source area, transport, deposition, and sampling. *Quaternary Research* 30: 67–80.

- Comes, H. P., y Kadereit, J. W. (1998): The effect of Quaternary climatic changes on plant distribution and evolution. *Trends in plant science*, 3(11): 432-438.
- Corella, J. P., y Martín-Puertas, C. (2022): Métodos de datación en sedimentos cuaternarios con laminación anual: Ejemplos de la Península Ibérica. *Cuaternario y Geomorfología*, 36(3-4): 73-86.
- Cortés, A.L. y Casas, A.M. (2000): *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 13: 445-470.
- Cuenca-Bescós, G., Alberdi, M. T., Canudo, J. I., García, N., Gordillo, J. C., Van der Made, J., Ramón, D., y Rubio, C. J. (2005): Los mamíferos del Pleistoceno Medio de la Cueva de los Huesos de Obón (Parque Cultural del Río Martín, Teruel). *Geogaceta*, 38: 119-122.
- Dahl-Jensen, D., Albert, M.R., Aldahan, A., Azuma, N., Balslev-Clausen, D., Baumgartner, M., y Berggren, A.-M. (2013): Eemian interglacial reconstructed from a Greenland folded ice core. *Nature*, 493 (7433): 489–494
- De Pedraza, Javier. (2006): Tendencias futuras del clima actual: Una perspectiva desde el análisis de riesgos y de las variaciones glaciares (Future tendency of climate: The perspective from the risk analysis and from glacial variations). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección Geología*. 100: 95-114.
- De'ath, G. (1999): Principal Curves: A New Technique for Indirect and Direct Gradient Analysis. *Ecology* 80: 2237–2253
- Del Valle, J. (1993): El régimen pluviométrico medio de la cuenca del río Jiloca. *Geographicalia*, 30: 145-154.
- Del Valle, J. (2017): El régimen pluviométrico de la Cuenca del Jiloca. *Geographicalia*, (30): 145–154.
- Delgado, J. F. I., y Romero, D. C. (2007): Cambio climático: glaciaciones y calentamiento global. (ed Jorge Tadeo Lozano), 289 p
- Domingo, R., Peña-Monné, J. L., de Torres, T., Ortiz, J. E., y Utrilla, P. (2017): Neanderthal highlanders: Las Callejuelas (Monteagudo del Castillo, Teruel, Spain), a high-altitude site occupied during MIS 5. *Quaternary International*, 435: 129-143.

- Fernandes, P. M., y Rigolot, E. (2007): The fire ecology and management of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Forest Ecology and Management*, 241(1-3): 1-13.
- Ganopolski, A. (2024): Toward generalized Milankovitch theory (GMT). *Climate of the Past*, 20(1): 151-185.
- García, D. G., Zamora, R., Correa, J. A. H., y Reyes, J. M. G. (1996): Ecología reproductiva y regeneración del matorral de alta montaña de Sierra Nevada: capacidad de respuesta a las perturbaciones. En 1ª Conferencia internacional: Sierra Nevada, conservación y desarrollo sostenible (II). Universidad de Granada.
- García, D., Zamora, R., Gómez, J. M., Jordano, P., y Hódar, J. A. (2000): Geographical variation in seed production, predation and abortion in *Juniperus communis* throughout its range in Europe. *Journal of Ecology*, 88(3): 435-446.
- Garcia, E. B. (1991): Aportaciones de la antracología al estudio del paisaje vegetal y su evolución en el Cuaternario reciente, en la costa mediterránea del País Valenciano y Andalucía (18.000-3.000 BP). Tesis doctoral, Universitat de Valencia, 316 p.
- García, J. L. O. (2004): Análisis y modelización del reclutamiento de *Pinus nigra* en zonas afectadas por grandes incendios. Tesis doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona.
- García-Prieto, E. (2015): Dinámica paleoambiental durante los últimos 135.000 años en el Alto Jiloca: el registro lacustre de El Cañizar. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, 359 p.
- Gill, A. M., y Zylstra, P. (2005): Flammability of Australian forests. *Australian Forestry*, 68(2): 87–93.
- Gillespie, R. G., Lim, J. Y., y Rominger, A. J. (2020): The theory of evolutionary biogeography. *The theory of evolution*: 319-337
- Gil-Romera, G., Carrión, J. S., Pausas, J. G., Sevilla-Callejo, M., Lamb, H. F., Fernández, S., y Burjachs, F. (2010a): Holocene fire activity and vegetation response in South-Eastern Iberia. *Quaternary Science Reviews*, 29(9-10): 1082-1092.

- Gil-Romera, G., Carrión, J. S., Pausas, J. G., Sevilla-Callejo, M., Lamb, H. F., Fernández, S., y Burjachs, F. (2010b): Holocene fire activity and vegetation response in South-Eastern Iberia. *Quaternary Science Reviews*, 29(9-10): 1082-1092.
- González-Sampérez, P., García-Prieto, E., Aranbarri, J., Valero-Garcés, B. L., Moreno, A., Gil-Romera, G., Sevilla-Callejo, M., Santos, L., Morellón, M., Mata, P., Andrade, A., y Carrión, J. S. (2013): Reconstrucción paleoambiental del último ciclo glacial-interglacial en la Iberia continental: La secuencia del Cañizar de Villarquemado (Teruel). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 39(1): 49-76.
- González-Sampérez, P., Gil-Romera, G., García-Prieto, E., Aranbarri, J., Moreno, A., Morellón, M., Sevilla-Callejo, M., Leunda, M., Santos, L., Franco-Múgica, F., Andrade, A., Carrión, J. S., y Valero-Garcés, B. L. (2020): Strong continentality and effective moisture drove unforeseen vegetation dynamics since the last interglacial at inland Mediterranean areas: The Villarquemado sequence in NE Iberia. *Quaternary Science Reviews*, 242: 106425.
- Gracia, A. C., y Sainz, A. C. (2000): ¿tiene el sistema de fosas de Teruel origen extensional? *Revista Sociedad Geológica de España*, 13, (3-4).
- Gracia, F. J., Gutiérrez, F., y Gutiérrez, M. (2003): The Jiloca karst polje-tectonic graben (Iberian range, NE Spain). *Geomorphology*, 52(3-4): 215-231.
- Harting, P. (1875): Le système Émien. *Archives Néerlandaises Sciences Exactes et Naturelles de la Société Hollandaise des Sciences (Harlem)*, 10: 443–454.
- Hearty, P. J., Hollin, J. T., Neumann, A. C., O’Leary, M. J., y McCulloch, M. (2007): Global sea-level fluctuations during the Last Interglaciation (MIS 5e). *Quaternary Science Reviews*, 26(17-18): 2090-2112.
- Helmens, K. F. (2014): The Last Interglacial–Glacial cycle (MIS 5–2) re-examined based on long proxy records from central and northern Europe. *Quaternary Science Reviews*, 86: 115-143.
- Higuera, P. E., Gavin, D. G., Bartlein, P. J., y Hallett, D. J. (2010): Peak detection in sediment–charcoal records: impacts of alternative data analysis methods on fire-history interpretations. *International Journal of Wildland Fire*, 19(8): 996-1014.

- Jaureguiberry P., Bertone G. y Díaz S. (2011): Device for the standard measurement of shoot flammability in the field: flammability measurement in the field. *Austral Ecol.* 36: 821–829.
- Kunst, C., Bravo, S., Moscovich, F., Herrera, J., Godoy, J., y Vélez, S. (2003): Fecha de aplicación de fuego y diversidad de herbáceas en una sabana de *Elionurus muticus* (Spreng) O. Kuntze. *Revista chilena de historia natural*, 76(1): 105-115.
- Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., Gastineau, M., Correia, A. C., y Levrard, B. (2004): A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astronomy & Astrophysics*, 428(1): 261-285.
- López, P. C., y Rubio, J. C.(2004): La antigua laguna del Cañizar: descripción y propuesta. *Naturaleza aragonesa: revista de la Sociedad de Amigos del Museo Paleontológico de la Universidad de Zaragoza*, 12: 24-31.
- Mataix-Solera, J., y Guerrero, C. (2007): Efectos de los incendios forestales en las propiedades edáficas. *Incendios forestales, suelos y erosión hídrica*: 5-40.
- McKenzie D., Miller C. y Falk D. A. eds (2011) *The landscape ecology of fire*. Springer, New York, USA, 551 p
- Milner, A. M., Roucoux, K. H., Collier, R. E. L., Müller, U. C., Pross, J., y Tzedakis, P. C. (2016): Vegetation responses to abrupt climatic changes during the last interglacial complex (marine isotope stage 5) at Tenaghi Philippon, NE Greece. *Quaternary Science Reviews*, 154: 169-181.
- Montserrat-Martí, G., y García, D. G. (2019): Variación de los dominios forestal y herbáceo en el paisaje vegetal de la Península Ibérica en los últimos 20.000 años. Importancia del efecto de los grandes herbívoros sobre la vegetación. *Cuadernos de investigación geográfica* 45(1): 87-121.
- Moreno, A., González-Sampériz, P., Morellón, M., Valero-Garcés, B.L. y Fletcher, W. J., (2012): Northern Iberian abrupt climate change dynamics during the last glacial cycle: A view from lacustrine sediments. *Quaternary Science Reviews*, 36: 139-153.
- Muñoz-García, M. B., Martín-Chivelet, J., Rossi, C., y Ford, D. C. (2008): Comparación del clima interglacial eemiense y holoceno en el norte de España a

- partir de los indicadores paleoclimáticos de estalagmitas de la Cueva del Cobre (Palencia). *Revista geotemas*, 10: 1459-1462
- Ninyerola, M., i Fernández, X. P., y Roure, J. M. (2005): Atlas climático digital de la Península Ibérica: metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica.
 - Olivé, A., Hernández, A. y Portero, J. M. (1983): Mapa geológico de España, E. 1: 50.000, hoja nº 516 (Monreal del Campo) y memoria. IGME, Madrid, 62 p.
 - Olmos, S. R., Espinosa, C. G., Izquierdo, C. V., Zavala, A. T., y Cruz, F. J. G. (2011): Cambio Climático Global a través del tiempo geológico. *Investigación Universitaria Multidisciplinaria: Revista de Investigación de la Universidad Simón Bolívar*, 10: 12.
 - Oppo, D. W., McManus, J. F., y Cullen, J. L. (2006): Evolution and demise of the Last Interglacial warmth in the subpolar North Atlantic. *Quaternary Science Reviews*, 25(23-24): 3268-3277.
 - Ordóñez García, J. L. (2004): Análisis y modelización del reclutamiento de *Pinus nigra* en zonas afectadas por grandes incendios.
 - Pausas, J. G. (2020): Incendios forestales. Los libros de la Catarata, 124 p.
 - Pearce, E. A., Mazier, F., Normand, S., Fyfe, R., Andrieu, V., Bakels, C., Balwierz, Z., Bińka, K., Boreham, S., Borisova, O. K., Brostrom, A., de Beaulieu, J.-L., Gao, C., González-Sampériz, P., Granoszewski, W., Hrynowiecka, A., Kołaczek, P., Kuneš, P., Magri, D., Malkiewicz, M., Mighall, T., Milner, A. M., Möller, P., Nita, M., Noryśkiewicz, B., Pidek, I. A., Reille, M., Robertsson, A.-M., Salonen, J. S., Schläfli, P., Schokker, J., Scussolini, P., Šeirienė, V., Strahl, J., Urban, B., Winter, H., and Svenning, J.-C. (2024): Substantial light woodland and open vegetation characterized the temperate forest biome before *Homo sapiens*. *Revista de Ecología y Paleoambiente*, 39: 22-45
 - Pereira, S. C., Carvalho, D., y Rocha, A. (2021): Temperature and precipitation extremes over the iberian peninsula under climate change scenarios: A review. *Climate*, 9(9): 139.
 - Pueyo Morer, E. L., Egli, R., Camarero, J. J., Sánchez-Moreno, E., Calvín, P., Scholger, R., Mata Campo, M. P., Beamud, E., García Gil, A., y Compaired, F.

- (2019): Registro arqueo/geomagnético en árboles afectados por incendios y rayos. Magiber XI - Livro de Resumos: 107-109
- Pyne, S. J. (2013): Fire: nature and culture. Reaktion Books, Chicago, 207 p.
 - Ramos R, M. P. (2010): Manejo de fuego. Editorial Félix Varela, ed licenciada Deborah Prats López, Habana, 1-150 p.
 - Rasco, J. F. A. (2014): Los contenidos para una visión racional del mundo: un enfoque naturalista. Cuadernos de pedagogía, 447: 54-57.
 - Rivas-Martínez, S., y Armaiz, C. (1984): Bioclimatología y Vegetación en la Península Ibérica. Bulletin de La Société Botanique de France. Actualités Botaniques, 131(2-4): 110-120.
 - Rodríguez, L. G. A., Campo, R. M., y Rodríguez, G. Á. (2024): Análisis espacio-temporal del régimen de fuego en las sabanas húmedas del Pacífico Sur de Costa Rica mediante datos MODIS 2001-2022. Revista de Geografía Norte Grande, (87).
 - Rodríguez-Calcerrada, J., Cano, F. J., Pardos, J. A., Gil, L., y Aranda, I. (2005): Estado hídrico y crecimiento en brinzales de *Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl. y *Quercus pyrenaica* Willd con diferente alometría en tres ambientes. En IV Congreso Forestal Español, 02.
 - Rodríguez-Sánchez, F. (2011): Un análisis integrado de la respuesta de las especies al cambio climático: biogeografía y ecología de árboles relictos en el Mediterráneo. Ecosistemas, 20(1).
 - Rodríguez-Trejo, D. A. (2012): Genesis of forest fires. Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente, 18(3): 357-373.
 - Rubio, J. C., y del Valle Melendo, J. (2005): Estudio de la evolución de régimen hidrológico en zonas húmedas drenadas: los humedales del Cañizar (Provincia de Teruel, España). Investigaciones Geográficas, 38: 47-63.
 - Rubio, J. C., (2004): Estudio hidrogeológico e histórico arqueológico de los humedales del alto Jiloca. Zaragoza: Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón.

- Sánchez Goñi, M.F., Loutre, M.F., Crucifix, M., Peyron, O., Santos, L., Duprat, J., Malaizé, B., Turon, J.-L., y Peyrouquet, J.-P. (2005): Increasing vegetation and climate gradient in Western Europe over the Last Glacial Inception (122–110 ka): data-model comparison. *Earth and Planetary Science Letters*, 231(1-2): 111-130.
- Schnurrenberger, D., Russell, J., y Kelts, K. (2003): Classification of lacustrine sediments based on sedimentary components. *Journal of Paleolimnology*, 29: 141-154.
- Scott, A. C. (2000): The Pre-Quaternary history of fire. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 164(1-4): 281-329.
- Simón, J. L., Rubio, J. C., y Soriano, M. A. (2010): Sobre el origen y edad de la depresión del Jiloca (Teruel, Cordillera Ibérica centro-oriental). *Geogaceta*, 48: 183-186.
- Simón, J.L. (1983): Tectónica y neotectónica del sistema de fosas de Teruel. *Teruel: Revista del Instituto de Estudios Turolenses*, 69: 21-98.
- Steffen, W., Crutzen, P. J., y McNeill, J. R. (2007): The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of nature. *Ambio-Journal of Human Environment Research and Management*, 36(8): 614-621.
- Stott, L. (2024): Glacial terminations or glacial interruptions? *Earth-Science Reviews*, 104756.
- Torres, D. M. (2007): *Juniperus thurifera*: una especie dioica, vecera y relíctica. *Ecosistemas*, 16(3).
- Utrilla, P. y Domingo, R. (2017): La transition Mésolithique-Néolithique dans la Vallée de l'Èbre. The mesolithic-neolithic transition in the Ebro Valley. En la transition néolithique en Méditerranée. *The Neolithic transition in the Mediterranean* (eds. Manen, C., Perrin, T. y Guilaine, J.), 327–358 p
- Valero-Garcés, B. L., y Moreno, A. (2011): Iberian lacustrine sediment records: responses to past and recent global changes in the Mediterranean region. *Journal of Paleolimnology*, 46: 319-325.
- 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., y 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 Science Reviews*, 54: 101006

- Wei, D., González-Sampériz, P., Gil-Romera, G., Harrison, S. P., y Prentice, I. C. (2021): Seasonal temperature and moisture changes in interior semi-arid Spain from the last interglacial to the Late Holocene. *Quaternary Research*, 101: 143-155.
- Yazgin, E. (2022): Neanderthal genetics study shows that our closest human cousins probably lived in small groups. *Cosmos Magazine*.