



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS



GRADO EN GEOGRAFÍA Y ORDENACIÓN DEL TERRITORIO

TRABAJO FIN DE GRADO

Director: Rasilla Álvarez, Domingo Fernando

Curso: 2023-2024

Análisis del polen de gramíneas y plátano de sombra en Madrid

Grasses and platanus pollen analysis in Madrid

Nava Abascal, Víctor

Julio del 2024

RESUMEN

El polen juega un papel fundamental en la reproducción de las plantas y es un buen indicador de los cambios ambientales. Sin embargo, puede convertirse en un problema para la salud de las personas, sobre todo en los entornos urbanos. En el presente TFG se compara la evolución temporal del volumen de polen de gramíneas (*Poaceae*) y de plátano de sombra (*Platanus*) y su relación con la variabilidad climática y con la vegetación en el interior de la ciudad de Madrid y su área circundante.

Los resultados muestran dos evoluciones diferentes ya que, mientras que la cantidad de polen de gramíneas no muestra ninguna tendencia temporal, la de plátano ha aumentado significativamente a lo largo de los últimos decenios. Ambas tendencias están relacionadas con la evolución climática regional, tendente a un aumento de las temperaturas y a una disminución de las precipitaciones. Mientras que el polen de gramíneas muestra una relación con la dinámica de la vegetación y la producción de cereales (trigo) en la Campiña de Madrid, el polen de plátano manifiesta una mayor correlación con la vegetación (arbórea) en el interior de la ciudad.

PALABRAS CLAVE: polen, Madrid, variabilidad climática, vegetación arbórea.

ABSTRACT

Pollen plays a fundamental role in plant reproduction and is a good indicator of environmental changes. However, it can become a problem for human health, especially in urban environments. In the present memory we compare the temporal evolution of grass (*Poaceae*) and shade plantain (*Platanus*) pollen and its relationship with climatic variability and vegetation in the interior of the city of Madrid and its surrounding area.

The results show two different evolutions since, while the amount of grass pollen does not show any temporal trend, plantain has increased significantly over the last decades. Both trends are related to the regional climatic evolution, tending to an increase in temperatures and a decrease in precipitation. While grass pollen shows a relationship with the dynamics of vegetation and cereal production (wheat) in the countryside of Madrid, plantain pollen shows a stronger correlation with (arboreal) vegetation in the interior of the city.

KEY WORDS: pollen, Madrid, land uses, climate.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. EL POLEN	4
1.1.1. El papel del polen en la naturaleza	4
1.1.2. El polen como marcador de los cambios ambientales	4
1.1.3. El polen en el contexto del calentamiento global	6
1.1.4. El polen como contaminante orgánico	8
1.2.OBJETIVOS	10
2.ÁREA DE ESTUDIO, FUENTES Y METODOLOGÍA	11
2.1. ÁREA DE ESTUDIO	11
2.1.1. Medio físico	11
2.1.2. Medio humano	13
2.2. FUENTES	15
2.3. METODOLOGÍA	18
3.RESULTADOS	26
3.1. EVOLUCIÓN CLIMÁTICA RECIENTE EN LA CIUDAD DE MADRID	26
3.2. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS TIPOS POLÍNICOS <i>POACEAE</i> Y <i>PLATANUS</i> EN LA CIUDAD DE MADRID	29
3.3. INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA REGIONAL EN LAS CONCENTRACIONES DE LOS TIPOS POLÍNICOS <i>POACEAE</i> Y <i>PLATANUS</i> EN LA CIUDAD DE MADRID	33
3.3.1. Variabilidad a largo plazo	33
3.3.2. Variabilidad a corto plazo	39
3.4. EVOLUCIÓN DE LA VEGETACIÓN EN LA CIUDAD DE MADRID Y SU RELACIÓN CON LAS CONCENTRACIONES POLÍNICAS DE <i>POACEAE</i> Y <i>PLATANUS</i>	41
4. CONCLUSIONES	45
BIBLIOGRAFÍA	46
ÍNDICE DE FIGURAS, TABLAS, CUADROS Y GRÁFICOS	49

1. INTRODUCCIÓN

1.1. EL POLEN

1.1.1. El papel del polen en la naturaleza

El polen se corresponde con el microgametófito de las plantas que poseen semilla, en el que además se incluye la mitad del genoma parental. Su origen está en los sacos polínicos, donde permanece hasta que es suficientemente maduro, momento en el que se libera a la atmósfera, alcanzando la micrópila del óvulo en el caso de las plantas gimnospermas, y el estigma en el caso de las angiospermas. Por tanto, los granos de polen son el medio de transporte a través del cual se realiza la reproducción de las plantas, incorporando el código genético masculino en el gameto femenino. Este proceso de transporte, denominado polinización, es esencial en el periodo reproductivo de las plantas (Lozano-García; Tonello y Stutz, 2017).

El proceso de polinización puede ocurrir a través de diferentes vías. En el caso de producirse mediante el agua se denominaría *polinización hidrófila*; en el caso de producirse por el viento sería *anemófila* y, por último, en el caso de estar provocada por animales sería una *polinización zoófila*. Por norma general las plantas producen grandes cantidades de polen, llegando en el caso de las anemófilas a los 10.000 granos de polen por antera. Sin embargo, no todos los granos de polen llegarán al óvulo con la información genética, sino que se depositarán en diferentes ambientes (Lozano-García; Tonello y Stutz, 2017). La Palinología es la disciplina que se encarga del estudio de granos de polen de plantas productoras de semillas, esporas y otros restos microscópicos tanto actuales como fósiles, utilizando diferentes aproximaciones metodológicas.

1.1.2. El polen como marcador de los cambios ambientales

Este elemento natural no se limita solo a la función de reproducción en las plantas, sino que también tiene un papel importante como marcador de los cambios ambientales ligados al Cambio Global. A través de él se pueden analizar las transformaciones en los usos del suelo o las consecuencias de los cambios climáticos pasados en el tipo de vegetación y su grado de ocupación del territorio (Rasilla Álvarez, 2021).

La Arqueopalinología, una disciplina incluida dentro de la Paleopalinología, se encarga de la captación y el análisis de restos espora-polínicos que se encuentren dentro de

sedimentos arqueológicos, así como la interpretación de los resultados obtenidos. A través de esta ciencia se puede reconstruir el paisaje vegetal de épocas pasadas, ofreciendo una visión a cerca de las condiciones climáticas pasadas o de los cambios generados por el ser humano. La representación gráfica de los resultados obtenidos a través de los estudios palinológicos suele representarse en gráficos denominados diagramas palinológicos. En estos gráficos se representa en el eje de las abscisas los diferentes taxones y su índice de presencia mediante la frecuencia relativa, absoluta etc. Sin embargo, en el caso del eje de las ordenadas se representan los puntos de columna donde se ha realizado el muestreo (García-Diez y Zapata, 2013).

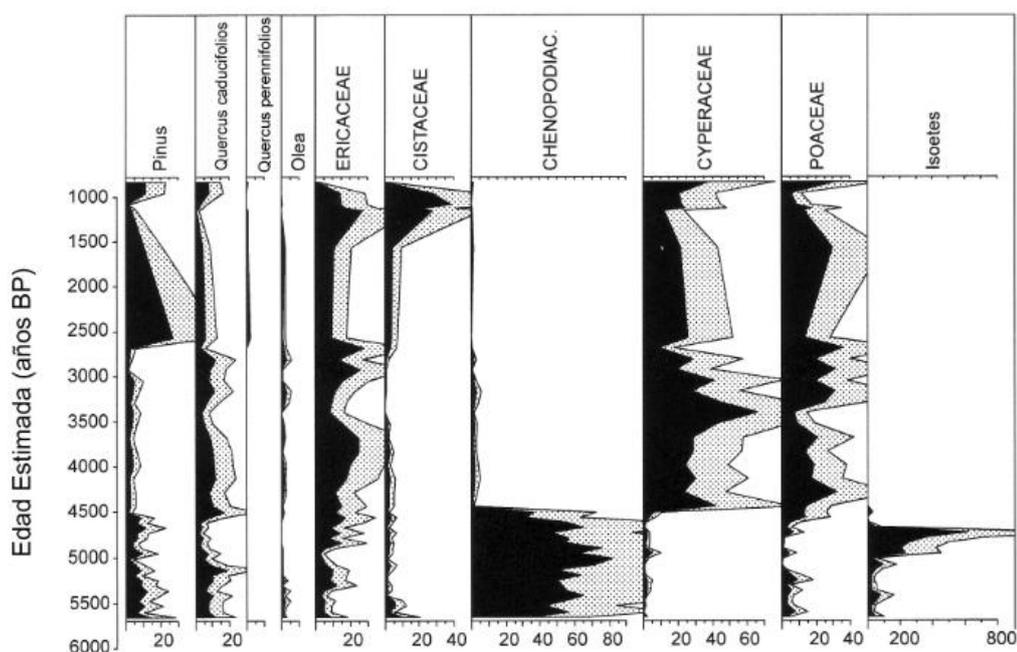


Figura 1.1. Diagrama polínico de la Laguna de las Madres (Huelva)

Fuente: Fuentes N. et al, 2006.

Se debe tener en cuenta que el espectro polínico refleja fielmente la vegetación existente y que la mayor parte de las actividades humanas tienen efectos en el registro palinológico ya que se producen alteraciones de la vegetación natural. Por tanto, a través del análisis de los diagramas polínicos se pueden observar alteraciones y fluctuaciones que se corresponden con cambios en la vegetación (López Sáez et al, 2003).

La Palinología unida a la arqueobotánica evidencia cada vez más que la explotación de recursos naturales produjo un cambio en el medio ambiente, al menos desde principios del Holoceno (Mercuri et al, 2013). Estos cambios pueden observarse mediante los indicadores polínicos de antropización que pueden detectarse en los análisis

paleopalinológicos. Algunos indicadores polínicos de antropización son la deforestación, la presencia de pólenes de plantas antrópicas (sobre todo cereales), señales de incendio etc. (García-Díez y Zapata, 2013). También a través de los estudios palinológicos se puede detectar la presencia de cabaña ganadera o el enriquecimiento de suelos con fósforo y nitrógeno, no obstante, se debe tener en cuenta que para la consideración de intervención antrópica debe existir una convergencia de varios indicadores o señales de antropización (López Sáez, 2003).

En definitiva, la Palinología es el mejor modo de conocer los cambios que ha experimentado el paisaje vegetal durante la Prehistoria, ya sea por la variabilidad climática natural o por la acción antrópica (González Sampérez, 2001).

1.1.3. El polen en el contexto del calentamiento global

Los cambios en el territorio producidos por la actividad humana no han hecho más que acentuarse, sobre todo desde la Revolución Industrial. Las emisiones de gases de efecto invernadero por parte del ser humano han provocado que desde la era preindustrial las concentraciones atmosféricas de gases como el dióxido de carbono, el metano o el óxido nitroso hayan aumentado a niveles sin precedentes desde, al menos, el comienzo de la Era Terciaria. Esta alteración de la composición atmosférica ha hecho que se genere el conocido efecto invernadero, que provoca un calentamiento generalizado del planeta y por ende el cambio climático. La utilización de combustibles fósiles para el desarrollo económico de los países desde la revolución industrial ha marcado un antes y un después en el planeta. Además, los cambios introducidos por el ser humano no se han limitado a las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también han provocado un cambio drástico de los usos del suelo. Fenómenos como la deforestación, la expansión urbana, la agricultura o la minería han impulsado un aumento de la degradación del planeta estimándose los suelos degradados actualmente en un 30 % de la superficie total del planeta.

Este calentamiento global está provocando un aumento de la temperatura media global que ya se estima en más de 1,5°C respecto a la época preindustrial. Además, también se está produciendo una alteración de la distribución espacial y temporal de las precipitaciones a lo largo del planeta. Estos cambios están teniendo consecuencias sobre el medio humano, pero también sobre los ecosistemas y sus especies (IPCC, 2019).

Este aumento de las temperaturas está generando efectos en las estaciones polínicas de las plantas, alterando la duración (en promedio 0,9 días más por año en los últimos 20 años) y la carga de polen liberada por las plantas. Además, estos efectos se acentúan en las zonas urbanas donde reside la mayoría de la población, ya que debido al efecto isla de calor urbano se produce un adelanto del comienzo de las estaciones polínicas (EUCHO, 2024). No obstante, otros factores meteorológicos como la insolación, la precipitación o la humedad relativa también juegan un papel importante en los procesos de floración y en la liberación de polen (Gharbi, 2018).

El aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero, sobre todo del CO₂ provoca alteraciones en el periodo de crecimiento de las plantas, favoreciendo un crecimiento más rápido. Además, este aumento de las concentraciones de CO₂ en la atmosfera, también trae consigo un aumento de la producción de polen. En el caso del cambio climático propiciado por el calentamiento global también tiene un efecto observable en la etapa de floración y polinización de las plantas. Estos cambios en las temperaturas y en el resto de los parámetros meteorológicos provocan un inicio más temprano del crecimiento de la planta y temporadas de plantación más largas. Además, el periodo de polinización puede ver alteradas su fecha de inicio, su duración y su intensidad con diferentes modificaciones en función de la región. En el caso de las precipitaciones los cambios en la cantidad y la distribución estacional tienen consecuencias en los niveles de las concentraciones atmosféricas de polen, favoreciendo el crecimiento de las plantas en los meses previos y la producción de polen, pero reduciendo las concentraciones atmosféricas durante el periodo de polinización (efecto de lavado atmosférico; Rasilla Álvarez, 2021; Anenberg et al., 2020).

El aumento de las temperaturas además de efectos sobre la estación polínica también provoca una redistribución latitudinal y altitudinal de la biodiversidad con un desplazamiento de los biomas existentes en el planeta. Se calcula que las especies se desplazan en un promedio de 11,8 km por década hacia los polos y ascienden 9 m s. n. m. por década (Rubenstein et al., 2023). Este desplazamiento de los biomas facilitará la migración de especies de plantas invasoras hacia el norte, lo que traerá consigo una exposición de la población a nuevos pólenes. La exposición a estos nuevos alérgenos puede tener consecuencias como el aumento de la sensibilización local, lo que se traduce en un proceso en el que personas no alérgicas se vuelven sensibles o alérgicas debido a la

exposición a estos nuevos pólenes. Las tendencias climáticas actuales auguran un aumento de las concentraciones atmosféricas de polen y un aumento de la alergenicidad del mismo, lo que tendrá consecuencias sobre la población. Esto provocará un aumento de la población alérgica y un agravamiento de los síntomas de las personas alérgicas, así como un aumento de la duración de estos (EUCHO, 2024).

1.1.4. El polen como contaminante orgánico

La calidad del aire juega un papel muy importante en la salud de las personas sobre todo en el caso de las personas que residen en entornos urbanos, ya que por normal general están más expuestas a un mayor número de contaminantes atmosféricos que las que viven en entornos más naturales. Sin embargo, los estudios y análisis de la calidad del aire de los entornos urbanos suelen centrarse en los contaminantes de origen antrópico, sobre todo los derivados de la quema de combustibles fósiles dejando de lado los contaminantes de origen biológico. No obstante, se debe tener en cuenta que entorno al 25% de las partículas sólidas que se encuentran en la atmósfera tienen un origen biológico, encontrándose entre estos el polen (Rasilla Álvarez, 2021).

Además, la infraestructura verde que se está desarrollando en los entornos urbanos con el fin de mitigar los efectos del cambio climático, también comporta un riesgo en cuanto al aumento de las concentraciones polínicas y las reacciones alérgicas en estos entornos (EUCHO, 2024). Un estudio llevado a cabo en Bruselas estima que el potencial alergénico de los parques urbanos se verá duplicado como consecuencia de las alteraciones provocadas por el cambio climático en la duración de las estaciones polínicas, la alergenicidad de los granos de polen y la sensibilización de la población (Aerts, R. et al., 2021).

Respecto a las consecuencias sobre la salud pública se prevé un aumento en la prevalencia de enfermedades y afecciones respiratorias como el asma, aumentando la necesidad de tratamientos y la presión asistencial sobre el sistema sanitario. Además, si el aumento de la duración e intensidad de los periodos en los que la población se ve expuesta a estos alérgenos aumenta, la evitación de alérgenos como estrategia para afrontarlo podría afectar a la salud mental (EUCHO, 2024).

En el contexto actual de cambio climático se debe tener en cuenta que la exposición a aeroalérgenos como el polen en combinación con otros factores de riesgo ambientales como pueden ser las temperaturas extremas o la contaminación del aire, tendrá impactos en la salud de la población. La exposición simultánea a estos factores de riesgo ambientales tiene consecuencias como enfermedades pulmonares o cardio vasculares (Anenberg et al., 2020).

La calidad del aire en el futuro también se verá afectada, con un empeoramiento a consecuencia del cambio climático que propiciará un aumento de las concentraciones de partículas contaminantes en la atmósfera. Además, los cambios en la frecuencia y duración de los periodos de estabilidad atmosférica harán que se reduzca la ventilación de la atmósfera. Al mismo tiempo la producción fotoquímica de contaminantes se verá potenciada durante estos periodos de estabilidad atmosférica, a lo que se le sumará un ambiente más cálido y seco. Esto provocará un aumento de las emisiones naturales de gases y partículas, entre los que se encuentra el polen. Por último, cabe resalta que el aumento de los gases de efecto invernadero tendrá como una de sus consecuencias la presencia de un mayor número de proteínas alérgicas en los granos de polen (Anenberg et al., 2020).

Algunos de los efectos que tiene la inhalación de los granos de polen sobre la salud de la población, son alteraciones en el sistema inmunológico dentro de los pulmones o el aumento de la vulnerabilidad ante infecciones virales. Además, cabe destacar que estos efectos no solo se producen en personas con alergias o afecciones, sino que también ocurre en pacientes sanos. Este polen aerotransportado también es un factor de riesgo para el infarto de miocardio, ya que la inhalación de polen activa los mastocitos y la liberación de histamina lo que provoca espasmos de la arteria coronaria o rotura de la placa. Esta mayor exposición al polen tendrá impactos generalizados en el aumento de la rinitis alérgica y el número de visitas a urgencias por crisis de asma. En definitiva, la interacción entre los contaminantes antropogénicos presentes en la atmósfera y los granos de polen puede desembocar en una liberación más rápida de alérgenos, con el consiguiente aumento en la absorción de estos alérgenos en los pulmones y una potenciación de la alergenicidad del polen. (Anenberg et al., 2020).

1.2. OBJETIVOS

Debido a la interrelación del polen tanto con el clima como con el grado de recubrimiento vegetal de una zona y con el tipo de especies dominantes, y a los efectos nocivos que las elevadas concentraciones de polen causan sobre la población, el objetivo general del presente trabajo es analizar en qué medida la evolución reciente de las concentraciones de polen de gramíneas y de plátano de paseo guarda relación con la evolución climática regional y con la evolución de la vegetación en la ciudad de Madrid y su área circundante.

A partir de este objetivo general se establecen los siguientes objetivos específicos:

1. Analizar la evolución climática reciente en el área de Madrid.
2. Evaluar los cambios experimentados en las concentraciones atmosféricas de polen de dos especies vegetales, una fundamentalmente urbana, el plátano de sombra (*Platanus*), y otro ubícuo, las gramíneas (*Poaceae*).
3. Determinar cómo influye la variabilidad climática regional en la concentración de polen de ambas especies.
4. Comprobar la relación entre la concentración de polen de ambos táxones y los cambios experimentados por la vegetación local y regional.

2. ÁREA DE ESTUDIO, FUENTES Y METODOLOGÍA

2.1. ÁREA DE ESTUDIO

La Comunidad de Madrid se ubica en el centro de la Península Ibérica, entre el Sistema Central al norte y el Valle del Tajo al sur. Limitando por el norte con Castilla y León concretamente con la provincia de Segovia, al este con Castilla-La Mancha provincia de Guadalajara, al sur con Toledo y Cuenca provincias de Castilla-La Mancha y al oeste con Ávila provincia perteneciente a Castilla y León.

2.1.1. Medio físico

El relieve de la comunidad de Madrid se compone de 3 grandes zonas como son la Sierra (compuesta por Guadarrama, Somosierra y las estribaciones de Gredos), las Campiñas en la zona del Tajo (Campiñas, páramos y vegas) y la Rampa que es la zona de transición entre las 2 áreas mencionadas anteriormente. Existe un gran contraste altitudinal entre las áreas más elevadas en la sierra y las más bajas, con una altitud máxima de 2.429 m s. n. m. en el Pico de Peñalara y una mínima de 430 m s. n. m. en el cauce del río Alberche en Villa del Prado (CMAD, 2007).

Respecto a la litología, en la zona de la Sierra encontramos principalmente granito y gneis exceptuando el área de Somosierra donde se encuentran cuarcitas y pizarras. En el área de las Campiñas encontramos 3 zonas con diferentes litologías, en los páramos existen calizas, arcillas, yesos y margas, las campiñas contienen arenas, margas arenosas, margas yesíferas y arcillas y, por último, en las vegas encontramos arenas, gravas y limos. En cuanto a la Rampa se compone principalmente de arcillas, arenas, margas y otros materiales de tipo detrítico (CMAD, 2007).

En lo que se refiere al clima según la clasificación climática de Köppen el clima de la ciudad de Madrid se clasifica como *Csa*, siendo este tipo de clima templado con veranos secos y calurosos (AEMET, 2011). Es decir, se trata de un clima mediterráneo continentalizado que se caracteriza por escasas precipitaciones con una variabilidad interanual considerable, variando las condiciones climáticas significativamente de un año a otro.

Esta continentalidad que le otorga su altitud de 680 m s. n. m. y su distancia a la costa de aproximadamente 300 kilómetros provocan una mayor oscilación térmica entre las

diferentes estaciones, con veranos calurosos e inviernos fríos. Además, en zonas montañosas como la de la Sierra la altitud también tiene influencia en el clima provocando un aumento de las precipitaciones y una disminución de las temperaturas medias.

En el climograma correspondiente a la estación meteorológica del Parque del Retiro observamos una temperatura media que en los meses más frío alcanza su mínimo con 6°C, mientras que en la época estival se alcanza una temperatura media de unos 25 °C.

La temperatura media anual sin embargo ronda los 15°C, aunque se pueden alcanzar máximas que puntualmente rocen o incluso superen los 40°C durante la época estival. Además, durante el invierno también se pueden dar mínimas por debajo de los 0°C. Por último, en lo que a temperatura se refiere cabe resaltar la amplitud térmica que se mantiene durante todo el año debido a la característica de continentalidad.

Respecto a las precipitaciones superan por poco los 430 mm de precipitación anual con meses como agosto en los que apenas se superan los 10 mm, mientras que en los meses de noviembre o diciembre se alcanzan los 56 mm de precipitación.

Una característica singular es el alto grado de artificialización de la superficie del suelo en la zona, debido a que se trata de un municipio con un grado de urbanización muy elevado. Esta característica tiene como una de sus consecuencias el fenómeno conocido como isla de calor urbano, que alteran los valores climáticos de la ciudad de Madrid especialmente sus temperaturas.

Respecto a la vegetación potencial, esta se encuentra influenciada por el clima y la diversidad topográfica y litológica. Las frondosas caducifolias como robles, hayas y fresnos, se encuentran en las zonas de mayor altitud, adaptadas a los inviernos fríos y nivosos, además de aprovechar las abundantes precipitaciones (CMAD, 2019). En las zonas de menor altitud encontramos un clima menos lluvioso y más cálido que propicia la presencia de encinares tanto en forma de bosques abiertos como de formaciones arbustivas. En las zonas de menor humedad el encinar es sustituido por matorrales y garrigas, mientras que en la zona de la Campiña la vegetación potencial continúa siendo el encinar en la mayoría del área (CMAD, 2019).

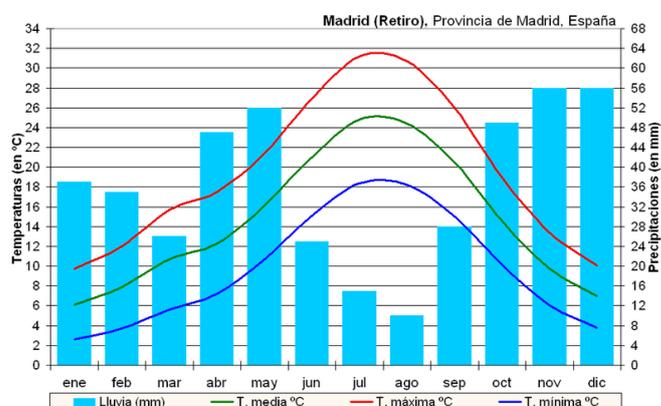


Figura 2.1. Climograma de la estación meteorológica del Retiro (Madrid)

Fuente: Eva CI, 2021.

2.1.2. Medio humano

La Comunidad Autónoma de Madrid se caracteriza por ser uno de los espacios más humanizados de la Península Ibérica, con más de 7 millones de habitantes y concentrándose la mayoría en el Área Metropolitana de Madrid. Además, la importancia de Madrid en términos de población es indiscutible, habiendo alcanzado los 3.460.491 habitantes a 1 de enero de 2024 según el padrón municipal (Ayto. de Madrid, 2024). Esto la convierte en la ciudad más poblada de España y una de las más pobladas del continente europeo. Esta elevada concentración de población se traduce en una influencia antropogénica muy importante sobre el medio natural, manifestándose en los usos del suelo de la región. Un ejemplo de esta transformación del medio natural es la vegetación de la Campiña madrileña, donde se han introducido cultivos como el trigo o la cebada entre otros (CMAD, 2019). A continuación, podemos observar la distribución de estos usos del suelo en la Comunidad de Madrid (Figura. 2.2). En color verdoso destacan los bosques ubicados en la zona norte, en el área de la Sierra. Si nos desplazamos hacia el sur resaltan los colores rosados y rojizos, que se corresponden con los suelos artificiales ubicados principalmente en el Área Metropolitana de Madrid. Por último, en la zona sur se observan en colores amarillentos las zonas ocupadas por actividades agrarias principalmente en el área de la Campiña madrileña.

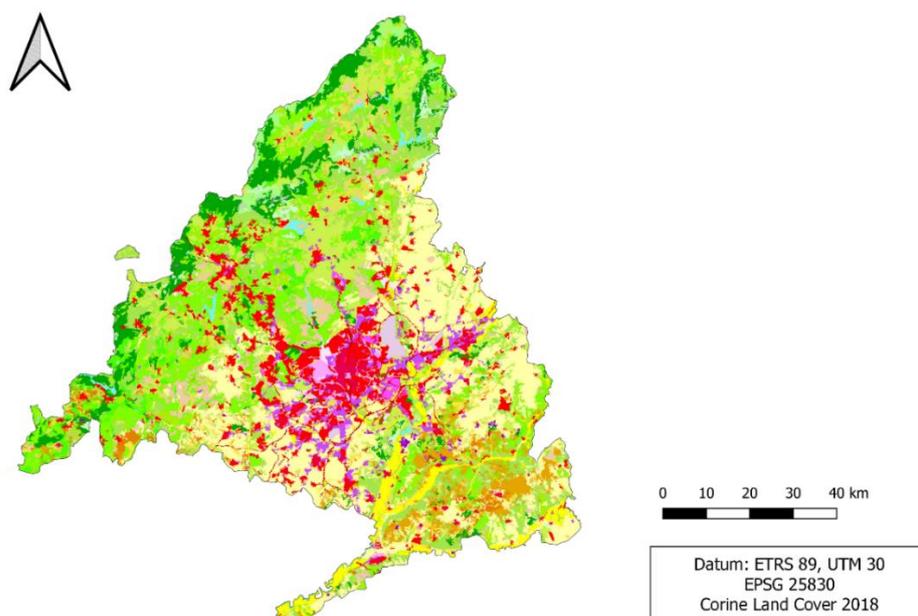


Figura 2.2. Imagen de la cobertura del suelo a partir del Corine Land Cover

Fuente: Elaboración propia a partir del CLC 2018.

Esta distribución actual de los usos del suelo en la Comunidad de Madrid responde a una tendencia y a una serie de procesos que vienen sucediendo desde finales del siglo XX en todo el continente europeo. Estos cambios en los usos y coberturas del suelo responden a causas multifactoriales como los cambios experimentados en el mundo rural, la globalización o los grandes cambios políticos e institucionales con el colapso de los antiguos regímenes socialistas y las reformas de la Política Agrícola Común Europea (Fernández-Nogueira y Corbelle-Rico, 2018).

Estas transformaciones han afectado a la mayoría de los usos del suelo, sin embargo, el abandono de las tierras de cultivo ha sido el cambio más trascendente afectando a una mayor superficie de los paisajes europeos. Este abandono de las tierras de cultivo ha traído consigo un aumento general de la cubierta forestal en el continente, así como una mayor presencia de la agricultura intensiva en detrimento de los sistemas agrícolas extensivos. Por último, la ocupación de antiguas tierras de cultivo por la expansión urbana también ha tenido un impacto considerable.

En el caso de España también se han observado tendencias similares con el abandono de tierras de cultivo y el aumento de las masas forestales. Respecto al aumento de las áreas urbanizadas y la artificialización de las superficies, se ha producido sobre todo en las zonas de la costa mediterránea y en las principales ciudades como Madrid, Barcelona, Valencia o Zaragoza. Si volvemos al caso concreto de la Comunidad de Madrid destaca entre los procesos de transformación de usos del suelo la forestación producida en la zona norte como resultado del abandono de las tierras agrícolas, así como la artificialización debida a la expansión urbana en toda la zona ocupada actualmente por el área metropolitana de Madrid. En el caso de la zona sur de la comunidad se observa un proceso de intensificación agrícola.

Por tanto, la disminución de las superficies agrícolas y el aumento de las cubiertas urbanizadas y de las masas forestales son una tendencia clara. Cabe detenerse en el aumento de las cubiertas urbanizadas y de la artificialización de los suelos, ya que la densificación y expansión de los núcleos urbanos sumado al contexto de cambio climático, han desencadenado una tendencia hacia la revegetación en el interior de las urbes. Esta nueva práctica impulsada por las administraciones tanto de ámbito local, autonómico, nacional o incluso supranacional, busca mejorar la calidad de vida de los residentes de los núcleos urbanos, así como mitigar los efectos de la actual crisis climática. Sin embargo, esta revegetación de las ciudades si no se lleva a cabo con cautela, puede desencadenar perjuicios a la par que beneficios. Uno de los posibles riesgos que

entraña este tipo de políticas de renaturalización, es la introducción de especies vegetales que produzcan pólenes con gran capacidad alergénica, lo que puede derivar en efectos en la población como se ha mencionado anteriormente.

Dentro de la propia ciudad de Madrid esta revegetación se ha articulado a través de cierto número de actuaciones enmarcadas en algunos planes municipales, como los siguientes

1. El Plan de Plantaciones de Arbolado de Zonas Verdes y del Viario (Ayto. de Madrid, 2023).
2. El plan Madrid+Natural que propone soluciones basadas en la naturaleza para la adaptación al cambio climático en la ciudad de Madrid (Ayto. de Madrid, 2019).
3. El Plan de Infraestructura Verde y Biodiversidad de la Ciudad de Madrid 2018-2030 (Ayto. de Madrid, 2018).

A continuación, se observan los principales usos del suelo en la Comunidad de Madrid fruto de los procesos que han tenido lugar en épocas pasadas y que se han mencionado anteriormente. Cabe resaltar el elevado porcentaje de la superficie de la Comunidad Autónoma de Madrid ocupado por usos urbanos con un 15% (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Usos del suelo en la Comunidad Autónoma de Madrid según Corine Land Cover 2018		
	Hectáreas	% Sobre el total
Uso Urbano	120.000	15
Uso Forestal	380.800	48
Uso Agrícola	295.600	37

Fuente: Elaboración propia a partir de Pérez Quintana, V., 2019.

2.2. FUENTES

El procedimiento seguido en este trabajo ha consistido en la revisión bibliográfica de artículos científicos relacionados con la temática estudiada, y el análisis estadístico de datos (Tabla 2.2).

Las concentraciones polínicas de los taxones *Poaceae* (gramíneas) y *Platanus* (plátano de paseo) provienen de la estación aerobiológica de Ciudad Universitaria (Facultad de Farmacia, Madrid). Esta estación aerobiológica pertenece a la Red Palinológica de la Comunidad de Madrid y suministra datos diarios desde 1994 y 2023.

La información meteorológica utilizada en este trabajo proviene de la estación sinóptica de la AEMET denominada Madrid-Cuatro Vientos. Los parámetros seleccionados fueron los datos diarios de temperatura, humedad relativa, nubosidad y precipitación, para el

periodo 1994-2022. Se seleccionó Cuatro Vientos por su localización urbana, próxima a la estación palinológica de referencia, y por la ausencia de grandes lagunas en su registro. Los datos mensuales correspondientes a la evolución del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada para el periodo 1984-2024, se han obtenido a través de *Google Earth Engine Climate*.

Niveles de polen por tipo polínico	Datos correspondientes a la Red PalinoCAM (https://datos.comunidad.madrid/catalogo/dataset/mediciones_polen) con posibilidad de descarga en formato CSV para cada uno de sus captadores de la Comunidad de Madrid, gestionada por el gobierno de la comunidad.
VARIABLES meteorológicas	Datos obtenidos del European Climate Assessment & Dataset (https://www.ecad.eu/) gestionado por el Consorcio Europeo de Servicios Climáticos, desde donde se pueden descargar datos climáticos pertenecientes a multitud de estaciones meteorológicas en formato CSV.
Índice NVDI	Estos datos se han conseguido mediante la herramienta Climate Engine (https://app.climateengine.org/climateEngine), la cual es una iniciativa colaborativa entre investigadores del Desert Research Institute y la Universidad de California Merced, además, de tener el respaldo de Google. A través de esta herramienta mediante la realización de un polígono sobre un mapa base en formato satélite se selecciona la zona de donde se pretenden obtener los datos.
Zonas verdes	Esta información se ha obtenido desde el Banco de Datos del Ayuntamiento de Madrid (https://servpub.madrid.es/CSEBD_WBINTER/arbol.html), donde se ofrecen datos de multitud de variables relacionadas con el municipio de Madrid.
Producción de cereales	En este caso se extrajo desde el Instituto de estadística de la Comunidad de Madrid perteneciente al Gobierno de la Comunidad Autónoma de Madrid (https://gestion.comunidad.madrid/desvan/AccionDatos) desde donde se pueden descargar en formato CSV.

Los datos correspondientes al índice NDVI se han obtenido de los sensores de 4 satélites que son Landsat 5, 7, 8 y 9 aumentando su frecuencia en la toma de datos a medida que se han ido actualizando.

La figura 2.3 muestra la localización de las dos principales fuentes de información del trabajo, el captador de polen y la estación meteorológica de Cuatro Vientos. Igualmente, se señala el perímetro de la zona urbana considerada para la obtención de los valores del índice NDVI.

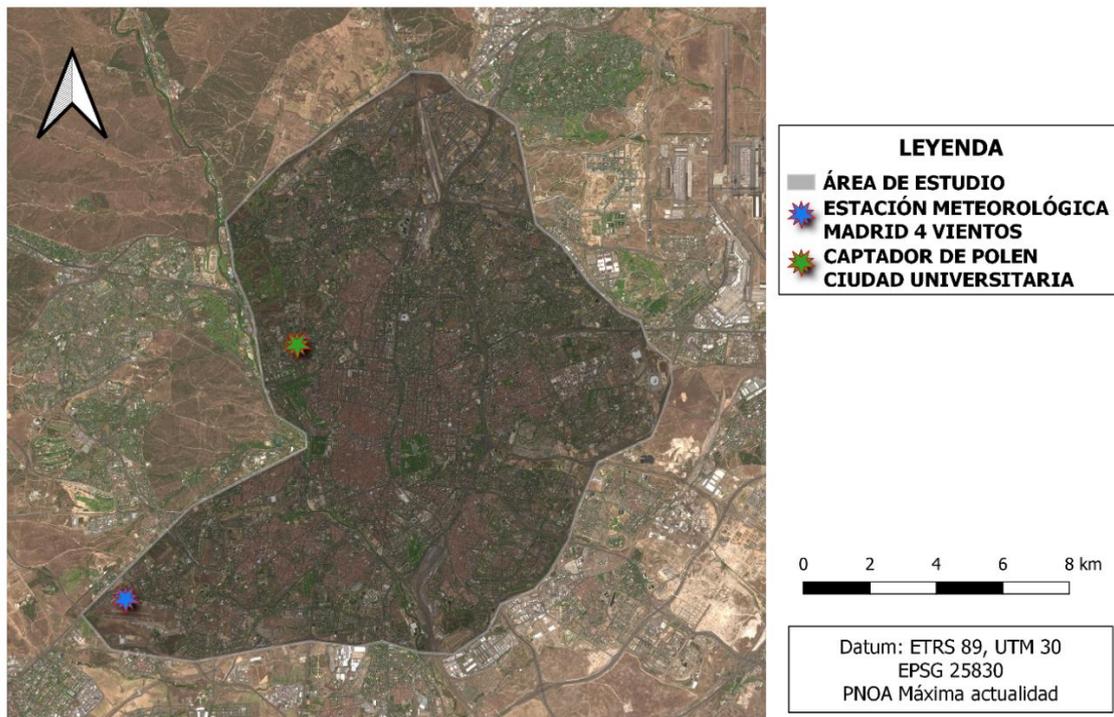


Figura 2.3. Área de estudio a escala de ciudad

Fuente: Elaboración propia a partir de PNOA máxima actualidad.

Se recurrió al uso del índice NDVI para observar su relación con las concentraciones de ambos tipos polínicos. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada mide el verdor y la densidad de la vegetación a través de las imágenes recogidas por el satélite. Este índice fluctúa entre los valores -1 y 1 donde -1 significaría material inerte y 1 vegetación sana y frondosa. El índice se calcula mediante la siguiente fórmula donde NIR es la luz reflejada en el espectro infrarrojo cercano y RED es la luz reflejada en el rango rojo del espectro.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

La figura 2.4 muestra el perímetro de la zona considerada para la obtención de los valores regionales del índice NDVI, que viene a coincidir con la Campiña de Madrid, donde se ubican la mayoría de los cultivos de la región, de los que, a su vez, se han extraído las series de producción agrícola.

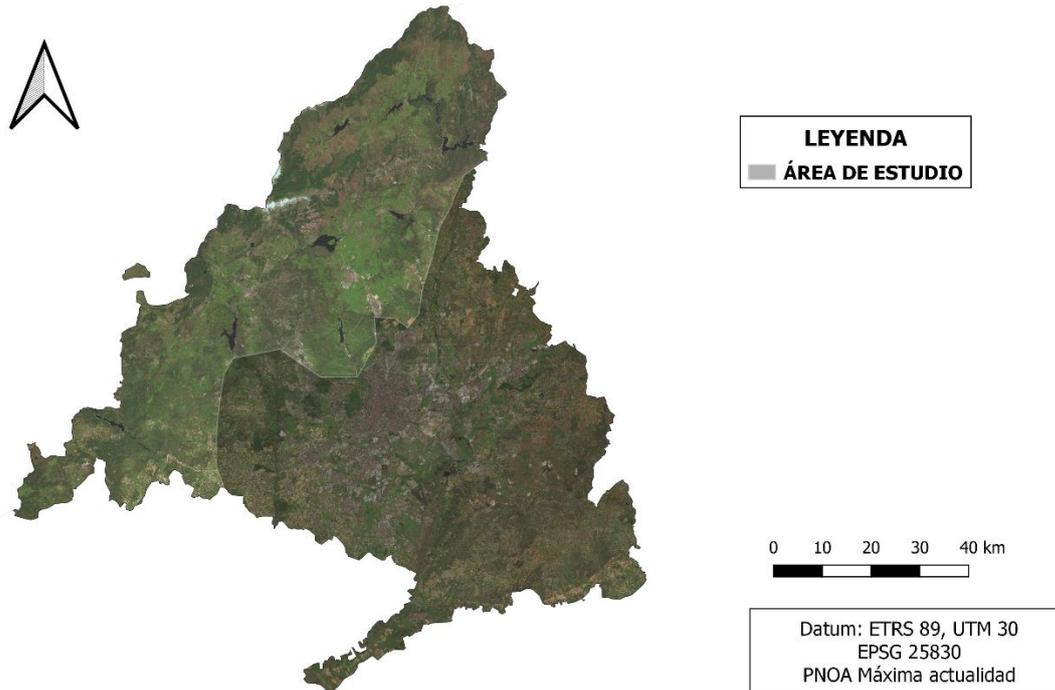


Figura 2.4. Área de estudio a escala de región

Fuente: Elaboración propia a partir de PNOA máxima actualidad.

En cuanto a los datos de producción de cereales se han obtenido del Banco de Datos Estructurales perteneciente al Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid. Estos datos se obtuvieron en miles de toneladas para el trigo y la cebada desde el año 1985 hasta el año 2021.

Por último, los datos correspondientes a la superficie en hectáreas de zonas verdes y el número de árboles asociados a viario se extrajeron desde el Banco de Datos del Ayuntamiento de Madrid, desde el apartado de Zonas verdes, jardineras y Árboles de Conservación Municipal por distrito para el periodo 1997-2017.

2.3. METODOLOGÍA

En primer lugar, se ha realizado el cálculo de los valores anuales de variables climáticas a partir de los datos diarios. A partir de ellos y para facilitar su comparación, esos valores brutos se transformaron en anomalías estandarizadas calculando los valores Z. Esta estandarización se ha calculado mediante la siguiente fórmula:

$$Z_i = \frac{x_i - \bar{X}}{\sigma}$$

Los valores Z obtenidos tras la aplicación de esta fórmula, expresan el número de desviaciones estándar que hay entre la media y alguno de los valores de la variable. Al realizar el cálculo se obtienen los valores Z siendo valores extremos los que superan el valor 1,96 o están por debajo del -1,96, teniendo una probabilidad de aparición del 5%. Estos valores Z se han calculado respecto a los valores de las variables climáticas de la estación meteorológica de Madrid Cuatro Vientos para el periodo de referencia 1981-2010.

Posteriormente se ha procedido a la cuantificación de las tendencias temporales de las variables climáticas, aplicando un análisis de regresión mediante el método de mínimos cuadrados. Este método consiste en buscar una función matemática que describa lo mejor posible la relación entre dos variables.

En el método de mínimos cuadrados la función más común es la ecuación lineal simple en la que se obtiene una pendiente (a) y un origen (b). La pendiente indica cuánto cambia una variable dependiente (temperatura, humedad, viento...) a medida que avanza la variable independiente (años). El modelo matemático puede expresarse con la siguiente fórmula:

$$y = ax + b$$

Para el cálculo de los términos a y b según el método de los mínimos cuadrados se utilizan las siguientes formulas:

$$A = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad \frac{\text{Covarianza}}{\text{Varianza}}$$

$$B = \bar{y} - a\bar{x} \quad B = \bar{Y} + A\bar{X}$$

A continuación, a partir de los datos diarios de polen (g/ m³) se calcularon una serie de índices sintéticos típicos del estudio de polen utilizando el paquete R Aerobiology (<https://cran.r-project.org/web/packages/AeRobiology/vignettes/my-vignette.html>) que son los siguientes:

1. En primer lugar, se calcularon las fechas de comienzo y fin de la estación de polinización, así como su duración, esto se calculó mediante el método de los porcentajes. Este método se basa en la eliminación de un cierto número de días al comienzo y al final del año. En este caso se ha utilizado un porcentaje del 90 %, es decir, el comienzo de la estación polínica corresponde al día en el que se ha acumulado ya el 5% del total de polen registrado de todo el año, mientras que se considerara que ha finalizado cuando se haya acumulado un 95%.
2. En segundo lugar, se calculó la suma anual y la integral polínica.
3. En tercer lugar, se observó el número de días con elevada concentración de polen.

Durante el análisis estadístico llevado a cabo sobre los datos de concentraciones diarias de granos de polen de las especies Poaceae (gramíneas) y Platanus (plátano de paseo), se realizó un primer control de calidad mediante la función *quality_control*. En este control de calidad se tuvieron en cuenta diferentes indicadores como un número mínimo de días disponibles y de observaciones. En la figura 2.5 se observa cómo en general tenemos una buena calidad de los datos, exceptuando algunos años concretos. En el caso de las gramíneas encontramos los años 1995 y 2009 con un riesgo bajo, mientras que en el año 2020 existe un riesgo medio. Respecto a los datos del polen de plátano encontramos un riesgo bajo en el año 1999 mientras que en el año 2020 se observa un riesgo elevado. Esta deficiencia del año 2020 se corresponde con la coincidencia de la floración del Plátano y el confinamiento derivado de la crisis sanitaria de ese año. Por tanto, tras el control de calidad se ha decidido tener precaución con el año 2020 pero no invalidarlo.

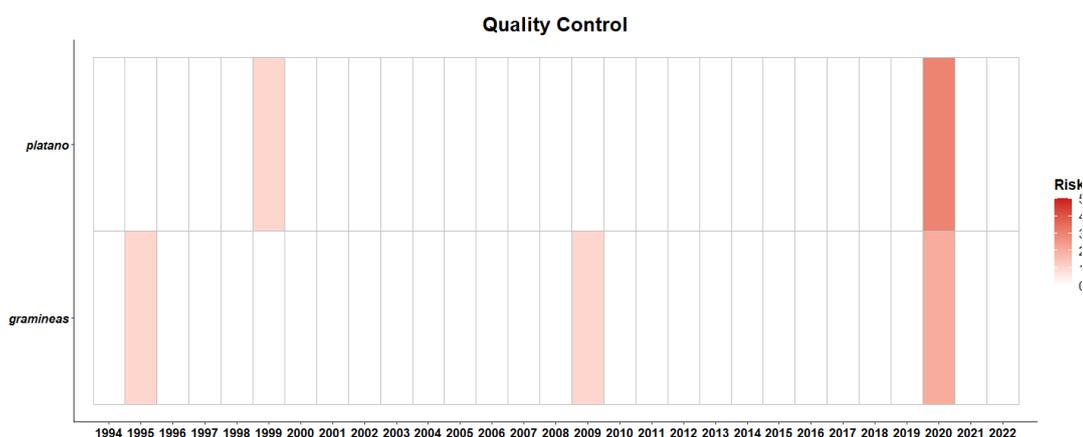


Figura 2.5. Gráfico de control de calidad

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de concentración de polen en el captador de Ciudad Universitaria perteneciente a la Red Palinocam.

Una vez detectadas las lagunas en la serie de datos se ha llevado a cabo un relleno de los datos mediante la función *interpollen*, utilizando el método de la media móvil. Este método calcula la media móvil de las concentraciones diarias de polen con un tamaño de ventana del tamaño de espacio de la laguna multiplicado por el factor. Una vez calculado, reemplaza los datos faltantes con la media móvil de estos días. Este método es el más interesante ya que va adaptando el tamaño de la ventana en función del tamaño de la laguna de datos.

A continuación, se observan los rellenos que se han realizado en las series de datos en color rojo, tanto en el caso del plátano (Figura 2.6) como en el caso de las gramíneas (Figura 2.7).

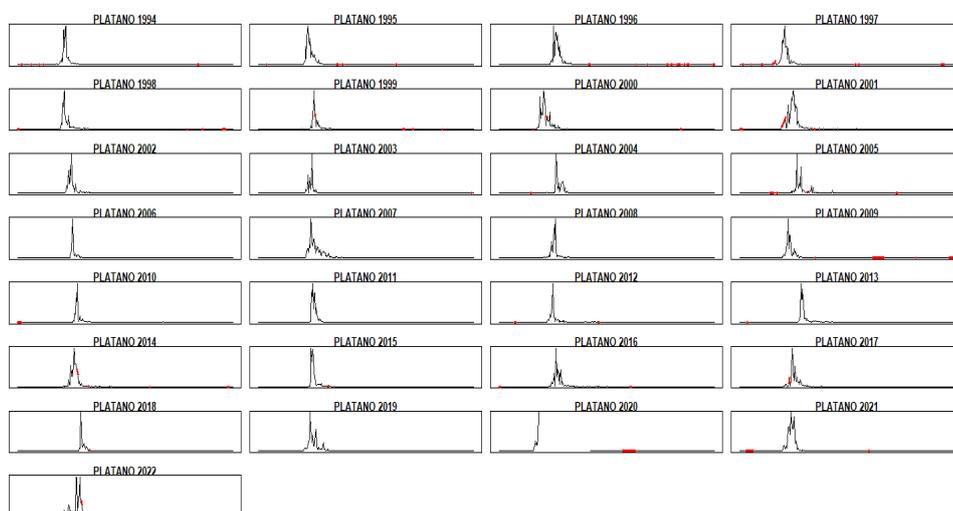


Figura 2.6. Relleno de datos mediante interpollen (plátano)

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de concentración de polen en el captador de Ciudad Universitaria perteneciente a la Red Palinocam.

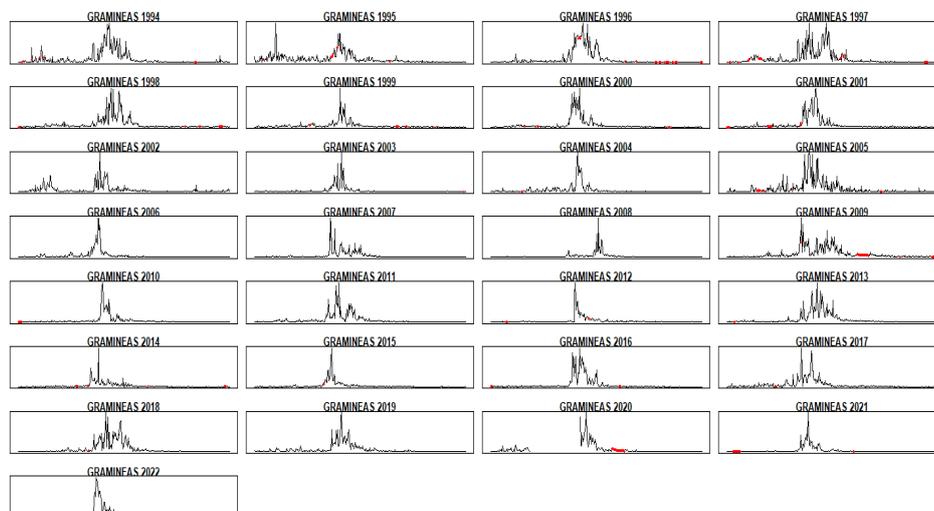


Figura 2.7. Relleno de datos mediante interpollen (gramíneas)

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de concentración de polen en el captador de Ciudad Universitaria perteneciente a la Red Palinocam.

Posteriormente, tras la creación de un nuevo fichero que incluyan los rellenos de las lagunas, se ha procedido a calcular el régimen temporal del polen en ambas especies mediante la función *pollen_calendar*. A continuación, se definen dos conceptos importantes durante el proceso de investigación.

1. **Estación polínica:** hace referencia a la duración en días del periodo comprendido entre el 5% del total de polen recogido durante el año y el 95 %. Es decir, la estación polínica comienza cuando se alcanza el 5% del total de polen recogido durante ese año y finaliza el día que se acumula el 95 % del total de polen recogido durante ese año.
2. **Integral polínica:** se define como la cantidad total de polen presente en la atmósfera durante un periodo de tiempo determinado y se expresa en granos de polen por metro cubico de granos y unidad de tiempo (granos/m³.mes; REA, 2007).

A continuación, se observan los días de comienzo y fin de las estaciones polínicas de plátano (Fig. 9) y gramíneas (Fig. 10), así como los días pico de cada una de las estaciones polínicas.

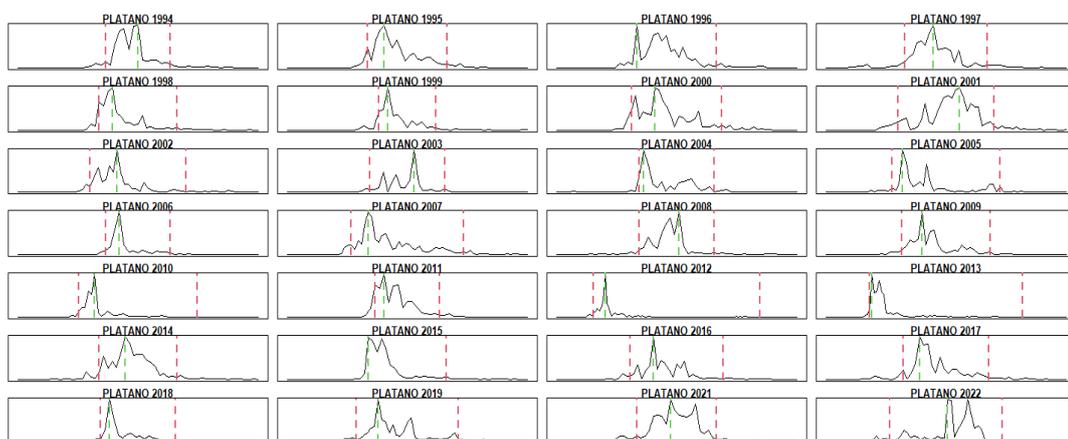


Figura 2.8 Estación polínica del plátano (día inicio, día pico, día fin) (1994-2022)

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de concentración de polen en el captador de Ciudad Universitaria perteneciente a la Red Palinocam.

En el caso de la estación polínica de las gramíneas encontramos una mayor duración en comparación con el caso de las estaciones polínicas del plátano. Además, las concentraciones de polen en la atmósfera durante la estación polínica de gramíneas

presentan un comportamiento mucho más irregular, con una mayor dispersión temporal produciéndose una alternancia de días con mayores concentraciones seguidos de días donde disminuye.

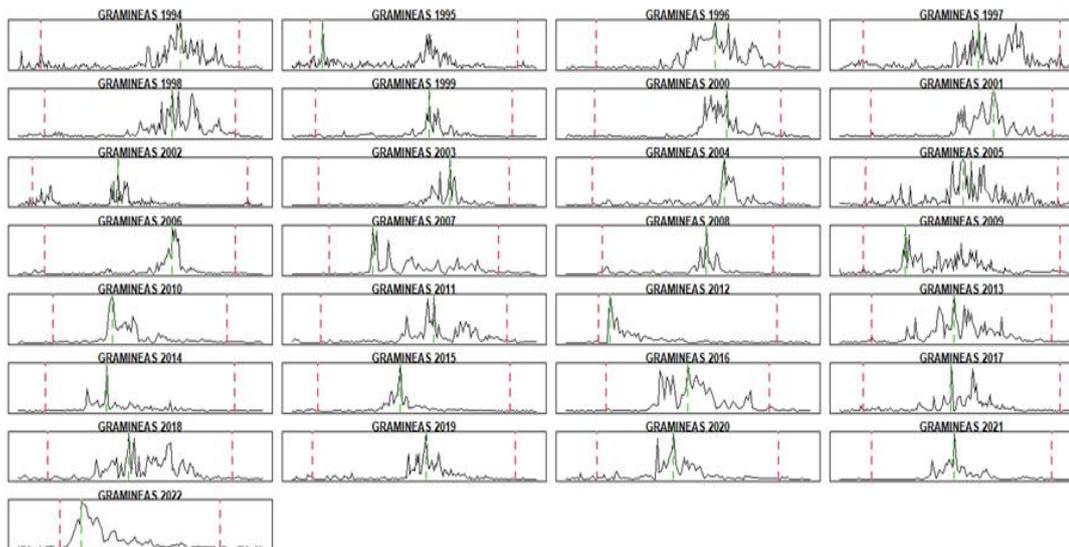


Figura 2.9. Estación polínica de las gramíneas (día inicio, día pico, día fin) (1994-2022)

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de concentración de polen en el captador de Ciudad Universitaria perteneciente a la Red Palinocam.

Para el análisis del papel de la variabilidad climática en la producción de polen, se procedió a trabajar a dos escalas temporales diferentes: a largo plazo y a corto plazo. En el primer caso, se intentó cuantificar la relación entre las series temporales de los diferentes índices polínicos y la evolución temporal de las variables climáticas y de indicadores como el índice NDVI mediante el cálculo del coeficiente de Pearson. Este coeficiente de correlación de Pearson sirve para verificar si hay una relación entre dos variables cuantitativas. El coeficiente de correlación se calcula mediante la fórmula:

- S_{xy} : Covarianza entre las dos variables.
- S_x : Desviación típica de la variable X.
- S_y : Desviación típica de la variable Y.

$$r_{xy} = \frac{S_{xy}}{S_x S_y}$$

Los valores obtenidos tras el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson oscilarán entre -1 y +1, indicando un valor negativo una relación inversa entre las variables, mientras que un valor positivo indicaría una relación positiva entre ambas variables. En el caso de que el valor sea 0 no existe una relación lineal entre ambas variables.

Para la identificación de las condiciones atmosféricas más favorables a altas concentraciones de polen, tanto a escala mensual (condiciones favorables a una estación polínica con baja/alta concentración) como diaria (condiciones favorables a días con alta concentración polínica) se utilizó la técnica del “compositing” (Yarnal, 1994). Esta técnica estadística consiste en calcular, para un determinado fenómeno atmosférico, el valor medio de una serie de variables meteorológicas (temperatura, precipitación) o campos de presión (presión a nivel del mar, altura geopotencial etc...). En el caso de las condiciones meteorológicas en los meses previos a la estación polínica de cada polen, se definieron como eventos singulares los terciles superior e inferior de la serie histórica de la integral polínica. Estos terciles se calcularon ordenando primero los valores de la integral polínica correspondientes a cada una de las estaciones polínicas del periodo 1994-2022 de menor a mayor, para dividirlos posteriormente en 3 grupos, siendo el tercil inferior el grupo correspondiente a las 8 estaciones polínicas con las integrales polínicas más bajas y el tercil superior las 8 estaciones con las integrales polínicas más altas, quedando las 9 estaciones polínicas restante integradas en el tercil medio. Para los años correspondientes a los terciles superior e inferior se calcularon los valores medios de temperatura, precipitación, humedad relativa y nubosidad de los 9 meses anteriores (pe. en el caso de las gramíneas, de agosto del año anterior a abril del mismo año), el mes en el que se produce la máxima cantidad de polen (para las gramíneas mayo) y los dos meses posteriores a este último (para las gramíneas junio y julio).

Por otro lado, para identificar qué condiciones atmosféricas eran más propicias a días con alta concentración de polen (relación a corto plazo), se identificaron los días que superan el umbral correspondiente al percentil 95 de la serie diaria de polen, y se obtuvo el tipo de circulación atmosférica dominante recurriendo a los gráficos proporcionados por NOAA Physical Sciences Laboratory a través de su herramienta web <https://psl.noaa.gov/data/composites/day/>

3. RESULTADOS

A continuación, se muestran los principales resultados obtenidos tras el análisis de las diferentes fuentes de información disponibles.

3.1. EVOLUCIÓN CLIMÁTICA RECIENTE EN LA CIUDAD DE MADRID

A continuación, se exponen las anomalías respecto a las variables meteorológicas de temperatura media, precipitación, nubosidad y humedad relativa respecto a los valores medios para el periodo 1981-2010. Se debe tener en cuenta que se denominaran anomalías significativas todas aquellas situadas por debajo de -1,96 o por encima de +1,96.

En el caso de la temperatura media para el periodo 1961-2023 encontramos dos fases bien diferenciadas (Figura 3.1). En una primera etapa desde el año 1961 hasta el año 1995 predominan las anomalías frías, con un total de 14 años con temperaturas medias con anomalías negativas muy marcadas (inferiores al valor -1,96). En una segunda etapa desde 1996 hasta la actualidad encontramos un predominio de las anomalías cálidas, destacando especialmente la última década donde se concentran las anomalías positivas más destacadas con un 60 % de los últimos 10 años con anomalías cálidas superiores al percentil 95.

Respecto a las precipitaciones la tendencia no es tan contundente, observándose una ligera disminución. Sin embargo, lo que si se observa es una irregularidad en el régimen de precipitaciones, alternándose momentos de precipitaciones abundantes con periodos de precipitaciones más escasas. Las anomalías superiores al valor 1,96 las encontramos entre los años 1963 a 1997 contabilizándose un total de 4 anomalías positivas significativas, mientras que en el caso de anomalías negativas inferiores al valor -1,96 no se ha detectado ninguna en el periodo analizado.

Por último, es importante destacar que, pese a que no se ha observado una disminución clara en las precipitaciones, el aumento de las temperaturas provoca una mayor evapotranspiración. Este aumento de la evapotranspiración genera una menor disponibilidad hídrica y un mayor estrés hídrico, teniendo como consecuencia un entorno más seco en el área de estudio.

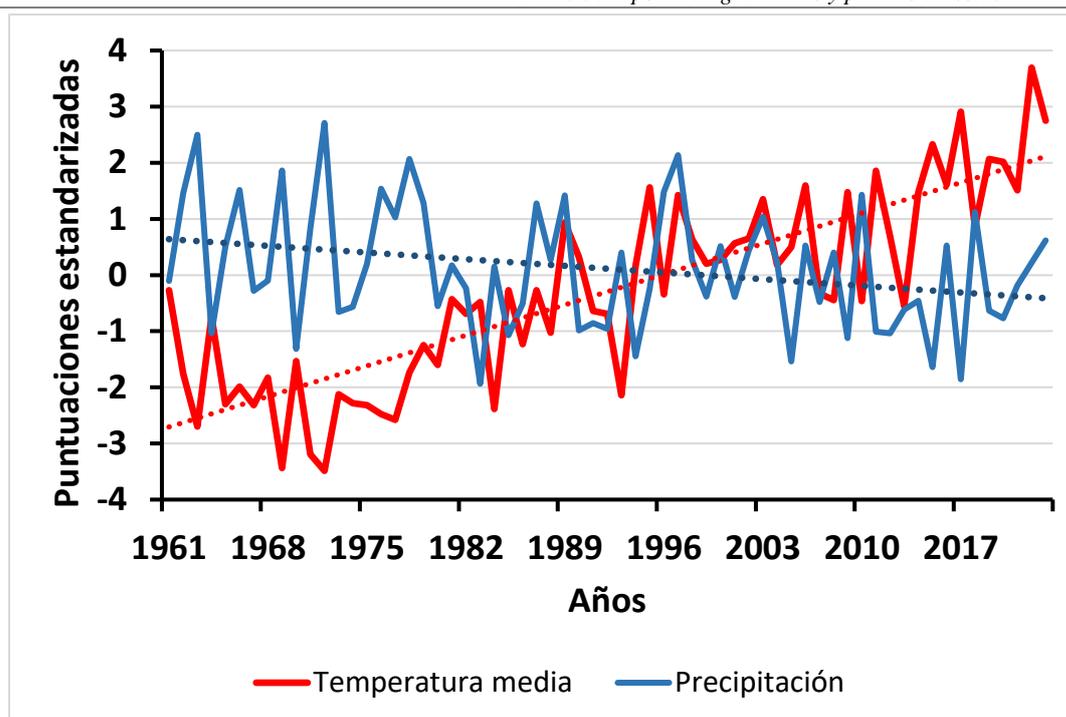


Figura 3.1. Anomalías en la precipitación y la temperatura media en la estación de meteorológica de Madrid Cuatro Vientos (Periodo de referencia 1981-2010)

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la estación meteorológica de Madrid Cuatro Vientos.

En cuanto a el coeficiente de determinación en el caso de la temperatura media expresa que el 70% de los datos pueden explicarse mediante la tendencia detectada, mientras que en el caso de la precipitación no existe una tendencia clara, explicándose tan solo aproximadamente un 8% de los datos analizados (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Parámetros estadísticos de la temperatura media y la precipitación		
Variable	Ecuación de la línea de tendencia	Coficiente de determinación R^2
Temperatura media	$Y = 0,0777X - 155,14$	0,7015
Precipitación	$Y = -0,017X + 33,904$	0,0791

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la estación meteorológica de Madrid Cuatro Vientos.

En el caso de la temperatura se detecta un aumento de $0,7^{\circ}\text{C}$ (tasa de cambio) por década, lo que se traduce en que en las 6 década transcurridas desde 1961 la temperatura media ha aumentado uno $4,2^{\circ}\text{C}$. Este valor es superior al de la Península Ibérica en su conjunto que experimento un aumento de $0,22^{\circ}\text{C}$ por década lo que se traduce en $1,32^{\circ}\text{C}$ (AEMET, 2022), pero puede explicarse por el efecto de Isla de Calor Urbano. Este fenómeno influye en los datos meteorológicos, ya que el observatorio de Madrid Cuatro Vientos se encontraba en los años 60 en la periferia

de Madrid, mientras que el desarrollo urbanístico lo ha situado dentro de la ciudad en la actualidad.

Respecto a los valores de nubosidad y humedad relativa muestran una tendencia hacia la disminución en ambas variables durante el periodo analizado (Figura 3.2). En el caso de la nubosidad en el periodo 1961 hasta 1980 se observa un predominio de las anomalías positivas concentrando 3 anomalías positivas significativas, mientras que tan solo se produce 1 anomalía negativa significativa en el año 1970. A partir del año 1980 hasta la actualidad no se han producido anomalías positivas significativas, mientras que en los años 2005 y 2007 sí que se han producido anomalías negativas superiores al percentil 95.

Respecto a los valores registrados para la humedad relativa también encontramos un primer periodo que se extiende desde 1961 hasta el año 1993 donde se observa un predominio de anomalías positivas, mientras que en los siguientes años predominan las negativas. En el primer periodo encontramos un total de 9 años con anomalías positivas significativas, mientras que en el segundo periodo encontramos los años 2005, 2009 y 2017 con anomalías negativas significativas.

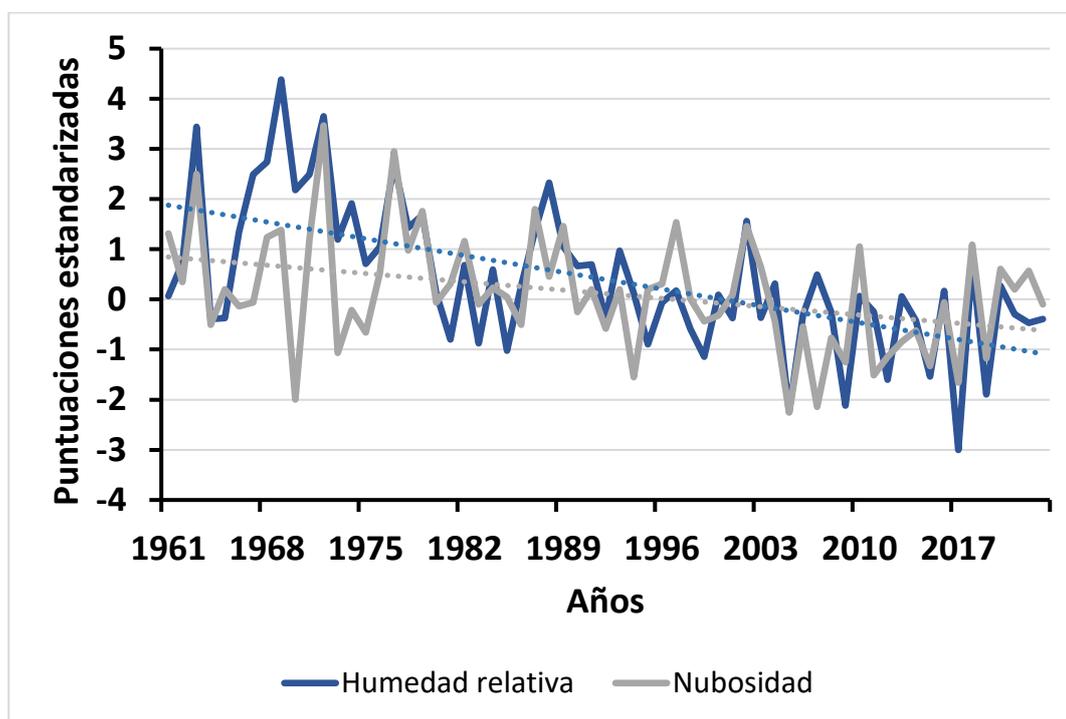


Figura 3.2. Anomalías en la nubosidad y la humedad relativa en la estación meteorológica de Madrid Cuatro Vientos (Periodo de referencia 1981-2010)

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la estación meteorológica de Madrid Cuatro Vientos.

Por tanto, la tendencia observada en la serie temporal analizada muestra una disminución paulatina de la humedad relativa y la cobertura nubosa. Esta tendencia se confirma con

las pendientes negativas observadas en ambas ecuaciones de las líneas de tendencia para ambas variables. Sin embargo, en el caso de los coeficientes de determinación no encontramos valores elevados en ninguna de las dos variables (Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Parámetros estadísticos de la humedad relativa y la nubosidad		
Variable	Ecuación de la línea de tendencia	Coefficiente de determinación R²
Humedad relativa	$Y = -0,0478X + 95,607$	0,37
Nubosidad	$Y = -0,0236X + 47,162$	0,1373

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la estación meteorológica de Madrid Cuatro Vientos.

Por tanto, si se mantienen las tendencias actuales observadas en las cuatro variables meteorológicas, cabe esperar un aumento de la temperatura media con anomalías positivas cada vez más marcadas, un mantenimiento de la cantidad de precipitación, pero con cambios en su régimen pluviométrico. Respecto a la nubosidad tendera a reducirse al igual que en el caso de la humedad relativa con ambientes más secos.

Observando estas tendencias climáticas a nivel local en las diferentes variables meteorológicas, se comprueba que siguen las tendencias que sugieren los distintos escenarios de cambio climático a nivel global.

3.2. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS TIPOS POLÍNICOS *POACEAE* Y *PLATANUS* EN LA CIUDAD DE MADRID

En el siguiente gráfico observamos claras diferencias entre ambos tipos polínicos, en primer lugar, mientras en el caso de las gramíneas el número de días de duración de la estación polínica super ampliamente los 100 días e incluso en algunos los 200, la estación polínica del plátano es más reducida. En el caso de la estación polínica es raro llegar a los 100 días de duración de la estación polínica, siendo mucho más usual una duración de entre 15 a 35 días. En segundo lugar, el momento en el que se produce la estación polínica, en el caso de las gramíneas usualmente tiene lugar en los meses de mayo, junio y julio, mientras que en el caso del plátano se suele producir entre marzo y abril. Por último, una característica bastante diferencial entre ambos tipos polínicos es su explosividad durante la floración, el plátano experimenta un aumento muy drástico en la concentración de granos de polen en la atmósfera, mientras que en el caso de las gramíneas es más paulatino y no tan intenso.

En resumen, la estación polínica de las gramíneas es más larga que la del plátano de sombra, pero concentraciones diarias relativamente bajas, mientras que en el caso del plátano la estación polínica es corta, pero las concentraciones diarias son muy altas.

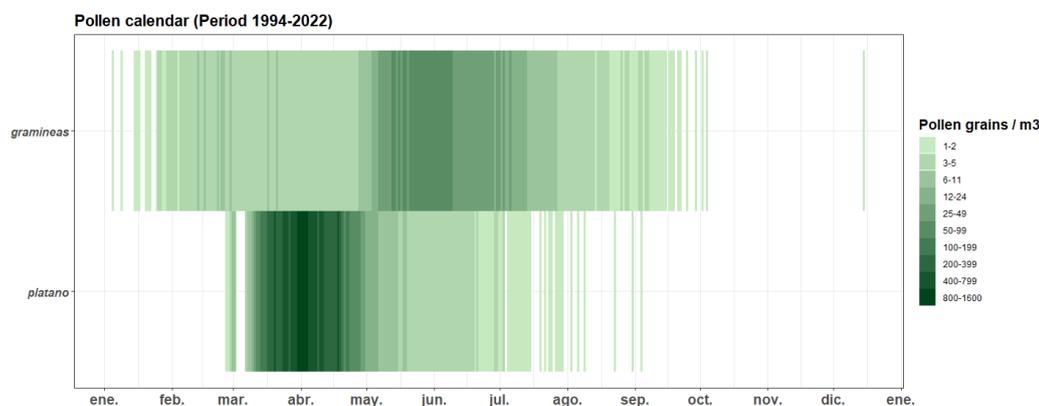


Figura 3.3 Régimen temporal del polen de ambas especies (1994-2022)

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de concentración de polen en el captador de Ciudad Universitaria perteneciente a la Red Palinocam.

A continuación, podemos observar la evolución interanual de la longitud de la estación polínica, así como de la integral polínica tanto en el caso de las gramíneas (Figura 3.4) como en el caso del plátano (Figura 3.5).

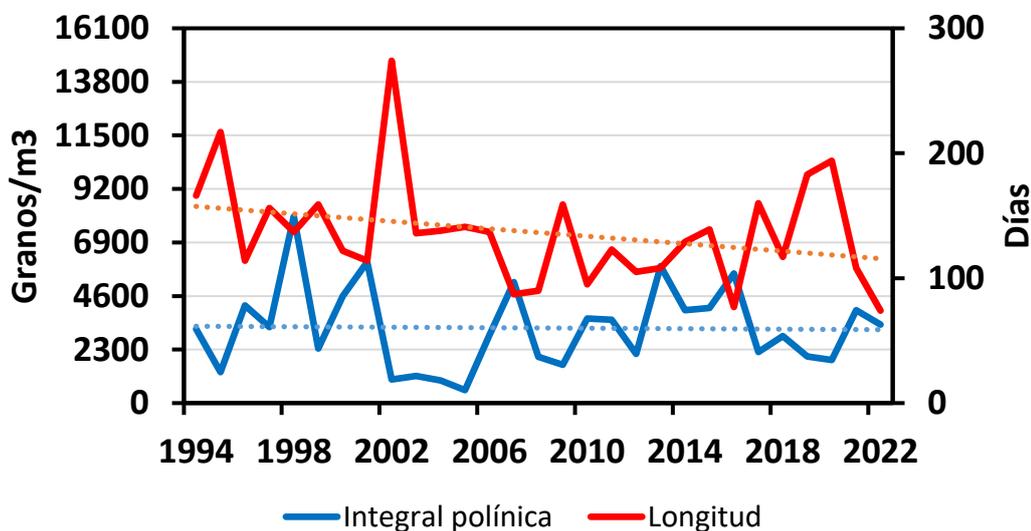


Figura 3.4. Evolución interanual de las concentraciones polínicas y la longitud de la estación polínica de las gramíneas

Fuente: Elaboración propia a partir de datos diarios de concentración de polen de la Red Palinocam y del cálculo de la duración de las estaciones polínicas a partir del paquete de R Aerobiology.

Respecto a la evolución interanual en el caso de las gramíneas se observa que la integral polínica se mantiene prácticamente constante con una reducción mínima (Tabla 3.3), mientras que en el caso de la longitud de la estación polínica existe una tendencia negativa más marcada. Si tenemos en cuenta que la estación polínica de las gramíneas se produce durante los meses de mayo, junio y julio, cabe suponer que debido a las tendencias actuales de aumento de temperaturas se esté produciendo un adelanto del comienzo de la estación polínica y también un adelanto de su fin.

Tabla 3.3 Parámetros estadísticos de la evolución interanual del tipo polínico <i>Poaceae</i>		
Variable	Ecuación de la línea de tendencia	Coefficiente de determinación R²
Integral polínica	$Y = -5,263X + 3306,2$	0,0006
Longitud	$Y = -1,4936X + 158,92$	0,0872

Fuente: Elaboración propia a partir de datos diarios de concentración de polen de la Red Palinocam y del cálculo de la duración de las estaciones polínicas a partir del paquete de R Aerobiology.

Sin embargo, en el caso del plátano sí que se observa una tendencia clara de aumento de la integral polínica. En el caso de la longitud de la estación polínica también se tiende a un aumento del número de días de duración, pero no es tan acusado (Fig.15).

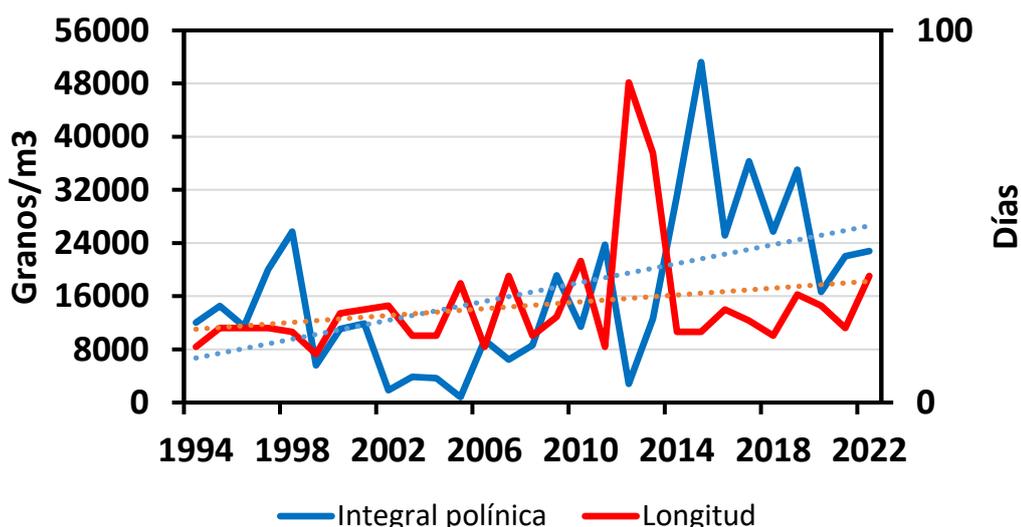


Figura 3.5 Evolución interanual de las concentraciones polínicas y la longitud de la estación polínica del plátano

Fuente: Elaboración propia a partir de datos diarios de concentración de polen de la Red Palinocam y del cálculo de la duración de las estaciones polínicas a partir del paquete de R Aerobiology.

Esta tendencia de aumento se confirma al observar la tasa de cambio de la integral polínica del plátano, con un aumento anual promedio de más de 710 granos de polen. En el caso de la longitud de la estación polínica ronda el medio día de aumento anual (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Parámetros estadísticos de la evolución interanual del tipo polínico <i>Platanus</i>		
Variable	Ecuación de la línea de tendencia	Coefficiente de determinación R ²
Integral polínica	$Y=710,29X +5991$	0,2566
longitud	$Y= 0,4596X+19,244$	0,0639

Fuente: Elaboración propia a partir de datos diarios de concentración de polen de la Red Palinocam y del cálculo de la duración de las estaciones polínicas a partir del paquete de R Aerobiology.

En el caso de las tendencias del total de granos de polen acumulado, nos encontramos ante dos situaciones diferentes en función del tipo polínico. En el caso de las gramíneas no se encuentra una tendencia (pendiente) significativa, sin embargo, en el caso del tipo polínico de plátano se encuentra una tendencia bastante significativa. Esta tendencia muestra un aumento importante de las concentraciones polínicas de *Platanus* en la atmosfera de Madrid, lo que confirma los datos mostrados anteriormente (Figura 3.6).

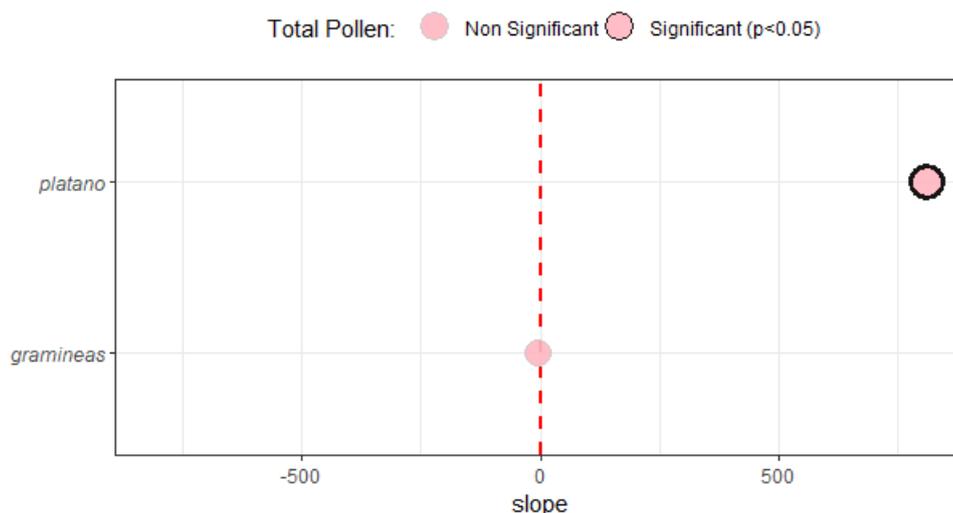


Figura 3.6 Tendencia del total de polen de gramíneas y plátano

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de concentración de polen en el captador de Ciudad Universitaria perteneciente a la Red Palinocam.

3.3. INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA REGIONAL EN LAS CONCENTRACIONES DE LOS TIPOS POLÍNICOS *POACEAE* Y *PLATANUS* EN LA CIUDAD DE MADRID Y EN SU ESTACIÓN POLÍNICA

A continuación, con el fin de comprobar posibles relaciones entre las variables climáticas y las concentraciones de polen, se procederá a realizar un análisis a dos escalas.

1. Para analizar esta variabilidad a largo plazo, se calculará el coeficiente de correlación de Pearson para las variables climáticas de la estación meteorológica Madrid Cuatro Vientos y los días julianos de comienzo y fin de las estaciones polínicas, comprobando la influencia de la lluvia, la temperatura, la nubosidad o la humedad relativa en su duración.

Posteriormente se realizará un análisis retrospectivo para evaluar la influencia de estas mismas variables meteorológicas, pero en este caso en relación con la integral polínica.

2. Por último, para conocer la variabilidad a corto plazo se procederá a analizar los patrones de circulación atmosférica para determinar las condiciones más favorables a días concentraciones de polen elevadas.

3.3.1 Variabilidad a largo plazo

El caso de las gramíneas

a) Día juliano del comienzo de la estación polínica

Respecto al día juliano de comienzo de la estación polínica de las gramíneas se muestra correlacionado con la nubosidad, la humedad y la temperatura media (Tabla 3.5).

Tabla 3.5. Coeficiente de Correlación de Pearson entre el día juliano de comienzo de la estación polínica y las variables meteorológicas			
Variable	Octubre previo	Marzo	Abril
Nubosidad	-0,49	0,29	0,25
Humedad	-0,45	0,08	0,39
Precipitación	-0,21	0,32	0,34
Temperatura media	0,34	-0,46	-0,24

Fuente: Elaboración propia a partir de datos climáticos y de concentraciones de polen.

En el caso del mes de octubre previo al comienzo de la estación polínica se observan valores relevantes en cuanto a la nubosidad y la humedad. En el caso de la nubosidad y la humedad existen correlaciones negativas de -0,49 y -0,45 respectivamente. Por tanto, un mes de octubre previo a la estación polínica con valores elevados de nubosidad y humedad provocarían un adelanto del comienzo de la estación polínica. En el mes de marzo la temperatura media muestra una correlación negativa de -0,46 que se correspondería con un adelanto del comienzo de la estación polínica. Durante el mes de abril se observa una correlación positiva con la humedad relativa provocando un retraso del comienzo de la estación polínica de gramíneas.

Por tanto, un mes de octubre previo a la estación polínica de gramíneas que sea nuboso y húmedo adelantara el comienzo de la estación, al igual que un marzo cálido. Sin embargo, un abril húmedo hará que se retrase el comienzo.

b) Día juliano fin de la estación polínica

Respecto a las correlaciones observadas tras el cálculo del coeficiente de Pearson para el día juliano del fin de la estación polínica, se han detectado los siguientes valores significativos (Tabla 3.6).

Tabla 3.6. Coeficiente de Correlación de Pearson entre el día juliano de fin de la estación polínica y las variables meteorológicas			
Variable	Junio previo	Diciembre previo	Septiembre
Nubosidad	-0,42	-0,37	0,40
Humedad	-0,15	-0,23	0,39
Precipitación	-0,19	-0,26	0,18
Temperatura media	-0,11	-0,33	-0,30

Fuente: Elaboración propia a partir de datos climáticos y de concentraciones de polen.

En primer lugar, durante el junio previo a la estación polínica se detectó una correlación negativa con la nubosidad, que indica una coincidencia entre junios nubosos y un adelanto del fin de la estación polínica. En segundo lugar, en el mes de diciembre previo a la estación polínica observamos una correlación negativa respecto a la nubosidad con un valor de -0,37. Es decir, la presencia de nubosidad abundante y ráfagas de viento coincide con un adelanto del fin de la estación polínica.

Por último, el otro mes en el que encontramos valores significativos es septiembre, cuando se observan correlaciones positivas de la nubosidad y la humedad relativa con el

día juliano del fin de la estación polínica. Estos valores son de 0,40 en el caso de la nubosidad y de 0,39 en el caso de la humedad relativa. Por tanto, un mes de septiembre nuboso y húmedo coincide con un retraso del fin de la estación polínica de las gramíneas.

c) Análisis retrospectivo de la integral polínica

A continuación, encontramos los resultados obtenidos tras haber realizado el análisis retrospectivo entre la integral polínica de las estaciones polínicas de gramíneas ubicadas en el tercil superior e inferior.

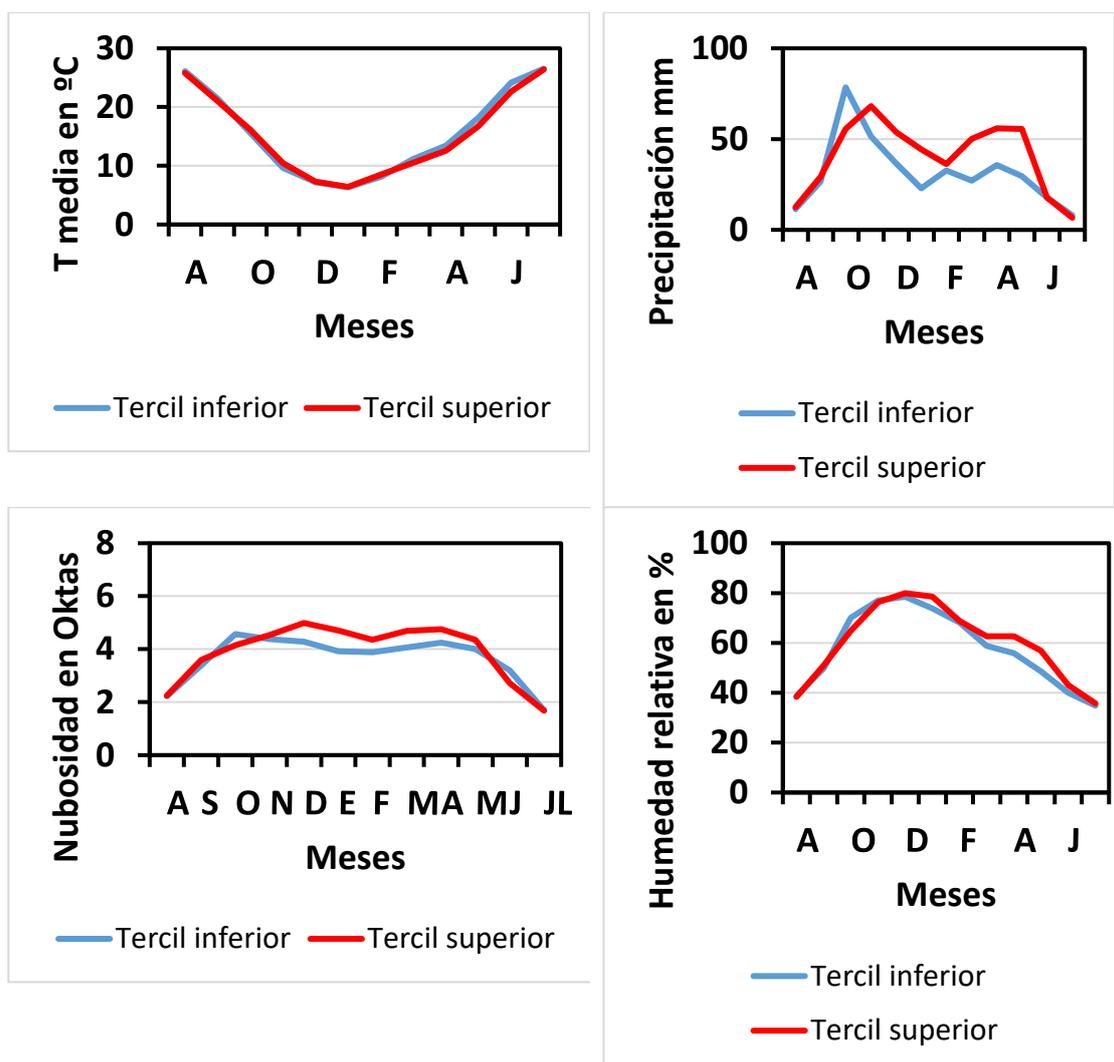


Figura 3.7 Análisis retrospectivo de la temperatura media, la precipitación, la nubosidad y la humedad relativa en los meses previos a estaciones con integrales polínicas de gramíneas situadas en el tercil inferior o en el superior.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos climáticos y de concentraciones de polen.

Se observa que las gramíneas necesitan que los meses anteriores a la polinización haya habido precipitaciones abundantes. Sin embargo, durante los meses de polinización

necesita que los mismos sean más frescos y más secos. En cuanto a la nubosidad debe ser elevada durante los meses previos, pero reducirse durante los meses de polinización (Figura 3.7)

El caso del plátano de sombra

En el caso del día juliano de comienzo de la estación polínica encontramos correlaciones significativas con la nubosidad, la precipitación y la temperatura media. Sin embargo, en el caso de la humedad relativa no se encontró una correlación significativa (Tabla 9).

En primer lugar, durante el verano previo a la estación polínica encontramos correlaciones negativas en la nubosidad y en la precipitación durante los meses de julio y agosto respectivamente. Es decir, un mes de julio nuboso y un mes de agosto lluvioso adelantan el comienzo de la estación polínica.

En cuanto al mes de febrero previo es relevante la precipitación con una correlación positiva de 0,43 que muestra una coincidencia entre un aumento de la precipitación y un retraso en el comienzo de la estación polínica. Sin embargo, la temperatura media tiene una correlación negativa mostrando que una temperatura elevada en ese mes adelanta el comienzo de la estación polínica.

Durante el mes de marzo la nubosidad muestra una correlación positiva con un valor de 0,52. Por tanto, parece que un aumento de la nubosidad durante el mes de marzo provoca un atraso en el comienzo de la estación polínica. Sin embargo, la temperatura media durante este mismo mes muestra una correlación negativa, que con un valor de -0,44 relaciona un marzo caluroso con un adelanto en el comienzo de la estación.

Tabla 9. Coeficiente de Correlación de Pearson entre el día juliano de comienzo de la estación polínica y las variables meteorológicas

Variable	Julio previo	Agosto previo	Febrero previo	Marzo
Nubosidad	-0,38	0,02	0,18	0,52
Humedad	0,02	-0,12	-0,16	0,13
Precipitación	-0,05	-0,51	0,43	0,26
Temperatura media	-0,06	0,13	-0,60	-0,44

Fuente: Elaboración propia a partir de datos climáticos y de concentraciones de polen.

Día juliano fin de la estación polínica

En el caso del día juliano de fin de la estación polínica I encontramos algún tipo de

Tabla 10. Coeficiente de Correlación de Pearson entre el día juliano de fin de la estación polínica y las variables meteorológicas					
Variable	Agosto previo	Septiembre previo	Octubre previo	Febrero previo	Marzo
Nubosidad	-0,09	-0,37	-0,35	-0,14	0,37
Humedad	-0,17	-0,33	-0,18	-0,38	0,10
Precipitación	-0,45	-0,14	-0,05	0,23	0,29
Temperatura media	0,17	0,19	0,19	-0,58	-0,40

Fuente: Elaboración propia a partir de datos climáticos y de concentraciones de polen.

correlación con todas las variables meteorológicas analizada (Tabla 10).

Durante el verano previo a la estación polínica encontramos correlaciones negativas con la precipitación y la nubosidad en los meses de agosto y septiembre respectivamente. Por tanto, un verano previo nuboso y con precipitaciones por encima de la media propiciaría un adelanto del fin de la estación polínica. Respecto al otoño previo el mes de octubre muestra una correlación negativa con la nubosidad de -0,35.

En cuanto al mes de febrero la humedad relativa se muestra con una correlación negativa de -0,38, lo que supone que una humedad relativa elevada durante ese mes desemboca en un adelanto del fin de la estación polínica. Este mes también muestra una correlación negativa de -0,58 con la temperatura media, por lo que en ese mes las temperaturas se muestran cálidas se adelantara el final de la estación polínica.

Durante el mes de marzo se observa una correlación positiva con la nubosidad de 0,37 lo que se traduce en una coincidencia entre el aumento de nubosidad durante el mes de marzo y un retraso en el fin de la estación polínica. Sin embargo, la temperatura en este mes tiene una correlación negativa por lo que ocurriría lo contrario que con la nubosidad.

Análisis retrospectivo de la integral polínica

Una vez realizado el análisis retrospectivo de las variables climáticas en los meses previos a las estaciones polínicas, se han obtenido las siguientes conclusiones:

Las estaciones polínicas de plátano con integrales polínicas elevadas requieren que haya precipitaciones algo superiores a la media en los meses de invierno (Fig. 22). Así como temperaturas ligeramente cálidas en invierno y primavera (Fig.21).

En cuanto a las condiciones durante el momento de polinización deben de ser algo menos nubosas (Fig. 23) y menos húmedas, es decir, que haga buen tiempo durante la primavera.

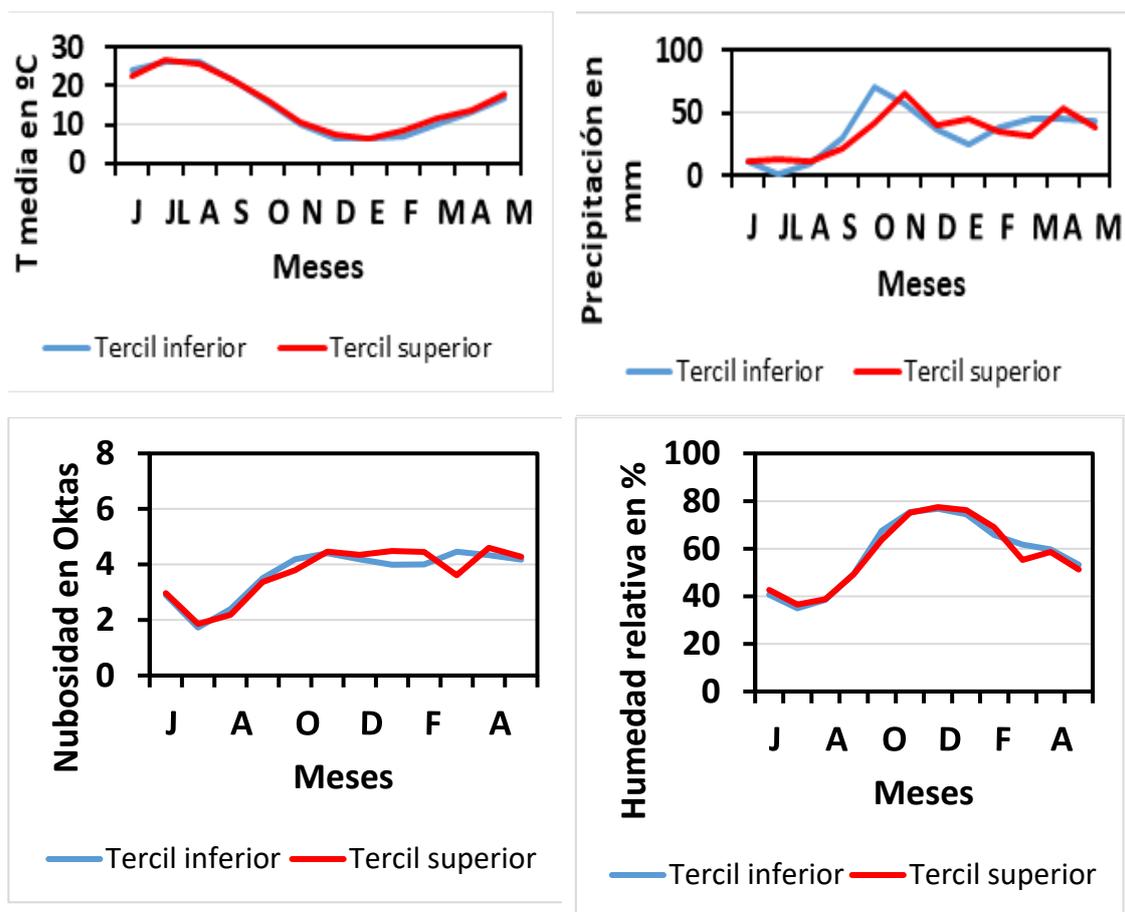


Figura 3.8 Análisis retrospectivo de la temperatura media, la precipitación, la nubosidad y la humedad relativa en los meses previos a estaciones con integrales polínicas de plátano situadas en el tercil inferior o en el superior.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos climáticos y de concentraciones de polen.

3.3.2. Variabilidad a corto plazo

Es importante conocer las condiciones atmosféricas favorables de los días con concentraciones polínicas elevadas, ya que son estos días los que presentan un mayor riesgo para las personas alérgicas o con patologías respiratorias como el asma. A continuación, se muestran los mapas de anomalías medias respecto al periodo 1991-2020 para los días de elevadas concentraciones polínica superiores al percentil 95 del tipo polínico *Poaceae*.

En primer lugar, respecto a las anomalías medias de presión atmosférica a nivel del mar (Figura 3.9) para los días concentraciones elevadas de gramíneas, las condiciones parecen neutras sobre el área de estudio. Sin embargo, sobre las Islas Británicas observamos áreas

con anomalías negativas de presión muy acusadas, por lo que en esa zona tendremos circulación de profundas borrascas.

En cuanto a las anomalías de temperatura a 850 ha se observan anomalías positivas en el entorno del área de estudio, por lo que estos días con elevadas concentraciones de polen de gramíneas se corresponderían con días cálidos. La procedencia de estas masas de aire cálido es el norte de África, por lo que podrían traer consigo polvo en suspensión del Desierto del Shara desencadenando episodios de clima sobre la Península Ibérica y pudiendo interactuar con los granos de polen. Esta combinación sumada a los contaminantes presentes en los entornos urbanos podría traducirse en días con muy mala calidad del aire en el área de estudio.

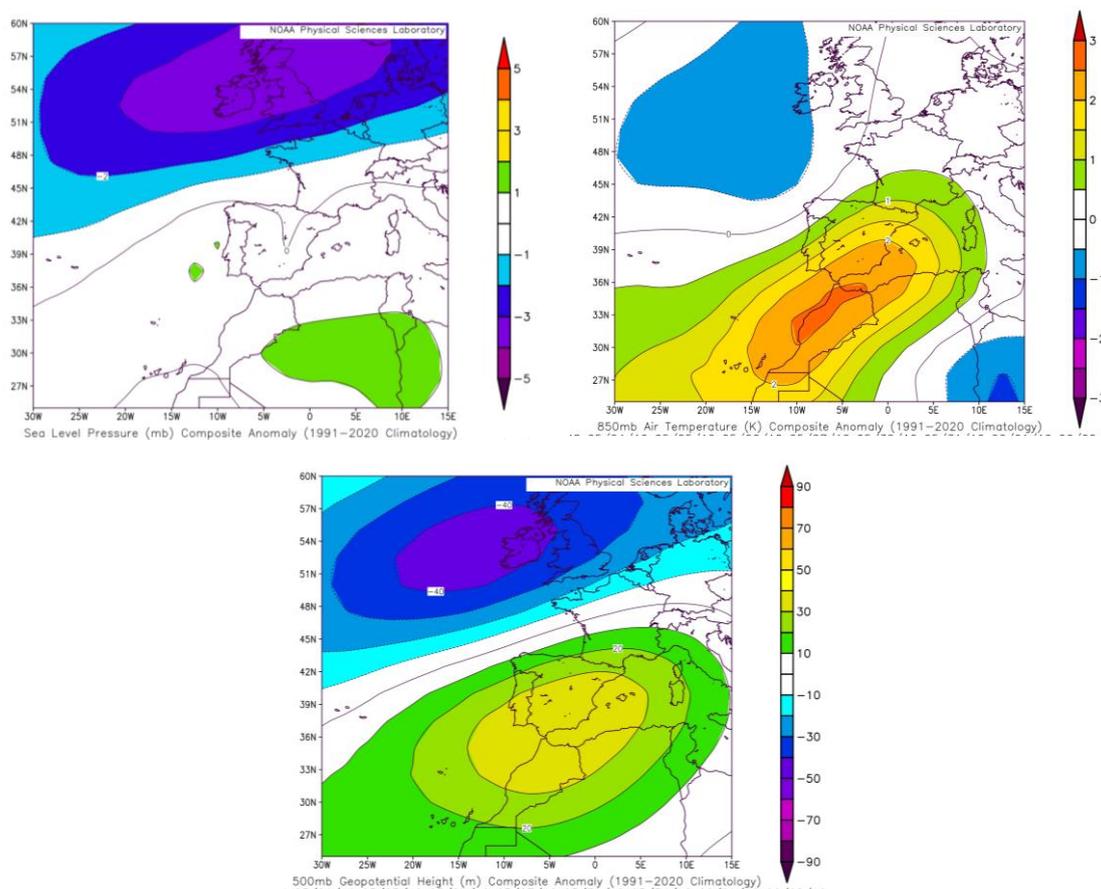


Figura 3.9. Anomalía de presión a nivel del mar (arriba, izquierda), de la temperatura a 850 ha (arriba, derecha) y de la altura geopotencial a 500 hPa respecto a la media para el periodo 1991-2020 durante los días en los que el contenido de polen en la atmósfera supera el percentil 95.

Fuente: Elaboración propia a partir del Physical Sciences Laboratory de NOAA.

En el caso del tipo polínico *Platanus* las anomalías en la presión a nivel del mar (Figura 3.10) son bastante elevadas, lo que implica la presencia de robustos anticiclones. Además,

con esta configuración sinóptica y atendiendo a los valores más elevados de las anomalías, probablemente tendríamos el centro de los anticiclones presentes durante estos periodos ubicado en el norte de Francia. Esta configuración propiciaría la presencia de vientos del sureste sobre la zona de estudio.

En cuanto a la temperatura la anomalía de temperatura a 850 hPa también es llamativamente positiva, por lo que las situaciones con elevadas concentraciones de polen de plátano se corresponden con días bastante cálidos. Al igual que en el caso de las gramíneas las masas de aire cálido parecen provenir del norte de África, probablemente asociado a dorsales anticiclónicas, con los posibles efectos adversos que ello con lleva y anteriormente mencionados.

Por último, la anomalía de la altitud geopotencial muestra al igual que en las otras dos variables anomalías positivas muy marcadas, lo que se traduce en periodos de estabilidad atmosférica y ausencia de precipitaciones, factores que impiden la ventilación de la atmosfera en el área de estudio.

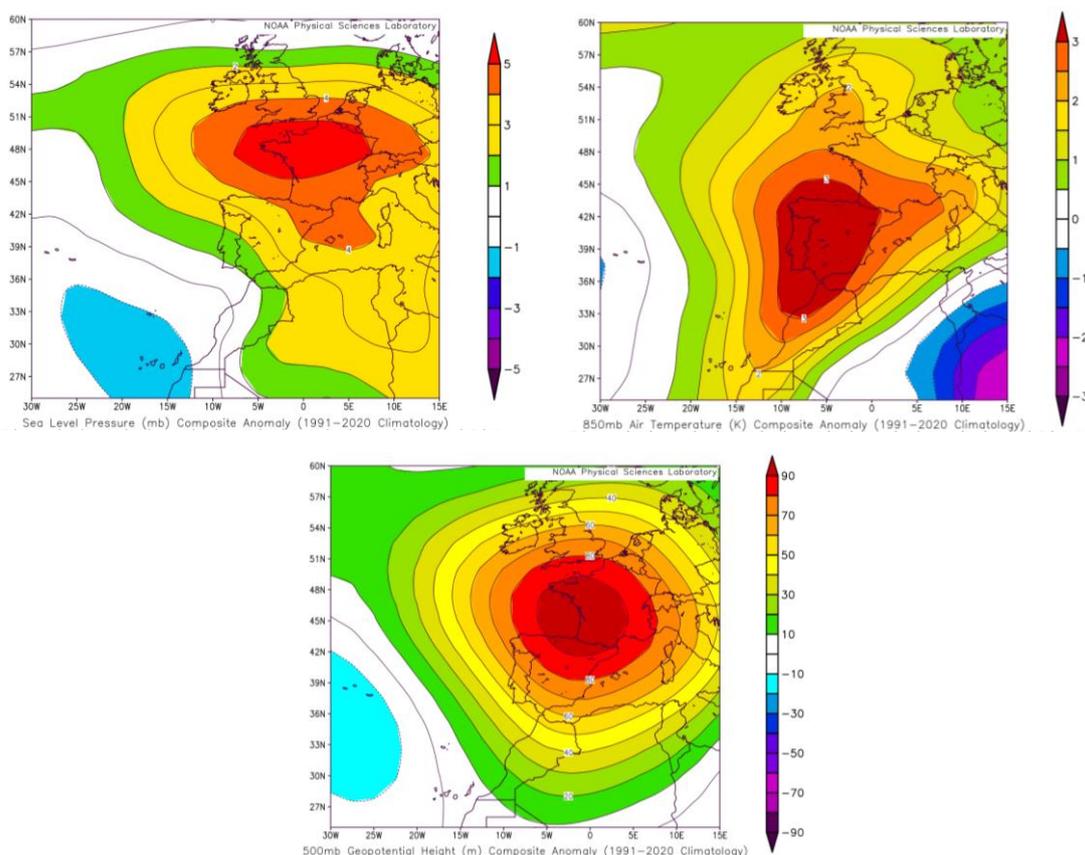


Figura 3.10. Anomalía de presión a nivel del mar (arriba, izquierda), de la temperatura a 850 ha (arriba, derecha) y de la altura geopotencial a 500 hPa respecto a la media para el periodo 1991-2020 durante los días en los que el contenido de polen en la atmósfera supera el percentil 95.

3.4. EVOLUCIÓN DE LA VEGETACIÓN EN LA CIUDAD DE MADRID Y SU RELACIÓN CON LAS CONCENTRACIONES POLÍNICAS DE *POACEAE* Y *PLATANUS*

Como ya se ha señalado en la introducción, el polen es también un buen indicador de los cambios que se producen en los usos del suelo, por lo tanto, las tendencias observadas en las concentraciones de polen podrían estar condicionadas por la evolución de los usos del suelo en la ciudad y la región de Madrid.

A continuación, se ha comprobado la relación entre las integrales polínicas de plátano y gramíneas mediante los índices NDVI de la ciudad de Madrid y la provincia de Madrid respectivamente. Además, en el caso de plátano se ha observado su posible relación con la evolución de la vegetación dentro de la ciudad de Madrid y en el caso de las gramíneas se ha examinado su posible relación con los posibles cultivos presentes al sur de la comunidad.

En el caso de las gramíneas se observa una correlación positiva (Figura 3.11) entre el índice NDVI de la provincia de Madrid durante los meses de junio del periodo 1994 - 2021 y la integral polínica. Por tanto, a priori se puede relacionar el aumento de este índice y el aumento de la integral polínica de las gramíneas.

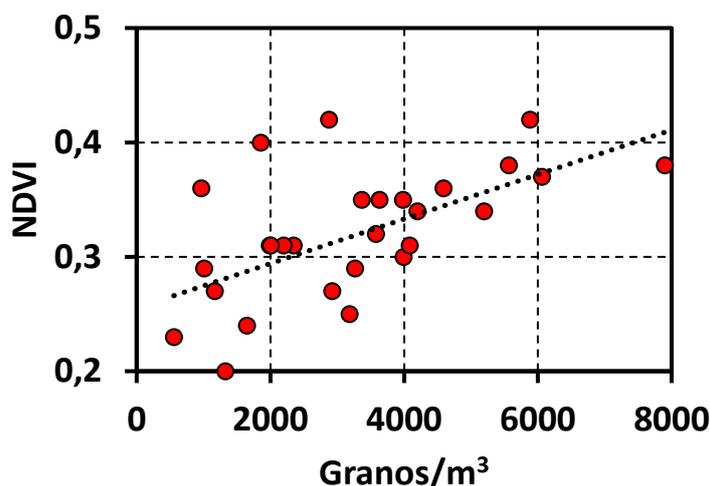


Figura 3.11. Correlación entre la integral polínica de gramíneas y el índice NDVI de la provincia de Madrid

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de las concentraciones de polen diarias y el índice NDVI.

Si observamos la evolución anual del índice NDVI en el mes de junio durante el periodo 1994-2021 en la provincia de Madrid, se observa cómo sigue una tendencia al alza en las dos últimas décadas (Figura 3.12).

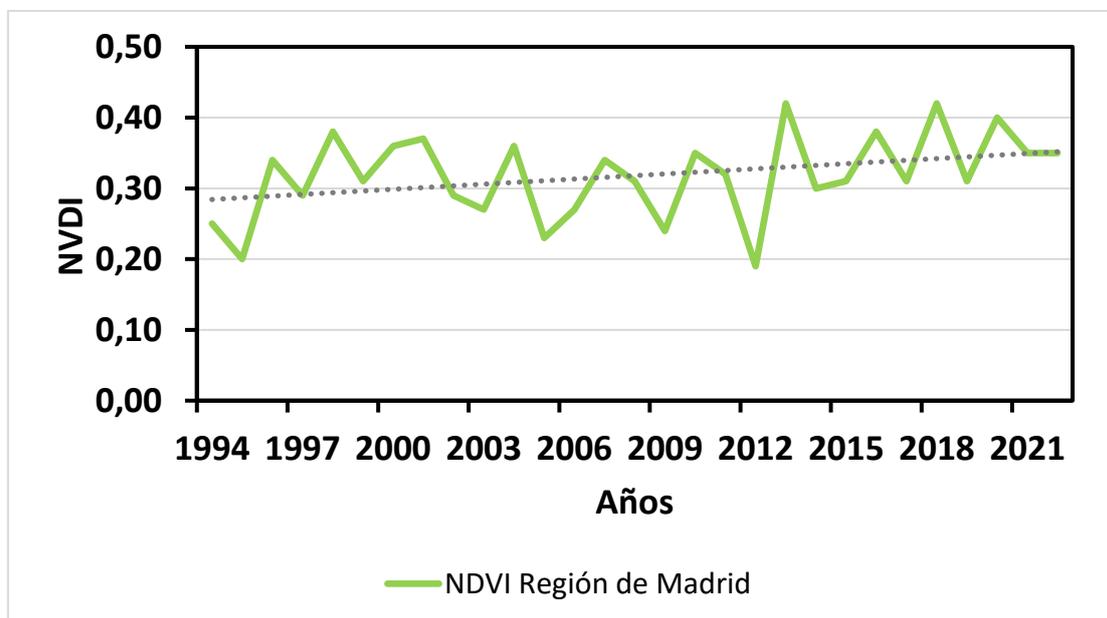


Figura 3.12 Evolución temporal del índice NDVI de la provincia de Madrid

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Índice NDVI.

Analizando la evolución de la producción de cereales en la Comunidad de Madrid, se obtiene una correlación positiva significativa entre la integral polínica y la producción de cereales. Esta correlación es bastante intensa en el caso del trigo mientras que en el caso de la cebada no es tan acusada, lo que podría significar que las plantaciones de cereales alrededor de Madrid influyen en las concentraciones polínicas de la misma (Figura 3.13).

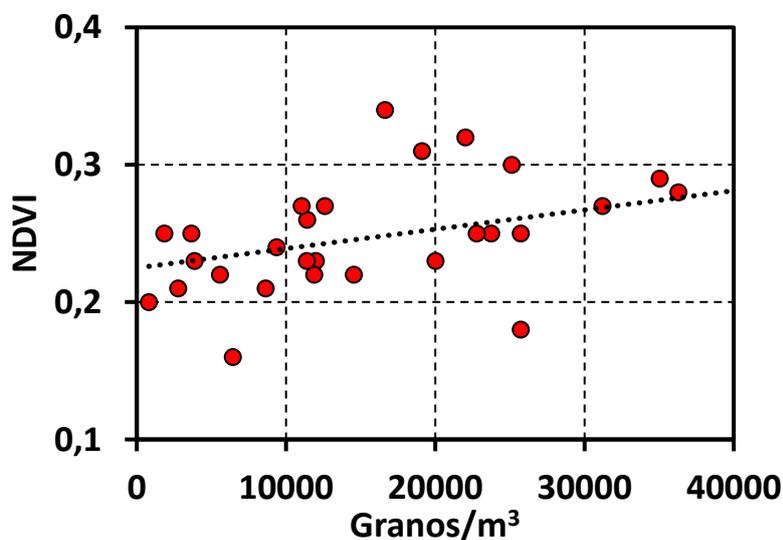


Figura 3.13. Correlación entre la integral polínica de plátano y el índice NDVI de la ciudad de Madrid

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de las concentraciones de polen diarias y el índice NDVI.

En el caso del plátano de sombra encontramos igualmente una correlación positiva entre la integral polínica y el índice NDVI durante los meses de abril (1994-2021), pero en este caso en el de la ciudad de Madrid. Si analizamos la evolución anual del índice NDVI en la ciudad de Madrid durante los meses de abril, vemos como la tendencia es igualmente positiva (Figura 3.14).

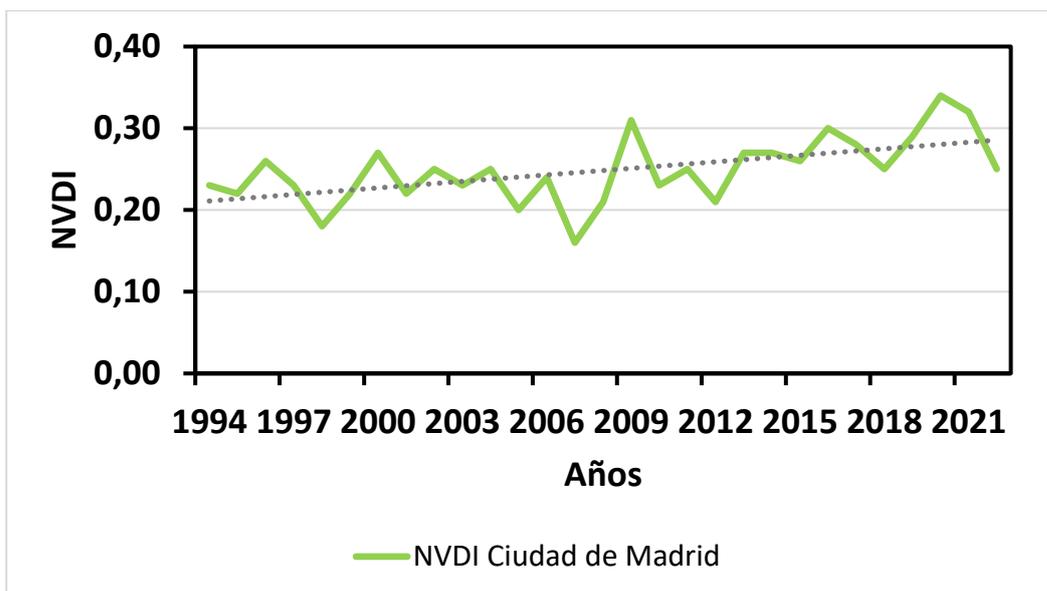


Figura 3.14. Evolución temporal del índice NDVI en la ciudad de Madrid

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Índice NDVI.

Analizando las posibles causas de este aumento del índice NDVI puede deberse tanto a razones humanas como estadísticas. En el caso de las causas humanas en el siguiente gráfico vemos la evolución de los espacios verdes en la ciudad de Madrid, tanto de los árboles asociados al viario como de las zonas ajardinadas. Si bien se observa un cambio drástico al final de la serie que podría tratarse de un error de tratamiento estadístico, la tendencia es clara la vegetación en la ciudad de Madrid está aumentando, sobre todo en el caso de los árboles (Figura 3.15).

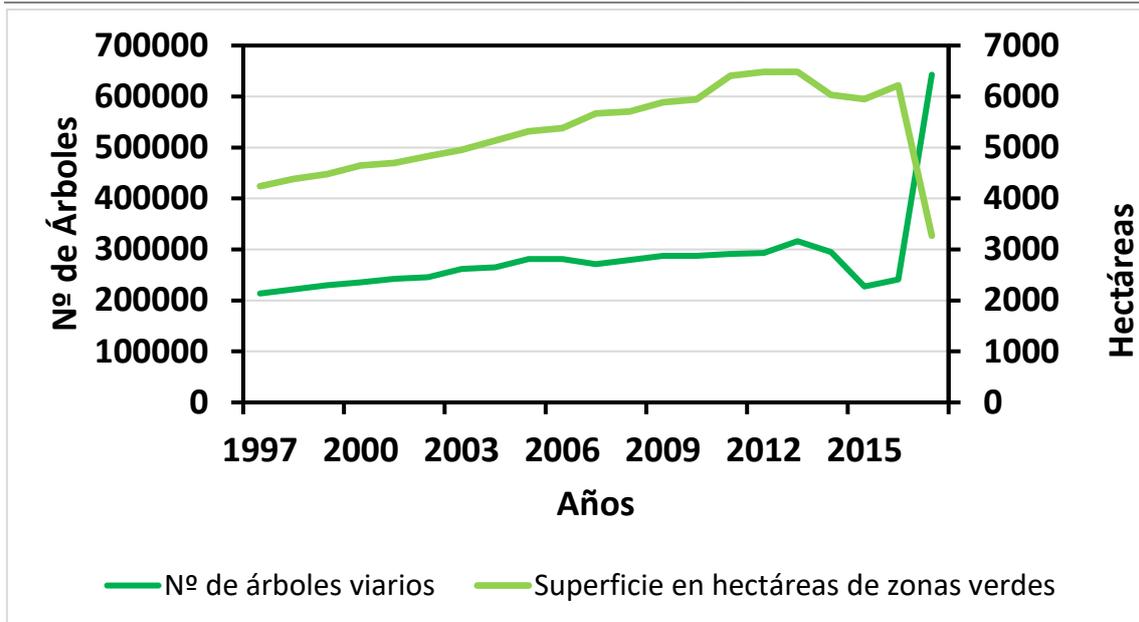


Figura 3.15. Evolución temporal de las zonas verdes en la ciudad de Madrid

Fuente: Elaboración propia a partir de la estadística de parques y jardines del Ayto. de Madrid

Sin embargo, también es posible que se deba a una razón estadística por la toma de datos mediante los satélites para capturar la imagen a partir de la cual se calcula posteriormente el índice NDVI. Este problema proviene de que las mediciones se han ido tomando a partir de 4 satélites como son Lansat 5 (1990-2011), Landsat 7 (2003-2020), Landsat 8 (2013- actualidad) y Landsat 9 (2022- Actualidad).

4. CONCLUSIONES

Tras haber realizado el presente análisis, cabe pensar que la combinación de una mayor presencia de especies vegetales con capacidad para producir pólenes alergénicos, sumado al contexto climático actual, podría derivar en una exacerbación de los efectos negativos sobre la población. El probable aumento de los episodios con altas concentraciones polínicas en la atmosfera, sumado a la mayor presencia de estas especies vegetales productoras de dicho polen, podría desencadenar picos de presión asistencial en el sistema sanitario. En el caso de las gramíneas observamos una relación entre los días con elevadas concentraciones de polen y las condiciones de estabilidad atmosférica, ausencia de precipitaciones y temperaturas elevadas. Estas condiciones ambientales como ya hemos visto anteriormente podrían convertir estos días con elevadas concentraciones polínicas en días potencialmente peligrosos tanto para la población general como para las personas con alergias o patologías respiratorias.

En cuanto al plátano al igual que en el caso de las gramíneas también se ha observado una relación entre los días con elevada concentración polínica y estabilidad atmosférica, ausencia de precipitaciones y temperaturas elevadas.

Por otro lado, resaltar que ambos tipos polínicos muestran una relación positiva con el índice NDVI, si bien en el caso de las gramíneas se corresponde con el índice de la provincia y en el caso del plátano corresponde con el índice de la ciudad. Esto se podría traducir en que un aumento de la vegetación en el interior de la ciudad y un aumento de la superficie agrícola en sus alrededores, podrían seguir contribuyendo a un aumento de las concentraciones polínicas de plátano y gramíneas respectivamente en la atmósfera de Madrid.

BIBLIOGRAFÍA

- AEMET (2022). *Informe sobre el estado del clima en España 2021. Resumen ejecutivo*. Madrid: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Agencia Estatal de Meteorología. Disponible en línea, en julio de 2024 en: https://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicacion_es_y_estudios/publicaciones/Informes_estado_clima/Resumen_ejecutivo_informe_clima_2021.pdf
- AEMET (2011). *Atlas Climático Ibérico. Iberian Climate Atlas*. Agencia Estatal de Meteorología. Disponible en línea, en junio de 2024 en: <http://www.madrid.org/iestadis/fijas/estructu/general/otros/descarga/clehmed3.pdf>
- Aerts, R. et al (2021). Tree pollen allergy risks and changes across scenarios in urban green spaces in Brussels, Belgium. *Elsevier*, Vol. 207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.104001>
- Anenberg et al. (2020). Synergistic health effects of air pollution, temperature, and pollen exposure: a systematic review of epidemiological evidence. *Environmental Health*, 19: pp. 1-19. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12940-020-00681-z>.
- Ayto. de Madrid (2024). La población de Madrid se incrementa en 120.560 habitantes en 2023 y supera los 3.460.000. Disponible en línea, en junio de 2024 en: [Población 2024](#).
- Ayto. de Madrid (2023). Plan de Plantaciones del Arbolado de Zonas Verdes y del Viario. Campaña 2023/2024. Disponible en línea, en junio de 2024 en: [Plan de Plantaciones del Arbolado de Zonas Verdes y del Viario](#)
- Ayto. de Madrid (2019). Madrid + Natural. Soluciones basadas en la naturaleza para la adaptación al cambio climático en la ciudad de Madrid. Disponible en línea, en junio de 2024 en: [Madrid+Natural](#)
- Ayto. de Madrid (2018). Plan de Infraestructura Verde y Biodiversidad de la Ciudad de Madrid 2018-2030. Área de Gobierno de Medioambiente y Movilidad. Disponible en línea, en junio de 2024 en: [Plan de Infraestructura Verde y Biodiversidad de la Ciudad de Madrid 2018-2030](#)
- Brent Yarnal (1992). *Synoptic Climatology in Environmental Analysis: A Primer*. ISBN: 978-0-471-94796-7. 256 pp

- CMAD (2019). *Memoria. Mapa digital continuo de vegetación de la comunidad de Madrid*. Madrid: Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Disponible en línea, en julio de 2024 en: https://www.comunidad.madrid/sites/default/files/aud/urbanismo/cma_urb_es_memoria_mapa_vegetacion.pdf
- CMAD (2007). *Atlas. El Medio Ambiente en la Comunidad de Madrid*. Madrid: Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Disponible en línea, en julio de 2024 en: <http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM003345.pdf>
- EUCHO (2024). *Datos probatorios sobre el cambio climático. Efectos sobre la salud. Alérgenos aeronáuticos. Polen*. European Climate and Health Observatory. Disponible en línea, en julio de 2024 en: https://climate-adapt.eea.europa.eu/es/observatory/evidence/health-effects/aeroallergens/pollen?set_language=es
- Eva CI (2021). Modelización del cambio climático a través de autómatas celulares. *Research Gate*. Disponible en línea, en julio de 2024 en: https://www.researchgate.net/figure/Figura-23-Climograma-de-la-estacion-de-Retiro-en-Madrid-donde-se-registran-las_fig3_353353070
- Fernández-Nogueira, D., & Corbelle-Rico, E. (2018). Land Use Changes in Iberian Peninsula 1990–2012. *Land*, 7(3), 99. DOI: <https://doi.org/10.3390/land7030099>
- Fuentes N. et al (2006). Análisis polínico del yacimiento arqueológico de La Junta (Puebla de Guzmán, Huelva). *Anales de Biología* 28: 73-83. Disponible en línea, en junio de 2024 en: <https://www.um.es/analesdebiologia/numeros/28/PDF/05-ANALISIS%20POLINICO.pdf>
- García-Diez, M. y Zapata, L. (2013). *Métodos y Técnicas de Análisis y Estudio en Arqueología Prehistórica. De lo técnico a la reconstrucción de los grupos humanos*. País Vasco. Universidad de País Vasco (UPV/EHU), pp. 270-285. Disponible en línea, en junio de 2024 en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=547511>
- Gharbi, D. (2018). Evolución del comportamiento de los diferentes tipos polínicos en la atmósfera de Málaga (1991-2015): Su relación con los parámetros meteorológicos y cambio climático. Málaga: Universidad de Málaga, Dpto. de Biología Vegetal, Facultad de Ciencias. Tesis Doctoral. Disponible en línea, en julio de 2024 en : <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=256410>

- González Sampérez, P. (2001). Fuentes paleoambientales para el estudio de la Prehistoria en Aragón. En Ubieto, Agustín (ed.). *II Jornadas de Estudios sobre Aragón en el umbral del siglo XXI, Alcorisa, 17-19 de diciembre de 1999*, 1.ª ed., Zaragoza: Instituto de Ciencias de la Educación, Universidad de Zaragoza, 2001; pp. 209-217. Disponible en línea, en junio de 2024 en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6468125>
- IPCC (2019). Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendía, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. Disponible en línea, en junio de 2024 en: https://report.ipcc.ch/ar6syr/pdf/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf
- López Saez, J.A.; López García, P. y Burjachs, F. (2003). Arqueopalinología: Síntesis crítica. *Polen 12*: 5-35. Disponible en línea, en junio de 2024 en: <https://arkeobotanika.pbworks.com/f/Lopez++03+Arqueopalinolog%C3%ADa.pdf>
- Lozano-Garcia, Ma. S.; Tonello, M. S. y Stutz, S. (2017). Capítulo 3: Polen. En Pérez, L.; Massaferró, J. y Correa-Metrio, A. (Eds.), *Paleobioindicadores Lacustres Neotropicales*. UNAM. Disponible en línea, noviembre de 2023 en: <http://www.librosoa.unam.mx/handle/123456789/273>
- Mercuri A.M.; Marignani M. y Sadori L. (2013). 2013 Palynology: The Bridge Between Palaeology And Ecology For The Understanding Of Human-Induced Global Changes In The Mediterranean Area. Roma. *Annali Di Botanica 3*: 107-113. DOI: 10.4462/annbotrm-10332
- Pérez Quintana, V. (2019). *Usos del suelo en la Comunidad de Madrid. Análisis de los resultados del Corine Land Cover de 2018*. Madrid: Asociaciones Vecinales Federación Regional Madrid. Disponible en línea, en julio de 2024 en: https://aavvmadrid.org/wpfd_file/usos-del-suelo-en-la-comunidad-de-madrid-analisis-de-los-resultados-del-corine-land-cover-de-2018/
- Rasilla Álvarez, D. F. (2021). Clima y Concentraciones de Polen de Gramíneas en el País Vasco. *Geographicalia*, 73: pp. 177-193. DOI: https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.2021735196

REA (2007). *Manual de Calidad y Gestión de la Red Española de Aerobiología*. Córdoba:

Universidad de Córdoba. Disponible en línea, en julio de 2024 en:

https://www.uco.es/aerobiologia/metodologia/manual_cast.pdf

Rubenstein, M.A., Weiskopf, S.R., Bertrand, R. et al. (2023). Climate change and the global redistribution of biodiversity: substantial variation in empirical support for expected range shifts. *Environmental Evidence*, 12:7. DOI:

<https://doi.org/10.1186/s13750-023-00296-0>

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura	Página
Figura 1.1 Diagrama polínico de la Laguna de las Madres (Huelva)	5
Figura 2.1 Climograma de la estación meteorológica del Retiro (Madrid)	12
Figura 2.2 Imagen de la cobertura del suelo a partir del Corine Land Cover	13
Figura 2.3 Área de estudio a escala de ciudad	17
Figura 2.4 Área de estudio a escala de región	18
Figura 2.5 Gráfico de control de calidad	21
Figura 2.6 Relleno de datos mediante interpolen (plátano)	21
Figura 2.7 Relleno de datos mediante interpolen (gramíneas)	22
Figura 2.8 Estación polínica del plátano (día inicio, día pico, día fin) (1994-2022)	23
Figura 2.9 Estación polínica de las gramíneas (día inicio, día pico, día fin) (1994-2022)	23
Figura 3.1 Anomalías en la precipitación y la temperatura media en la estación de meteorológica de Madrid Cuatro Vientos (Periodo de referencia 1981-2010)	27
Figura 3.2 Anomalías en la nubosidad y la humedad relativa en la estación meteorológica de Madrid Cuatro Vientos (Periodo de referencia 1981-2010)	28
Figura 3.3 Régimen temporal del polen de ambas especies (1994-2022)	30
Figura 3.4 Evolución interanual de las concentraciones polínicas y la longitud de la estación polínica de las gramíneas	30
Figura 3.5 Evolución interanual de las concentraciones polínicas y la longitud de la estación polínica del plátano	31
Figura 3.6 Tendencia del total de polen de gramíneas y plátano	32
Figura 3.7 Análisis retrospectivo de la temperatura media, la precipitación, la nubosidad y la humedad relativa en los meses previos a estaciones con integrales polínicas de gramíneas situadas en el tercil inferior o en el superior.	36
Figura 3.8 Análisis retrospectivo de la temperatura media, la precipitación, la nubosidad y la humedad relativa en los meses previos a estaciones con integrales polínicas de plátano situadas en el tercil inferior o en el superior.	38
Figura 3.9. Anomalía de presión a nivel del mar (arriba, izquierda), de la temperatura a 850 ha (arriba, derecha) y de la altura geopotencial a 500 hPa respecto a la media para el periodo 1991-2020 durante los días en los que el contenido de polen en la atmósfera supera el percentil 95.	39
Figura 3.10. Anomalía de presión a nivel del mar (arriba, izquierda), de la temperatura a 850 ha (arriba, derecha) y de la altura geopotencial a 500 hPa respecto a la media para el periodo 1991-2020 durante los días en los que el contenido de polen en la atmósfera supera el percentil 95.	40
Figura 3.11 Correlación entre la integral polínica de gramíneas y el índice NDVI de la provincia de Madrid	41
Figura 3.12 Evolución temporal del índice NDVI de la provincia de Madrid	42
Figura 3.13 Correlación entre la integral polínica de plátano y el índice NDVI de la ciudad de Madrid	43
Figura 3.14 Evolución temporal del índice NDVI en la ciudad de Madrid	43
Figura 3.15 Evolución temporal de las zonas verdes en la ciudad de Madrid	44
Tabla	Página
Tabla 2.1. Usos del suelo en la Comunidad Autónoma de Madrid según Corine Land Cover 2018	15
Tabla 2.2 Fuentes de información utilizadas	15

Tabla 3.1 Parámetros estadísticos de la temperatura media y la precipitación	26
Tabla 3.2 Parámetros estadísticos de la humedad relativa y la nubosidad	28
Tabla 3.3 Parámetros estadísticos de la evolución interanual del tipo polínico <i>Poaceae</i>	30
Tabla 3.4 Parámetros estadísticos de la evolución interanual del tipo polínico <i>Platanus</i>	31
Tabla 3.5 Coeficiente de Correlación de Pearson entre el día juliano de comienzo de la estación polínica y las variables meteorológicas	33
Tabla 3.6. Coeficiente de Correlación de Pearson entre el día juliano de fin de la estación polínica y las variables meteorológicas	
Tabla 3.7. Coeficiente de Correlación de Pearson entre el día juliano de comienzo de la estación polínica y las variables meteorológicas	36
Tabla 3.8 Coeficiente de Correlación de Pearson entre el día juliano de fin de la estación polínica y las variables meteorológicas	37