



Facultad de Ciencias
Departamento de Botánica y Fisiología Vegetal
Universidad de Málaga

Estudio aerobiológico del municipio de Ronda y Sierra de las Nieves (sur de España). Análisis comparativo y elaboración de modelos

Tesis Doctoral

Antonio Picornell Rodríguez

Directoras:

M.^a Marta Recio Criado y M.^a Mar Trigo Pérez

Programa de Doctorado:

Diversidad Biológica y Medio Ambiente


Año 2020



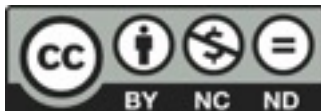


UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

AUTOR: Antonio Picornell Rodríguez

 <http://orcid.org/0000-0002-3102-1344>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): riuma.uma.es





DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DE LA TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL TÍTULO DE DOCTOR

D./Dña ANTONIO PICORNELL RODRÍGUEZ

Estudiante del programa de doctorado DIVERSIDAD BIOLÓGICA Y MEDIO AMBIENTE de la Universidad de Málaga, autor/a de la tesis, presentada para la obtención del título de doctor por la Universidad de Málaga, titulada: ESTUDIO AEROBIOLÓGICO DEL MUNICIPIO DE RONDA Y SIERRA DE LAS NIEVES (SUR DE ESPAÑA). ANÁLISIS COMPARATIVO Y ELABORACIÓN DE MODELOS

Realizada bajo la tutorización de MARÍA MARTA RECIO CRIADO y dirección de MARÍA DEL MAR TRIGO PÉREZ Y MARÍA MARTA RECIO CRIADO (si tuviera varios directores deberá hacer constar el nombre de todos)

DECLARO QUE:

La tesis presentada es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, conforme al ordenamiento jurídico vigente (Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), modificado por la Ley 2/2019, de 1 de marzo.

Igualmente asumo, ante a la Universidad de Málaga y ante cualquier otra instancia, la responsabilidad que pudiera derivarse en caso de plagio de contenidos en la tesis presentada, conforme al ordenamiento jurídico vigente.

En Málaga, a 27 de JULIO de 2020

Fdo.: ANTONIO PICORNELL RODRÍGUEZ





UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA

Facultad de Ciencias

Departamento de Botánica y Fisiología Vegetal

DOÑA M.^a MARTA RECIO CRIADO Y DOÑA M.^a DEL MAR TRIGO PÉREZ, Profesoras Titulares del Departamento de Botánica y Fisiología Vegetal de la Universidad de Málaga, y directoras de la Memoria presentada por D. Antonio Picornell Rodríguez para la obtención del grado de Doctor, titulada «Estudio aerobiológico del municipio de Ronda y Sierra de las Nieves (sur de España). Análisis comparativo y elaboración de modelos».

INFORMAN:

Que el citado trabajo de investigación ha sido realizado bajo nuestra supervisión en el Departamento de Botánica y Fisiología Vegetal (Área de Botánica) de la Universidad de Málaga, que se considera finalizado y puede ser presentado para su exposición y defensa como Tesis Doctoral, habiéndose alcanzado los objetivos propuestos.

Y para que así conste, a efectos administrativos para la obtención del grado de Doctor, firmamos el presente informe en Málaga, a 27 de julio de 2020.

Fdo. Dra. M.^a Marta Recio Criado

Fdo. Dra. M.^a del Mar Trigo Pérez



Resultados publicados de esta memoria

Parte de los resultados de esta memoria han sido publicados en revistas científicas con índice de impacto:

- **Picornell, A.**, Recio, M., Ruiz-Mata, R., García-Sánchez, J., Cabezudo, B., & Trigo, M. M. (2020). Medium- and long-range transport events of *Alnus* pollen in western Mediterranean. *International Journal of Biometeorology*, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01944-7>
- **Picornell, A.**, Oteros, J., Trigo, M. M., Gharbi, D., Docampo Fernández, S., Melgar Caballero, M., Toro, F. J., García-Sánchez, J., Ruiz-Mata, R., Cabezudo, B., & Recio, M. (2019). Increasing resolution of airborne pollen forecasting at a discrete sampled area in the southwest Mediterranean Basin. *Chemosphere*, 234, 668-681. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.019>
- **Picornell, A.**, Recio, M., Trigo, M. M., & Cabezudo, B. (2019). Preliminary study of the atmospheric pollen in Sierra de las Nieves Natural Park (Southern Spain). *Aerobiologia*, 35(3), 571-576. <https://doi.org/10.1007/s10453-019-09591-1>
- Rojo, J., **Picornell, A.**, & Oteros, J. (2019). AeRobiology: the computational tool for biological data in the air. *Methods in Ecology and Evolution*, 10, 1371-1376. <https://doi.org/10.1111/2041-210x.13203>
- Recio, M., **Picornell, A.**, Trigo, M. M., Gharbi, D., García-Sánchez, J., & Cabezudo, B. (2018). Intensity and temporality of airborne *Quercus* pollen in the southwest Mediterranean area: Correlation with meteorological and phenoclimatic variables, trends and possible adaptation to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 250-251, 308-318. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.11.028>

También se han expuesto parte de los resultados en comunicaciones expuestas en los siguientes congresos internacionales:

- Mediterranean Palynology Symposium 2017. Organizado por APLE, GPPSBI, APLF. Barcelona (España). 4-6 septiembre 2017.
- 11th International Congress on Aerobiology 2018. Organizado por International Association for Aerobiology (IAA). Parma (Italia). 3-7 septiembre 2018.
- Mediterranean Palynology Symposium 2019. Organizado por APLE, GPPSBI, APLF. Bordeaux (Francia). 9-11 julio 2019.

Agradecimientos

Esta Tesis Doctoral se ha realizado gracias a la ayuda de una beca de Formación de Profesorado Universitario (FPU15/01668) concedida por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte del Gobierno de España.

El transporte para la realización de muestreos y reemplazamiento de muestras se realizó gracias a la financiación recibida en el convenio para el estudio de la Flora y Vegetación del Espacio Natural Sierra de las Nieves firmado entre el grupo de investigación PAIDI RNM 115 de la Universidad de Málaga y la Junta de Andalucía. Todo el material fungible de laboratorio y los medios y maquinaria necesaria para el montaje y análisis de las muestras fueron proporcionados por el grupo de investigación PAIDI RNM 115.

El captador de polen instalado en Sierra de las Nieves fue financiado por el Herbario MGC del Servicio Central de Apoyo a la Investigación de la Universidad de Málaga, y el Ayuntamiento de Parauta contribuyó a su instalación.

Los datos meteorológicos de la estación de La Nava en Sierra de las Nieves fueron cedidos por la Asociación de Cazatormentas y Aficionados a la Meteorología ACAMET.

Son muchas las personas que me han ayudado y apoyado a lo largo de mi formación investigadora y a las que le debo un especial agradecimiento.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis directoras de tesis, Marta Recio Criado y M.^a del Mar Trigo Pérez, la paciencia y dedicación que han tenido a la hora de instruirme y formarme. Marta, muchas gracias por todo lo que me has enseñado, por escuchar mis ideas y mejorarlas, por confiar en mí, por encargarte de las muestras mientras estaba de estancia y por apoyarme cuando lo he necesitado. M.^a del Mar, muchas gracias por todas las oportunidades que me has dado, por tus correcciones, por tu apoyo y por ayudarme a abrirme paso como investigador.

No puedo pasar por alto la ayuda de mis compañeros y compañeras del departamento. Muchas gracias, Baltasar, por todo el apoyo que nos has ofrecido con el proyecto de tesis, por las salidas de campo y por tan sabios consejos que me has dado. Muchas gracias, Noelia, por todas las charlas y consejos, por escucharme y animarme cuando más lo necesitaba y por todo lo que me has enseñado. Gracias también para ti, José, por enseñarme a herborizar plantas, por tus consejos y por ayudarme con el trabajo informático. Muchas gracias, Enrique, por tantos buenos ratos a la hora del almuerzo, por ayudarme a ganar confianza en el ámbito docente y por tus buenos consejos. Muchas gracias, Andrés, por ayudarme con las identificaciones de especies y resolverme tantas dudas «de pasillo». Muchas gracias, Federico, por llevarme al campo, por resolver mis dudas y por enseñarme a determinar especies. Por supuesto, agradecer a José María Nieto, Antonio Flores, Rosa Peran, María Altamirano, Teresa Navarro, Elena Bañares, Alfredo Asensi y Blanca Díez por todo lo que me han enseñado como docentes y compañeros/as.

Me gustaría agradecer también a mis compañeros y compañeras becarios/as Rocío, Dorra, Álvaro, Ignacio, Raquel, Elena y Andrea por todo el apoyo y buenos momentos vividos, y también por la ayuda tanto en el laboratorio como en la docencia. Gracias también a Ana, la mujer de la limpieza, por los ánimos y por

hacer del laboratorio un lugar más acogedor, a David, técnico del SCAI, por su amistad, apoyo y consejo y a Lola, Eva, Mamen, Irene y Maica, PAS del área de Botánica, por todos los favores y buenas palabras.

Muchas gracias, Pepe y Rafael, por abrirme la puerta para acceder al captador del instituto de Ronda incluso durante vuestras vacaciones. Gracias por recibirme siempre con tan buenas palabras, por animarme los viajes e incluso ayudarme con reparaciones pese a no tener por qué hacerlo. Gracias también a Pascual, el director, por todo el apoyo y ayuda a la hora de instalar el captador. De igual forma quiero agradecer a María, del Camping las Conejeras, por toda su ayuda a mantener y facilitar el acceso al captador de Sierra de las Nieves.

Quiero dar un especial agradecimiento a mi compañero y amigo José Oteros. Me ayudaste casi sin conocerme y me acogiste en tu casa con tu familia en Alemania. Me has enseñado mucho y no solo en el ámbito de la investigación. Gracias por confiar en mí, por ayudarme a hacer contactos, por dedicarme tu tiempo y por tantos buenos momentos que pasamos en las escapadas de fin de semana. Gracias también a ti, Jesús, has confiado en mí desde que nos conocimos y me has ayudado a integrarme en el ámbito científico. Me gustaría agradecer también a Jeroen Buters que me integrase en su equipo de investigación, confiase en mi trabajo, que me prestase su bicicleta y que siempre haya sido tan amable conmigo.

Quiero agradecer también a todos mis compañeros y compañeras de la Red Española de Aerobiología y de la Asociación Española de Aerobiología por haberme recibido siempre con los brazos abiertos, haber confiado en mi trabajo y por el apoyo y consejos recibidos.

Muchas gracias a Raquel, mi pareja. Siempre me has apoyado y ayudado en todo lo que ha estado en tu mano. Has sufrido conmigo los momentos de mayor incertidumbre y dureza, y es algo por lo que te estaré agradecido siempre.

Gracias a mis padres, por haber confiado siempre en mí, por haberme dejado la máxima libertad a la hora de tomar decisiones y por todo el apoyo y ayuda. Gracias también para el resto de mi familia y en especial a mis abuelos, a los que siempre llevaré en mi memoria y de los que tanto aprendí.

Por último, me gustaría agradecerles a mis amigos todo el apoyo mostrado. Todos y cada uno de vosotros habéis influido en que hoy sea la persona que soy y, por lo tanto, en las cosas que hago.

Gracias de todo corazón,

Antonio Picornell Rodríguez

Índice

1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. Área de estudio	13
1.1.1. Localización geográfica, orografía, geología e hidrología	13
1.1.2. Climatología	15
1.1.3. Sectorización fitogeográfica	17
1.1.4. Uso del suelo.....	18
1.1.5. Vegetación.....	19
1.1.6. Figuras de protección.....	23
1.2. La aerobiología y antecedentes del estudio.....	24
1.3. Justificación del estudio	26
2. OBJETIVOS.....	29
3. MATERIAL Y MÉTODOS	31
3.1. Datos climáticos	31
3.1.1. Datos climáticos en Ronda.....	31
3.1.2. Datos climáticos en Sierra de las Nieves.....	32
3.1.3. Mapas de cambio climático en España.....	33
3.2. Inventario de parques y jardines de Ronda ciudad.....	33
3.3. Muestreo fenológico <i>in situ</i>	33
3.4. Datos de polen y esporas.....	35
3.4.1. Muestreo aerobiológico	35
3.4.1.1. Método de captación de partículas sólidas del aire (polen y esporas).....	35
3.4.1.2. Montaje de muestras aerobiológicas	36
3.4.1.3. Método de recuento de polen y esporas al microscopio.....	36
3.4.2. Calendarios polínicos	37
3.4.3. Tipos polínicos mayoritarios y minoritarios	37
3.4.4. Periodo de Polinación Principal	38
3.4.5. Correlaciones entre valores diarios de concentraciones de polen o esporas y variables meteorológicas.....	38
3.4.6. Variaciones intradiarias	39
3.4.7. Estudio del transporte de polen	40
3.4.8. Esporas de <i>Alternaria</i> y <i>Oidium</i>	41
3.4.9. Modelos de pronóstico	42
3.4.9.1. Modelos de pronóstico basados en regresiones lineales múltiples por pasos ..	43
3.4.9.2. Modelos de pronóstico basados en redes neuronales artificiales	43
3.4.9.3. Modelos de pronóstico basados en random forest	44
3.4.10. Modelos de interpolación espacial: <i>kriging</i>	44
3.5. Paquete AeRobiology.....	47
3.5.1. Métodos de interpolación de datos ausentes.....	47
3.5.1.1. Interpolación lineal	49
3.5.1.2. Interpolación mediante medias móviles	50
3.5.1.3. Interpolación mediante regresiones spline.....	50
3.5.1.4. Interpolación mediante análisis de series temporales	50
3.5.1.5. Interpolación mediante regresiones con puntos de muestreo cercanos	51
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
4.1. Análisis climático y meteorológico	53
4.1.1. Análisis climático y meteorológico en Ronda.....	53
4.1.2. Análisis climático y meteorológico en Sierra de las Nieves	56
4.1.3. Dirección de los vientos predominantes	59
4.1.4. Análisis de los mapas de cambio climático en España	60
4.2. Análisis del inventario de parques y jardines de Ronda ciudad.....	62
4.3. Análisis del muestreo fenológico <i>in situ</i>	68

4.4. Análisis del polen atmosférico.....	72
4.4.1. Diversidad, abundancia y calendarios polínicos	72
4.4.1.2. Diversidad y abundancia	78
4.4.1.3. Calendarios polínicos	79
4.4.2. Tipos polínicos mayoritarios.....	83
4.4.2.1. Tipo Cupressaceae	83
4.4.2.2. Tipo <i>Quercus</i>	87
4.4.2.3. Tipo <i>Olea</i>	90
4.4.2.4. Tipo <i>Castanea</i>	93
4.4.2.5. Tipo Urticaceae	95
4.4.2.6. Tipo Poaceae	98
4.4.2.7. Tipo <i>Plantago</i>	101
4.4.2.8. Tipo <i>Pinus</i>	104
4.4.2.9. Análisis de correlación entre concentraciones de polen y variables meteorológicas	107
4.4.3. Tipos polínicos minoritarios.....	115
4.4.3.1. Análisis de los episodios de transporte de polen de <i>Alnus</i>	122
4.4.4. Variaciones intradiarias	130
4.4.4.1. Análisis de clusters de Ward	136
4.5. Análisis de esporas de <i>Alternaria</i> y <i>Oidium</i>	140
4.5.1. Estacionalidad y abundancia de <i>Alternaria</i> y <i>Oidium</i>	140
4.5.2. Análisis de correlación entre concentración de esporas y variables meteorológicas	147
4.6. Análisis de los modelos de pronóstico	152
4.7. Análisis de los modelos de interpolación espacial.....	156
4.8. Paquete AeRobiology.....	161
4.8.1. Eficiencia de los métodos de interpolación de datos ausentes	164
5. CONCLUSIONES	169
6. ABSTRACT AND CONCLUSIONS	171
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	193
8. ANEXOS	217
8.1. Anexo A. Concentraciones de polen de <i>Alnus</i> en la provincia de Málaga (1992-2019).....	217
8.2. Anexo B. Resultados de la validación interna de los modelos inter-localidades	218
9. PUBLICACIONES CIENTÍFICAS	223

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Área de estudio

1.1.1. Localización geográfica, orografía, geología e hidrología

El municipio de Ronda está situado al noroeste de la provincia de Málaga, en Andalucía (sur de España). Ronda es una de las principales ciudades del interior de la provincia. Se sitúa sobre la depresión de Ronda (>700 m s.n.m.), una meseta rodeada por la Sierra de Grazalema (oeste), Sierra Bermeja (sur) y la Serranía de Ronda (este y sureste). En esta última se encuentra el Parque Natural Sierra de las Nieves y en ella se ubica la cumbre más elevada de la zona (y la segunda de Málaga): el pico Torrecilla, de 1919 m s.n.m. (Figura 1.1).

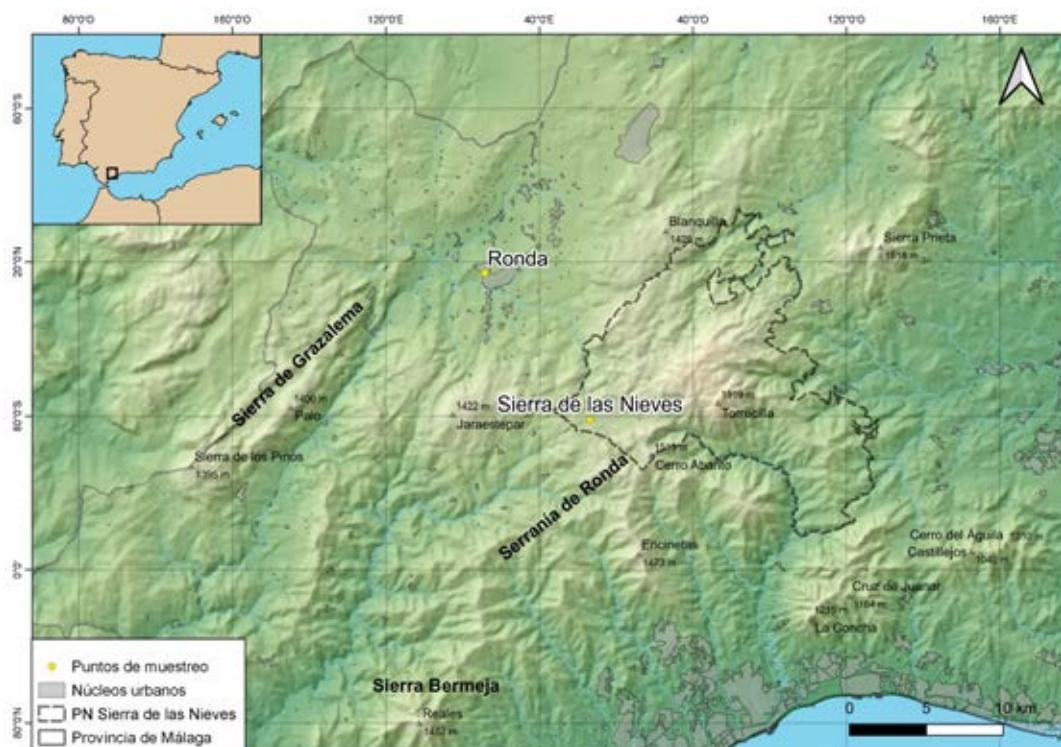


Figura 1.1. Localización geográfica de la ciudad de Ronda y de los puntos de muestreo aerobiológicos de este estudio. Mapa elaborado a partir de las capas de información provistas por el DERA, de la Junta de Andalucía (Junta de Andalucía, 2019). SRC: ETS89 UTM zona 30N. PN: Parque Natural.

La gran diferencia de altitud entre lugares cercanos es el resultado de una orografía escarpada e irregular (Figura 1.1). De hecho, más de la mitad de la superficie del Parque Natural Sierra de las Nieves presenta pendientes de entre el 34% y 66%, y un 20% de su superficie presenta pendientes aún mayores (Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, 2005). Esta orografía es la responsable de las diferencias en dinámicas de vientos y de condiciones meteorológicas locales entre puntos geográficamente cercanos.

En los alrededores de la ciudad de Ronda predominan los materiales sedimentarios calcáreos del Mioceno superior y Paleógeno. La Serranía de Ronda también está compuesta principalmente por rocas sedimentarias (margas y calizas del Triásico, Jurásico, Cretácico y Paleógeno principalmente), aunque posee grandes afloramientos de rocas ígneas. Por la naturaleza carbonatada de

la mayor parte de sus materiales, la Serranía se considera un karst y abundan las cuevas, simas, tajos, manantiales y otras formaciones características de este tipo de materiales. Por lo tanto, la composición litológica de la zona es muy variada (Figura 1.2). Fundamentalmente dominan las margas, margocalizas, calizas, areniscas, dolomías y lutitas, aunque también hay un componente bastante relevante de peridotitas, serpentinitas y gneises. El afloramiento de peridotitas de la Sierra de las Nieves y alrededores es uno de los más extensos del mundo. En el sureste del Parque Natural Sierra de las Nieves, hay también un afloramiento bastante relevante de esquistos, cuarcitas y anfibolitas (Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, 2005; Junta de Andalucía, 2019; Pérez-Latorre *et al.*, 1998).

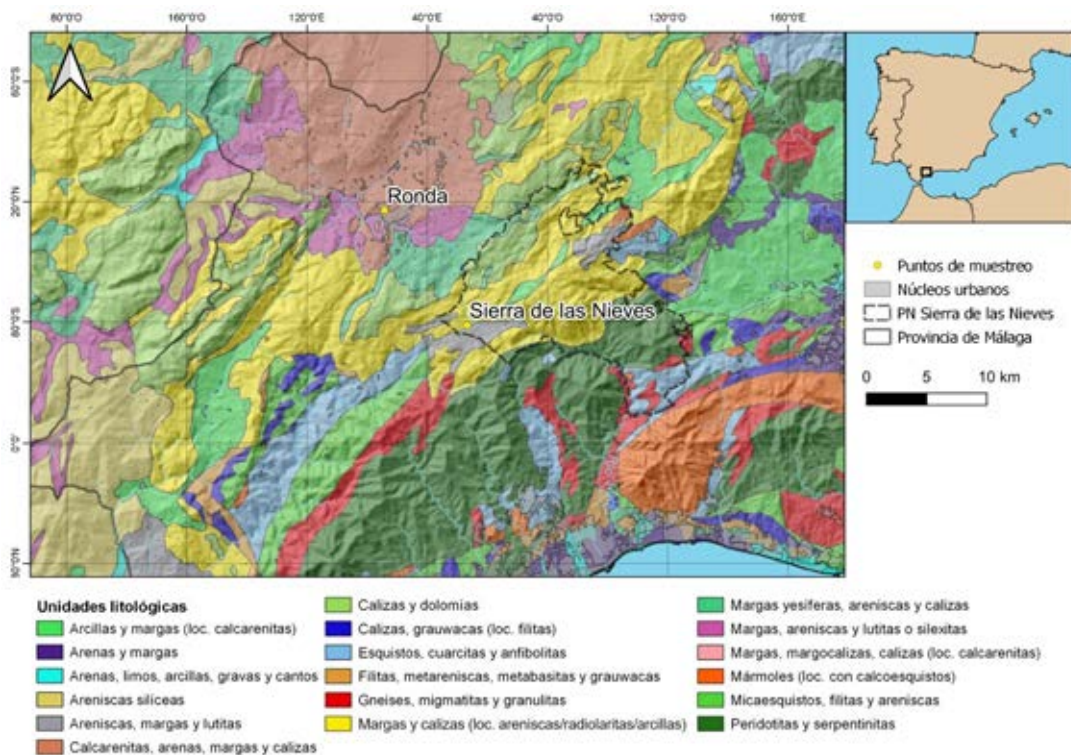


Figura 1.2. Mapa de las unidades litológicas de la zona de estudio. Elaborado a partir de datos espaciales provistos por el DERA (Junta de Andalucía, 2019). Loc.: localmente. PN: Parque Natural.

Los materiales calcáreos favorecen el filtrado de las precipitaciones hasta los acuíferos, que acaban descargando sus aguas en los ríos de la zona. Los principales ríos son el Genal y Río Grande, aunque también destacan el Algoma, Cisnera, Río Verde y Cuevas del Moro (Liñán Baena *et al.*, 2009). Sin embargo, la mayoría de los cauces de la zona son torrenciales (Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, 2005). Por la naturaleza calcárea de gran parte de los materiales, los ríos excavan profundos valles que modelan la orografía (Pérez-Latorre *et al.*, 1998).

1.1.2. Climatología

La abrupta orografía de la zona y, consecuentemente, las grandes diferencias en altitud y orientación de cada área otorgan una gran diversidad climática. La precipitación total anual oscila desde los 500 mm hasta los 2100 mm (Figura 1.3). Hay un gradiente de mayor a menor precipitación desde la zona de la Sierra de Grazalema y Parque Natural de los Alcornocales al oeste hasta el este. La Sierra de Grazalema es uno de los lugares de la Península Ibérica que registra mayores precipitaciones anuales, lo que se debe a una combinación de factores orográficos y meteorológicos. Los vientos dominantes proceden del oeste y al llegar a la sierra ascienden por barlovento. Posteriormente se ven sometidos a una combinación de depresión de sotavento y efecto Venturi que favorecen la ascensión de las masas de aire y la descarga de precipitaciones en la zona (Naranjo-Barea *et al.*, 2017). La mayor parte de las precipitaciones suelen concentrarse en primavera y otoño. Hay un acusado periodo de sequía estival característico del macrobioclima Mediterráneo (Pérez-Latorre *et al.*, 1998).

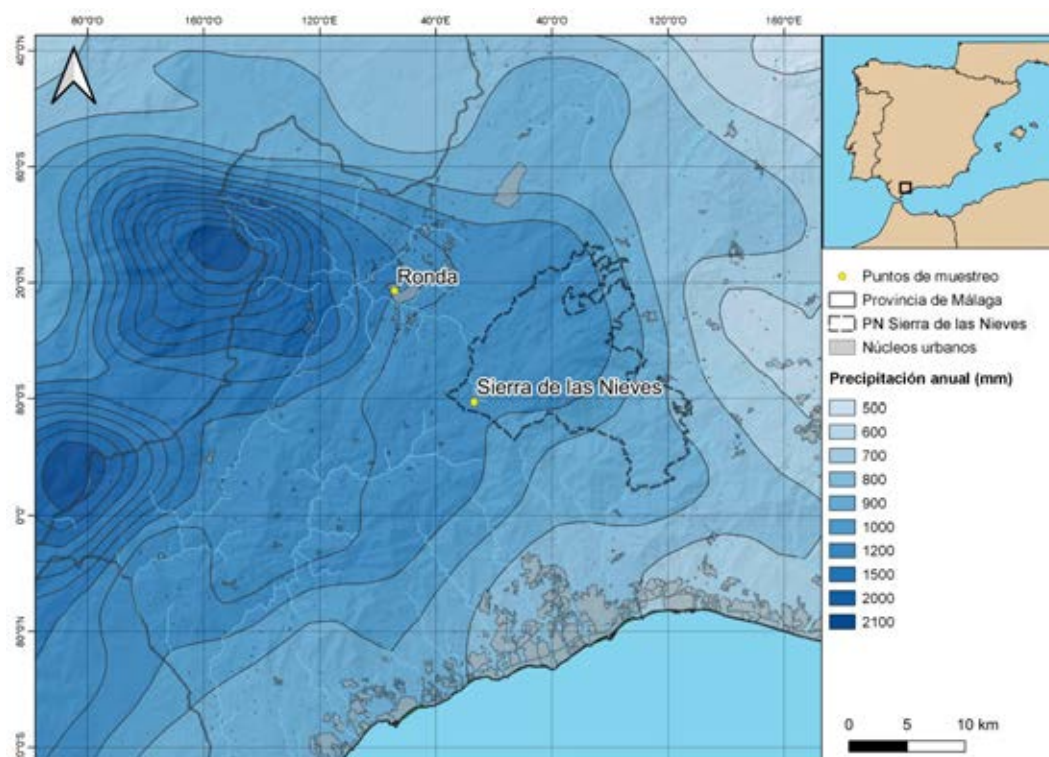


Figura 1.3. Distribución de la precipitación total anual en la zona de estudio. Elaborado a partir de datos espaciales provistos por el DERA de los años 1971-2000 (Junta de Andalucía, 2019). PN: Parque Natural.

La temperatura media anual oscila entre los 13°C y los 18°C (Figura 1.4). Generalmente es mayor en las zonas de menor altitud u orientadas al sur.

La combinación de precipitaciones y temperaturas establecen ombrotipos en la zona que van desde el hiperhúmedo hasta el seco (Figura 1.5). Normalmente altitudes mayores están asociadas a ombrotipos más húmedos. En la Sierra de las Nieves predomina el ombrotipo húmedo, y en Ronda ciudad el subhúmedo en su mitad sur y el húmedo en su mitad norte.

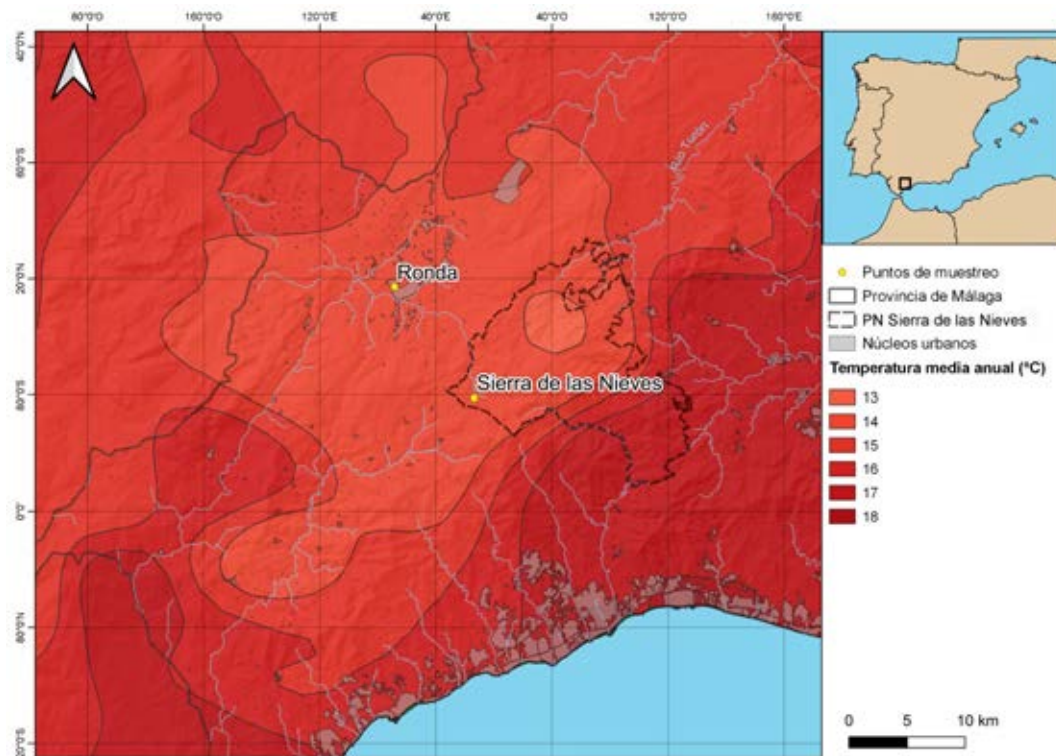


Figura 1.4. Distribución de la temperatura media anual en la zona de estudio. Elaborado a partir de datos espaciales provistos por el DERA de los años 1971-2000 (Junta de Andalucía, 2019). PN: Parque Natural.

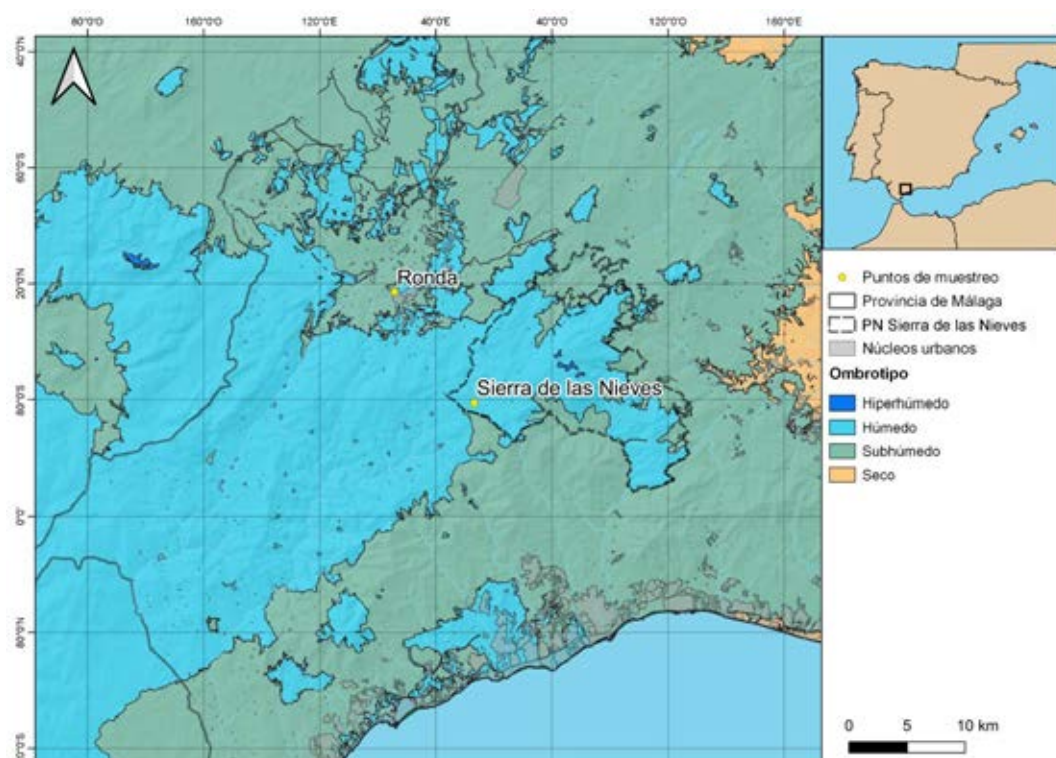


Figura 1.5. Distribución de los ombrotipos en la zona de estudio. Elaborado a partir de datos espaciales provistos por REDIAM y DERA de los años 1971-2000 (Junta de Andalucía, 2011, 2019). PN: Parque Natural.

Los pisos bioclimáticos en la zona van desde el termomediterráneo inferior hasta el oromediterráneo inferior. Predominan fundamentalmente el

termomediterráneo superior y mesomediterráneo inferior, aunque en el interior del Parque Natural hay mayor representatividad de pisos bioclimáticos superiores en su mitad norte (Figura 1.6).

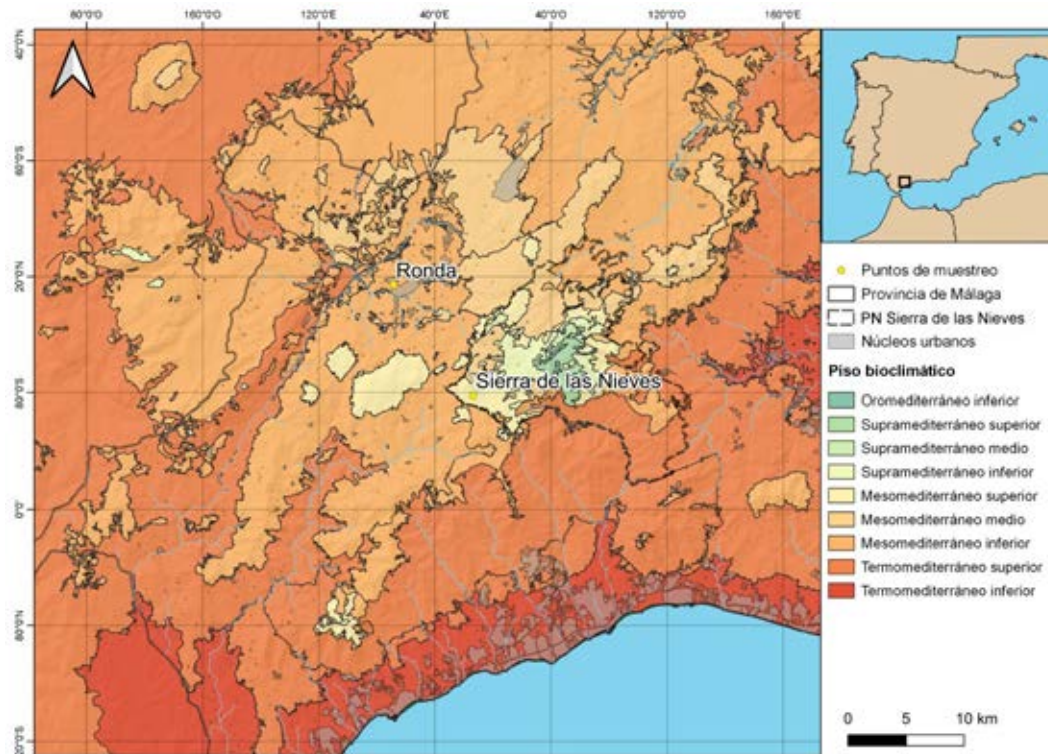


Figura 1.6. Distribución de los pisos bioclimáticos en la zona de estudio. Elaborado a partir de datos espaciales provistos por REDIAM y DERA de los años 1971-2000 (Junta de Andalucía, 2011, 2019). PN: Parque Natural.

1.1.3. Sectorización fitogeográfica

El área de estudio se encuentra en la región Mediterránea. La mayor parte de la zona de estudio se sitúa en la provincia Bética y en los sectores Rondeño (subsector Rondense) y Bermejense (subsector Bermejense), aunque hay una pequeña porción del sur del Parque Natural y del suroeste de la zona de estudio que se enmarca en la provincia Tingitano-Onuvo-Algarviense, perteneciente al sector Aljibico (subsector Aljibico) (Figura 1.7) (Pérez-Latorre *et al.*, 2019).

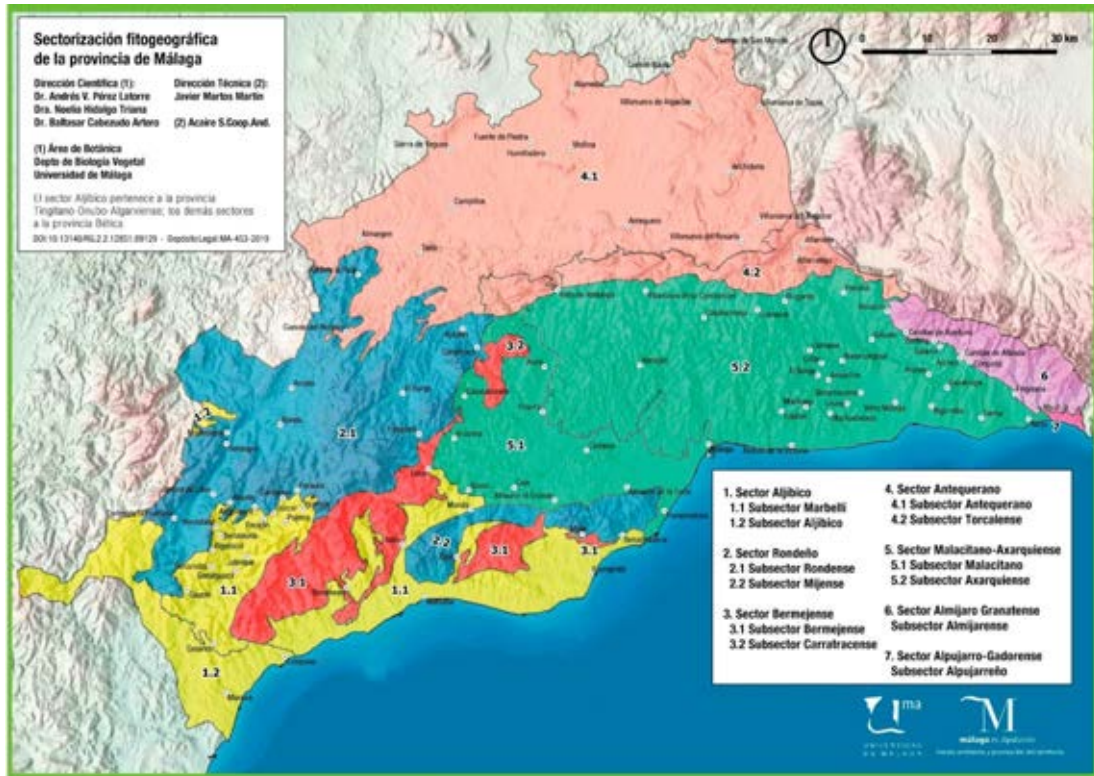


Figura 1.7. Mapa de la sectorización fitogeográfica de la provincia de Málaga. Extraído de Pérez-Latorre *et al.*, 2019.

1.1.4. Uso del suelo

La mayor parte de la zona estudiada se encuentra cubierta por vegetación natural o seminatural en distintos grados de desarrollo (Figura 1.8).



Figura 1.8. Usos del suelo en la zona de estudio. Elaborado a partir de datos espaciales provistos por REDIAM y DERA de los años 1971-2000 (Junta de Andalucía, 2011, 2019). PN: Parque Natural.

En la parte norte predominan los terrenos de cultivo, fundamentalmente olivares, árboles frutales, viñas y cereales. En la parte suroccidental (valle del Genal) también abundan los cultivos de castaño. En general domina el cultivo de secano sobre el de regadío. A pesar de la gran extensión de algunos cultivos, la actividad económica predominante en la zona es el sector de servicios: hostelería, turismo y construcción (Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, 2005; Junta de Andalucía, 2011, 2019).

La actividad cinegética en el interior del Parque Natural históricamente ha tenido una gran relevancia económica y actualmente siguen existiendo cotos privados de caza que mantienen una actividad económica considerable. Es también muy abundante la actividad ganadera ovina y caprina. La pesca, por el contrario, es escasa (Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, 2005).

1.1.5. Vegetación

Andalucía está marcada por una elevada biodiversidad por la confluencia de flora y fauna holártica y africana, y es considerada uno de los puntos de mayor biodiversidad de la cuenca del Mediterráneo con una elevada concentración de endemismos (Cueto *et al.*, 2018). La comarca de Ronda en concreto presenta una gran heterogeneidad climática, litológica y orográfica que ha contribuido notablemente a la diversidad de la vegetación actual de la zona de estudio (Figura 1.9).

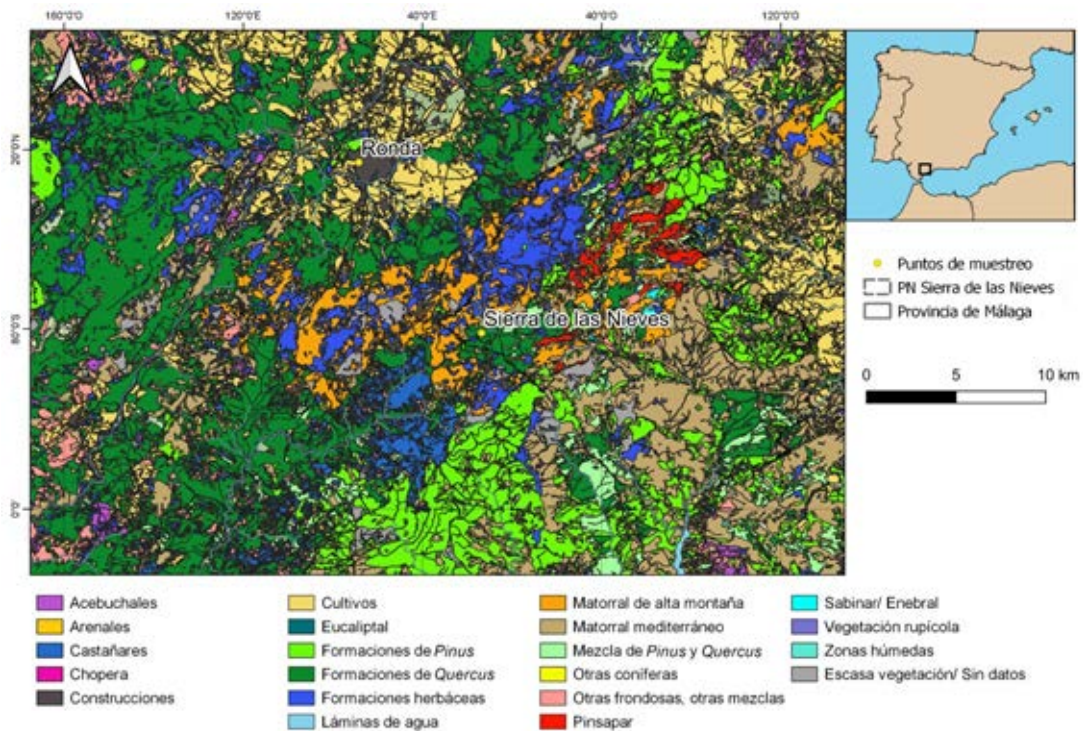


Figura 1.9. Distribución de las principales formaciones vegetales de la zona de estudio. Elaborado a partir de datos espaciales provistos por REDIAM y DERA (Junta de Andalucía, 2011, 2019). PN: Parque Natural.

En las inmediaciones de la ciudad de Ronda dominan los terrenos de cultivo y los pinares de repoblación (*Pinus halepensis* Mill. principalmente). La influencia de la presión antrópica también impide el desarrollo de la vegetación aledaña, por lo que gran parte de ella se encuentra en sus etapas de sustitución de

matorral o pastizal (Figura 1.9). Los cultivos de castaño (*Castanea sativa* Mill.) y de olivo (*Olea europaea* L.) en ocasiones se entremezclan con la vegetación propia de estas etapas de sustitución dando lugar a manchas de vegetación seminatural.

En las inmediaciones de Ronda se encuentra el límite del Parque Natural de Sierra de las Nieves. En él dominan los encinares de la serie *Paeonio coriaceae-Querceto rotundifoliae* S. mezclados con quejigos (faciación *quercetoso fagineae*) y con algunos pinsapos (*Abies pinsapo* Boiss.) y alcornoques (*Quercus suber* L.). Las encinas se acompañan de orlas dominadas por *Crataegus monogyna* Jacq. en las zonas más húmedas, y *Pistacia terebinthus* L. en las secas. La composición del matorral de las etapas de sustitución de estos encinares varía según la especie acompañante: *Cistus monspeliensis* L. y *Cistus laurifolius* L. en las zonas en las que el encinar se mezcla con alcornoques; matorral de *Cytiso plumosi-Ulicetum baetici* cuando se mezcla con quejigos, y aulagares de *Ulici-Lavanduletum lanatae* cuando se mezcla con pinsapos. Zonas muy degradadas o con regosoles o litosoles desarrollan tomillares, espartales, o pastizales de *Phlomido-Brachypodietum retusi* y *Violo-Jonopsidetum prolongoi* (Pérez-Latorre et al., 1998).

En las zonas de sustrato predominantemente silíceo, o en los que las precipitaciones son abundantes y favorecen el lavado mineral de los suelos, predominan los alcornocales de la serie *Teurcio baetici-Querceto suberis* S. acompañados de pinsapos. En las zonas más umbrías de estos alcornocales pueden aparecer manchas de madroñales (*Arbutus unedo* L.). Los alcornocales han sufrido una gran presión antrópica y se encuentra fuertemente degradados, sustituyéndose en ocasiones por varios tipos de jarales. Algunas zonas han sido taladas y remplazadas por cultivos de castaño. Cuando el sustrato es duro y es una zona de mayores temperaturas, el alcornocal desarrollado pertenece a la serie *Myrto communis-Querceto suberis* S. (Pérez-Latorre et al., 1998).

En algunas zonas de mayor humedad se desarrollan quejigales de la serie *Daphno latifoliae-Acereto granatensis* S., en los que se mezclan *Quercus faginea* Lam. y *Acer granatense* Boiss como especies dominantes. En ocasiones en la alta montaña se desarrolla la faciación *quercetoso alpestris* con *Quercus faginea* subsp. *alpestris* (Boiss.) Maire como especie dominante. Es el quejigar de mayor altitud de la Península Ibérica y actualmente se encuentra adherado por la presión antrópica (pastoreo y carboneo) (Pérez-Latorre et al., 1998). *Quercus faginea* subsp. *alpestris* es endémico de esta sierra lo que lo ha llevado a ser catalogado como «En Peligro de Extinción (EN)» a nivel nacional (Bañares et al., 2004, 2008) y protegido por la ley andaluza como «Taxon Vulnerable (VU)» (Decreto 23/2012, de 14 de febrero por el que se regula la conservación sostenible de la flora y fauna silvestres y sus hábitats. B.O.J.A. número 60, 2012).

En zonas de alta montaña se desarrollan enebrales y sabinares de la serie *Daphno oleoidis-Pineto sylvestris* S. faciación *abietetoso pinsaponis*. En ellos dominan *Juniperus sabina* L. y *Juniperus communis* L. como especies dominantes (Pérez-Latorre et al., 1998).

Como vegetación edafoxerófila destacan los pinsapares. Hay diversas series de vegetación que tienen *Abies pinsapo* como especie dominante y que varían según el sustrato sobre el que se desarrollan: *Bunio macucae-Abietetum pinsaponis* sobre serpentinas, *Paeonio broteroi-Abietetum pinsaponis* S.

faciación *abietetoso pinsaponis* sobre calizas y faciación *juniperetoso phoeniceae* sobre dolomías. Suelen sustituir a los encinares y alcornocales en el piso supramediterráneo. Las etapas de sustitución de estos pinsapares son espinares y matorrales cuya composición depende de la serie de vegetación (Pérez-Latorre *et al.*, 1998). *Abies pinsapo* es una especie relictica y endémica de la zona que procede de la especiación de poblaciones de *Abies* que quedaron aisladas en la alta montaña tras la retirada de la última de las glaciaciones del Pleistoceno (Arista, 1995; Linares, 2011). Actualmente solo existen tres zonas de distribución natural de esta especie en todo el mundo: Sierra de las Nieves, Sierra Bermeja y Sierra de Grazalema (Figura 1.10), lo que ha llevado a su protección y conservación. Está catalogado como «En Peligro de Extinción (EN)» y protegido como tal por la legislación andaluza (Cabezudo *et al.*, 2005; Decreto 23/2012, de 14 de febrero por el que se regula la conservación sostenible de la flora y fauna silvestres y sus hábitats. B.O.J.A. número 60, 2012). Los pinsapares de mayor extensión se encuentran dentro del Parque Natural Sierra de las Nieves, seguido de los de la Sierra de Grazalema (Figura 1.10). Los pinsapares de Sierra Bermeja tienen la peculiaridad de desarrollarse sobre peridotitas, lo que le otorga un carácter singular a su composición florística (Arista, 1995). Actualmente la mayor parte de los pinsapares se encuentran en buen estado de conservación, con poblaciones estables o que incrementan su densidad (Figura 1.10).

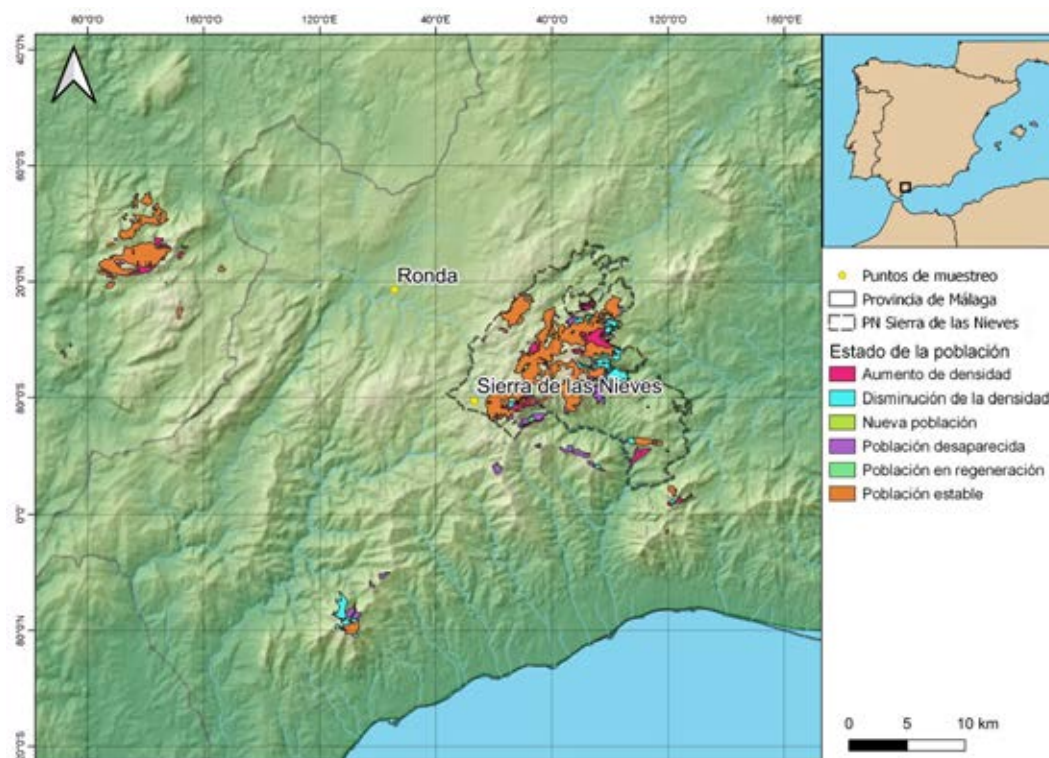


Figura 1.10. Distribución actual y pretérita (color violeta), y estado de las poblaciones de *Abies pinsapo*. Elaborado a partir de datos espaciales provistos por REDIAM y DERA (Junta de Andalucía, 2011, 2019). PN: Parque Natural.

Como vegetación edafoxerófila también destacan los sabinares de *Juniperus phoenicea* L. mezclados con pino carrasco (*Pinus halepensis*) y algarrobos (*Ceratonia siliqua* L.) sobre dolomías, los pinares de *Pinus pinaster* Aiton sobre serpentinas (*Pino pinastri-Querceto cocciferae* S.) y, en zonas más elevadas de

calizas o dolomías, los sabinares con pinsapos (*Rhamno myrtifoliae-Junipereto phoeniceae* S.) (Pérez-Latorre *et al.*, 1998).

La vegetación edafohigrófila de la zona está representada por saucedas con adelfas en cauces permanentes sobre calizas y esquistos (*Equiseto telmateiae-Saliceto pedicellate* S.), saucedas con brezos en cauces permanentes sobre peridotitas (*Erico terminalis-Saliceto pedicellatae* S.), y adelfares en cauces no permanentes (*Erico terminalis-Nerieto oleandri galletoso viridiflori* S. sobre peridotitas y *Rubo ulmifolii-Nerieto oleandri* S. sobre calizas y esquistos). También hay algunas fresnedas muy degradadas en el piso supramediterráneo (*Ficario ranunculoidis-Fraxineto angustifoliae* S.) (Pérez-Latorre *et al.*, 1998).

Al oeste y suroeste de Ronda se encuentran el Parque Natural de la Sierra de Grazalema y el Parque Natural de Los Alcornocales. En la Sierra de Grazalema predominan las formaciones boscosas de *Quercus*, en concreto encinares (*Quercus rotundifolia* Lam.) mezclados con quejigos (*Quercus faginea*) y acebuches (*Olea europaea* var. *sylvestris* (Mill.) Lehr). En la parte nororiental de esta sierra se encuentran pinsapares de gran extensión (Figura 1.10)(Gallego Fernández, 2004; Pérez-Latorre & Cabezudo, 2002a). Como especies acompañantes a estas formaciones boscosas destacan lentiscos, enebros, sabinas y madroños. Su matorral está condicionado principalmente por el pH del suelo, la altitud y la presión antrópica, y en él dominan *Cistus albidus* L. y *Ulex baeticus* Boiss.(Gallego Fernández, 2004). El Parque Natural de Los Alcornocales tiene unas temperaturas más suaves que el resto del área de estudio por su cercanía a la costa y también las precipitaciones son más abundantes que en el interior por los vientos húmedos de poniente y la lluvia orográfica, lo que condiciona la vegetación que se desarrolla. En este Parque Natural predominan los alcornocales silicícolas, encinares y acebuchales. El clima de la zona ha permitido que se conserven algunos bosques de especies marcescentes que quedaron aisladas tras el último periodo glaciario, como *Quercus faginea* subsp. *broteroi* (Cout.) A.Camus, *Quercus canariensis* Willd. y *Quercus pirenaica* Willd. (Pérez-Latorre *et al.*, 1999).

La zona de estudio es una de las zonas de Málaga con mayor cantidad de endemismos. En el sector Rondeño destacan, además *Abies pinsapo* y *Quercus faginea* subsp. *alpestris*, otras especies endémicas como *Ononis reuteri* Boiss. en la Sierra de las Nieves y Sierra de Grazalema (endemismo compartido con Marruecos), *Linaria clementei* Haens. ex Boiss. al sureste en la Sierra de Mijas, *Genista haenseleri* Boiss. y *Galium pulvinatum* Boiss. en las sierras costeras y sierra de Antequera, *Arenaria capillipes* (Boiss.) Boiss., *Andrayala ragusina* var. *ramosissima* Boiss., *Armeria villosa* subsp. *villosa* Girard, *Armeria villosa* subsp. *carratracensis* (Bernis) Nieto Fel., *Cytisus fontanesii* subsp. *plumosus* (Boiss.) Fern. Casas y *Ulex baeticus* subsp. *baeticus* Boiss. De esta última especie hay una población con características distintivas que se desarrolla a más de 1500 m de altitud sobre dolomías y que algunos autores consideran como una subespecie aparte: *Ulex baeticus* subsp. *bourgaeanus* (Webb) Pérez Latorre & Cabezudo. Destaca también *Carduus rivasgodayanus* Devesa & Talavera, endemismo compartido entre los sectores Aljibico y Rondeño. En el sector Bermejense la presencia de metales pesados en el suelo ha sido un factor limitante para el desarrollo de la vegetación, lo que ha propiciado la aparición de numerosos endemismos como *Armeria colorata* Pau, *Saxifraga gemmulosa* Boiss., *Centaurea lainzii* Fern. Casas y *Centaurea carratracensis* Lange (en el

subsector Carratracense), *Staezelina baetica* DC., *Iberis fontqueri* Pau, *Silene fernandezii* Jeanmonod. En el sector Aljibico destacan los bosques de laurisilva, en los que se encuentran especies relictas como *Rhododendron ponticum* L., *Ilex aquifolium* L., *Drosophyllum lusitanicum* (L.) Link, *Laurus nobilis* L. o *Quercus lusitanica* Lam. (Blanca *et al.*, 2011; Gavira-Romero & Pérez-Latorre, 2003; Pérez-Latorre *et al.*, 1998; Pérez-Latorre & Cabezudo, 2002a).

1.1.6. Figuras de protección

Por su localización geográfica y su clima, Andalucía ha sufrido una constante presión antrópica, que se ve reflejada en la introducción de especies exóticas invasoras, degradación de hábitats, contaminación, sobreexplotación de recursos naturales, y erosión y pérdida del suelo entre otras consecuencias (Cueto *et al.*, 2018; Templado, 2014). La elevada relevancia biológica de la zona y su alto grado de amenaza han propiciado el establecimiento de diferentes figuras de protección a nivel autonómico, estatal y europeo. Actualmente hay protegidas más de 2,5 millones de hectáreas en Andalucía (Gómez Moreno, 2010).

La zona de estudio es una de las zonas con más figuras de protección de Andalucía (Figura 1.11).

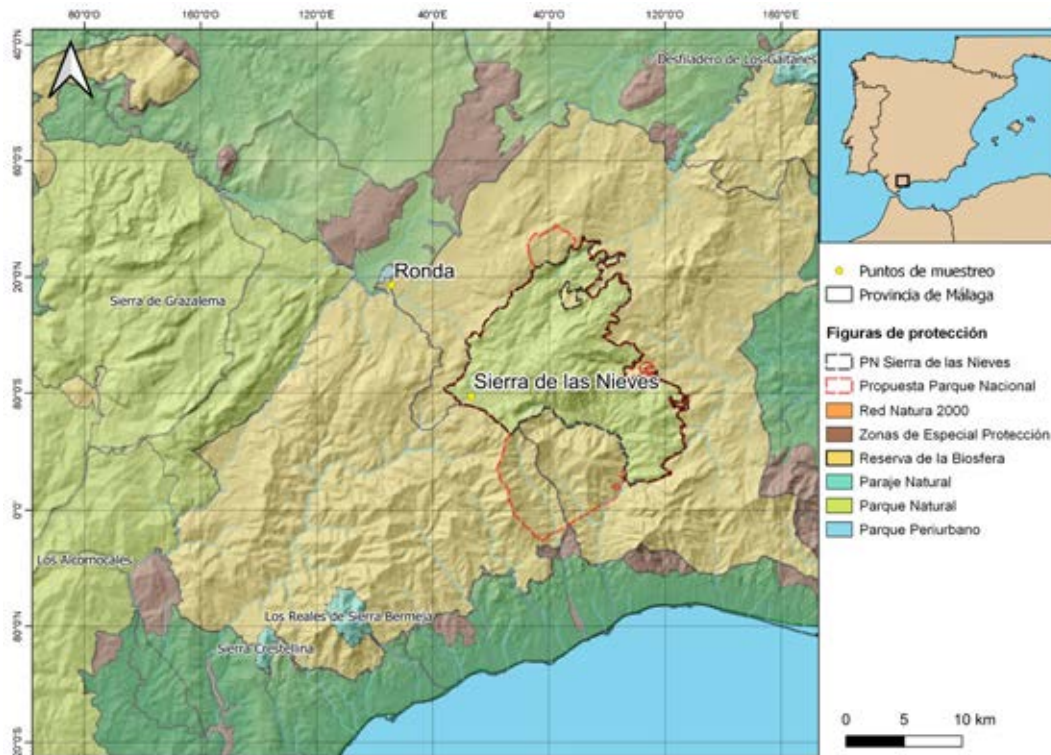


Figura 1.11. Espacios naturales protegidos de la zona de estudio. Elaborado a partir de datos espaciales provistos por el DERA (Junta de Andalucía, 2019). PN: Parque Natural.

Gran parte de la zona de estudio está catalogada como Reserva de la Biosfera por la UNESCO («Sierra de las Nieves y su Entorno» e «Intercontinental del Mediterráneo»). Algunos valles de ríos, zonas montañosas como Sierra Bermeja y Real, Sierra de Grazalema, Sierra Crestellina, y zonas costeras están

protegidas a nivel europeo dentro de la red Natura 2000. Sobre estas figuras de protección también se establecen figuras de ámbito nacional: Parajes Naturales como el de Los Reales de Sierra Bermeja o el de la Sierra Crestellina, Parque Natural de Sierra de las Nieves, Parque Natural de Los Alcornocales y Parque Natural de Sierra de Grazalema. Otras zonas aledañas están protegidas bajo la denominación de Zonas de Especial Protección por la Junta de Andalucía. También hay algunas figuras de protección de ámbito autonómico como Parques Periurbanos al norte de la ciudad de Ronda. Además de estas figuras de protección también hay algunos monumentos naturales, como el Pinsapo de las Escaleretas, El Cañón de las Buitreras o el Cerro del Hierro entre otros (Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, 2005; Junta de Andalucía, 2011, 2019).

En la actualidad el Parque Natural Sierra de las Nieves está en vías de ser declarado Parque Nacional de España. El 8 de enero de 2019 se aprobó la propuesta definitiva que inicia el trámite (Resolución de 17 de diciembre de 2018, del Organismo Autónomo Parques Nacionales, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 7 de diciembre de 2018, por el que se aprueba la propuesta final de declaración del Parque Nacional de la Sierra, 2019). La propuesta también pretende ampliar la zona de protección del actual Parque Natural (Figura 1.11).

1.2. La aerobiología y antecedentes del estudio

La aerobiología se define como «la disciplina científica centrada en el transporte pasivo de organismos y partículas de origen biológico en la atmósfera» (Mandrioli & Ariatti, 2001). Por lo tanto, dentro de la aerobiología también se integra el estudio de todos los procesos de producción, liberación, transporte, deposición y resuspensión del polen y las esporas en la atmósfera (Spieksma, 1992). El término «aerobiología» fue utilizado por primera vez por Fred C. Meier en sus estudios de las partículas presentes en la atmósfera del Ártico en la década de 1930, aunque los primeros estudios aerobiológicos datan del siglo XIX (Meier, 1935; Meier & Lindbergh, 1935; Polunin *et al.*, 1947).

Durante la segunda mitad del siglo XX la aerobiología fue ganando relevancia en Europa y en 1974 se constituyó la Asociación Internacional de Aerobiología (IAA, en sus siglas en inglés) (Sozinova & Ariatti, 2019). A principio de la década de los 90 la investigación aerobiológica arraigó en España y en 1992 se constituyó la Red Española de Aerobiología (REA), que cooperaría con la Red Europea de Aeroalérgenos (EAN, en sus siglas inglesas) (Galán *et al.*, 2007).

El equipo de investigación de aerobiología de la Universidad de Málaga comenzó a muestrear el polen de la atmósfera de la ciudad en mayo de 1991. La estación de muestreo de Málaga fue una de las primeras en adherirse a la REA, y actualmente posee uno de los registros del polen de la atmósfera más extensos de España (Galán *et al.*, 2007; Picornell *et al.*, 2019b). Desde entonces se han instalado estaciones de muestreo aerobiológico en siete localidades de la provincia incluyendo las de este estudio (Figura 1.12).

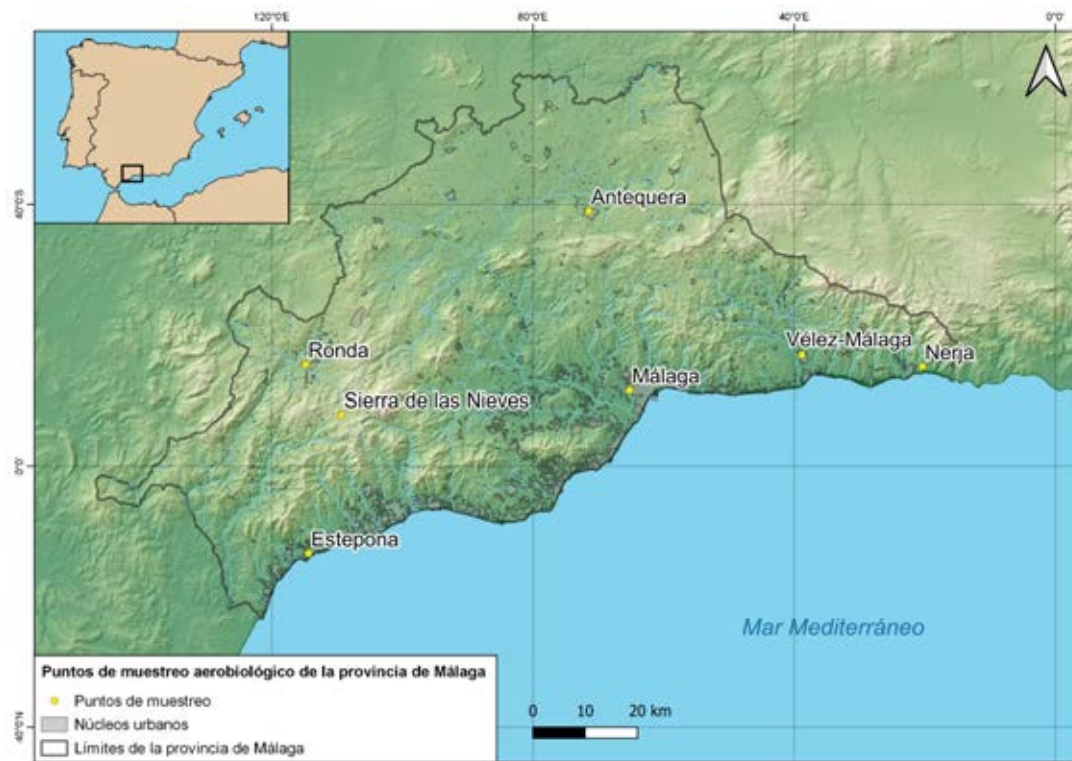


Figura 1.12. Puntos de muestreo aerobiológico de la provincia de Málaga. Datos espaciales de altitud y orientación obtenidos del DERA (Junta de Andalucía, 2019).

Semanalmente se analiza el contenido polínico de la atmósfera de Málaga y se envían los resultados a la REA para la elaboración de informes y pronósticos regionales y nacionales. También se ha publicado cada semana en la página web del grupo de aerobiología de la Universidad de Málaga (<http://www.aerobiologia.uma.es/>) los niveles actuales de las estaciones operativas de la provincia, junto a un pronóstico para los próximos días, con objeto de informar a la población y prevenir alergias. La nueva versión de esta página web ha sido elaborada y diseñada durante este estudio (figuras 1.13 y 1.14).

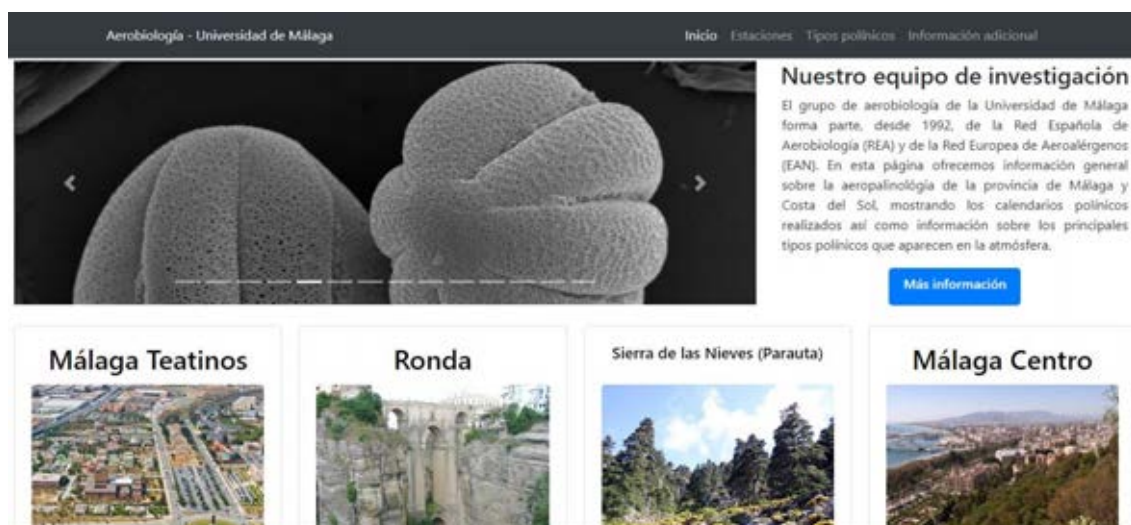


Figura 1.13. Portada de la página web del grupo de aerobiología de la Universidad de Málaga.

Estación Sierra de las Nieves (municipio de Parauta)

Datos del 3 al 9 de marzo de 2019 y pronóstico

Tipos polínicos	Capacidad alérgica	Niveles de concentración (10 ⁶ granos de polen / m ³ aire)							Pronóstico
		Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo	Lunes	
Cupresáceas	Moderada	●	●	●	●	●	●	●	Estable
Chopos y álamos	Moderada	●	●	●	●	●	●	●	Alza
Artemisias	Alta	●	●	●	●	●	●	●	Baja
Quercus (encinas, alcornoques)	Baja	●	●	●	●	●	●	●	Alza
Oliivo	Alta	●	●	●	●	●	●	●	Estable
Chenopodiáceas	Moderada	●	●	●	●	●	●	●	Estable
Llantenes (Plantago)	Moderada	●	●	●	●	●	●	●	Estable
Gramíneas	Alta	●	●	●	●	●	●	●	Estable
Fresnos	Media/Alta	●	●	●	●	●	●	●	Baja
Urticáceas (ortigas, parietarias)	Alta	●	●	●	●	●	●	●	Alza

● Nulo ● Bajo ● Moderado ● Elevado ● Extremo

¿Por qué no aparece el polen de hoy?



Pronóstico

Los niveles de polen en la atmósfera de la provincia de Málaga han subido significativamente en los últimos días, anunciando la llegada de la primavera. Aunque las concentraciones atmosféricas de polen de cupresáceas han bajado en los últimos días, han subido los de pinos, moreras, encinas-alcornoques, plátanos de sombra y urticáceas. Hay que tener en cuenta que aunque se detecten niveles bajos de polen de urticáceas (ortigas, parietarias), son potencialmente muy alergénicos, por lo que las personas sensibles a este polen deben de tomar precauciones con objeto de prevenir alergias respiratorias. También han subido muy significativamente las concentraciones atmosféricas de polen de pino y Quercus (encinas, alcornoques), pero su capacidad alergénica es baja. Los plátanos de sombra son árboles cultivados en calles, parques y jardines, y su polen puede causar alergias, por lo que se aconseja a las personas sensibles a este polen tomar precauciones y no acercarse a estos árboles. Para los próximos días habrá riesgo de alergia debido al polen de urticáceas y plátanos de sombra fundamentalmente. Se espera un ascenso en general de los niveles de polen en la atmósfera.

Figura 1.14. Tabla de niveles de concentración y pronóstico de polen de Sierra de las Nieves. Página web del grupo de aerobiología de la Universidad de Málaga.

1.3. Justificación del estudio

La parte noroccidental de la provincia de Málaga era la única en la que todavía no se habían realizado estudios aerobiológicos (Docampo *et al.*, 2007; Picornell *et al.*, 2019b; Recio *et al.*, 2000, 2006; Trigo *et al.*, 2007). Tampoco hay estaciones de muestreo en zonas cercanas de las provincias colindantes (Galán *et al.*, 2007). La gran diversidad vegetal de la zona, las especies endémicas y/o protegidas que se distribuyen en ella y la presencia de hábitats de características únicas merecen un especial estudio y conservación. Las concentraciones de polen de la atmósfera son una medida indirecta de la fenología de floración de especies anemófilas, por lo que se puede obtener información sobre el comportamiento reproductivo de la vegetación de la zona a través su estudio, lo que resulta indispensable para su gestión y conservación (Lander *et al.*, 2010; Morán-López *et al.*, 2016; Picornell *et al.*, 2020; Sork & Smouse, 2006; Zhang *et al.*, 2019). Para ello es muy útil elaborar calendarios polínicos, que son representaciones visuales de la estacionalidad y abundancia de los principales tipos polínicos detectados en un determinado lugar. Aunque se recomienda un mínimo de 5 años de muestreo en la misma localidad para obtener un calendario polínico representativo, pueden elaborarse calendarios polínicos preliminares que permitan una primera aproximación (Galán *et al.*, 2017).

Comprender el comportamiento reproductivo de las plantas es crucial para estimar el efecto que tendrá el cambio climático sobre ellas. Para el año 2100 se espera un aumento de la temperatura media de la Tierra de 1,4-5,8°C lo que

pondrá en riesgo a numerosos ecosistemas (García-Mozo *et al.*, 2010b). Hasta el momento, el área mediterránea ha sufrido un incremento mayor de temperaturas que la media para el resto del mundo, por lo que es un área especialmente vulnerable (Guiot & Cramer, 2016). Debido al calentamiento global, la distribución natural de algunas especies vegetales está cambiando en latitud y altitud para compensar el incremento de la temperatura. Sin embargo, las especies de alta montaña normalmente se encuentran en ecosistemas aislados y no tienen la posibilidad de modificar su distribución, por lo que son más vulnerables al cambio climático (Dullinger *et al.*, 2012). Algunas de estas especies están modificando su fenología reproductiva para adaptarse al aumento de temperaturas, aunque la respuesta adaptativa es muy variable entre especies y debe ser estudiada en cada caso (García-Mozo *et al.*, 2010b; Wang *et al.*, 2014).

El incremento de temperatura no es el único efecto del cambio climático, la frecuencia e intensidad de las precipitaciones también se ve afectada en un sentido u otro dependiendo del área geográfica considerada (Anders *et al.*, 2014; Guiot & Cramer, 2016; Norrant & Douguédroit, 2006). En el sur de la Península Ibérica las precipitaciones tienden a reducir su frecuencia y aumentar su intensidad (De Luis *et al.*, 2009; Sheffield *et al.*, 2012).

Para estudiar los efectos del cambio climático es necesario contar con largas series temporales de datos (normalmente de más de 20 años) (Ziska *et al.*, 2019). Sin embargo, a través de estudios bioclimáticos es posible establecer relaciones que puedan ser utilizadas para prever el efecto del cambio climático sobre esas determinadas especies (Jeschke & Strayer, 2008). La recogida inicial de datos en un área no muestreada también es fundamental para sentar un conocimiento base que inicie la serie temporal de datos.

El polen es el principal causante de la rinitis alérgica, un trastorno respiratorio que sufre aproximadamente el 40% de la población europea (Akdis *et al.*, 2015; D'Amato *et al.*, 2007). Además del perjuicio que supone para la salud humana, también acarrea un grave perjuicio económico por el coste de la medicación necesaria para paliar los síntomas y la pérdida de productividad laboral (Smith *et al.*, 2007). El número de personas alérgicas y la severidad de los síntomas se han incrementado en los últimos años, lo que ha llevado a la creación de redes de monitoreo del polen atmosférico y de modelos de pronóstico locales que permitan proporcionar información detallada para la población alérgica (Ranzi *et al.*, 2003).

Al igual que con los estudios de polen, el estudio de las concentraciones de esporas de hongos presentes en la atmósfera también puede aportar información relevante sobre su comportamiento reproductivo. Algunos de estos hongos son fitopatógenos que afectan a poblaciones naturales, producen grandes pérdidas económicas en cosechas y, en algunos casos, producen enfermedades en humanos. Algunos hongos fitopatógenos también están cambiando su distribución y abundancia como resultado del cambio climático, lo que podría tener consecuencias negativas sobre la conservación vegetal, economía y salud humana (Anderson *et al.*, 2004; Cortiñas Rodríguez *et al.*, 2020; Launay *et al.*, 2014; Martínez-Bracero *et al.*, 2019; Oliveira *et al.*, 2009). De entre los hongos fitopatógenos más abundantes destacan *Alternaria* spp. y *Oidium* spp. s.l. Las esporas de tipo *Alternaria* son frecuentemente detectadas en la atmósfera de casi todo el mundo. Son especies muy cosmopolitas que

producen grandes pérdidas económicas en cultivos de cereales, constituyen un factor de riesgo para personas asmáticas e inducen rinitis alérgica en la población sensible (Aira *et al.*, 2013; Corden *et al.*, 2003; Infante *et al.*, 1999; Rodríguez-Rajo *et al.*, 2005a). Dentro del tipo esporal *Oidium* se engloban estados anamorfos de algunas especies del orden Erysiphales que actualmente se encuentran bastante extendidas por todo el mundo (Cortiñas Rodríguez *et al.*, 2020). Muchas de estas especies son patógenas de viñedos, cultivos de cereales, frutales, plantas ornamentales e incluso de especies de distribución natural. Algunas de ellas también pueden producir enfermedades en humanos o desencadenar rinitis alérgica (Oliveira *et al.*, 2009). Por todo ello, es muy importante determinar la abundancia y temporalidad de estas esporas en la atmósfera, así como sus relaciones con las principales variables meteorológicas.

2. OBJETIVOS

1. Estudiar el comportamiento aerobiológico del municipio de Ronda y del Parque Natural Sierra de las Nieves, determinando los taxones de mayor incidencia en la atmósfera, la variación temporal (estacional, intradiaria e interanual) y comparando los comportamientos entre ambas zonas.
2. Elaborar un calendario polínico para cada una de las áreas de estudio: municipio de Ronda y el Parque Natural Sierra de las Nieves.
3. Estudiar la relación existente entre el polen atmosférico y los parámetros meteorológicos, los parámetros climáticos, los estudios fenológicos realizados *in situ*, la vegetación real y el uso del suelo.
4. Elaborar modelos de pronóstico aplicados a la prevención de alergias y a ámbitos económicos y ambientales.
5. Desarrollar modelos de interpolación espacial de datos aerobiológicos.
6. Desarrollar un paquete de herramientas computacionales que integre las principales funciones que se realizan en la investigación aerobiológica, así como para la interpolación de datos ausentes.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. Datos climáticos

3.1.1. Datos climáticos en Ronda

Para la caracterización climática del municipio de Ronda se utilizaron datos históricos obtenidos de Global Bioclimatics (Rivas-Martínez & Rivas-Sáenz, 2009). Estos datos históricos proceden de una estación meteorológica situada en el sur de la ciudad de Ronda (36°44' N 5°10' W, 660 m s.n.m.) durante el periodo 1973-1989 para la temperatura y 1967-1989 para las precipitaciones. Para comprobar si el patrón climático ha cambiado desde entonces, se recurrió al registro meteorológico más extenso disponible. Este registro comprende el periodo abarcado entre diciembre de 2009 y diciembre de 2019 en la estación meteorológica de Ronda Instituto de Enseñanza Secundaria Pérez de Guzmán (situada en la misma localización que el captador de polen), perteneciente a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet). Se utilizaron las medias mensuales de temperatura media diaria (°C) y precipitación acumulada (mm) para elaborar un diagrama ombrotérmico con cada set de datos (histórico y 2009-2019) utilizando el paquete de R *berryFunctions* (Boessenkool, 2019). Para cada periodo se calculó el Índice de Termicidad Compensado (Itc), el Índice de Continentalidad simple (Ic) y el Índice Ombrotérmico (Io).

El Itc se calculó como se observa en la Ecuación 3.1. Es, por lo tanto, un índice relacionado con la intensidad del frío y la oscilación térmica anual, que suponen un factor limitante para el desarrollo de la vegetación (Pesaresi *et al.*, 2014; Rivas-Martínez *et al.*, 1997; Valencia-Barrera *et al.*, 2002). A diferencia del Índice de Termicidad (It), el Itc está ajustado para zonas no tropicales del planeta y permite compensar la calidez de los inviernos de Málaga (Picornell *et al.*, 2019b; Rivas-Martínez *et al.*, 1997).

$$I_{tc}=(T+m+M)*10+C \quad (3.1)$$

T es la temperatura media anual, m la media de las temperaturas mínimas del mes más frío, M la media de las temperaturas máximas del mes más frío, y C un valor compensado en función del índice de continentalidad (Rivas-Martínez *et al.*, 1997).

El Ic se calculó como se observa en la Ecuación 3.2. Es una medida de la oscilación térmica anual (Rivas-Martínez *et al.*, 1997).

$$I_c=T_{max}-T_{min} \quad (3.2)$$

Tmax es la temperatura media del mes más cálido, y Tmin la temperatura media del mes más frío (Rivas-Martínez *et al.*, 1997).

El I_o se calculó como se observa en la Ecuación 3.3. Mide la relación entre las precipitaciones totales anuales y las temperaturas positivas (Rivas-Martínez *et al.*, 1997).

$$I_o = \frac{P_p}{T_p} * 10 \quad (3.3)$$

P_p es la precipitación total anual de los meses con temperaturas medias superiores a 0°C, y T_p la suma de temperaturas medias de los meses con medias de temperatura superiores a 0°C expresada en décimas de °C.

Paralelamente, se analizaron las variaciones intraanuales de precipitaciones, temperaturas medias, máximas y mínimas mensuales para comparar los años de muestreo (2017-2019) con el comportamiento medio intraanual (tanto histórico como reciente).

La frecuencia de vientos procedentes de cada octante fue analizada a partir de datos de frecuencias diarias y mensuales proporcionados por AEMet del periodo diciembre 2009-diciembre 2019. La frecuencia se expresó como porcentaje y se representó en una rosa de los vientos.

3.1.2. Datos climáticos en Sierra de las Nieves

Para la caracterización climática de la Sierra de las Nieves se utilizaron datos históricos obtenidos de Global Bioclimatics (Rivas-Martínez & Rivas-Sáenz, 2009). Proceden de una estación meteorológica instalada en el área recreativa Los Quejigales (36°41'N 5°03'W; 1180 m s.n.m.; a 4 km del captador de polen) que muestreó temperaturas durante los años 1982-1989, y precipitaciones durante 1967-1989. Con estos datos se elaboró el diagrama ombrotérmico de Sierra de las Nieves utilizando el paquete de R *berryFunctions* (Boessenkool, 2019). A pesar de la existencia de datos de mayor amplitud temporal (Cornes *et al.*, 2018; Fick & Hijmans, 2017), estos datos proceden de interpolaciones espaciales a partir de otras estaciones históricas, y no de ninguna estación existente en la zona de estudio. Se calculó también el I_{tc} , el I_c y el I_o .

Los datos meteorológicos recientes de las inmediaciones del captador de polen proceden de una estación meteorológica instalada por miembros de la Asociación de Cazatormentas y Aficionados a la Meteorología (ACAMET) en la Nava de San Luis (36°39'N 5°03'W; 1114 m s.n.m.; a 3,17 km del captador de polen). Dicha estación es la más cercana situada a una altitud similar y se encuentra en la misma nava que el captador de polen. Los datos disponibles abarcan los periodos del 1 de febrero de 2014 al 28 de octubre de 2018, y del 21 de octubre de 2019 al 31 de diciembre de 2019. El periodo intermedio a los mencionados no fue muestreado debido a una avería de la estación meteorológica tras un fuerte temporal. Se analizaron las variaciones mensuales de precipitaciones y temperaturas medias, máximas y mínimas a partir de datos diarios de dichos periodos, y se compararon con los valores históricos.

En cada estación se calculó la frecuencia diaria de vientos procedente de cada octante y se calculó la media con todos los datos disponibles para estimar la dirección y frecuencia de vientos dominantes.

3.1.3. Mapas de cambio climático en España

Se calcularon las tendencias de las temperaturas máximas, mínimas y cantidad de precipitaciones con datos del periodo 1991- 2018 procedentes de la base de datos europea Ensemble-Observations (E-OBS) (Cornes *et al.*, 2018). Esta base de datos pertenece al servicio de cambio climático del programa de información *Copernicus Earth Observation Programme* de la Unión Europea. Los datos provienen de estaciones observacionales de las agencias meteorológicas oficiales de todos los países europeos interpoladas espacialmente al continuo de la superficie. Se extrajeron los datos de la versión 19.0e con una resolución espacial de 0,1 grados y se calcularon medias trimestrales con las temperaturas y sumas trimestrales con las precipitaciones en cada uno de los años estudiados. Las tendencias en cada trimestre del año se obtuvieron a partir de regresiones lineales para cada píxel y para cada variable calculadas con el software R (Development-Core-Team, 2017) y el paquete raster (Hijmans & van Etten, 2014). Se representó gráficamente la pendiente de aquellas regresiones lineales que fueron significativas (p -valores $< 0,05$). Se asignaron colores cálidos a las pendientes positivas -incrementos en dichas variables- y colores fríos a las negativas.

3.2. Inventario de parques y jardines de Ronda ciudad

Durante el año 2017 se realizó un inventario cualitativo de los principales parques y jardines de la ciudad de Ronda. Dicho inventario se elaboró para identificar a grandes rasgos la distribución de las principales fuentes de emisión de polen dentro de la ciudad. Por lo tanto, los inventarios no tienen la finalidad de proveer un listado exhaustivo de las especies presentes en dichos jardines, sino acotar las posibles fuentes de emisión de cada tipo polínico.

Para la identificación de las especies presentes se utilizaron las claves de la *Flora Vascular de Andalucía Oriental* (Blanca *et al.*, 2011), *Flora Vascular de Andalucía Occidental* (Valdés *et al.*, 1987b), *Flora Ibérica* (Castroviejo *et al.*, 1990), el libro *Los árboles y arbustos de la Península Ibérica e Islas Baleares (especies silvestres y las principales cultivadas)* (López González, 2001) y la *Flora Ornamental Española* (Sánchez de Lorenzo Cáceres, 2000). En los casos en los que se consideró necesario, se tomaron pliegos de referencia que posteriormente se incluyeron en la colección de cormófitos del Herbario MGC.

El mapa de distribución de parques y jardines se elaboró utilizando el software QGIS en su versión 3.12 (QGIS Development Team, 2019). Las ortofotografías de Andalucía de 2010-2011 obtenidas del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía se utilizaron como capa de base para el mapa (Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, 2011). El sistema de referencia de coordenadas utilizado fue el ETRS89 UTM 30N.

3.3. Muestreo fenológico *in situ*

Se tomaron registros semanales de las fenofases de floración masculina de las principales especies anemófilas presentes en el entorno de los captadores aerobiológicos durante 2018, la segunda mitad de 2019 y principios de 2020. El criterio utilizado para definir el inicio y final de la fenofase de floración se basó en el criterio general del Instituto Federal de Biología y Oficina Federal de Variedades Vegetales e Industria Química (BBCH, en sus siglas alemanas)

(Meier, 2001) con ligeras modificaciones introducidas previamente por otros autores en el campo de la aerobiología. El inicio de la floración (BBCH 61) se marcó en la semana en la que al menos el 10% de los individuos de las poblaciones estudiadas presentaban flores que dispersasen polen (anteras abiertas) en al menos 3 de sus ramas (Estrella *et al.*, 2006; Roetzer *et al.*, 2000; Tormo-Molina *et al.*, 2011). El final de la floración (BBCH 67) se marcó en la semana en la que las flores de más del 90% de los individuos ya no dispersaban polen y sus anteras se encontraban secas (Jato *et al.*, 2007).

Las especies a las que se les realizó un seguimiento fenológico se muestran en la Tabla 3.1. El número de individuos a los que se les realizó el seguimiento fenológico en cada especie varió según la abundancia y accesibilidad de dichos taxones en las inmediaciones de la zona de muestreo. La temporalidad de las fenofases es muy sensible a las condiciones climáticas locales (Roetzer *et al.*, 2000), por lo que se realizaron seguimientos de las mismas especies en pisos bioclimáticos diferentes de forma simultánea.

Tabla 3.1. Número de individuos de cada especie por piso bioclimático a los que se les realizó seguimiento fenológico *in situ*.

Especie	Termo	Meso Inf	Meso Sup/ Supra Inf	Pliego testigo
<i>Abies pinsapo</i> Boiss.	-	3	10	MGC-Cormof 88322
<i>Castanea sativa</i> Mill.	-	3	15	MGC-Cormof 89118
<i>Casuarina cunninghamiana</i> Miq.	3	2	-	MGC-Cormof 92511
<i>Cupressus arizonica</i> Greene	5	10	-	MGC-Cormof 87439
<i>Cupressus sempervirens</i> L.	10	10	-	MGC-Cormof 87438
<i>Cupressus lusitanica</i> Mill.	-	1	-	-
<i>Fraxinus angustifolia</i> Vahl	-	7	4	MGC-Cormof 87455/87525
<i>Olea europaea</i> var. <i>europaea</i> L.	10	20	-	MGC-Cormof 89117
<i>Pinus halepensis</i> Mill.	15	15	-	MGC-Cormof 92727/92750
<i>Pinus pinaster</i> Aiton	-	-	10	MGC-Cormof 87528/88318
<i>Pinus pinea</i> L.	2	10	2	MGC-Cormof 88319
<i>Populus alba</i> L.	5	10	-	MGC-Cormof 84676/87527
<i>Populus nigra</i> L.	6	5	-	-
<i>Quercus faginea</i> subsp. <i>faginea</i> Lam.	-	2	2	MGC-Cormof 88316/88320
<i>Quercus rotundifolia</i> Lam.	10	10	15	MGC-Cormof 88317/88323
<i>Quercus suber</i> L.	10	-	5	MGC-Cormof 88315/89116

Termo, termomediterráneo; Meso Inf, mesomediterráneo inferior; Meso Sup, mesomediterráneo superior; Supra Inf, supramediterráneo inferior.

Los ejemplares se identificaron utilizando la *Flora Vascular de Andalucía Oriental* y *Flora Ibérica* (Blanca *et al.*, 2011; Castroviejo *et al.*, 1990). Se tomaron pliegos testigo cuando la altura de los ejemplares lo permitió, y se incluyeron en la colección de cormófitos del Herbario MGC (Tabla 3.1).

3.4. Datos de polen y esporas

3.4.1. Muestreo aerobiológico

3.4.1.1. Método de captación de partículas sólidas del aire (polen y esporas)

La captación de polen y esporas aerovagantes se realizó por medio de dos captadores volumétricos de succión-impacto tipo Hirst (1952) de la marca Lanzoni s.r.l., modelo VPPS 2000. Este modelo consiste en una bomba de succión de alimentación eléctrica que aspira aire a través de una boquilla de 2 x 14 mm. El aire que entra por la boquilla es conducido directamente a un tambor metálico que tiene adherida una cinta de Melinex® cubierta con una sustancia adhesiva (fluido de silicona) para asegurar que las partículas que transporta el aire se mantengan adheridas a la cinta. El tambor gira a razón de 2 mm/h gracias a un mecanismo de relojería para dar continuidad temporal a la muestra obtenida. El aparato posee una veleta que permite la orientación de la boquilla hacia la dirección del viento. Los captadores volumétricos Hirst fueron diseñados para captar pólenes, esporas y otras partículas en suspensión con diámetros comprendidos entre 2 y 200 μm . Los aparatos se ajustaron a un flujo constante de 10 l/min para que aspirasen el volumen de aire equivalente al que respira una persona adulta en estado de reposo (Galán *et al.*, 2007).

Se empleó un captador para cada punto de muestreo. El captador utilizado en la localidad de Ronda se instaló en el tejado del IES Pérez de Guzmán (36°44'59" N, 5°10'5" W; 768 m sobre el nivel del mar; 13 m sobre el nivel del suelo) (Figura 3.1). El captador de la Sierra de las Nieves se instaló en el tejado del depósito clorador del área recreativa Las Conejeras (36°39'54" N, 5°5'20" W; 1073 m sobre el nivel del mar; 3 m sobre el suelo) (Figura 3.1).



Figura 3.1. Captadores volumétricos de tipo Hirst instalados en Ronda (izquierda) y Sierra de las Nieves (derecha).

Se utilizó un captador volumétrico de tipo Hirst de la marca Burkad Ltd., modelo 7-day recording como repuesto para las ocasiones en las que se averió el captador de Ronda: del 24 de julio de 2018 al 21 de agosto de 2018 y del 2 de octubre de 2018 al 24 de septiembre de 2019. El captador se ajustó también a 10 l/min, siendo directamente comparables las muestras de ambos modelos.

Los aparatos captadores poseen una autonomía de 7 días. Semanalmente (los martes) se reemplazaban las muestras impactadas con las partículas aerovagantes por muestras sin impactar y se comprobaba que el flujo se mantuviese a 10 l/min con un flujómetro Lanzoni (flujómetro de la marca Burkad para el captador de repuesto). En Ronda se reemplazaban las muestras a las 10:00 y Sierra de las Nieves a las 11:00, hora local. Las muestras se mantenían

unidas al tambor o rodillo y protegidas en el interior de un recipiente metálico hasta la llegada al laboratorio de Palinología del Departamento de Botánica y Fisiología Vegetal de la Universidad de Málaga.

3.4.1.2. Montaje de muestras aerobiológicas

Para el montaje de las muestras aerobiológicas se siguió la metodología recomendada por la REA (Galán *et al.*, 2007). Una vez en el laboratorio, la cinta impactada de partículas sólidas se cortaba con ayuda de una cuchilla y una regleta de metacrilato en secciones de 48 mm de longitud para elaborar preparados de microscopía. Estas secciones se corresponden con 24 horas de muestreo.

Cada sección de cinta impactada se colocaba por separado sobre un portaobjetos de cristal añadiéndole glicerogelatina líquida con fucsina básica como medio de montaje encima y debajo de la cinta, y se cubría con un cubreobjetos de cristal de 24 x 60 mm. El exceso de glicerogelatina se retiraba enfriando la muestra con placas de hielo hasta que la glicerogelatina se solidificaba y posteriormente se retiraba el exceso con una cuchilla. Los bordes de la muestra se sellaban con laca de uñas transparente y cada muestra era etiquetada con el nombre de la localidad de muestreo, la fecha y la hora de comienzo de la muestra.

La glicerogelatina utilizada para el montaje de muestras aerobiológicas se preparaba en un matraz utilizando una mezcla de: 80 ml de agua destilada, 30 g de gelatina, 70 g de glicerina (57 ml) y 2 g de fenol. Se calentaba en una placa calefactora removiendo constantemente la mezcla con una varilla de vidrio hasta el comienzo de la ebullición y la pérdida total de la turbidez del fluido. Finalmente, se le añadía fucsina básica (una punta de lanceta) para teñir e incrementar el contraste de los granos de polen sobre el resto de la muestra.

Tras montar las muestras, el tambor se limpiaba con papel empapado en alcohol, se colocaba una cinta de Melinex® nueva, y se le añadía una capa de fluido de silicona con un pincel utilizando una campana extractora de gases. El fluido de silicona se preparaba realizando una dilución de silicona pura en ciclohexano (20 g/l) y se utiliza como sustancia adherente para las partículas que transporta el aire y que impactan contra el tambor. El tambor con la cinta impregnada de sustancia adhesiva se guardaba en un recipiente metálico hasta que fuese utilizado de nuevo.

3.4.1.3. Método de recuento de polen y esporas al microscopio.

El recuento de polen y esporas al microscopio óptico se realizó acorde con las recomendaciones de la Red Española de Aerobiología y de la Sociedad Europea de Aeroalérgenos (EAS, en sus siglas inglesas) (Galán *et al.*, 2007, 2014). En cada preparado de microscopía se realizaron cuatro barridos longitudinales a 400x aumentos con ayuda de un microscopio óptico. Previamente, se fijaba a la parte inferior del preparado una plantilla elaborada en papel de acetato con líneas negras pintadas cada 2 mm. El espacio existente entre dos líneas negras consecutivas se corresponde con una hora de muestreo.

La identificación de los pólenes y esporas se realizó consultando atlas polínicos de la zona de estudio (Grant Smith, 1984; Trigo *et al.*, 2007, 2008; Valdés *et al.*, 1987a) y preparaciones de la palinoteca de referencia del

Departamento de Botánica y Fisiología Vegetal, asociada al Herbario MGC de la Universidad de Málaga.

En una hoja Microsoft Excel se anotaba el número de granos de polen de cada tipo polínico y de esporas de *Alternaria* y *Oidium* observados en cada hora. Para obtener los valores de concentración diaria de cada tipo polínico, de spora y de polen total, se sumaban los datos diarios de los 4 barridos y se multiplicaban por el siguiente factor de conversión:

- Superficie total impactada:

$$14 \text{ mm de anchura} * 48 \text{ mm de longitud} = 672 \text{ mm}^2$$

- Superficie total analizada:

$$4 \text{ barridos} * 48 \text{ mm de longitud} * 0,45 \text{ mm de diámetro del microscopio} = 86,4 \text{ mm}^2$$

- Volumen de aire aspirado:

$$10 \text{ l/min} * 60 \text{ min/h} * 24 \text{ h/día} = 14.400 \text{ l/día} = 14,4 \text{ m}^3/\text{día}$$

- Factor de conversión final:

$$(672 \text{ mm}^2/86,4 \text{ mm}^2) / 14,4 \text{ m}^3/\text{día} = \mathbf{0,54 \text{ m}^{-3} * \text{día}}$$

De acuerdo con los criterios de la EAS y la IAA, las unidades de concentración de polen y esporas se expresaron en número de granos de polen o esporas /m³ de aire. Se prescinde de expresar el tiempo en las unidades siempre y cuando se especifique al hacer referencia a las concentraciones obtenidas (Galán *et al.*, 2017).

La integral polínica (o de esporas) anual es la suma de las concentraciones diarias detectadas durante un año completo. Se expresan como pólenes*día/m³ o esporas*día/m³ (Galán *et al.*, 2017).

Las abundancias relativas de cada tipo polínico se calcularon como el porcentaje que supuso su integral polínica con respecto a la integral polínica de polen total. Su cálculo y representación gráfica se realizó con el paquete AeRobiology (Rojo *et al.*, 2019).

3.4.2. Calendarios polínicos

Para la elaboración de calendarios polínicos se siguió la metodología propuesta por Spieksma (1991). Se calcularon medias para 10 días (medias decenales) de las concentraciones diarias de polen en cada tipo polínico, y se representaron todos aquellos tipos polínicos que igualaron o excedieron el grano de polen/m³ en alguna decena. Las concentraciones medias decenales se convirtieron en clases exponenciales según la metodología propuesta por Stix y Ferretti (1974). Se utilizaron 3 años (2017-2019) para elaborar el calendario de Ronda y 2 años (2018-2019) para el de Sierra de las Nieves. La representación gráfica de los datos se realizó por medio del software R (Development-Core-Team, 2017), utilizando el paquete AeRobiology. Los tipos polínicos se ordenaron según su aparición mayoritaria a lo largo de las decenas y los meses.

3.4.3. Tipos polínicos mayoritarios y minoritarios

Se seleccionaron como mayoritarios los 8 tipos polínicos más abundantes de ambas estaciones, que fueron aquellos que superaron el 1% de abundancia relativa como promedio en el total de años de muestreo.

Dentro de los tipos polínicos minoritarios, se estudiaron solo aquellos que superaron el 0,2% de abundancia relativa como promedio en el total de años de muestreo de alguna de las localidades.

El listado de especies presentes en la zona de estudio cuyo polen se agrupa dentro de cada tipo polínico se elaboró a partir de los datos recogidos en las salidas de campo junto a otros investigadores del equipo de investigación RNM115 de la Universidad de Málaga, en el marco del convenio entre la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía y el Departamento de Botánica y Fisiología Vegetal (área de Botánica) de la Universidad de Málaga para la realización de un estudio sobre la flora y vegetación del futuro Parque Nacional Sierra de las Nieves (806/03.4764).

3.4.4. Periodo de Polinación Principal

El Periodo de Polinación Principal (PPP) es el periodo del año en el que las concentraciones de polen o esporas alcanzan niveles significativos en una localidad determinada (Galán *et al.*, 2017). Para la mayoría de los tipos polínicos se calculó como el periodo comprendido entre el primer día del año en el que se acumuló el 5% de la integral polínica anual y el día en el que se acumuló el 95% (Nilsson & Persson, 1981).

En el caso del tipo polínico Urticaceae, por ser detectado en abundancia durante prácticamente todo el año, las fechas del PPP presentan grandes variaciones entre años cuando se recurre a métodos de porcentajes de integral polínica anual. En este caso, los PPP se calcularon mediante el ajuste de la una curva logística y seleccionando como inicio y fin del PPP aquellas fechas en las que la cuarta derivada de la curva logística cruzó el eje de abscisas (Cunha *et al.*, 2015; Ribeiro *et al.*, 2007).

En el tipo polínico Cupressaceae se detectan dos curvas a lo largo del año: una en invierno y otra en otoño. Por este motivo, se ha optado por dividir cada año en dos estaciones: del 1 de enero al 31 de julio para Cupressaceae de invierno y del 1 de agosto al 31 de diciembre para Cupressaceae de otoño. A cada estación se le calculó su PPP con el método del 5%/95% (Nilsson & Persson, 1981).

El tipo polínico *Fraxinus*, por su aparición durante finales/comienzo de año, tiene su PPP entre dos años naturales. Por este motivo, se calculó el PPP utilizando años encabalgados: desde el 1 de junio hasta el 31 de mayo del año siguiente.

Los métodos de cálculo de PPP en función del polen acumulado son muy sensibles a días con ausencia de datos, ya que asumen que en esos días no hubo acúmulo de polen (es decir, interpreta la ausencia de datos como concentraciones de 0 granos de polen/m³), lo que produce mayores errores en la determinación del PPP que una interpolación de las concentraciones de estos días. Por este motivo, para el cálculo de los PPP se realizó una interpolación de los datos ausentes mediante regresiones lineales.

3.4.5. Correlaciones entre valores diarios de concentraciones de polen o esporas y variables meteorológicas

Se realizaron correlaciones entre los valores diarios de concentración atmosférica de los tipos polínicos mayoritarios (granos de polen/m³) y las

principales variables meteorológicas: precipitación total diaria (mm), humedad relativa media diaria (%), temperaturas máximas, medias y mínimas diarias (°C), velocidad del viento media diaria (km/h), frecuencias de vientos provenientes de cada cuadrante y frecuencia de calma de vientos (%). Los datos meteorológicos corresponden a las estaciones de Ronda Insituto (AEMet) y La Nava (ACAMET) anteriormente descritas (capítulos 3.1.1 y 3.1.2). También se realizaron correlaciones entre estas variables meteorológicas y las concentraciones diarias de esporas de *Alternaria* y *Oidium*. Tras comprobar que los datos no se ajustaban a una distribución normal mediante pruebas de Kolmogorov-Smirnov ajustadas con la corrección de Lilliefors ($\alpha=0,05$), se optó por utilizar pruebas de correlación de Spearman (no paramétricas). Dado el elevado número de correlaciones a realizar con cada tipo polínico/esporal, se ajustaron los *p*-valores mediante una corrección de Bonferroni.

3.4.6. Variaciones intradiarias

Se estudiaron los comportamientos intradiarios de los cinco tipos polínicos más abundantes en ambas estaciones: *Castanea*, *Cupressaceae*, *Olea*, *Quercus* y *Poaceae*. Para cada tipo polínico, en cada uno de los años de muestreos y en cada estación, se calculó el PPP como se detalla en el apartado anterior. Se estudió el patrón intradiario de aquellos días cuyas concentraciones polínicas igualaron o superaron a la media del PPP (Trigo *et al.*, 1996). Los datos polínicos utilizados para este estudio fueron los recuentos de granos de polen detectados en intervalos de dos horas a partir de la media noche (UTC+2 en primavera y verano, y UTC+1 durante el resto del año; la hora española). Estos recuentos bihorarios se expresaron como porcentajes respecto al número total de granos de polen de ese tipo polínico contabilizado durante el día completo (24 horas).

Se calculó el Índice de Distribución Intradiurna (IDI) (Trigo *et al.*, 1997) para cada uno de los días seleccionados (Ecuación 3.4) y se calculó la media y desviación estándar para cada tipo polínico.

$$IDI = \frac{M-m}{T} \quad (3.4)$$

M es el máximo valor de número de granos de polen registrados en periodos bihorarios; m el mínimo valor bihorario; y T el total de granos registrados en el día.

Se realizaron pruebas de Shapiro-Wilk para comprobar la normalidad de los datos. Para cada tipo polínico y estación, se realizaron pruebas pareadas de Mann-Whitney-Wilcoxon en busca de diferencias significativas entre los años de muestreo. Se realizaron correcciones *post-hoc* de Bonferroni para ajustar los *p*-valores.

Para comparar estaciones de muestreo, se realizaron pruebas de Mann-Whitney-Wilcoxon para cada uno de los periodos bihorarios. Los IDI de ambas estaciones se compararon mediante pruebas de Mann-Whitney-Wilcoxon.

Para cada tipo polínico y estación se realizaron análisis de *clusters* de Ward (1963) de distancias euclidianas utilizando el software PAST (Hammer *et al.*, 2001) con intención de detectar posibles grupos de patrones intradiarios. Solo se consideraron aquellos análisis que obtuvieron un coeficiente de correlación

cofenética superior a 0,7. En cada *cluster* se realizaron 1000 simulaciones para comprobar la robustez de las agrupaciones (*bootstrap* = 1000).

Las representaciones gráficas de los resultados se realizaron con el paquete AeRobiology, implementado en el software R (Development-Core-Team, 2017; Rojo *et al.*, 2019).

Con cada uno de los días agrupados en los *clusters* se realizó un estudio de retrotrayectorias de vientos utilizando el modelo *Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory 4* (HYSPLIT4) del National Oceanic and Atmospheric Administration Air Resources Laboratory (NOAA ARL) (Rolph *et al.*, 2017; Stein *et al.*, 2015). Las retrotrayectorias se calcularon a 500 m sobre el nivel del suelo, ya que a menor altura podrían verse afectadas por la influencia de condiciones climáticas locales y orografía. Para su cálculo, se utilizaron los datos meteorológicos de 1 grado de precisión obtenidos de la base de datos Global Data Analysis System (GDAS), provistos por la NOAA ARL (Environmental Modeling Center *et al.*, 2001).

Para la representación gráfica de las trayectorias se recurrió al software QGIS (QGIS Development Team, 2019). Se utilizaron capas de información obtenidas de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM), gestionada por la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible de la Junta de Andalucía (Junta de Andalucía, 2011).

3.4.7. Estudio del transporte de polen

Para este estudio se utilizaron también los datos aerobiológicos de la estación de Málaga capital. En esta localidad se ha realizado un muestreo continuo desde mayo de 1991 hasta la actualidad, lo que constituye un registro amplio y representativo de la zona de estudio. La metodología empleada para la recogida, el montaje y recuento de polen atmosférico de Málaga capital al microscopio fue el mismo que el descrito en el Capítulo 3.4.1. Para este estudio se emplearon todos los datos disponibles de los tres puntos de muestreo (Málaga, Ronda y Sierra de las Nieves) hasta la primera mitad de 2019 (30 de junio).

Los datos meteorológicos utilizados para la estación de Málaga fueron los de la estación meteorológica Málaga-Aeropuerto (a 11,7 km del punto de muestreo aerobiológico) y fueron proporcionados por AEMet.

Se estudiaron en detalle todos los días en los que las concentraciones de polen de *Alnus* excedieron o igualaron los 10 granos de polen/m³ para detectar las posibles causas o circunstancias de estas concentraciones anómalas. Complementariamente se analizaron las retrotrayectorias de masas de aire durante estos días, que se calcularon utilizando el modelo HYSPLIT4 desarrollado por el NOAA ARL (Rolph *et al.*, 2017; Stein *et al.*, 2015). Se estudiaron las retrotrayectorias a 500, 750 y 1000 m sobre el nivel del suelo. Este rango de altitud evita el efecto de la orografía y es ampliamente utilizado en este tipo de estudios (Šauliene and Veriankaite 2006; Stach *et al.* 2007; Hernández-Ceballos *et al.* 2011, 2014; Bilińska *et al.* 2017). Las trayectorias fueron elaboradas utilizando datos meteorológicos de 1 grado de precisión obtenidos de la base de datos GDAS de la NOAA para fechas comprendidas entre los años 2005 y 2019 (Environmental Modeling Center *et al.*, 2001). Dado que los datos previos a 2005 son menos abundantes, se recurrió a la base de datos Archived Reanalysis Database del NOAA (National Centers for Environmental Prediction

and National Center for Atmospheric Research 2003). Para cada uno de los días se calcularon tres trayectorias por hora (una trayectoria por cada una de las alturas seleccionadas y por cada hora del día; en total 72 trayectorias por día). Se estudió el recorrido trazado por dichas trayectorias durante las 48 horas previas a su llegada al punto de muestreo.

El recorrido de las trayectorias se representó gráficamente sobre el mapa político del oeste del Mediterráneo utilizando el software QGIS (QGIS Development Team, 2019). Sobre estos mapas también se representó la localización geográfica de todos los individuos del género *Alnus* identificados en la zona de estudio y que tuviesen pliegos de referencia. Estos datos se extrajeron de la base de datos Global Biodiversity Information Facility (GBIF) (GBIF: The Global Biodiversity Information Facility., 2019; GBIF.org., 2019), que actualmente es la mayor y más completa base de datos de la zona. En ella está integrada información de herbarios oficiales, universidades y centros de investigación (58 bases de datos distintas para los registros de *Alnus* en la zona estudiada). No se tuvieron en consideración los registros de identificaciones visuales sin pliegos de referencia para evitar posibles identificaciones erróneas o fuentes de datos no oficiales.

Se compararon estadísticamente las condiciones meteorológicas de los días con elevadas concentraciones de *Alnus* y el resto de los días del periodo enero-marzo. Las comparaciones se realizaron mediante pruebas de rangos Mann-Whitney-Wilcoxon, ya que los datos no se ajustaban a una distribución normal según pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov con corrección de Lilliefors ($\alpha=0,05$). También se realizaron correlaciones de Spearman entre las concentraciones medias diarias de todos los días del periodo de muestreo en el que se hubiese detectado algún grano de polen de *Alnus* y las condiciones meteorológicas de esos días. Debido al elevado número de pruebas, se realizaron correcciones de Bonferroni como correcciones *post-hoc*. Todas las pruebas estadísticas se realizaron utilizando el software R y el procesamiento de datos se realizó utilizando el paquete AeRobiology (Development-Core-Team, 2017; Rojo *et al.*, 2019).

3.4.8. Esporas de *Alternaria* y *Oidium*

Bajo el tipo esporal *Oidium* se han agrupado esporas procedentes de estados anamorfos de especies del orden Erysiphales (phylum Ascomycota), que tradicionalmente se habían agrupado dentro del género *Oidium* y que presentan su mismo tipo esporal pese a que haya cambiado su clasificación taxonómica (Oliveira *et al.*, 2009). Las esporas del tipo *Alternaria* se corresponden con las esporas provenientes de especies del género homónimo.

Para comparar la temporalidad de los dos tipos esporales en ambas estaciones de muestreo se utilizó la representación de calendarios polínicos «violinplot» del paquete AeRobiology. Esta representación gráfica está basada en la metodología descrita por O'Rourke (1990): se calculan las medias de concentraciones para cada día del año y se relativizan a las concentraciones del tipo esporal con mayor integral anual. Los resultados se representan mediante un diagrama de violines. La estrechez o anchura del gráfico muestra la distribución de los datos a lo largo del año para un mismo tipo esporal, aunque no guarda relación con la abundancia relativa de dicho tipo. El resultado permite

comparar la intensidad y temporalidad de los distintos tipos esporales en cada localidad.

Los análisis de correlación entre valores diarios o semanales de concentraciones de esporas y variables meteorológicas se realizaron siguiendo la misma metodología descrita en el Capítulo 3.4.5. Se comprobó que los datos no se ajustaban a una distribución normal a través de pruebas de Kolmogorov-Smirnov con corrección de Lilliefors ($\alpha=0,05$), y se aplicaron también correcciones *post hoc* de Bonferroni para determinar los resultados significativos. Se utilizaron también las variables meteorológicas de uno, dos y tres días (o semanas) anteriores.

3.4.9. Modelos de pronóstico

Los modelos de pronóstico de polen y esporas se elaboraron utilizando tres técnicas distintas: regresiones lineales múltiples por pasos, redes neuronales artificiales y *random forest*. Se elaboraron modelos de pronóstico independientes para cada uno de los tipos polínicos mayoritarios y para los dos tipos esporales estudiados: *Castanea*, *Cupressaceae*, *Olea*, *Pinus*, *Plantago*, *Poaceae*, *Quercus*, *Urticaceae*, *Alternaria* y *Oidium*. También se elaboraron modelos de pronóstico distintos para Ronda y Sierra de las Nieves.

Cada modelo fue entrenado con el 80% de los datos disponibles en cada localidad y validado externamente con el 20% restante. Los datos para el entrenamiento y validación se escogieron de forma aleatoria de entre todos los disponibles para evitar sesgos.

Los modelos de pronóstico se entrenaron y validaron con concentraciones diarias. Las concentraciones numéricas diarias de polen se transformaron en las categorías establecidas por la REA según el tipo polínico considerado: «nulo», «bajo», «medio» y «alto» (Galán *et al.*, 2007). En el caso de *Alternaria* y *Oidium* se asignaron las siguientes según los valores de concentración diaria:

- <1 espora/ m^3 → Nulo
- $1 < x \leq 15$ esporas/ m^3 → Bajo
- $15 < x \leq 30$ esporas/ m^3 → Medio
- >30 → esporas/ m^3 → Alto

En los modelos de regresiones lineales múltiples por pasos y de redes neuronales se utilizaron datos numéricos de concentración diaria que posteriormente (en la validación) se transformaron en categorías. Las predicciones con valores negativos se transformaron en 0. Los modelos de *random forest* se entrenaron directamente con categorías, ya que requieren que la variable de respuesta no sea continua (Breiman, 2001).

Las variables predictoras utilizadas fueron: concentración de polen o esporas del día previo (granos de polen/ m^3 o esporas/ m^3), concentración media de los 5 días previos (granos de polen/ m^3 o esporas/ m^3), día del año (fecha numerada desde el 1 de enero), precipitación total diaria (mm), humedad relativa media diaria (%), temperatura media diaria ($^{\circ}C$), temperatura máxima diaria ($^{\circ}C$), temperatura mínima diaria ($^{\circ}C$) y velocidad media del viento diario (km/h).

La funcionalidad de los modelos se comprobó al comparar las categorías predichas con las reales de los días utilizados para validación externa (Ecuación 3.5).

$$\text{Tasa de acierto} = \frac{\text{N.º predicciones correctas}}{\text{N.º total predicciones}} \quad (3.5)$$

Para detectar diferencias significativas en las tasas de acierto de cada método se realizaron pruebas de Mann-Whitney-Wilcoxon con correcciones *post-hoc* de Bonferroni.

3.4.9.1. Modelos de pronóstico basados en regresiones lineales múltiples por pasos

Las regresiones lineales múltiples por pasos se basan en la homocedasticidad y normalidad de los datos (Hastie & Pregibon, 1992; Venables & Ripley, 2002). También son más sensibles a la covariabilidad entre variables predictoras que las redes neuronales artificiales y el *random forest*. Los datos de concentraciones de polen y esporas no suelen ajustarse a distribuciones normales, aunque se utilizan frecuentemente en aerobiología por la directa aplicación y fácil interpretabilidad de los modelos (Aguilera *et al.*, 2014; Beggs *et al.*, 2017; Galán *et al.*, 2001a; García-Mozo *et al.*, 2006a, 2009b, 2010a; Iglesias *et al.*, 2003). Para poder confiar en el ajuste de los modelos, la fiabilidad de estos no se expresó como un *p*-valor de una prueba paramétrica, sino que se utilizó la tasa de acierto (Ecuación 3.5), que es totalmente independiente de la distribución y homocedasticidad de los datos.

Se excluyeron de los modelos aquellas variables que presentaron una covariabilidad alta (correlaciones de Spearman entre ellas con coeficientes superiores a 0,85). Las variables excluidas fueron: temperaturas máxima y mínima diarias.

Los modelos se elaboraron siguiendo un proceso de pasos sucesivos de adición y sustracción de variables no relevantes. En cada paso se añade una variable y se comprueba si el ajuste del modelo ha mejorado. También se comprueba si eliminando alguna de las variables ya añadidas se obtiene un resultado similar y se van eliminando todas aquellas variables no relevantes (Hastie & Pregibon, 1992; Venables & Ripley, 2002).

3.4.9.2. Modelos de pronóstico basados en redes neuronales artificiales

Las redes neuronales artificiales son modelos matemáticos que se basan en la interacción múltiple de variables para predecir el valor de una variable dependiente. Son utilizados cuando no se conoce con exactitud la secuencialidad y/o complejidad de las interacciones entre las variables predictoras, pero se desea obtener un modelo matemático que prediga el resultado. Los modelos se construyen utilizando una base de datos de entrenamiento a partir de la cual se establecen las relaciones entre variables. Usando estas relaciones se construye una red de nodos (interacciones entre variables) en los que cada nodo comunica con un determinado número de variables o con otros nodos. Los nodos se agrupan en varias capas ocultas entre las variables predictoras y la variable dependiente. Variando el número de nodos y de capas ocultas se puede alterar la complejidad y precisión de la red neuronal artificial. Las interacciones entre variables se inician al azar y se van ajustando

para minimizar el error en las predicciones con el set de datos de entrenamiento. El número de nodos y de capas ocultas se optimiza por un proceso de ensayo y error. Normalmente el número de nodos de cada capa oculta suele ser alrededor de un tercio del de la capa anterior. Las redes neuronales se elaboraron utilizando el paquete de R *neuralnet* (Günther & Fritsch, 2010). Se elaboraron redes neuronales con dos capas ocultas: la primera con 5 nodos y la segunda con 2 nodos.

3.4.9.3. Modelos de pronóstico basados en *random forest*

Los *random forest* son modelos que predicen rangos de variables discretas en función de otras variables. Su nombre se debe a que son el resultado de la integración de los resultados de un número determinado de árboles de decisión. Los árboles de decisión son algoritmos de clasificación que buscan los valores de las variables predictoras que son comunes a un determinado valor de la variable dependiente para poder establecer una relación entre ellas. Cada árbol de decisión se compone de nodos en los que se divide un subconjunto de datos de entrenamiento (escogido al azar) en función de una o más variables para obtener subconjuntos de datos puros. Un subconjunto de datos puros es una muestra de la base de datos de entrenamiento en la que se obtiene siempre el mismo valor de la variable dependiente a partir de los mismos valores de las variables predictoras, es decir, siempre que se dan unas condiciones determinadas (variables predictoras) se produce la misma respuesta (variable dependiente). Los árboles siguen creando nodos hasta que cada rama alcanza un subconjunto de datos puro, lo que permite establecer las relaciones entre las combinaciones de valores de variables predictoras y los valores de variables dependientes. Una vez construidos los árboles de decisión, se pueden introducir valores de las variables predictoras y determinar el valor de la variable dependiente que se obtendría con ellos. Como cada árbol utiliza un subconjunto de datos de entrenamiento distinto y en cada nodo de cada árbol las variables que subdividen el subconjunto de datos de entrenamiento se eligen de forma aleatoria, los árboles tienen estructuras distintas entre sí. El resultado de la predicción de *random forest* es aquel en el que coinciden la mayoría de los árboles de decisión que lo componen (Breiman, 2001; Liaw & Wiener, 2002). En cada *random forest* se generaron 500 árboles de decisión distintos. En cada nodo de cada árbol se utilizaron 3 variables para clasificar los subconjuntos de datos. Se utilizó el paquete de R *randomForest* (Liaw & Wiener, 2002).

3.4.10. Modelos de interpolación espacial: *kriging*

Con objeto de extrapolar los datos de concentraciones de polen registrados en Málaga capital al continuo de la provincia de Málaga, se elaboraron modelos interlocalidades. Estos modelos fueron elaborados a partir del estudio comparativo de las distintas estaciones aerobiológicas que han estado en funcionamiento durante algún periodo en la provincia de Málaga desde el año 1991 (Figura 1.12, Capítulo 1.2).

Se compararon las concentraciones polínicas detectadas en cada una de las localidades de muestreo con las concentraciones registradas durante el mismo periodo en Málaga capital (Figura 3.2). El montaje y procesado de las muestras de todas las estaciones de la provincia de Málaga se realizó siguiendo la misma metodología descrita en el Capítulo 3.4.1. Los modelos elaborados permiten estimar los niveles polínicos (establecidos por la REA para cada tipo polínico;

Galán et al., 2007) en cada estación de la provincia a partir de las concentraciones polínicas registradas en Málaga capital.

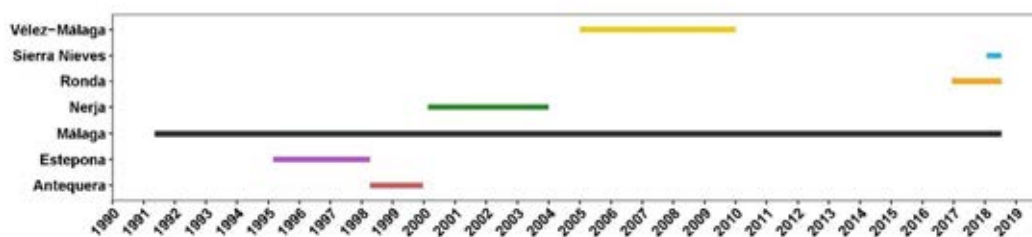


Figura 3.2. Periodos de muestreo aerobiológico y datos de polen disponibles en cada una de las estaciones de muestreo de la provincia de Málaga. «Sierra Nieves», Sierra de las Nieves. Publicada en Picornell *et al.*, 2019.

Cada modelo (modelo compuesto) consta, a su vez, de dos modelos distintos: un modelo prerrotura y un modelo postrrotura (Figura 3.3). Estos dos modelos se basan en regresiones lineales (con β fijado a 0) que establecen una relación cuantitativa y cualitativa, por medio del coeficiente de regresión, entre las concentraciones de polen de Málaga capital y las de la estación objetivo. Debido a las diferencias temporales de fenología de las especies vegetales circundantes en cada una de las estaciones de la provincia, esta relación cambia a lo largo del periodo de polinación principal. Para tener en cuenta el desfase en la fenología de floración y, por lo tanto, el cambio de relación entre las concentraciones de polen en ambas estaciones, se estimó un punto de rotura (Picornell *et al.*, 2019b).

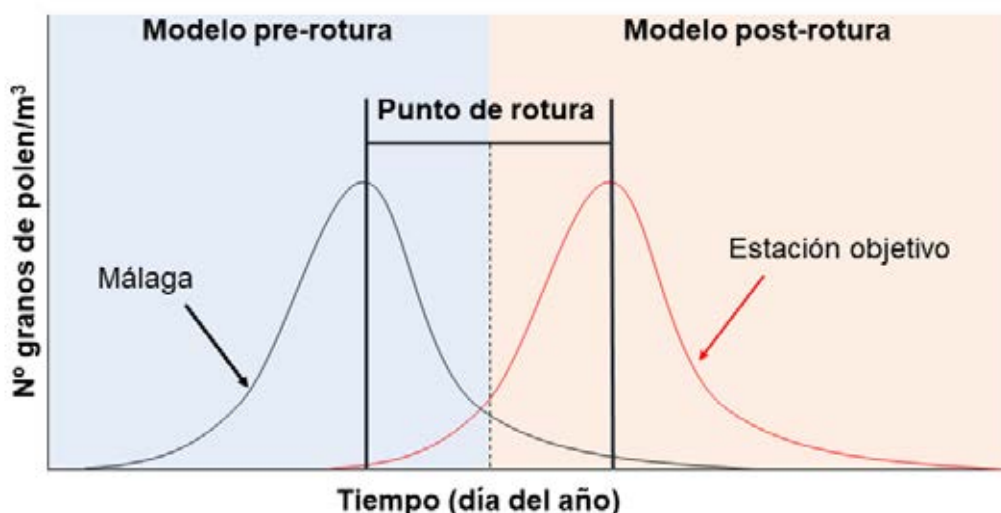


Figura 3.3. Diagrama teórico de la aplicación de los modelos inter-localidades. En negro se marca la curva de concentraciones polínicas registrada en Málaga capital; en rojo, la curva de polen de la estación objetivo. Las líneas negras verticales marcan los picos de concentración de ambas curvas. La línea vertical discontinua marca el punto de rotura de los modelos. Publicada en Picornell *et al.*, 2019.

El punto de rotura es el día del año en el que comienza a aplicarse el modelo postrrotura, y se corresponde con la mitad de la distancia temporal entre los picos de concentración de ambas estaciones. El modelo postrrotura se aplica desde este día hasta 182 días después (medio año), mientras que el modelo prerrotura

se aplica en el resto de los días del año (Figura 3.3). Así pues, cada modelo consta únicamente de las tres variables siguientes: coeficiente de regresión prerrotura, la distancia (en días) entre el pico de concentración de Málaga y el punto de rotura, y coeficiente de regresión postrrotura (Picornell *et al.*, 2019b).

Se elaboró un modelo compuesto para cada estación objetivo y para cada uno de los tipos polínicos más abundantes en todas las estaciones de muestreo de la provincia de Málaga, siendo estos los siguientes: Cupressaceae, *Olea*, *Pinus*, *Plantago*, *Platanus*, Poaceae, *Quercus* y Urticaceae. Se entrenaron los modelos con todos los datos disponibles para cada estación y excluyendo los años que se utilizarían para la validación externa de los modelos interlocalidades: Antequera del año 1998, Estepona del año 1995, Nerja del año 2000, Ronda del año 2018 y Vélez-Málaga del año 2005. También se excluyeron los datos de Sierra de las Nieves que se utilizarían para una segunda validación externa (la de los modelos de interpolación espacial).

Para cada tipo polínico, los valores de los coeficientes de regresión y de la distancia del pico de Málaga al punto de rotura se establecieron como la media de los valores obtenidos para cada uno de los años de entrenamiento. Se realizó una validación interna de los modelos compuestos creados para cada estación de muestreo y tipo polínico. La precisión de los modelos se evaluó mediante el Error Absoluto Medio (MAE en sus siglas inglesas; Ecuación 3.6).

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n |\text{Predicho} - \text{Observado}|}{n} \quad (3.6)$$

n es el número de casos.

Para la validación externa de los modelos, las concentraciones predichas se convirtieron en los niveles de polen establecidos por la REA (Galán *et al.*, 2007), facilitando así la comprensión de los resultados y la trascendencia de los errores de los modelos. Los resultados obtenidos se compararon con los niveles observados durante los años de validación externa en cada una de las estaciones por medio de la tasa de acierto (Ecuación 3.5, Capítulo 3.4.9).

Para poder interpolar los modelos interlocalidades a otros puntos no muestreados de la provincia, se recurrió a la técnica de extrapolación geoespacial denominada *cokriging*. Esta técnica deriva originalmente del *kriging*, que fue desarrollada por Daniel Krige en 1951 para interpolar espacialmente ciertas variables de interés económico en las explotaciones mineras de oro (Krige, 1951; Oliver & Webster, 2014). El *cokriging* se basa en la interpolación espacial de variables a partir de la distribución espacial conocida de otra variable que guarda relación con la primera. A partir de puntos concretos en los que se conocen los valores de ambas variables se establece una relación entre las variables mediante una función matemática que se ajusta a la nube de puntos. Basándose en la relación de la variable predictora y la predicha, y conociendo la distribución espacial real de la variable predictora, puede realizarse una interpolación espacial de los valores de la variable predicha (Oteros *et al.*, 2019a; Pebesma, 2004). Esta técnica ha sido previamente aplicada para interpolar concentraciones de polen en estudios aerobiológicos (Alba *et al.*, 2006; Oteros *et al.*, 2019a; Picornell *et al.*, 2019b; Rojo *et al.*, 2016; Rojo & Pérez-Badia, 2015).

En este caso de estudio, se realizaron tres *cokriging* distintos; uno para cada una de las variables a predecir: coeficiente de regresión prerrotura, distancia temporal (días) desde el pico de concentración de Málaga hasta el punto de rotura, y coeficiente de regresión postrrotura. Como variable predictora se utilizó el ITC (Ecuación 3.1, Capítulo 3.1.1). Esta variable es una medida de la intensidad del frío registrada en un lugar determinado, y constituye un factor limitante para la distribuciones de especies y comunidades vegetales, teniendo un gran impacto sobre la fenología de floración y sobre el pronóstico de niveles polínicos (Pesaresi *et al.*, 2014; Rivas-Martínez *et al.*, 1997; Valencia-Barrera *et al.*, 2002).

Los datos climáticos utilizados para el cálculo del ITC en toda la provincia de Málaga se obtuvieron de WorldClim (años 1970-2000; resolución de 1 km²) (Fick & Hijmans, 2017). La información espacial de las variables se gestionó utilizando los siguientes paquetes del software R (Development-Core-Team, 2017): *envirem*, *gstat*, *raster*, *sp* y *geoR* (Hijmans & van Etten, 2014; Pebesma & Bivand, 2005; Pebesma, 2004; Ribeiro & Diggle, 2015; Title & Bemmels, 2018).

Para cada tipo polínico se elaboraron 3 mapas distintos, uno para cada variable del modelo compuesto. A partir de estos mapas, se extrajeron los valores de dichas variables en el punto de muestreo de Sierra de las Nieves para realizar una segunda validación externa. Utilizando las concentraciones de polen registradas en Málaga, se estimaron los niveles de polen diarios durante los meses de enero a julio de 2018 y se compararon los resultados con los valores reales observados en dicha estación de muestreo para obtener la tasa de acierto de cada tipo polínico (Ecuación 3.5, Capítulo 3.4.9).

3.5. Paquete AeRobiology

El paquete de herramientas software AeRobiology se elaboró en colaboración de los investigadores José Oteros y Jesús Rojo. Está programado en la versión 2.10 del lenguaje informático R (Development-Core-Team, 2017), y optimizado para los principales sistemas operativos.

Las funciones integradas en el paquete implementan la automatización de la metodología descrita en secciones anteriores para la elaboración de calendarios polínicos, cálculos del periodo principal de polinación/ esporulación, cálculo de integrales polínicas/de esporas, cálculo de abundancias relativas e interpolación de datos, así como la representación gráfica -estática o interactiva- de los datos. Además, se ha elaborado una función que permite interpolar datos ausentes (por ejemplo, por avería del aparato) que se describe a continuación.

3.5.1. Métodos de interpolación de datos ausentes

Para determinar la eficiencia de cada método de interpolación integrado en la función *interpollen* del paquete AeRobiology se realizó un estudio utilizando la base de datos de polen de Ronda como modelo. Se valoró la eficiencia de cada uno de los métodos en función de tres variables complementarias: el periodo en el que se realiza la interpolación, el número de días interpolados y el tipo polínico. Hay otras variables individuales dentro de cada método que también podrían ajustarse, pero la adición de más variables dificultaría en gran medida la interpretación de los resultados.

Los periodos testados fueron:

- Prestación: días precedentes al inicio del PPP de ese mismo año natural.
- Prepico: días desde el inicio del PPP hasta el día pico.
- Pico: periodo de tiempo variable en función del número de días a interpolar, pero con el pico localizado en el centro del hueco.
- Postpico: días desde el pico hasta el fin del PPP.
- Postestación: días desde el fin del PPP hasta el final de ese año natural.

El PPP se calculó con los mismos métodos descritos en el Capítulo 3.4.4. Es decir, se definió con el método del 90% (Nilsson & Persson, 1981) excepto para Urticaceae, que se calculó con el método de curva logística y cuarta derivada (Cunha *et al.*, 2015; Ribeiro *et al.*, 2007). Cupressaceae se partió en Cupressaceae de invierno y de otoño siguiendo la metodología descrita en el Capítulo 3.4.4. Los PPP se calcularon utilizando la función *calculate_ps* del paquete AeRobiology.

Los tipos polínicos utilizados fueron elegidos en función de su comportamiento en la localidad de muestreo. Los tipos polínicos seleccionados abarcaron tipos mayoritarios, minoritarios y de aparición a lo largo de diferentes épocas del año:

- Tipo polínico correspondiente a especies ornamentales abundantes y a especies naturales de las inmediaciones de la zona de muestreo: Cupressaceae
- Tipos polínicos correspondientes a especies arbóreas de distribución mayoritariamente natural o seminatural: *Pinus* y *Quercus*.
- Tipos polínicos correspondientes a especies herbáceas predominantemente nitrófilas: Amaranthaceae, *Plantago* y Urticaceae.
- Tipos polínicos correspondientes a numerosas especies herbáceas de distribución natural y cosmopolita, también especies ampliamente cultivadas como ornamental (césped) y como cultivo extensivo (cereales): Poaceae.
- Tipo polínico correspondiente a una especie de cultivo intensivo en la zona cercana: *Olea*.
- Tipo polínico correspondiente a especies arbóreas ornamentales de floración primaveral: *Platanus*.
- Tipo polínico correspondiente a especies arbóreas ornamentales de floración fundamentalmente estival y a una especie de distribución natural: Arecaceae.
- Tipo polínico correspondiente a especies arbóreas ornamentales de floración otoñal: *Casuarina*.

Los números de días interpolados (tamaño del hueco) testados fueron 3, 5, 7 y 10 días. En cada tipo polínico y año se eliminó un segmento de días consecutivos igual al número de días a interpolar (3, 5, 7 o 10 según el caso) en

cada uno de los periodos testados. La elección de los días que iban a eliminarse dentro de cada periodo se realizó aleatoriamente para evitar sesgos. Una vez eliminados, se realizó una interpolación con cada uno de los métodos testados y se compararon las concentraciones observadas con las predichas. Los errores fueron cuantificados mediante errores relativos. El error relativo está calibrado en función de la magnitud de las concentraciones observadas y predichas. De esta forma se pueden comparar los errores de los tipos polínicos mayoritarios con los de los minoritarios, y de unos periodos con otros. Las concentraciones de 0 granos de polen/m³ son datos relevantes, por lo que no se eliminaron. Para poder utilizar estos valores nulos, se modificó ligeramente la fórmula del error relativo (Ecuación 3.7).

$$\text{Error relativo} = \begin{cases} 0 & \text{si } o=0 \text{ y } p=0 \\ \frac{|p-o|}{\left(\frac{|p|+|o|}{2}\right)} & \text{si } o \neq 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

O es valor observado; p es valor predicho.

Se realizó una interpolación con cada combinación de variables. Es decir, una interpolación de cada tamaño de hueco, en cada uno de los periodos de todos los tipos polínicos considerados, para cada uno de los años de muestreo y con cada uno de los métodos (375 datos interpolados por método). De los resultados se excluyeron aquellos en los que el periodo considerado era más corto que el hueco a interpolar o aquellos en los que no fue posible obtener un coeficiente de correlación elevado entre el punto de muestreo cercano y el punto de muestreo objetivo.

Para comprobar la existencia de diferencias significativas ($\alpha=0,05$) entre los diferentes parámetros de las variables se realizaron pruebas de Mann-Whitney Wilcoxon aplicando correcciones *post-hoc* de Bonferroni.

3.5.1.1. Interpolación lineal

Se basa en trazar una línea recta entre ambos extremos del hueco (Figura 3.4). La ecuación de dicha recta se utiliza para obtener los valores de los días con datos ausentes.



Figura 3.4. Visualización gráfica del método lineal de interpolación. En rojo, datos interpolados. En negro, datos reales.

3.5.1.2. Interpolación mediante medias móviles

Este método se basa en el cálculo de medias móviles para completar los datos ausentes. El tamaño de la media móvil se determina como el doble del hueco a interpolar para asegurar la integración de datos de ambos extremos del hueco. Se va reconstruyendo el hueco (Figura 3.5) de izquierda a derecha (cronológicamente) utilizando a su vez los datos interpolados (y sin considerar datos ausentes) para calcular las medias móviles.

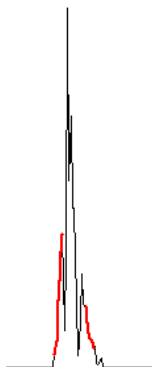


Figura 3.5. Visualización gráfica del método de interpolación de media móvil. En rojo, datos interpolados. En negro, datos reales.

3.5.1.3. Interpolación mediante regresiones spline

Se traza una curva (Figura 3.6) correspondiente a la expresión polinómica que más se ajusta a los datos de ambos extremos del hueco. La ecuación de dicha curva se utiliza para calcular los valores de los días sin datos. Por defecto se tienen en consideración los tres días previos y tres días posteriores al hueco para ajustar la curva y se suaviza mediante un factor de ajuste denominado «spar» y fijado en 0,7 por defecto.



Figura 3.6. Visualización gráfica del método de interpolación mediante regresiones *spline*. En rojo, datos interpolados. En negro, datos reales.

3.5.1.4. Interpolación mediante análisis de series temporales

En este método se extrae la estacionalidad de la curva de polen anual siguiendo la metodología propuesta por Cleveland *et al.* (1990). Posteriormente se calcula una regresión lineal entre la estacionalidad y la curva del año de muestreo en el que se encuentran los datos a interpolar y, mediante dicha regresión, se transforman los datos de la curva modelo estacional en los del hueco a interpolar (Figura 3.7). Para poder obtener la estacionalidad es necesario un mínimo de 3 años de datos.

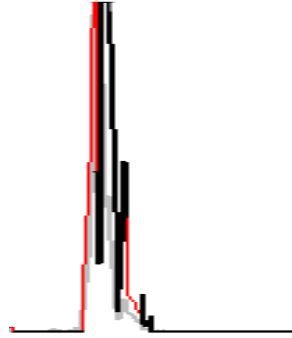


Figura 3.7. Visualización gráfica del método de interpolación mediante series temporales. En rojo, datos interpolados. En negro, datos reales. En gris, curva modelo de la temporalidad.

3.5.1.5. Interpolación mediante regresiones con puntos de muestreo cercanos

Se basa en utilizar datos de puntos de muestreo cercanos en los que no hay pérdida de datos para las fechas seleccionadas. Los muestreos deben ser simultáneos, es decir, ambos puntos de muestreo deben funcionar durante los mismos periodos. En primer lugar, se detecta si hay correlación entre los datos de ambos puntos de muestreo mediante una correlación de Spearman. Para utilizar los datos de la estación vecina es necesario que el coeficiente de correlación sea mayor que 0,6. Tras esto, se traza una regresión lineal entre la curva del punto de muestreo vecino y la curva que se desea interpolar. Los datos del del punto de muestreo vecino se transforman mediante la ecuación de la regresión y se sustituyen por los datos ausentes de la estación a interpolar (Figura 3.8).



Figura 3.8. Visualización gráfica del método de interpolación mediante regresiones con puntos de muestreo cercanos. En rojo, datos interpolados. En negro, datos reales.

Como puntos de muestreo cercanos se utilizaron Málaga capital y Sierra de las Nieves.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis climático y meteorológico

4.1.1. Análisis climático y meteorológico en Ronda

En los datos del periodo más reciente (2009-2019) se observa un incremento de las temperaturas medias durante los meses de abril a diciembre con respecto a los datos históricos (Figura 4.1). Por el contrario, en los meses de enero y febrero la temperatura media se ha reducido. Este aumento de oscilación térmica anual se observa con mayor claridad en el índice de continentalidad. El Ic para el periodo 2009-2019 fue de 17,7, lo que clasifica a Ronda en un tipo de continentalidad oceánico, subtipo semicontinental atenuado (Rivas-Martínez *et al.*, 2017). En cambio, el Ic del registro histórico es 14,3, lo que clasificaba a Ronda como subtipo euoceánico acusado (también dentro del tipo oceánico).

El Itc histórico de Ronda es de 332,67, muy similar al 335,85 obtenido para el periodo 2009-2019 a pesar del aumento general de las temperaturas (un incremento de 1,2°C entre ambos periodos). En ambos casos el termotipo obtenido es mesomediterráneo inferior según la clasificación de Rivas Martínez (1997) y, pese a haberse reducido ligeramente, todavía se encuentra lejos del límite inferior del mesomediterráneo. Ronda no ha sido la única localidad que ha incrementado sus temperaturas en Europa, ya que desde el año 2000 se ha detectado un incremento general de las temperaturas en el hemisferio norte (Anders *et al.*, 2014; Ziska *et al.*, 2019) y un incremento en el número de olas de calor en verano en todo el continente europeo (Barriopedro *et al.*, 2011; Seneviratne *et al.*, 2006).

La precipitación total anual se ha incrementado ligeramente en el periodo 2009-2019 (681,02 mm) con respecto al histórico (642,4 mm). Este incremento se debe, principalmente, a un aumento de las lluvias durante los meses de marzo, abril, septiembre y octubre. En el resto de los meses del año las precipitaciones totales mensuales se han reducido. No se han detectado grandes cambios en el lo (3,53 para el periodo histórico, y 3,46 para el periodo 2009-2019). Pese a registrarse un volumen de precipitaciones similar, la temporalidad de dichas precipitaciones se ha reducido, lo que incrementa la oscilación en la disponibilidad hídrica a lo largo del año. En general, este incremento en la concentración temporal de precipitaciones se ha observado en todo el sur de la Península Ibérica en los últimos años, y con mayor intensidad en la época seca (De Luis *et al.*, 2011). El periodo de sequía estival se ha mantenido constante (de marzo a septiembre), aunque con mayor severidad en el periodo reciente (menos precipitaciones y temperaturas más elevadas). El periodo de sequía estival presenta cierta gradación en latitud en la Península Ibérica. Así pues, en el centro y norte de la Península la sequía estival abarca meses más tardíos (en torno a abril-septiembre) que en Ronda (De Luis *et al.*, 2011). Cabe destacar que el pico de precipitación observado en marzo en el periodo 2009-2019 está influenciado por un fenómeno de precipitación extrema registrada durante 2018 que se comentará en mayor profundidad en la discusión de la Figura 4.2.

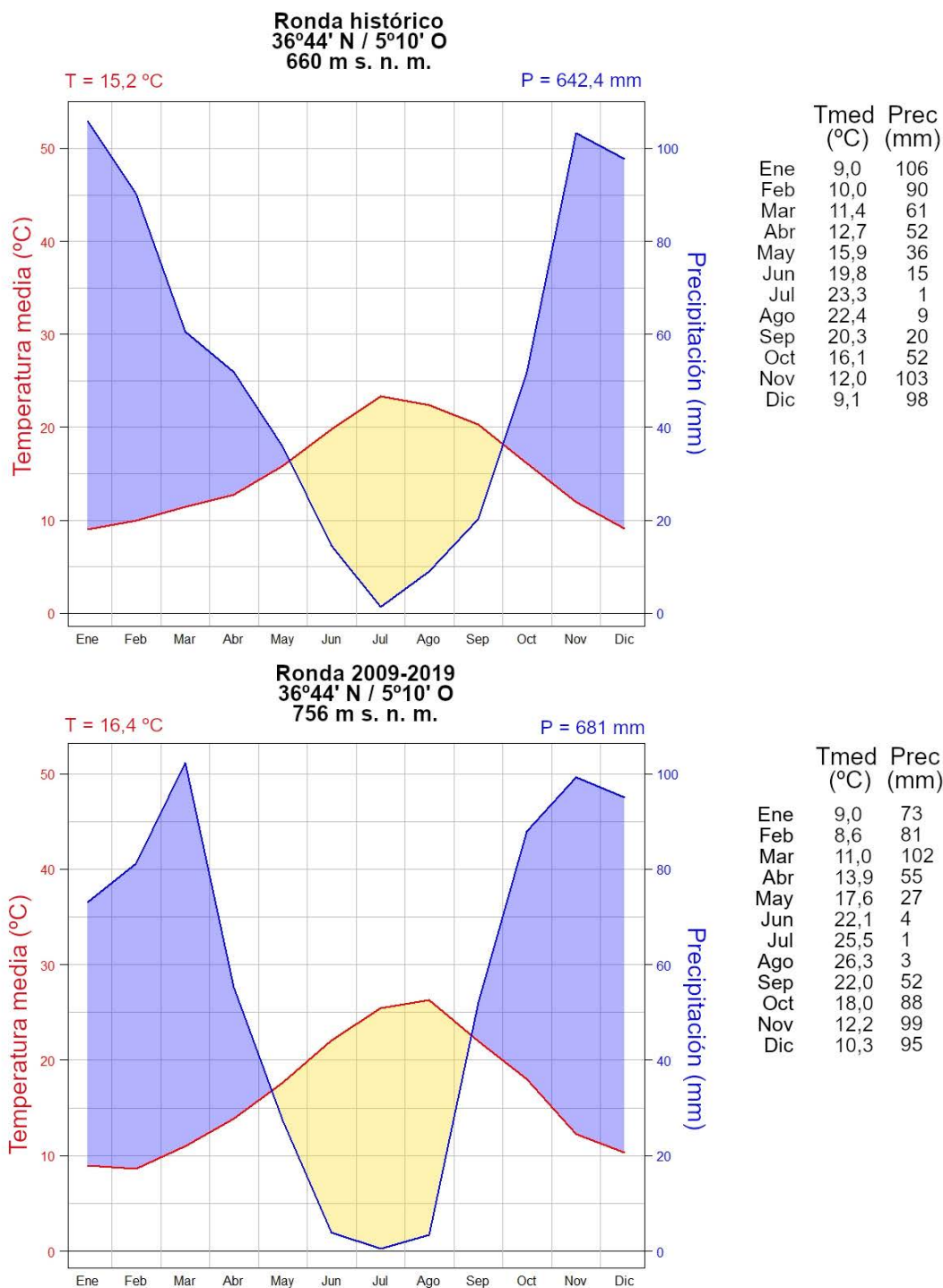


Figura 4.1. Comparativa del diagrama ombrotérmico histórico de Ronda ciudad (periodo de observación de temperatura de 1973-1989; periodo de observación de precipitación de 1967-1989; modificado de Rivas-Martínez y Rivas-Sáenz (2009) y del diagrama ombrotérmico obtenido con datos recientes de AEMet (diciembre 2009-diciembre de 2019). Tmed, temperatura media mensual; Prec, precipitación acumulada mensual; T, temperatura media anual; P, Suma de la precipitación total anual media.

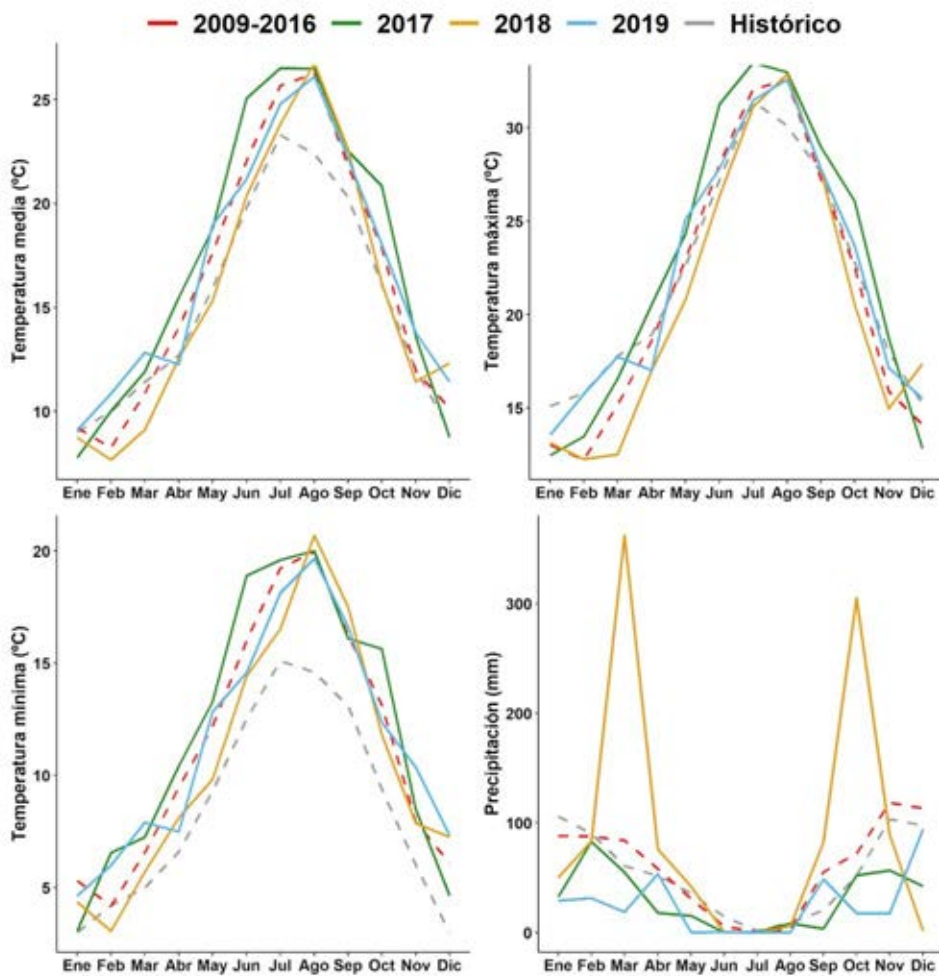


Figura 4.2. Variación mensual de las principales variables meteorológicas en Ronda. Cada línea continua representa datos de un mismo año. La línea discontinua roja representa la media obtenida del periodo 2009-2016. La media del periodo histórico (1973-1989 para temperaturas; 1967-1989 para precipitación) se muestra con una línea gris discontinua.

Durante los años de muestreo (2017-2019) se observó un patrón mensual en las temperaturas similar al de los años previos (2009-2016) con algunas excepciones (Figura 4.2). La primera mitad de 2018 fue más fría que la media histórica y la de los años previos. Las temperaturas medias, máximas y mínimas mensuales de la primera mitad de 2017 fueron superiores a la media. Las temperaturas mínimas del periodo histórico son generalmente inferiores a las mínimas de los años de muestreo y a la media de los años 2009-2016, lo que también refleja el incremento de la temperatura media anual mencionado anteriormente. Las temperaturas máximas han aumentado en mayor medida en los meses de julio, agosto y septiembre con respecto al periodo histórico.

Las precipitaciones tuvieron grandes oscilaciones entre los años de muestreo, tal como se ha observado en toda la región Mediterránea (De Luis *et al.*, 2009, 2011; Norrant & Douguédroit, 2006). Dentro de la Península Ibérica, se ha detectado una mayor variabilidad interanual en el sur (De Luis *et al.*, 2011). En marzo y octubre de 2018 se registraron precipitaciones muy abundantes e intensas en un periodo de pocos días. Estos fenómenos de precipitación torrencial han acontecido recurrentemente en toda la región del Mediterráneo y

están aumentando su frecuencia en los últimos años, lo que produce graves perjuicios para la población y el medio natural (De Luis *et al.*, 2011). Las lluvias torrenciales registradas en Ronda en marzo y octubre de 2018 produjeron grandes inundaciones en la ciudad y alrededores (Diario Ronda, 2018; Perriáñez, 2018). Las inundaciones de octubre fueron las responsables de la avería de la estación meteorológica de la Nava de San Luis (Sierra de las Nieves).

4.1.2. Análisis climático y meteorológico en Sierra de las Nieves

Al igual que en Ronda y en el resto del hemisferio norte (Anders *et al.*, 2014; Ziska *et al.*, 2019), en los últimos años se ha detectado un incremento de las temperaturas medias durante gran parte del año en Sierra de las Nieves (Figura 4.3). Cabe destacar que las estaciones meteorológicas histórica y actual tienen una diferencia de altitud de 68 m y sus localizaciones geográficas distan 2,5 km, por lo que algunas diferencias son esperables. Sin embargo, siguen siendo las dos estaciones meteorológicas más directamente comparables para analizar el cambio del clima en los 24 años que separan sus muestreos. En el caso de Sierra de las Nieves, y al contrario que en Ronda, la subida de temperaturas también se detecta en invierno, por lo que no hay un incremento en su I_c (16,2 para el periodo histórico y 15,44 para el periodo reciente). En ambos casos, su I_c clasifica la zona en un tipo de continentalidad oceánico, subtipo euoceánico atenuado (Rivas-Martínez *et al.*, 1997). Por lo tanto, Sierra de las Nieves presenta menores oscilaciones térmicas anuales que Ronda.

La temperatura media anual ha aumentado en 1,1°C, casi lo mismo que en Ronda. Esto también se ha reflejado en un aumento del I_{tc} , que ha pasado de 185,1 en el periodo histórico a 197 en el reciente. El incremento no ha sido suficiente como para cambiar su termotipo, por lo que la localidad sigue siendo clasificada como supramediterráneo inferior (Rivas-Martínez *et al.*, 1997). La estación meteorológica actual está situada a 40 metros más sobre el nivel del mar que el aparato captador de polen, y a 3,2 km de distancia, en una localización en la que la orografía juega un papel muy relevante. Por este motivo, pese a ser la estación meteorológica más cercana, puede haber ligeras variaciones en las temperaturas (temperaturas más cálidas en el entorno del captador de polen) y precipitaciones registradas. La Junta de Andalucía en la plataforma REDIAM (Junta de Andalucía, 2011) tiene disponible un modelo de distribución de los pisos bioclimáticos de Andalucía que fue elaborado con datos interpolados espacialmente a partir de registros climáticos de 1960-1990. En dicho modelo, la zona de estudio de Sierra de las Nieves se clasifica en el termotipo mesomediterráneo inferior. Los datos reales tomados *in situ* en las estaciones meteorológicas de Sierra de las Nieves presentan una mayor fiabilidad que datos interpolados, lo que se confirma al ver que las coordenadas exactas en las que se encontraba la estación meteorológica histórica y en la que se encuentra la estación actual están clasificadas en el mapa de REDIAM como mesomediterráneo superior (frente al supramediterráneo inferior calculado en este apartado). Sin embargo, las diferencias mencionadas en altitud y distancia entre la estación meteorológica y el punto de muestreo, junto a la vegetación natural de las inmediaciones -más propias del piso mesomediterráneo que del supramediterráneo- parecen apuntar a que el captador de polen se encuentre en el límite entre el mesomediterráneo superior y supramediterráneo inferior.

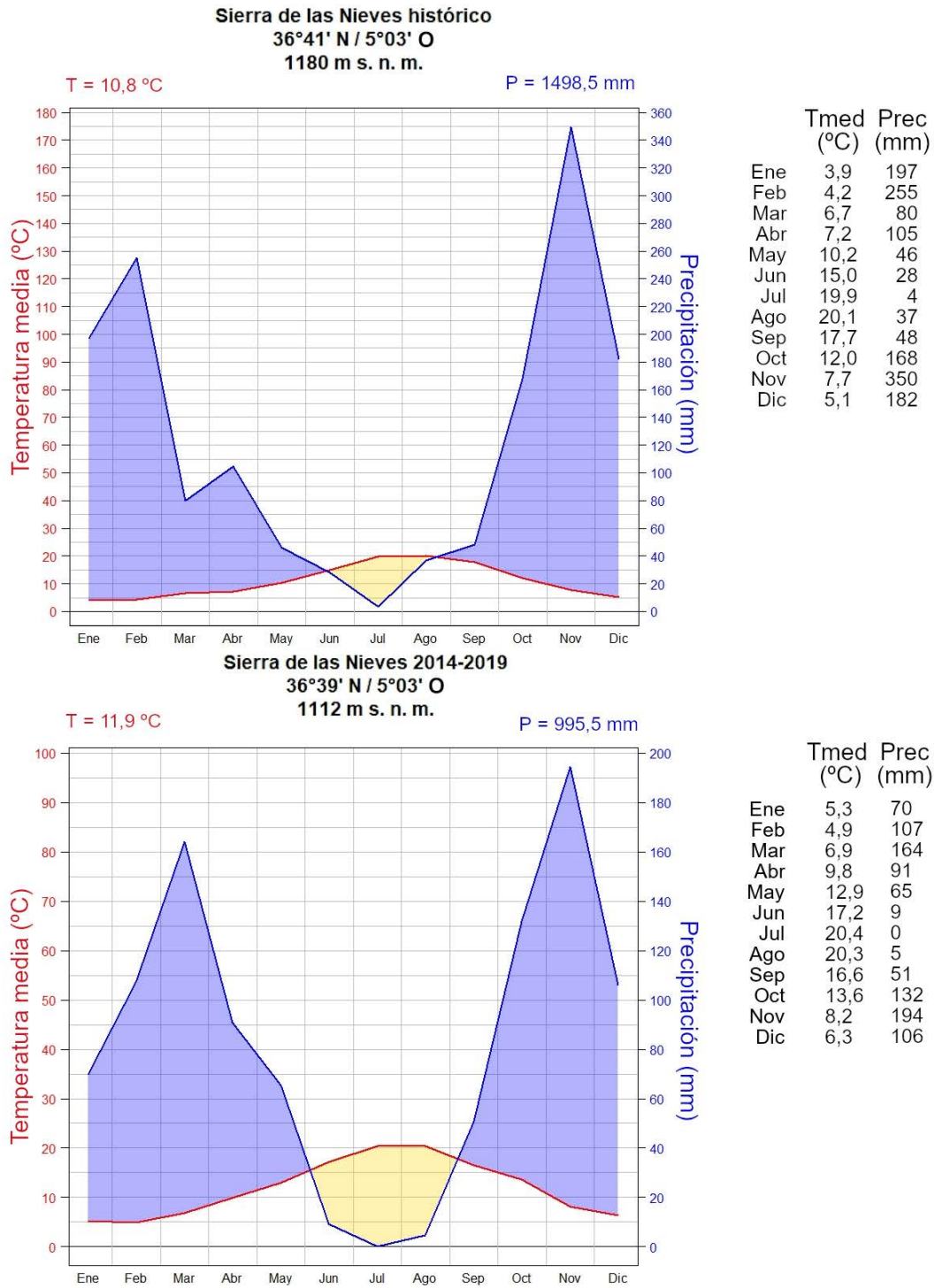


Figura 4.3. Comparativa del diagrama ombrotérmico histórico de Sierra de las Nieves (periodo de observación de temperatura de 1982-1989; periodo de observación de precipitación de 1967-1989; modificado de Rivas-Martínez y Rivas-Sáenz (2009) y del diagrama ombrotérmico obtenido con datos recientes de ACAMET (febrero 2014-diciembre de 2019). Tmed, temperatura media mensual; Prec, precipitación acumulada mensual; T, temperatura media anual; P, Suma de la precipitación total anual media.

Al igual que en Ronda y en otros lugares del sur de la Península Ibérica, las precipitaciones están más concentradas temporalmente a lo largo del año, se ha intensificado y ampliado el periodo de sequía estival, y abundan los episodios de

lluvias torrenciales (De Luis *et al.*, 2011). A pesar de esto, la precipitación total anual se ha visto drásticamente reducida (de 1498,5 mm a 995,5 mm), lo que se ha reflejado también en su lo (11,55 en la estación histórica y 6,99 en la actualidad). Puede que las variaciones orográficas y de altitud entre la localización de ambas estaciones meteorológicas sean las responsables de, al menos, parte de estas diferencias. En general no hay una tendencia global generalizada en la cantidad total de precipitaciones anuales con respecto al cambio climático, si bien está claro el incremento de la estacionalidad de las mismas y las elevadas variaciones interanuales (Anders *et al.*, 2014; De Luis *et al.*, 2011; Eckhardt & Ulbrich, 2003). Pese a la reducción de la precipitación total anual en Sierra de las Nieves en los últimos años, sigue siendo una cantidad superior a la que se registra en Ronda. Sierra de las Nieves está situada en un entorno montañoso cercano al mar, por lo que las masas de aire procedentes de la costa, de gran humedad relativa, descargan sus precipitaciones en el parque natural tras verse obligadas a ascender en altitud por la orografía. Los meses de mayor concentración de precipitaciones son coincidentes en ambas estaciones de muestreo: de enero a abril y de octubre a diciembre. El periodo de sequía en Sierra de las Nieves es menos extenso y acusado que en Ronda; solo abarca los meses de junio, julio y agosto.

No hay datos de polen en Sierra de las Nieves en el año 2017. Sin embargo, ante la ausencia de datos meteorológicos durante gran parte del periodo de muestreo por la avería de la estación meteorológica, se ha decidido incluir la representación gráfica de este año para poder comparar con Ronda (Figura 4.4).

El año 2017 fue similar a los años previos, con temperaturas máximas superiores y mínimas inferiores a 2018 y al periodo histórico. Es decir, durante estos años previos, se incrementó la oscilación térmica. Este contraste entre años sucesivos también se ha observado en Ronda, aunque no con una intensidad tan notable (Figura 4.2). Tal como se ha descrito previamente, la precipitación total anual ha oscilado mucho en los años recientes. 2017 fue un año caluroso, sobre todo en la primera mitad de año. Por el contrario, 2018 fue un año frío y con más precipitaciones que el año anterior.

Las precipitaciones han sido más abundantes e intensas en Sierra de las Nieves que en Ronda. Las temperaturas han sido generalmente más frías en Sierra de las Nieves por su mayor altitud. En esta localidad, las diferencias entre las temperaturas máximas y mínimas mensuales del periodo reciente y del histórico son mucho más notables que en Ronda (figuras 4.2 y 4.4).

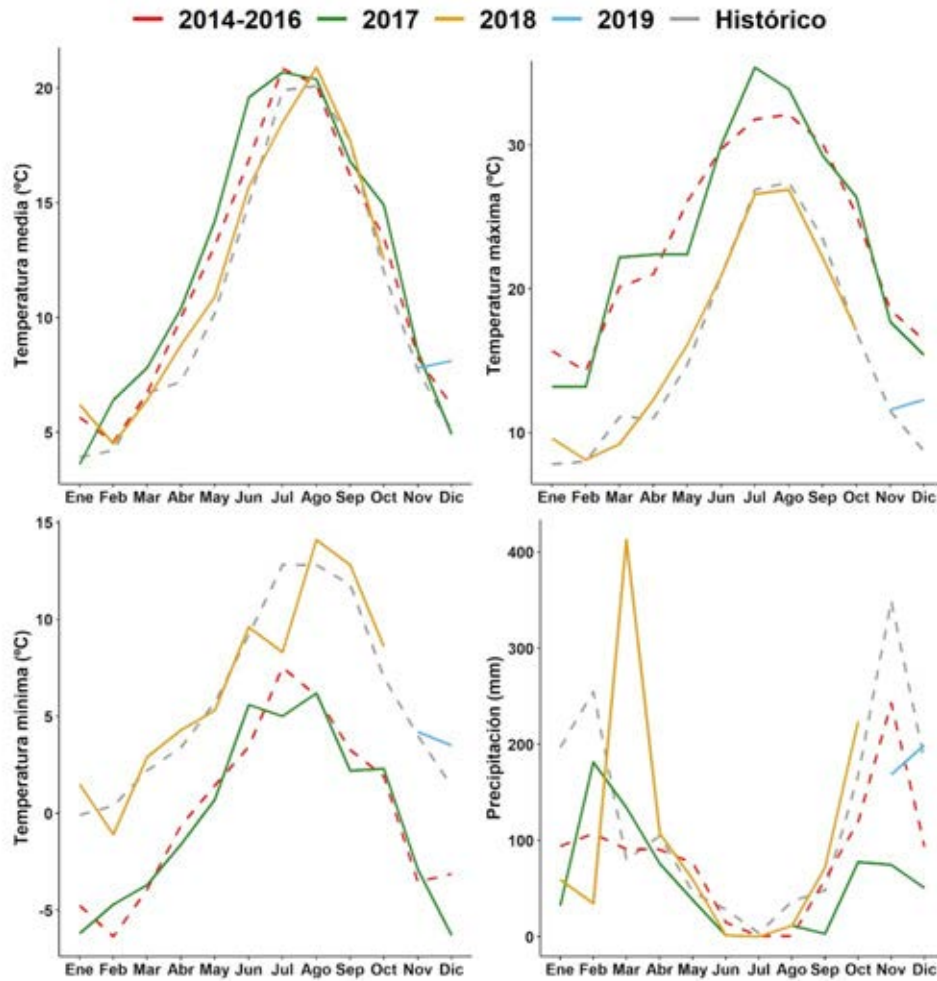


Figura 4.4. Variación mensual de las principales variables meteorológicas en Sierra de las Nieves. Cada línea continua representa datos de un mismo año. La media del periodo histórico (1982-1989 para temperaturas; 1967-1989 para precipitación) se muestra con una línea gris discontinua.

4.1.3. Dirección de los vientos predominantes

La ciudad de Ronda está situada en el centro de una meseta, por lo que no tiene formaciones orográficas cercanas que impidan la libre circulación del viento. Por el contrario, el aparato captador de polen de Sierra de las Nieves está situado en el centro de una nava, rodeada por elevados picos que influyen en la dirección de los vientos dominantes. Estas diferencias se observan en la frecuencia y dirección de sus vientos dominantes (Figura 4.5).

En Ronda dominan los vientos procedentes de los octantes 3, 4, 7 y 8, es decir, del sureste y el noroeste. La frecuencia de vientos del resto de cuadrantes es inferior al 10%, aunque mayor que en el caso de Sierra de las Nieves.

En Sierra de las Nieves dominan los vientos procedentes de los octantes 2, 3, 6 y 7, es decir, del este y del oeste. La orografía cercana, con grandes cumbres al sur y norte del punto de muestreo, favorece la canalización de las corrientes de aire en estas direcciones predominantes.

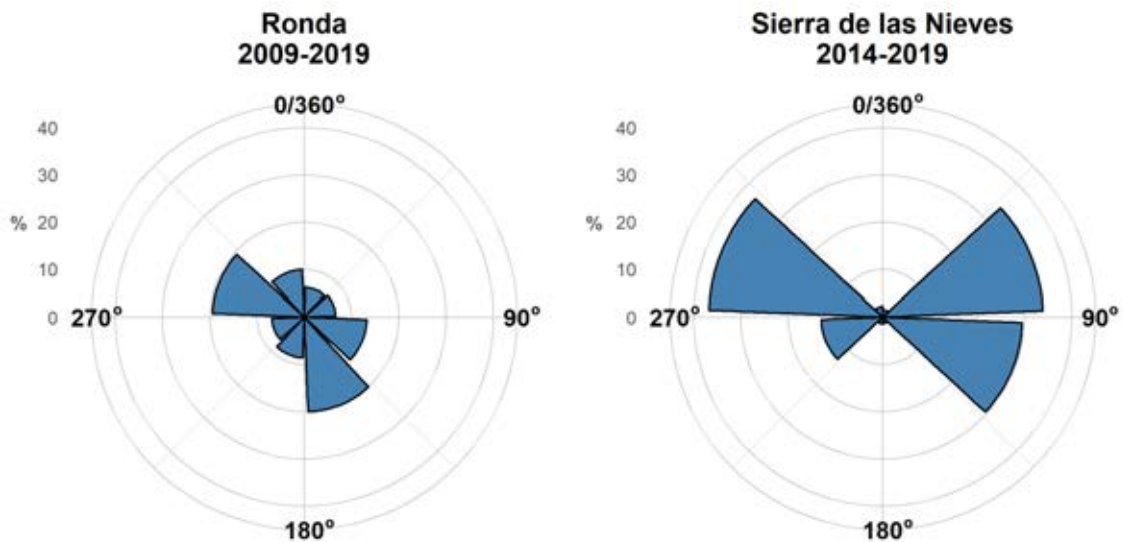


Figura 4.5. Frecuencias medias de los vientos provenientes de cada uno de los octantes.

4.1.4. Análisis de los mapas de cambio climático en España

Durante el periodo 1991-2018 se observan tendencias significativas de incremento de las temperaturas máximas durante la primavera, verano y otoño en la mayor parte de la Península Ibérica e Islas Baleares, incluyendo la totalidad de la provincia de Málaga (Figura 4.6). Al oeste de la provincia también se observan algunas tendencias significativas de incremento durante el invierno. Las tendencias son más fuertes en el sur, noreste y noroeste peninsular. A su vez, las temperaturas mínimas presentan tendencias significativas de incremento durante primavera, verano y otoño, sobre todo en el sur peninsular e Islas Baleares. En la zona del Pirineo español se detectan tendencias significativas de reducción de las temperaturas mínimas durante invierno, verano y otoño (muy pocas en primavera). Si las temperaturas máximas aumentan durante el periodo estival y las mínimas se reducen en invierno, se incrementa la oscilación térmica anual en esta zona montañosa. Lo mismo se observa, aunque en menor medida, en gran parte de la península: en invierno las temperaturas mínimas no presentan tendencias significativas en la mayor parte del territorio, mientras que en verano se produce un incremento de las máximas. El aumento de la oscilación térmica anual también se ha detectado en la comparativa de datos climáticos históricos y recientes en Ronda y Sierra de las Nieves (capítulos 4.1.1 y 4.1.2).

Durante las últimas décadas se ha detectado un incremento generalizado de las temperaturas en el resto de Europa, así como en el conjunto del hemisferio norte (Anders *et al.*, 2014; Ziska *et al.*, 2019). La temperatura media anual en la cuenca mediterránea se ha elevado 1,3°C de media desde principios del siglo XX (1,2°C en Ronda y 1,1°C en Sierra de las Nieves en la comparativa histórica y reciente, capítulos 4.1.1 y 4.1.2) y se le pronostica un incremento mayor durante los próximos años que en el resto del mundo (Guiot & Cramer, 2016).

En cuanto a precipitaciones, las tendencias significativas son de incremento en invierno en el norte y centro de la península y reducción durante el verano en el norte peninsular. Es decir, una mayor concentración temporal de las precipitaciones anuales y mayor contraste entre estaciones, lo que puede llegar

a afectar a la disponibilidad hídrica. El aumento del contraste estacional en disponibilidad hídrica también se ha observado en Ronda y Sierra de las Nieves (comparativa de datos climáticos históricos y recientes, capítulos 4.1.1 y 4.1.2). Tal como han demostrado otros autores, las precipitaciones en el sur de la Península Ibérica tienden a reducir su constancia y se favorecen fenómenos de precipitaciones torrenciales (De Luis *et al.*, 2011; Sheffield *et al.*, 2012). A pesar de esto, las tendencias en las precipitaciones debidas al cambio climático parecen tener patrones muy heterogéneos dependiendo del área geográfica (Anders *et al.*, 2014; De Luis *et al.*, 2011; Guiot & Cramer, 2016; Norrant & Douguédroit, 2006), por lo que su efecto sobre la vegetación es también difícil de prever.

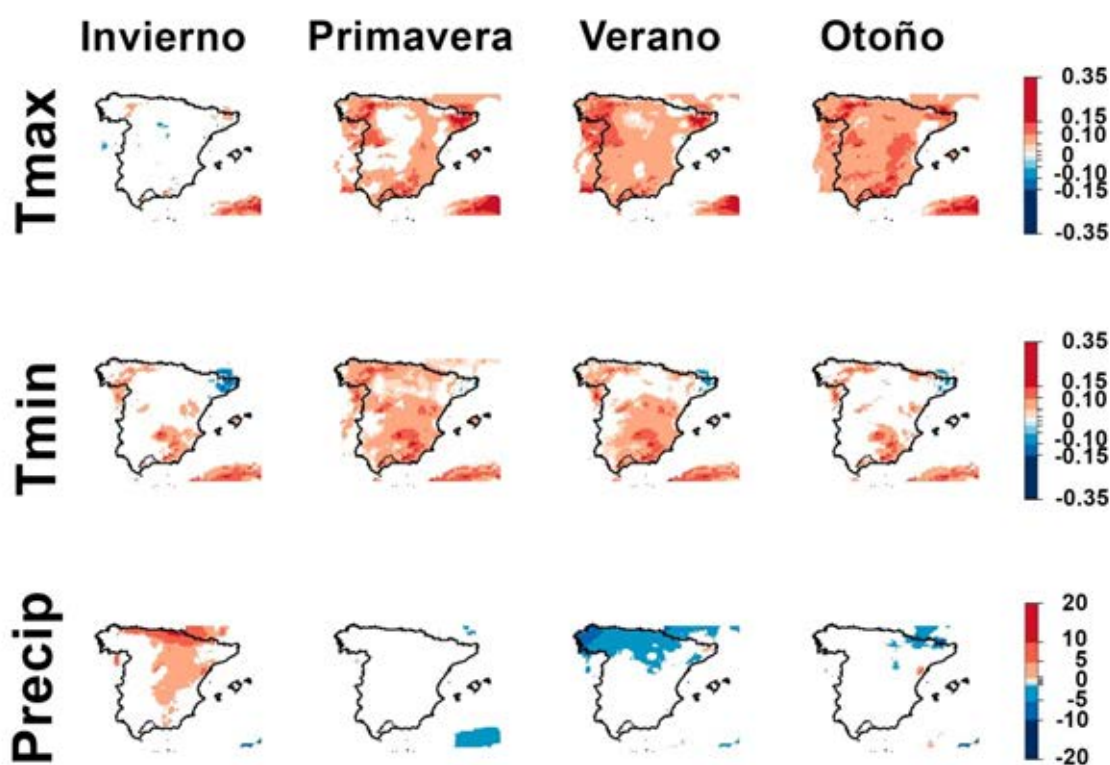


Figura 4.6. Tendencias de la temperatura máxima media trimestral (Tmax), temperatura mínima media trimestral (Tmin) y precipitación total trimestral (Precip) en el territorio español peninsular e Islas Baleares durante los años 1991-2018. Invierno: enero, febrero y marzo. Primavera: abril, mayo y junio. Verano: julio, agosto y septiembre. Otoño: octubre, noviembre y diciembre. Colores cálidos representan pendientes positivas significativas (p -valor $< 0,05$) y colores fríos pendientes negativas significativas.

La fenología de las especies vegetales se ve afectada por el cambio climático, y los cambios en temporalidad e intensidad de fenofases a lo largo de series extensas de años pueden utilizarse como indicadores de alteraciones del clima global (García *et al.*, 2014; Menzel *et al.*, 2006; Rosemartin *et al.*, 2014). La temperatura de los meses previos a la floración está estrechamente relacionada con su comienzo, lo que se manifiesta con mayor intensidad en especies que florecen a principios de primavera (Menzel *et al.*, 2006; Picornell *et al.*, 2019a). No obstante, la respuesta de cada especie a estos cambios de temperaturas y precipitaciones es muy variable (Aira *et al.*, 2016; Rosemartin *et al.*, 2014; Tormo-Molina *et al.*, 2010) y, aunque la mayoría de estudios apuntan a un adelanto del comienzo de la floración en Europa por el incremento de las temperaturas, algunas especies no obtienen tendencias significativas (Bogawski

et al., 2014; Recio *et al.*, 2018; Tormo-Molina *et al.*, 2010). En algunas especies herbáceas se ha detectado un incremento de la duración del PPP en ciudades centro-europeas por el aumento de las temperaturas estivales (Bogawski *et al.*, 2014; Huynen *et al.*, 2003). Las precipitaciones tienen menor peso sobre la floración de taxones arbóreos, aunque parecen tener una mayor relevancia en especies herbáceas o en especies de lugares áridos (Aira *et al.*, 2016; Peñuelas *et al.*, 2004).

A pesar de las tendencias detectadas en las variables meteorológicas como resultado del cambio climático, el efecto que dichos cambios tendrán sobre la vegetación y el resto de los organismos guarda cierto grado de incertidumbre. La gran cantidad de variables que inciden sobre el desarrollo y distribución de la vegetación, así como las interrelaciones entre las mismas y los cambios en el uso del suelo dificultan mucho la obtención de tendencias claras con respecto al cambio climático (García *et al.*, 2014). Además, habría que considerar la influencia de variables que no son puramente climáticas, como la propagación de especies exóticas invasoras, la creciente aparición de incendios o el incremento de las concentraciones atmosféricas de CO₂ (Aira *et al.*, 2016; Eckhardt & Ulbrich, 2003; García *et al.*, 2014). El efecto de algunas de estas variables sobre la vegetación tampoco está claro. Por ejemplo, el incremento de las concentraciones de CO₂ atmosférico produciría una gran variedad de respuestas fisiológicas en las plantas cuyo efecto sobre la fenología y la producción de polen dependería mucho de las condiciones concretas de cada especie y zona geográfica (Tubiello *et al.*, 2000).

A toda la incertidumbre sobre el efecto de las interacciones entre variables habría que sumarle que no todas las especies reaccionan igual ante estos cambios. Hay especies que no muestran tendencias en su fenología pese a la existencia de tendencias climáticas, lo que podría considerarse una adaptación al cambio climático (Aira *et al.*, 2016; Bogawski *et al.*, 2014; Recio *et al.*, 2018). Por el contrario, las especies de zonas montañosas parecen ser las más amenazadas por el aumento de las temperaturas. En muchos casos no es posible el ascenso en altitud de sus poblaciones naturales, por lo que podrían enfrentarse a la desaparición o reducción de sus hábitats y, en el peor de los casos, a la extinción de algunas de ellas (Dullinger *et al.*, 2012; Elsen & Tingley, 2015). Dado el incremento de temperatura observado en Sierra de las Nieves durante las últimas décadas (1,1°C, Capítulo 4.1.2), especies como *Abies pinsapo* o *Quercus faginea* subsp. *alpestris* podrían verse seriamente afectadas. Sería necesario estudiar la capacidad de adaptación de estas especies para poder determinar estrategias de conservación efectivas.

4.2. Análisis del inventario de parques y jardines de Ronda ciudad

Se realizó un inventario cualitativo en 13 jardines y parques distribuidos por la ciudad (Figura 4.7). Las zonas verdes más extensas son la Alameda del Tajo y el Parque de San Rafael. La Urbanización Norte tiene también una gran extensión de zonas verdes, pero está formada en su mayor parte por árboles aislados y no presenta la continuidad de los otros parques.

Los inventarios están principalmente centrados en especies arbóreas o arbustivas. Sin embargo, en prácticamente todas las zonas muestreadas aparecen estacionalmente herbáceas (generalmente nitrófilas) de polinización anemófila pertenecientes a las familias Amaranthaceae, Asteraceae,

Euphorbiaceae, Plantaginaceae, Poaceae y Urticaceae. Estas herbáceas nitrófilas suelen ser más abundantes al norte de la ciudad, en las zonas de polígonos industriales y descampados.



Figura 4.7. Distribución de los parques y jardines inventariados en la ciudad de Ronda. Ortofotografías del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, 2011). Sistema de referencia ETRS89 UTM 30N. La estrella representa la localización del captador de polen.

1. Urbanización Norte

- *Cedrus atlantica* (Endl.)
Manetti ex Carrière
- *Cupressus sempervirens* L.
- *Fraxinus angustifolia* Vahl
- *Melia azedarach* L.
- *Olea europaea* L.
- *Pinus canariensis* C.Sm.
- *Pinus pinea* L.
- *Prunus cerasifera* Ehrh.
- *Prunus dulcis* (Mill.)
D.A.Webb
- *Rosmarinus officinalis* L.
- *Teucrium fruticans* L.

Predominan las fuentes de emisión de polen de tipo Cupressaceae, *Fraxinus*, *Olea* y *Pinus*. También abundan estacionalmente fuentes de emisión de polen de tipo Amaranthaceae, Asteraceae, *Mercurialis*, Poaceae, *Plantago* y Urticaceae.

2. Polígono Oeste:

- *Acer negundo* L.
- *Ceratonia siliqua* L.
- *Cercis siliquastrum* L.
- *Citrus sinensis* (L.) Osbeck
- *Cupressus sempervirens* L.
- *Lavandula stoechas* L.
- *Ligustrum vulgare* L.
- *Melia azedarach* L.
- *Nerium oleander* L.
- *Pinus halepensis* Mill.
- *Pinus pinea* L.
- *Platanus hispanica* Münchh.

- *Platycladus orientalis* (L.) Franco
- *Populus alba* L.
- *Rosmarinus officinalis* L.
- *Viburnum tinus* L.

Predominan las fuentes de emisión de polen de tipo Cupressaceae, *Pinus*, *Platanus* y *Populus*. También abundan estacionalmente fuentes de emisión de polen de tipo Amaranthaceae, Asteraceae, *Mercurialis*, Poaceae, *Plantago* y Urticaceae.

3. Parterre Norte Instituto:

- *Cupressus sempervirens* L.
- *Olea europaea* L.
- *Pinus halepensis* Mill.
- *Prunus dulcis* (Mill.) D.A.Webb

Predominan las fuentes de emisión de polen de tipo Cupressaceae, *Olea* y *Pinus*. También abundan estacionalmente fuentes de emisión de polen de tipo Amaranthaceae, Asteraceae, *Mercurialis*, Poaceae, *Plantago* y Urticaceae.

4. IES Pérez de Guzmán:

- *Abies pinsapo* Boiss.
- *Acer negundo* L.
- *Brachychiton populneus* (Schott & Endl.) R.Br.
- *Castanea sativa* Mill.
- *Casuarina cunninghamiana* Miq.
- *Catalpa bignonioides* Walter
- *Cedrus atlantica* (Endl.) Manetti ex Carrière
- *Celtis australis* L.
- *Ceratonia siliqua* L.
- *Cercis siliquastrum* L.
- *Chamaerops humilis* L.
- *Citrus sinensis* (L.) Osbeck
- *Cupressus lusitanica* Mill.
- *Cupressus sempervirens* L.
- *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.
- *Fraxinus angustifolia* Vahl
- *Ginkgo biloba* L.
- *Hedera helix* L.
- *Koelreuteria paniculata* Laxm.
- *Laurus nobilis* L.
- *Lavandula stoechas* L.
- *Magnolia grandiflora* L.
- *Melia azedarach* L.
- *Morus alba* L.
- *Nerium oleander* L.
- *Olea europaea* var. *sylvestris* (Mill.) Lehr
- *Pinus halepensis* Mill.
- *Pinus pinaster* Aiton
- *Pinus pinea* L.
- *Platycladus orientalis* (L.) Franco
- *Populus alba* L.
- *Quercus faginea* subsp. *broteroi* (Cout.) A. Camus.
- *Quercus faginea* Lam.
- *Quercus robur* L.
- *Quercus rotundifolia* Lam.
- *Quercus x fagineomirbeckii* Villar
- *Retama monosperma* (L.) Boiss.
- *Rhamnus alaternus* L.
- *Rosa* spp. L.
- *Rosmarinus officinalis* L.
- *Tilia platyphyllos* Scop.
- *Ulmus minor* Mill.
- *Viburnum tinus* L.

Predominan las fuentes de emisión de polen de tipo *Castanea*, *Casuarina*, Cupressaceae, *Fraxinus*, Myrtaceae, *Olea*, *Pinus*, *Populus* y *Quercus*. También abundan estacionalmente fuentes de emisión de polen de tipo Amaranthaceae, Asteraceae, *Mercurialis*, Poaceae, *Plantago* y Urticaceae.

5. Escuela de Enfermería:

- *Abies pinsapo* Boiss.
- *Cercis siliquastrum* L.
- *Cupressus arizonica* Greene
- *Cupressus sempervirens* L.
- *Erica* spp. L.
- *Hedera helix* L.
- *Lavandula stoechas* L.
- *Nerium oleander* L.
- *Olea europaea* L.
- *Platycladus orientalis* (L.) Franco
- *Populus alba* L.
- *Prunus dulcis* (Mill.) D.A.Webb

Predominan las fuentes de emisión de polen de tipo Cupressaceae, *Olea*, *Pinus* y *Populus*. También abundan estacionalmente fuentes de emisión de polen de tipo Amaranthaceae, Asteraceae, *Mercurialis*, Poaceae, *Plantago* y Urticaceae.

6. Biblioteca:

- *Cedrus atlantica* (Endl.) Manetti ex Carrière
- *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.
- *Punica granatum* L.
- *Quercus suber* L.
- *Rosmarinus officinalis* L.
- *Salix* spp. L.
- *Viburnum tinus* L.
- *Yucca gigantea* Lem.

Predominan las fuentes de emisión de polen de tipo Myrtaceae, *Pinus*, *Quercus* y *Salix*. También abundan estacionalmente fuentes de emisión de polen de tipo Amaranthaceae, Asteraceae, *Mercurialis*, Poaceae, *Plantago* y Urticaceae.

7. Vivero Ronda:

- *Cupressus sempervirens* L.
- *Phoenix dactylifera* L.
- *Populus alba* L.

Predominan las fuentes de emisión de polen de tipo Arecaceae, Cupresaceae y *Populus*. También abundan estacionalmente fuentes de emisión de polen de tipo Amaranthaceae, Asteraceae, *Mercurialis*, Poaceae, *Plantago* y Urticaceae.

8. Parque Renfe:

- *Agave americana* L.
- *Cedrus atlantica* (Endl.) Manetti ex Carrière
- *Celtis australis* L.
- *Ceratonia siliqua* L.
- *Citrus sinensis* (L.) Osbeck
- *Cortaderia selloana* (Schult. & Schult.f.) Asch. & Graebn.
- *Cupressus sempervirens* L.
- *Hedera helix* L.
- *Nerium oleander* L.
- *Phoenix dactylifera* L.
- *Pinus pinaster* Aiton



- *Rosa* spp. L.
- *Viburnum tinus* L.

Predominan las fuentes de emisión de polen de tipo Arecaceae, Cupressaceae, *Pinus* y Poaceae. También abundan estacionalmente fuentes de emisión de polen de tipo Amaranthaceae, Asteraceae, *Mercurialis*, *Plantago* y Urticaceae.

9. Polígono Este

- | | |
|--|---|
| • <i>Acer negundo</i> L. | • <i>Pinus pinea</i> L. |
| • <i>Cupressus sempervirens</i> L. | • <i>Platycladus orientalis</i> (L.) Franco |
| • <i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehnh. | • <i>Populus alba</i> L. |
| • <i>Ligustrum vulgare</i> L. | • <i>Salix</i> spp. L. |
| • <i>Melia azedarach</i> L. | • <i>Viburnum tinus</i> L. |
| • <i>Nerium oleander</i> L. | |
| • <i>Pinus halepensis</i> Mill. | |

Predominan las fuentes de emisión de polen de tipo Cupressaceae, Myrtaceae, *Pinus*, *Populus* y *Salix*. También abundan estacionalmente fuentes de emisión de polen de tipo Amaranthaceae, Asteraceae, *Mercurialis*, *Plantago*, Poaceae y Urticaceae.

10. Polígono sur

- | | |
|------------------------------------|-------------------------------------|
| • <i>Cupressus sempervirens</i> L. | • <i>Platanus hispanica</i> Münchh. |
| • <i>Pinus halepensis</i> Mill. | |

Predominan las fuentes de emisión de polen de tipo Cupressaceae, *Pinus* y *Platanus*. También abundan estacionalmente fuentes de emisión de polen de tipo Amaranthaceae, Asteraceae, *Mercurialis*, *Plantago*, Poaceae y Urticaceae.

11. Parque San Rafael

- | | |
|---|--|
| • <i>Acanthus spinosus</i> L. | • <i>Corylus avellana</i> L. |
| • <i>Acer granatense</i> Boiss. | • <i>Cupressus sempervirens</i> L. |
| • <i>Acer negundo</i> L. | • <i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehnh. |
| • <i>Agave americana</i> L. | • <i>Gaura lindheimeri</i> Engelm. & A.Gray |
| • Bambusoideae | • <i>Hedera helix</i> L. |
| • <i>Callistemon citrinus</i> (Curtis) Skeels | • <i>Koelreuteria paniculata</i> Laxm. |
| • <i>Castanea sativa</i> Mill. | • <i>Lantana montevidensis</i> (Spreng.) Briq. |
| • <i>Catalpa bignonioides</i> Walter | • <i>Laurus nobilis</i> L. |
| • <i>Cedrus atlantica</i> (Endl.) Manetti ex Carrière | • <i>Lavandula stoechas</i> L. |
| • <i>Celtis australis</i> L. | • <i>Nerium oleander</i> L. |
| • <i>Ceratonia siliqua</i> L. | • <i>Phoenix dactylifera</i> L. |
| • <i>Cercis siliquastrum</i> L. | • <i>Pinus halepensis</i> Mill. |
| • <i>Citrus sinensis</i> (L.) Osbeck | |

- *Pinus pinaster* Aiton
- *Platanus hispanica* Münchh.
- *Platyclusus orientalis* (L.) Franco
- *Populus alba* L.
- *Prunus cerasifera* Ehrh.
- *Prunus dulcis* (Mill.) D.A.Webb
- *Rosa* spp. L.
- *Rosmarinus officinalis* L.
- *Russelia equisetiformis* Schltld. & Cham.
- *Salix babylonica* L.
- *Santolina chamaecyparissus* L.
- *Schinus molle* L.
- *Teucrium fruticans* L.
- *Thymus* sp. L.
- *Vesalea floribunda* M.Martens & Galeotti
- *Viburnum tinus* L.
- *Yucca gigantea* Lem.

Predominan las fuentes de emisión de polen de tipo *Arecaceae*, *Castanea*, *Cupressaceae*, *Myrtaceae*, *Pinus*, *Platanus*, *Populus* y *Salix*. También abundan estacionalmente fuentes de emisión de polen de tipo *Amaranthaceae*, *Asteraceae*, *Mercurialis*, *Plantago*, *Poaceae* y *Urticaceae*.

12. Parque Hotel Reina Victoria

- *Abies pinsapo* Boiss.
- *Agave americana* L.
- *Antirrhinum majus* L.
- *Asteraceae*
- *Celtis australis* L.
- *Citrus sinensis* (L.) Osbeck
- *Clivia* sp. Lindl.
- *Cupressus sempervirens* L.
- *Euryops pectinatus* (L.) Cass.
- *Gaura lindheimeri* Engelm. & A.Gray
- *Hedera helix* L.
- *Koelreuteria paniculata* Laxm.
- *Lantana montevidensis* (Spreng.) Briq.
- *Lavandula stoechas* L.
- *Nerium oleander* L.
- *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.
- *Pelargonium peltatum* (L.) L'Hér.
- *Petunia hybrida* Vilm.
- *Phoenix dactylifera* L.
- *Pinus pinaster* Aiton
- *Platanus hispanica* Münchh.
- *Platyclusus orientalis* (L.) Franco
- *Rosa* sp. L.
- *Rosmarinus officinalis* L.
- *Santolina chamaecyparissus* L.
- *Tagetes* spp. L.
- *Vesalea floribunda* M.Martens & Galeotti

Predominan las fuentes de emisión de polen de tipo *Arecaceae*, *Cupressaceae*, *Pinus* y *Platanus*. También abundan estacionalmente fuentes de emisión de polen de tipo *Amaranthaceae*, *Asteraceae*, *Mercurialis*, *Plantago*, *Poaceae* y *Urticaceae*.

13. Alameda del Tajo

- *Acanthus spinosus* L.
- *Bambusoideae*
- *Callistemon citrinus* (Curtis) Skeels
- *Casuarina cunninghamiana* Miq.
- *Cedrus atlantica* (Endl.) Manetti ex Carrière
- *Celtis australis* L.

- *Cercis siliquastrum* L.
- *Citrus sinensis* (L.) Osbeck
- *Cupressus sempervirens* L.
- *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.
- *Ginkgo biloba* L.
- *Nerium oleander* L.
- *Olea europea* L.
- *Phoenix dactylifera* L.
- *Pinus pinaster* Aiton
- *Platanus hispanica* Münchh.
- *Platyclusus orientalis* (L.) Franco
- *Populus alba* L.
- *Prunus cerasifera* Ehrh.
- *Punica granatum* L.
- *Quercus rotundifolia* Lam.
- *Schinus molle* L.
- *Tipuana tipu* (Benth.) Kuntze
- *Yucca gigantea* Lem.

Predominan las fuentes de emisión de polen de tipo Arecaceae, *Casuarina*, Cupressaceae, Myrtaceae, *Olea*, *Pinus*, *Platanus*, Poaceae. También abundan estacionalmente fuentes de emisión de polen de tipo Amaranthaceae, Asteraceae, *Mercurialis*, *Plantago*, Poaceae, *Populus*, *Quercus* y Urticaceae.

El jardín del IES Pérez de Guzmán es el que presenta mayor diversidad de taxones arbóreos y arbustivos. Por su finalidad docente, en él se encuentran representadas las principales especies arbóreas de la zona, así como otras especies mediterráneas y algunas ornamentales. Muchas de estas especies son de polinización anemófila.

Fuera de las zonas inventariadas también son frecuentes las cupresáceas ornamentales (principalmente *Cupressus sempervirens* L.), los pinsapos y los cedros. En Ronda ciudad son muy abundantes los árboles ornamentales de polinización anemófila: pinos, cipreses, tuyas, encinas, palmeras, fresnos, olivos, chopos, cedros y pinsapos. En sus zonas verdes hay una mezcla heterogénea de especies autóctonas y alóctonas que, en su conjunto, influyen notablemente en las concentraciones de polen detectado. Al ser una ciudad situada en un entorno rural, las concentraciones de polen también pueden verse afectadas por los abundantes cultivos cercanos de olivos y gramíneas.

4.3. Análisis del muestreo fenológico *in situ*

En general se observa un retraso en el comienzo de la fenofase de floración en poblaciones naturales y cultivos de especies autóctonas (*Castanea sativa*, *Olea europaea*, *Populus alba*, *Quercus faginea* subsp. *faginea*, *Quercus rotundifolia*, *Quercus suber*) conforme se asciende en piso bioclimático (Tabla 4.1). Los pisos bioclimáticos están definidos por sus rangos de valores del Itc, que está determinado por las temperaturas registradas a lo largo del año (Rivas-Martínez *et al.*, 1997). Por lo tanto, un piso bioclimático más elevado implica una mayor intensidad de frío y una menor temperatura media anual, que son determinantes a la hora de detonar la floración (Chuine, 2000; Chuine & Cour, 1999; Linkosalo *et al.*, 2010; Picornell *et al.*, 2019a; Wang *et al.*, 2014). Normalmente esta disminución de la temperatura se asocia con un retraso en la fenofase de floración (Rojo & Pérez-Badía, 2014; Wang *et al.*, 2014; Wielgolaski, 1999), tal como se observa con los taxones mencionados. En otros casos, como en *Abies pinsapo* o *Populus nigra*, no se observa un retraso apreciable. Esto puede deberse a que haya otros factores como la genética, la disponibilidad de agua, el fotoperiodo o la exposición solar de los individuos muestreados que determinen en mayor medida

el comienzo de la fenofase de floración (Picornell *et al.*, 2019a; Rojo & Pérez-Badia, 2014; Wang *et al.*, 2014). También otros autores han sugerido una posible adaptación de los requerimientos térmicos de la floración en poblaciones situadas a diferentes altitudes. De este modo, las poblaciones a mayor altitud, necesitarían menores temperaturas para detonar su floración, lo que permitiría que no se produjese un retraso notable en el comienzo de esta fenofase con respecto a poblaciones de lugares más cálidos (Chuine & Cour, 1999; Wang *et al.*, 2014).

En especies ornamentales alóctonas como *Casuarina cunninghamiana*, *Cupressus arizonica* y *Cupressus sempervirens* se observa un comportamiento completamente inverso al descrito anteriormente: la floración es más temprana en pisos bioclimáticos más fríos. Estas especies tienen una floración otoñal o invernal. Podría deberse a que el factor detonante de su floración sea la disponibilidad hídrica, que es mayor y más temprana en estos pisos bioclimáticos (Wang *et al.*, 2014).

La duración de la fenofase de floración está estrechamente relacionada con la temperatura acumulada desde su inicio (Linkosalo & Lechowicz, 2006; Picornell *et al.*, 2019a; Sarvas, 1972), que sería la responsable del secado y dehiscencia de la flor. Mayores temperaturas reducen la duración del periodo de floración (Sherry *et al.*, 2011), lo que se observa en *Pinus halepensis* y *Pinus pinea* en pisos bioclimáticos más cálidos. No obstante, también pueden intervenir factores genéticos de la propia especie (Wilczek *et al.*, 2010). En el caso de otros taxones como *Olea europaea*, *Quercus rotundifolia* y *Quercus suber*, se observa un efecto aparentemente contrario al mencionado anteriormente: la floración en pisos bioclimáticos más cálidos es más duradera. Sin embargo, en estos casos la floración también muestra un notable retraso en comparación con pisos bioclimáticos más cálidos. Floraciones más tardías y cercanas al periodo estival implican temperaturas más elevadas, que serían las responsables del secado y dehiscencia temprano de las flores, lo que podría explicar la menor duración de la floración en estos pisos bioclimáticos más fríos.

En el caso de *Pinus pinea*, entre el termomediterráneo y mesomediterráneo inferior no se observan diferencias en el inicio de la floración, lo que podría explicarse como esta compensación adaptativa de los requerimientos térmicos a la altitud que se ha mencionado anteriormente. En cambio, sí que se observan grandes diferencias entre estos pisos bioclimáticos y el mesomediterráneo superior/supramediterráneo inferior, llegando en este último piso a exceder los límites temporales de la floración de la bibliografía (Blanca *et al.*, 2011; Recio, 2012; Valdivieso *et al.*, 2017). *P. pinea* no se distribuye de forma natural por el piso supramediterráneo (Blanca *et al.*, 2011), y los ejemplares a los que se les ha realizado el seguimiento fenológico en el mesomediterráneo superior/supramediterráneo inferior son ornamentales. Estos individuos, por lo tanto, no proceden de poblaciones que estén adaptadas a dicha altitud y no tendrían compensados sus requerimientos térmicos a ella. La temperatura acumulada necesaria para detonar su fenofase de floración se alcanza mucho más tarde que en los otros pisos bioclimáticos, lo que resulta en una fenofase bastante tardía. El acúmulo de calor en esta época más cálida sería mucho mayor que en una época del año más fría, lo que podría explicar la menor duración de esta fenofase tal como se ha explicado anteriormente. En este caso, si el factor determinante para detonar la floración fuese el fotoperiodo, la genética de la especie o la disponibilidad hídrica en lugar de la temperatura, se esperaría un

inicio del periodo de floración similar al de los pisos bioclimáticos más cálidos. No obstante, el escaso número de individuos a los que se les realizó seguimiento no permite la obtención de conclusiones determinantes en este aspecto.

Los registros fenológicos semanales son escasos en Andalucía, son más frecuentes los mensuales. Dado que la fenología generalmente varía con la localización geográfica (Roetzer *et al.*, 2000), es mejor recurrir a registros fenológicos del ámbito geográfico más reducido posible, como la *Flora Vascular de Andalucía Oriental* (Blanca *et al.*, 2011) para comparar los resultados obtenidos. También se debe recalcar que el criterio seguido para la determinación de la fenofase de floración en las floras suele ser la aparición de flores tanto masculinas como femeninas, y no el criterio de dispersión de polen (flores masculinas) seguido en este estudio (Capítulo 3.3). Por otro lado, la *Flora Vascular de Andalucía Oriental* integra datos de más años de muestreo y de todos los pisos bioclimáticos en los que se distribuye la especie, con la variabilidad en la temporalidad de floración que esto puede conllevar. Por todos estos motivos, es de esperar periodos de floración más reducidos que los consultados en esta flora.

Los periodos de floración de *Abies pinsapo* están ligeramente retrasados con respecto a la *Flora Vascular de Andalucía Oriental* (Blanca *et al.*, 2011) y a estudios fenológicos previos (Pérez-Latorre *et al.*, 1996; Pérez-Latorre & Cabezudo, 2012), y abarcan también la primera semana del mes de junio, lo que puede explicarse por los motivos anteriormente descritos junto a la resolución mensual de los datos bibliográficos.

El periodo de floración de *Castanea sativa* obtenido es coincidente con la *Flora Vascular de Andalucía Oriental* (Blanca *et al.*, 2011) y con la *Flora Vascular de Andalucía Occidental* (Valdés *et al.*, 1987b), al igual que ocurre con *Olea europaea*, *Pinus halepensis*, *Populus alba*, *Pinus pinaster*, *Populus nigra*, *Quercus faginea* subsp. *faginea* y *Quercus rotundifolia*. Sus periodos de floración también coinciden con estudios fenológicos previos (Navarro & Cabezudo, 1998; Pérez-Latorre & Cabezudo, 2002b; Recio & Silva, 2018). En ocasiones otros autores han detectado segundas floraciones otoñales en *Q. rotundifolia*, *Q. suber* y *Q. faginea* subsp. *faginea* (Pérez-Latorre *et al.*, 1996; Recio & Silva, 2018), aunque en los individuos estudiados no se ha detectado.

En *Fraxinus angustifolia*, el periodo de floración en el mesomediterráneo inferior coincide con la flora consultada, aunque el del mesomediterráneo superior/supramediterráneo inferior se prolonga más en el año. La falta de datos impide determinar si tiene una duración mayor o menor, pero los datos presentes sí permiten determinar que, en cualquier caso, abarca un periodo más tardío. Los ejemplares seguidos en este piso bioclimático son ornamentales, lo que no descarta su procedencia de poblaciones de pisos bioclimáticos más cálidos en los que se observe un efecto similar al descrito previamente en *Pinus pinea*. Lo mismo ocurre con *Quercus suber* en el mesomediterráneo superior/supramediterráneo inferior.

Los taxones ornamentales como *Casuarina cunninghamiana*, *Cupressus sempervirens*, *Cupressus arizonica* y *Cupressus lusitanica* no tienen un registro fenológico en las floras locales. Otros autores han detectado una floración masculina de *C. sempervirens* y *C. arizonica* similar en Córdoba (enero-marzo en *C. arizonica* y febrero-abril en *C. sempervirens*) (Hidalgo *et al.*, 2003), aunque

menos extensa en el tiempo y más similar a la observada en el termomediterráneo. *Flora Ibérica* indica un periodo de floración de *C. cunninghamiana* que abarca noviembre y diciembre; ligeramente menos extenso y más tardío que el observado (octubre-diciembre) (Castroviejo *et al.*, 1990). Tal como se ha comentado anteriormente en este mismo capítulo, factores como la disponibilidad hídrica también influyen en la fenología, y es muy variable en el caso de individuos ornamentales.

4.4. Análisis del polen atmosférico

4.4.1. Diversidad, abundancia y calendarios polínicos

En Ronda, la mayor parte de la integral polínica anual de polen total se concentra generalmente en los meses de febrero a junio (92,42% en 2017, 86,10% en 2018 y 90,83% en 2019), y mayo es el mes mayoritario (tablas 4.2-4.4). El tipo polínico Cupressaceae fue el responsable de que en 2019 febrero superase a mayo en cuanto a concentración total de polen. Se identificaron 40, 39 y 36 tipos polínicos en 2017, 2018 y 2019 respectivamente. Los tipos polínicos Cupressaceae, *Olea* y *Quercus* acumularon el 77,81% de la integral polínica anual en 2017, el 78,41% en 2018 y el 82,55% en 2019, y solo 7 tipos polínicos más superaron el 1% en alguno de los años de muestreo (*Castanea*, Myrtaceae, *Pinus*, Poaceae, *Plantago*, *Urtica membranacea* y Urticaceae). Se detectó un gran contraste en las integrales polínicas anuales de los dos primeros años de muestreo (47 709 polen*día/m³ en 2017 y 55 414 polen*día/m³ en 2018) y 2019 (98 428 polen*día/m³). El incremento se debió, principalmente, al polen de Cupressaceae, que aumentó más del doble con respecto a años previos. La media fue de 67 184±27 331 polen*día/m³.

En Sierra de las Nieves la mayor parte de la integral polínica anual de polen total se detecta durante solo dos meses: mayo y junio, que sumaron el 79,79% anual en 2018 y 77,38% anual en 2019 (tablas 4.5-4.6). Se identificaron 37 tipos polínicos distintos en 2018 y 35 en 2019. En esta localidad, el polen de *Quercus* es claramente el mayoritario, con un 70,40% de la integral polínica anual en 2018 y un 60,27% en 2019, lo que puede explicarse por la localización del captador en un encinar. Entre los tipos polínicos *Castanea*, Cupressaceae, *Quercus* y *Olea* se acumuló el 90,43% de la integral polínica anual en 2018, y el 87,35% en 2019. Solo 3 tipos polínicos más (*Pinus*, Poaceae y Urticaceae) superaron el 1%. En esta localidad no se detectó un contraste tan marcado en la integral polínica anual entre los distintos años de muestreo (69 350 polen*día/m³ en 2018 y 56 867 polen*día/m³ en 2019), y sus valores fueron superiores a los obtenidos en Ronda en 2018, pero inferiores a los de 2019. La media de la integral polínica anual de polen total en Sierra de las Nieves fue de 63 109±8827 polen*día/m³, ligeramente inferior a Ronda.

Las diferencias observadas entre Ronda y Sierra de las Nieves en el periodo del año en el que se registra la mayor parte de la integral polínica anual se deben a los tipos polínicos mayoritarios de cada localidad. En Ronda los tipos polínicos mayoritarios tienen menores diferencias en abundancia entre ellos que en Sierra de las Nieves, localidad en la que domina notablemente el tipo polínico *Quercus* sobre el resto. La mayor heterogeneidad de tipos polínicos en Ronda hace que el periodo de mayor abundancia de polen se ajuste a los meses en los que se solapan la mayoría de estos tipos polínicos dominantes, mientras que, en Sierra

de las Nieves, este periodo se correspondería principalmente con los meses de mayor abundancia de *Quercus*.

Tabla 4.2. Suma de las concentraciones polínicas detectadas en Ronda durante cada uno de los meses de 2017 y durante todo el año. También se muestra la abundancia relativa de cada tipo polínico y de cada mes durante ese año.

Tipo polínico	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total	%
<i>Acacia</i>	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	3	0,01
<i>Alnus</i>	22	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	38	0,08
Amaranthaceae	1	3	10	39	59	59	44	42	89	9	9	0	364	0,76
Apiaceae	0	0	0	6	24	64	21	21	11	3	6	1	157	0,33
Arecaceae	0	0	8	4	1	0	5	14	3	5	5	2	47	0,10
<i>Artemisia</i>	6	0	0	0	0	0	1	1	59	6	13	34	120	0,25
Asteraceae	0	0	1	9	14	24	13	7	7	1	3	0	79	0,17
<i>Betula</i>	0	5	9	17	15	1	0	0	0	0	0	0	47	0,10
Brassicaceae	0	8	12	18	2	6	5	1	0	0	0	0	52	0,11
<i>Cannabis</i>	0	0	0	0	0	35	19	54	4	0	0	0	112	0,23
<i>Castanea</i>	0	0	1	1	10	2600	70	21	9	6	3	0	2721	5,70
<i>Casuarina</i>	1	1	1	0	0	0	0	0	15	40	27	4	89	0,19
<i>Corylus</i>	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0,00
Cupressaceae	609	9381	6434	320	20	22	8	14	17	114	154	217	17 310	36,28
Cyperaceae	0	0	0	3	10	17	1	0	1	0	0	0	32	0,07
<i>Echium</i>	0	0	1	9	15	8	0	0	0	0	0	0	33	0,07
Ericaceae	0	1	27	15	26	9	1	0	0	0	0	0	79	0,17
<i>Fraxinus</i>	61	62	49	1	0	0	1	0	0	0	0	21	195	0,41
<i>Juglans</i>	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0,00
<i>Juncus</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,00
Lamiaceae	0	2	2	1	0	1	2	0	0	1	1	0	10	0,02
<i>Mercurialis</i>	6	15	20	9	0	10	5	0	0	2	1	0	68	0,14
<i>Morus</i>	0	0	17	85	2	0	0	0	0	0	0	0	104	0,22
Myrtaceae	0	0	5	2	19	163	372	8	6	1	1	3	580	1,22
<i>Olea</i>	4	11	41	791	7091	586	94	46	54	21	149	28	8916	18,69
<i>Pinus</i>	4	6	185	191	81	14	4	2	8	6	1	1	503	1,05
<i>Pistacia</i>	0	3	24	150	3	0	0	0	0	0	0	0	180	0,38
<i>Plantago</i>	3	1	43	293	273	191	31	26	8	2	3	2	876	1,84
<i>Platanus</i>	0	4	87	314	4	3	0	0	0	0	0	0	412	0,86
Poaceae	10	8	13	56	512	275	31	14	15	6	1	1	942	1,97
<i>Populus</i>	0	3	216	38	1	0	0	1	0	0	0	0	259	0,54
<i>Quercus</i>	6	14	122	5908	3990	608	104	37	48	32	9	17	10 895	22,84
<i>Rhamnus</i>	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0,00
<i>Ricinus</i>	3	9	32	6	0	14	8	2	4	2	1	2	83	0,17
Rosaceae	3	2	23	1	2	6	1	0	0	0	0	3	41	0,09
<i>Rumex</i>	1	7	33	43	62	28	7	2	0	0	0	0	183	0,38
<i>Salix</i>	0	0	6	9	0	0	8	2	0	0	0	0	25	0,05
<i>Ulmus</i>	0	33	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41	0,09
<i>Urtica membranacea</i>	22	69	372	359	85	23	0	0	3	1	0	1	935	1,96
Urticaceae	103	130	497	625	199	108	21	10	14	13	22	32	1774	3,72
Otros	9	34	45	49	11	44	36	33	25	17	12	18	333	0,70
Suma	852	9759	7974	9015	12 447	4897	913	358	397	287	421	389	47 709	
%	1,79	20,46	16,71	18,90	26,09	10,26	1,91	0,75	0,83	0,60	0,88	0,82		

El polen de *Urtica membranacea* se encuentra integrado dentro del tipo polínico Urticaceae, por lo que no ha sido tenido en cuenta para calcular la integral polínica total anual y mensual.

Tabla 4.3. Suma de las concentraciones polínicas detectadas en Ronda durante cada uno de los meses de 2018 y durante todo el año. También se muestra la abundancia relativa de cada tipo polínico y de cada mes durante ese año.

Tipo polínico	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total	%
<i>Acacia</i>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0,00
<i>Alnus</i>	20	44	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	66	0,12
Amaranthaceae	3	2	2	39	102	98	83	78	23	14	5	1	450	0,81
Apiaceae	1	0	0	6	12	116	83	24	5	21	3	3	274	0,49
Arecaceae	0	0	0	2	6	1	4	10	1	8	6	6	44	0,08
<i>Artemisia</i>	9	11	2	0	0	0	0	3	11	18	26	28	108	0,19
Asteraceae	1	0	0	2	15	37	28	8	5	6	1	0	103	0,19
<i>Betula</i>	0	0	1	6	10	0	0	0	0	0	0	0	17	0,03
Brassicaceae	2	7	15	33	10	1	0	0	0	6	5	3	82	0,15
<i>Cannabis</i>	0	0	0	0	4	30	31	67	15	0	0	0	147	0,27
<i>Castanea</i>	0	0	0	2	8	345	535	47	3	0	1	0	941	1,70
<i>Casuarina</i>	5	3	0	0	0	0	0	0	147	25	16	3	199	0,36
<i>Corylus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0,00
Cupressaceae	774	5533	7611	580	35	25	5	12	57	606	643	943	16 824	30,36
Cyperaceae	0	1	0	2	3	48	9	4	54	0	0	0	121	0,22
<i>Echium</i>	0	0	2	9	52	37	1	1	0	0	0	0	102	0,18
Ericaceae	1	1	3	7	21	8	1	0	1	2	1	0	46	0,08
<i>Fraxinus</i>	67	64	5	1	0	0	0	0	0	3	382	386	908	1,64
<i>Juncus</i>	0	0	0	0	4	6	1	0	0	0	0	0	11	0,02
Lamiaceae	1	2	1	5	1	1	0	0	0	0	2	2	15	0,03
<i>Ligustrum</i>	0	0	0	0	0	0	26	7	0	0	1	0	34	0,06
<i>Mercurialis</i>	11	15	14	45	25	23	13	3	2	13	1	8	173	0,31
<i>Morus</i>	0	0	2	55	8	1	0	0	0	0	0	0	66	0,12
Myrtaceae	1	2	2	2	3	20	46	22	2	1	2	4	107	0,19
<i>Olea</i>	32	6	8	62	3420	7663	323	140	19	16	5	12	11 706	21,12
<i>Pinus</i>	2	6	15	408	325	196	16	15	5	5	4	1	998	1,80
<i>Pistacia</i>	0	0	0	83	39	7	4	5	6	0	0	0	144	0,26
<i>Plantago</i>	1	0	9	136	520	290	37	7	1	0	0	0	1001	1,81
<i>Platanus</i>	0	1	10	288	31	2	0	0	0	0	0	0	332	0,60
Poaceae	2	6	8	22	875	1044	110	17	2	26	3	0	2115	3,82
<i>Populus</i>	2	23	115	212	1	0	0	0	0	0	0	0	353	0,64
<i>Quercus</i>	28	4	7	908	10 366	3139	293	129	23	10	10	7	14 924	26,93
<i>Ricinus</i>	5	0	0	9	32	21	6	1	0	3	1	0	78	0,14
Rosaceae	5	1	19	14	1	0	0	0	0	0	0	0	40	0,07
<i>Rumex</i>	2	4	16	49	146	76	16	3	0	1	2	5	320	0,58
<i>Salix</i>	0	0	9	20	5	10	11	0	1	0	1	0	57	0,10
<i>Ulmus</i>	0	16	6	3	0	0	0	0	0	1	0	0	26	0,05
<i>Urtica membranacea</i>	4	38	137	303	175	22	3	1	1	2	0	3	689	1,24
Urticaceae	55	192	228	476	356	176	62	31	11	27	46	106	1766	3,19
Otros	29	24	38	92	86	74	86	90	22	102	29	42	714	1,29
Suma	1059	5968	8149	3578	16 522	13 495	1830	725	416	915	1196	1561	55 414	
%	1,91	10,77	14,71	6,46	29,82	24,35	3,30	1,31	0,75	1,65	2,16	2,82		

El polen de *Urtica membranacea* se encuentra integrado dentro del tipo polínico Urticaceae, por lo que no ha sido tenido en cuenta para calcular la integral polínica total anual y mensual.

Tabla 4.4. Suma de las concentraciones polínicas detectadas en Ronda durante cada uno de los meses de 2019 y durante todo el año. También se muestra la abundancia relativa de cada tipo polínico y de cada mes durante ese año.

Tipo polínico	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total	%
<i>Alnus</i>	73	50	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	128	0,13
Amaranthaceae	1	4	19	60	166	55	52	80	58	25	2	1	523	0,53
Apiaceae	2	1	3	14	54	48	34	19	17	14	2	0	208	0,21
Arecaceae	4	0	4	2	0	2	24	20	10	11	10	3	90	0,09
<i>Artemisia</i>	6	1	9	0	0	0	3	12	32	1	0	4	68	0,07
Asteraceae	1	2	4	5	64	26	18	10	5	4	2	1	142	0,14
<i>Betula</i>	0	4	30	12	23	2	0	0	0	0	0	0	71	0,07
Brassicaceae	0	6	22	13	15	0	0	0	0	0	0	0	56	0,06
<i>Cannabis</i>	0	0	0	0	0	54	37	59	8	0	0	0	158	0,16
<i>Castanea</i>	0	0	0	0	8	2610	437	69	15	4	1	0	3144	3,19
<i>Casuarina</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	87	91	16	4	198	0,20
Cupressaceae	3402	29 682	11 408	115	134	20	18	11	30	225	21	142	45 208	45,93
Cyperaceae	0	0	2	2	13	19	5	0	0	0	0	0	41	0,04
<i>Echium</i>	0	0	3	13	28	4	0	0	0	0	0	0	48	0,05
Ericaceae	0	7	75	12	36	4	0	0	1	0	0	0	135	0,14
<i>Fraxinus</i>	167	83	60	1	0	0	0	0	1	0	50	283	645	0,66
<i>Juncus</i>	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0,00
Lamiaceae	0	1	3	2	3	1	0	0	0	1	2	0	13	0,01
<i>Mercurialis</i>	8	21	29	22	12	9	7	0	0	7	0	2	117	0,12
<i>Morus</i>	0	1	115	57	15	0	0	0	0	0	0	0	188	0,19
Myrtaceae	2	3	10	15	17	64	965	37	8	2	4	0	1127	1,14
<i>Olea</i>	15	12	164	886	10 694	818	172	60	67	41	25	8	12 962	13,17
<i>Pinus</i>	8	208	650	272	324	30	9	4	5	5	2	2	1519	1,54
<i>Pistacia</i>	0	0	103	99	65	0	1	0	0	0	0	0	268	0,27
<i>Plantago</i>	0	5	45	266	528	55	22	16	6	4	2	0	949	0,96
<i>Platanus</i>	0	1	338	151	3	0	0	1	0	0	0	0	494	0,50
Poaceae	8	11	38	85	2040	180	45	14	7	15	1	0	2444	2,48
<i>Populus</i>	0	102	392	80	5	0	0	0	0	0	0	0	579	0,59
<i>Quercus</i>	6	18	299	8860	11 960	976	317	159	117	325	28	14	23 079	23,45
<i>Ricinus</i>	1	0	1	13	45	16	0	0	0	0	0	0	76	0,08
Rosaceae	0	0	21	24	1	9	0	0	0	1	0	0	56	0,06
<i>Rumex</i>	1	5	26	52	126	16	2	1	1	0	0	0	230	0,23
<i>Salix</i>	0	0	0	8	13	2	3	0	0	0	0	0	26	0,03
<i>Ulmus</i>	0	23	21	5	0	0	0	0	0	0	0	0	49	0,05
<i>Urtica membranacea</i>	35	124	296	337	299	23	4	0	0	1	0	3	1122	1,14
Urticaceae	184	297	454	557	574	117	51	21	12	23	7	46	2343	2,38
Otros	36	44	168	136	231	115	146	47	36	47	24	14	1044	1,06
Suma	3925	30 592	14 521	11 840	27 198	5252	2368	640	523	846	199	524	98 428	
%	3,99	31,08	14,75	12,03	27,63	5,34	2,41	0,65	0,53	0,86	0,20	0,53		

El polen de *Urtica membranacea* se encuentra integrado dentro del tipo polínico Urticaceae, por lo que no ha sido tenido en cuenta para calcular la integral polínica total anual y mensual.

Tabla 4.5. Suma de las concentraciones polínicas detectadas en Sierra de las Nieves durante cada uno de los meses de 2018 y durante todo el año. También se muestra la abundancia relativa de cada tipo polínico y de cada mes durante ese año.

Tipo polínico	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total	%
<i>Alnus</i>	10	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41	0,06
Amaranthaceae	0	2	0	28	55	62	40	52	26	11	2	1	279	0,40
Apiaceae	0	1	0	2	7	50	73	14	4	3	0	1	155	0,22
Arecaceae	0	0	0	8	0	1	2	0	0	0	0	0	11	0,02
<i>Artemisia</i>	3	9	1	0	0	0	0	7	10	6	9	15	60	0,09
Asteraceae	2	0	2	1	12	14	24	10	3	2	0	0	70	0,10
<i>Betula</i>	0	0	0	7	2	0	0	0	0	0	0	0	9	0,01
Brassicaceae	0	5	17	14	2	0	1	0	0	0	0	1	40	0,06
<i>Cannabis</i>	0	0	0	0	4	6	20	86	14	0	0	0	130	0,19
<i>Castanea</i>	0	0	0	1	11	1896	1543	45	7	0	0	0	3503	5,05
<i>Casuarina</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	3	7	5	1	16	0,02
Cupressaceae	13	209	269	105	6	24	7	9	38	656	2450	647	4433	6,39
Cyperaceae	0	0	0	20	8	31	20	6	0	0	0	0	85	0,12
<i>Echium</i>	0	0	1	5	41	21	3	0	0	0	0	0	71	0,10
Ericaceae	0	2	4	13	15	14	0	0	0	0	0	0	48	0,07
<i>Fraxinus</i>	10	38	7	1	0	0	0	0	0	0	10	38	104	0,15
<i>Juncus</i>	0	0	0	0	5	2	1	0	0	0	0	0	8	0,01
Lamiaceae	0	0	0	1	0	6	1	0	0	0	0	0	8	0,01
<i>Ligustrum</i>	0	0	0	0	0	0	6	5	0	0	0	0	11	0,02
<i>Mercurialis</i>	2	9	8	9	7	6	1	0	1	0	0	6	49	0,07
<i>Morus</i>	0	0	4	19	2	0	0	0	0	0	0	0	25	0,04
Myrtaceae	0	2	0	0	1	4	18	2	0	1	0	4	32	0,05
<i>Olea</i>	3	7	2	35	1927	3558	257	89	30	27	13	9	5957	8,59
<i>Pinus</i>	0	13	28	367	339	128	22	17	7	12	3	0	936	1,35
<i>Pistacia</i>	0	0	1	69	27	0	0	7	6	0	0	0	110	0,16
<i>Plantago</i>	0	0	4	76	309	181	28	4	1	1	0	0	604	0,87
<i>Platanus</i>	0	0	2	28	8	1	0	0	0	0	0	0	39	0,06
Poaceae	3	3	5	25	417	1464	106	16	7	1	0	0	2047	2,95
<i>Populus</i>	0	3	48	42	0	0	0	0	0	0	0	0	93	0,13
<i>Quercus</i>	4	3	1	462	5164	39 091	2061	1226	507	250	33	18	48 820	70,40
<i>Ricinus</i>	0	0	0	8	14	7	6	0	0	0	0	0	35	0,05
Rosaceae	0	0	1	4	0	7	2	0	0	0	0	2	16	0,02
<i>Rumex</i>	0	1	7	29	76	42	8	0	0	0	0	3	166	0,24
<i>Salix</i>	0	5	7	6	2	2	1	2	0	1	0	0	26	0,04
<i>Ulmus</i>	0	3	2	5	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0,01
<i>Urtica membranacea</i>	0	17	79	225	44	10	1	3	0	0	1	0	380	0,55
Urticaceae	8	96	130	298	114	66	35	16	9	9	14	36	831	1,20
Otros	6	20	17	58	51	27	63	80	39	18	36	57	472	0,68
Suma	64	462	568	1746	8626	46 711	4349	1693	712	1005	2575	839	69 350	
%	0,09	0,67	0,82	2,52	12,44	67,36	6,27	2,44	1,03	1,45	3,71	1,21		

El polen de *Urtica membranacea* se encuentra integrado dentro del tipo polínico Urticaceae, por lo que no ha sido tenido en cuenta para calcular la integral polínica total anual y mensual.

Tabla 4.6. Suma de las concentraciones polínicas detectadas en Sierra de las Nieves durante cada uno de los meses de 2019 y durante todo el año. También se muestra la abundancia relativa de cada tipo polínico y de cada mes durante ese año.

Tipo polínico	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total	%
<i>Alnus</i>	27	24	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	58	0,10
<i>Amaranthaceae</i>	3	2	10	22	69	35	24	56	40	19	1	4	285	0,50
<i>Apiaceae</i>	2	0	0	7	32	28	17	11	4	4	0	0	105	0,18
<i>Arecaceae</i>	0	0	0	0	2	1	3	1	3	0	1	1	12	0,02
<i>Artemisia</i>	6	5	4	0	0	0	0	10	5	1	1	8	40	0,07
<i>Asteraceae</i>	0	2	1	4	49	22	12	7	6	1	0	1	105	0,18
<i>Betula</i>	0	7	2	10	6	1	1	0	0	0	0	0	27	0,05
<i>Brassicaceae</i>	1	0	18	7	4	0	0	0	0	0	0	0	30	0,05
<i>Cannabis</i>	0	0	0	0	0	33	41	69	13	0	0	0	156	0,27
<i>Castanea</i>	0	0	0	0	3	5240	846	74	30	13	0	0	6206	10,91
<i>Casuarina</i>	0	0	0	0	0	0	0	1	11	14	6	3	35	0,06
<i>Cupressaceae</i>	707	961	703	24	108	13	4	1	7	575	39	148	3290	5,79
<i>Cyperaceae</i>	1	3	6	4	13	14	5	0	0	0	0	0	46	0,08
<i>Echium</i>	0	0	1	6	15	2	0	0	0	0	0	0	24	0,04
<i>Ericaceae</i>	0	16	49	7	58	9	2	0	0	1	0	0	142	0,25
<i>Fraxinus</i>	77	66	36	1	0	0	0	0	0	0	25	54	259	0,46
<i>Lamiaceae</i>	0	0	0	0	3	3	0	1	0	1	0	0	8	0,01
<i>Mercurialis</i>	3	9	14	5	8	2	1	0	0	0	0	0	42	0,07
<i>Morus</i>	0	0	19	11	2	0	0	0	0	0	0	0	32	0,06
<i>Myrtaceae</i>	1	1	7	2	4	27	54	5	4	2	0	2	109	0,19
<i>Olea</i>	14	7	115	344	4744	404	112	53	53	27	22	10	5905	10,38
<i>Pinus</i>	8	110	319	215	232	40	16	7	6	2	7	1	963	1,69
<i>Pistacia</i>	0	0	49	42	16	0	1	0	0	0	0	0	108	0,19
<i>Plantago</i>	0	0	11	75	348	41	17	12	7	3	5	0	519	0,91
<i>Platanus</i>	0	2	48	11	0	0	0	0	1	0	0	0	62	0,11
<i>Poaceae</i>	5	5	19	32	1449	412	33	8	10	9	3	2	1987	3,49
<i>Populus</i>	0	15	96	11	0	0	0	0	0	0	0	0	122	0,21
<i>Quercus</i>	14	13	135	2475	25 166	4650	731	344	371	198	142	33	34 272	60,27
<i>Ricinus</i>	0	0	4	13	46	14	0	0	1	0	0	0	78	0,14
<i>Rosaceae</i>	0	1	11	7	2	7	0	0	0	1	0	0	29	0,05
<i>Rumex</i>	1	4	17	26	81	12	1	2	2	1	0	0	147	0,26
<i>Salix</i>	0	1	6	1	8	2	0	3	0	0	0	0	21	0,04
<i>Ulmus</i>	0	0	5	2	1	0	0	0	0	0	0	0	8	0,01
<i>Urtica membranacea</i>	23	43	149	88	147	9	0	0	0	1	0	1	461	0,81
<i>Urticaceae</i>	87	109	223	140	216	46	18	6	11	6	8	19	889	1,56
Otros	32	25	85	65	180	81	124	49	41	29	20	15	746	1,31
Suma	989	1388	2019	3570	32 865	11 139	2063	720	626	907	280	301	56 867	
%	1,74	2,44	3,55	6,28	57,79	19,59	3,63	1,27	1,10	1,59	0,49	0,53		

El polen de *Urtica membranacea* se encuentra integrado dentro del tipo polínico Urticaceae, por lo que no ha sido tenido en cuenta para calcular la integral polínica total anual y mensual.

4.4.1.2. Diversidad y abundancia

Pese a que en ambas localidades coinciden los 8 tipos polínicos más abundantes, su orden cambia según la localidad de muestreo (Figura 4.8). A pesar de las mayores desviaciones estándar observadas en Ronda, no puede concluirse si la variabilidad interanual es mayor en esta localidad, pues la cantidad de años de muestreo es muy reducida. La distancia existente entre captadores no es suficiente como para encontrar diferencias en la composición de los tipos polínicos mayoritarios, aunque sí para alterar su orden.

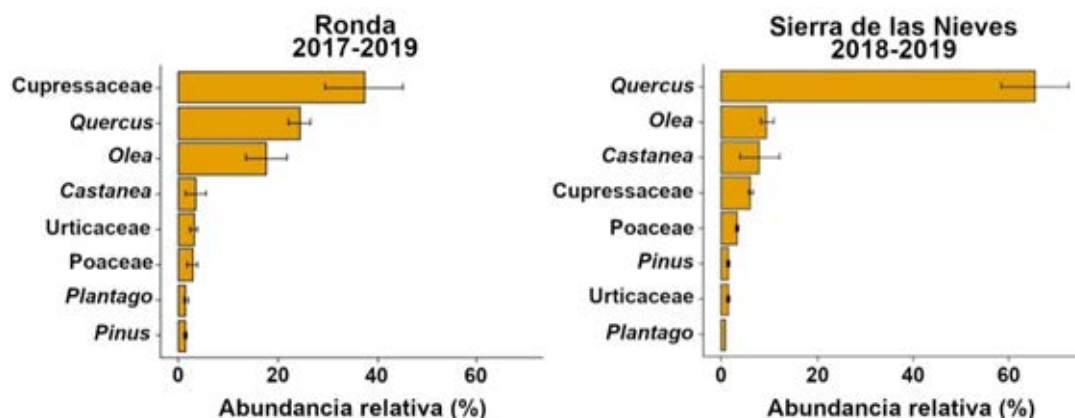


Figura 4.8. Abundancia relativa anual (media y desviación estándar) de los ocho tipos polínicos más abundantes en cada localidad.

La presencia de taxones alóctonos ornamentales de Cupressaceae en las inmediaciones cercanas al edificio donde se encuentra el captador de Ronda explicaría su elevada abundancia relativa. Las fuentes emisoras de este tipo polínico estarían representadas en Sierra de las Nieves, principalmente, por taxones autóctonos de zonas montañosas (especies del género *Juniperus*).

La vegetación natural de las inmediaciones de los dos captadores está dominada por formaciones vegetales con prevalencia de especies del género *Quercus*, por lo que su tipo polínico tiene una gran presencia en la atmósfera y una elevada abundancia relativa en ambas localidades. No obstante, la localización del captador de Sierra de las Nieves en el interior de un encinar explica su mayor abundancia relativa con respecto a Ronda, lo que reduce la abundancia relativa del resto de tipos polínicos.

Ronda, al estar situada en un medio más modificado por el ser humano, tiene mayor abundancia de tipos polínicos pertenecientes a taxones nitrófilos y ruderales como los de Urticaceae y *Plantago*. La influencia de cultivos de *Castanea sativa*, en cambio, es mayor en el entorno de Sierra de las Nieves por su cercanía a la mayoría de los cultivos más extensos de la zona.

El tipo *Olea*, pese a ser el segundo orden de abundancia, presenta una abundancia total (tablas 4.2-4.6) y relativa anual (Figura 4.8) inferiores (menos de la mitad) en Sierra de las Nieves que en Ronda.

Poaceae tiene una abundancia anual media similar en ambas localidades, con una integral anual de unos 2000 polen*día/m³, a excepción del año 2017 en Ronda, que fue inferior a 1000 polen*día/m³.

La cercanía de pinares de *Pinus pinaster* y *Pinus halepensis*, de poblaciones de *Cedrus atlantica* y *Pinus nigra* J.F.Arnold y, sobre todo, de los pinsapares (*Abies pinsapo*) en la Sierra de las Nieves junto a individuos ornamentales en el área recreativa de conejeras (*Pinus pinea* y *Pinus nigra*) son las responsables de las diferencias en abundancia relativa observadas en este tipo polínico. En la Sierra de las Nieves también hay ejemplares dispersos de *Pinus sylvestris* L. y *Pinus radiata* D.Don que pueden contribuir al polen detectado.

4.4.1.3. Calendarios polínicos

En Ronda se identificaron 34 tipos polínicos que superaron el grano de polen/m³ en sus medias decenales (Figura 4.9) y, por lo tanto, obtuvieron representación en el calendario polínico. La estación con mayor diversidad de tipos polínicos fue la primavera, con 28 tipos polínicos identificados, seguida de invierno (21 tipos), verano (16 tipos) y otoño (10 tipos). El mes con mayor diversidad de tipos polínicos fue mayo, con 22 tipos. En invierno el tipo polínico dominante fue Cupressaceae, seguido de Urticaceae y *Fraxinus*; en primavera, *Quercus* y *Olea*, seguidos de Poaceae, *Plantago*, *Pinus* y *Castanea*; en verano, *Castanea* y Myrtaceae; y en otoño, Cupressaceae y *Fraxinus*.

En Sierra de las Nieves (Figura 4.10) se identificaron 27 tipos polínicos. El periodo de mayor diversidad también fue la primavera (23 tipos polínicos), seguida del invierno (17 tipos), verano (15 tipos) y otoño (6 tipos). Los meses con mayor diversidad de tipos polínicos fueron abril y mayo, ambos con 16 tipos polínicos. En invierno el tipo polínico más abundante fue Cupressaceae, seguido de Urticaceae y *Fraxinus*; en primavera, *Quercus*, *Olea* y *Castanea*, seguidos de Poaceae, *Plantago* y *Pinus*; en verano, *Castanea* y *Quercus*; y en otoño, Cupressaceae seguido de *Quercus* y *Fraxinus*.

Tanto en Ronda como en Sierra de las Nieves, las curvas polínicas presentan una amplitud temporal muy extensa, con presencia durante casi todo el año en algunos taxones (e.j.: Cupressaceae, Urticaceae, *Quercus*, *Olea*, Amaranthaceae). Podría deberse a la gran variedad de especies (o de variedades de cultivo en el caso de *Olea*) con diferentes periodos de floración que integran estos tipos polínicos en la zona. En el caso de *Quercus*, en otras estaciones de la provincia de Málaga (como en Málaga capital, Vélez-Málaga, Nerja o Estepona) y en otras ciudades de Andalucía (Almería, Cádiz, Córdoba, Granada, Huelva, Jaén y Sevilla) se observan colas más reducidas (Docampo *et al.*, 2007; Martínez-Bracero *et al.*, 2015; Recio *et al.*, 1998a, 2006; Trigo *et al.*, 2007). Por el contrario, se observó un comportamiento similar al de Ronda y Sierra de las Nieves -aunque no tan pronunciado- en Antequera, posiblemente por su cercanía a formaciones vegetales naturales dominadas por el género *Quercus* (Recio *et al.*, 2000). El tipo polínico *Olea* está caracterizado por un periodo de polinación extenso en la mayoría de localidades de Andalucía (Martínez-Bracero *et al.*, 2015), lo que también se observa en Ronda y Sierra de las Nieves. Urticaceae y Amaranthaceae están integrados por una gran variedad de especies en todas las localidades muestreadas en la provincia de Málaga y en el resto de Andalucía, por lo que no se observan grandes diferencias en la estacionalidad de estos tipos polínicos (aunque sí en sus abundancias), tanto entre Ronda y Sierra de las Nieves, como con el resto de las localidades de la provincia de Málaga y de Andalucía. En Cupressaceae, por la prevalencia de una variedad de taxones ornamentales, ocurre un fenómeno similar.

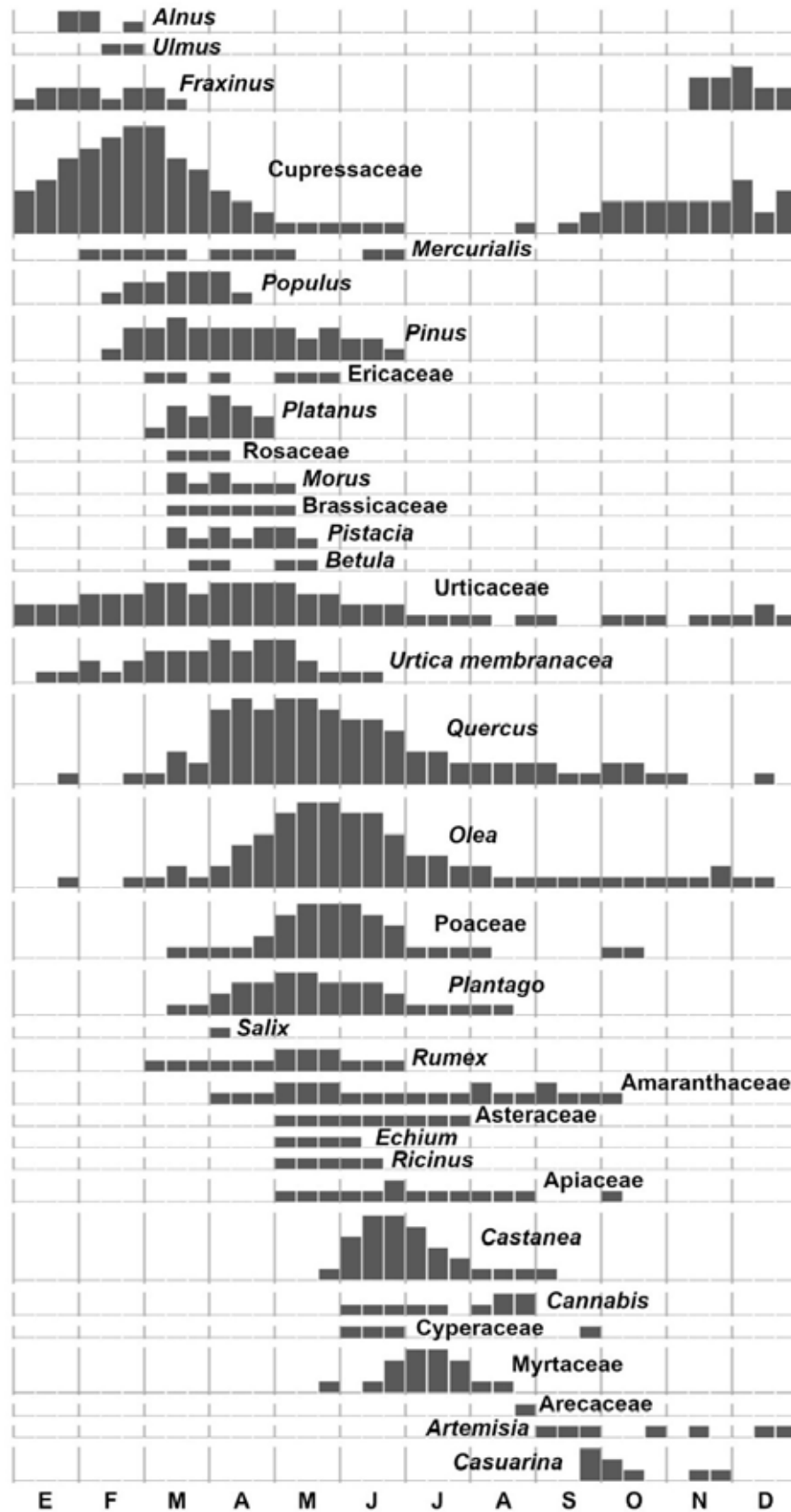


Figura 4.9. Calendario polínico de Ronda elaborado con datos desde diciembre de 2016 hasta diciembre de 2019. Se representan todos aquellos tipos polínicos que alcanzaron de promedio más de 1 grano de polen/m³ en alguna decena del año.

Por el contrario, hay tipos polínicos como *Castanea*, *Cannabis* o Myrtaceae que, pese a su abundancia en Ronda y Sierra de las Nieves, tienen una curva polínica bastante reducida en el tiempo. Esto se debe a que estos tipos polínicos proceden de una o pocas especies con un periodo de floración muy marcado, lo que reduce bastante su estacionalidad. Estas especies son *Castanea sativa* Mill. en el caso de *Castanea*; *Cannabis sativa* L. en el caso de *Cannabis*; y *Myrtus communis* L., *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. y *Eucalyptus globulus* Labill. en el caso de Myrtaceae. Se ha observado el mismo comportamiento en el resto de localidades muestreadas en Málaga provincia y en el resto de Andalucía (Docampo *et al.*, 2007; Martínez-Bracero *et al.*, 2015; Recio *et al.*, 1998a, 2000, 2006; Trigo *et al.*, 2007). La mayor abundancia de *Castanea* en Sierra de las Nieves se debe a la menor distancia del captador a las principales extensiones de cultivos de la zona.

Se observaron grandes diferencias en la temporalidad del tipo polínico *Mercurialis* entre Ronda y Sierra de las Nieves. *Mercurialis*, por estar integrado por especies predominantemente nitrófilas y ruderales (Trigo *et al.*, 2008), se encuentra con mayor abundancia y extensión temporal en áreas con mayor influencia antrópica, como es el caso de Ronda cuando se compara con Sierra de las Nieves. Pese a esto, la presencia de este tipo polínico en otras zonas más pobladas de la provincia es mayor que la detectada en ambas localidades (Docampo *et al.*, 2007; Martínez-Bracero *et al.*, 2015; Recio *et al.*, 1998a, 2006; Trigo *et al.*, 2007), aunque similar a Antequera, una ciudad de gran influencia rural del interior de la provincia (Recio *et al.*, 2000). También se observaron diferencias en *Casuarina* por su uso como ornamental en parques y jardines de Ronda.

En ambas estaciones se detectó la presencia de polen procedente de especies riparias, como *Alnus*, *Ulmus*, *Fraxinus*, *Populus* y *Salix*. El estudio del origen del polen de *Alnus* será discutido en el Capítulo 4.4.3.1. Los aparatos captadores de ambas estaciones se encuentran próximos a arroyos y ríos que, en algunos casos, conservan retazos de la vegetación riparia natural de la zona, lo que explica la detección de estos tipos polínicos en cantidades mayores a las detectadas, en general, en localidades costeras de la provincia de Málaga (Docampo *et al.*, 2007; Recio *et al.*, 1998a, 2006; Trigo *et al.*, 2007). Este aumento en abundancia también se detectó en Antequera, otra localidad del interior de la provincia (Recio *et al.*, 2000). En Ronda abundan especies como *Populus alba* L., *Ulmus minor* Mill. o *Fraxinus angustifolia* Vahl en parques y jardines de las inmediaciones del captador (Capítulo 4.2), lo que explica las diferencias observadas con Sierra de las Nieves para estos tipos polínicos. *Ulmus* no está representado en el calendario polínico de Sierra de las Nieves, aunque sí se ha detectado en su atmósfera. Quizás sean necesarios más años de muestreo para que las medias decenales alcancen representatividad. *Salix* no alcanzó la representación en Sierra de las Nieves y en Ronda solo la consiguió en una decena. Las diferencias podrían deberse a una mayor presencia de este tipo polínico en Ronda por la presencia de sauces ornamentales y a que sean necesarios más años de muestreo para que taxones minoritarios como *Salix* ganen representatividad en el calendario polínico.

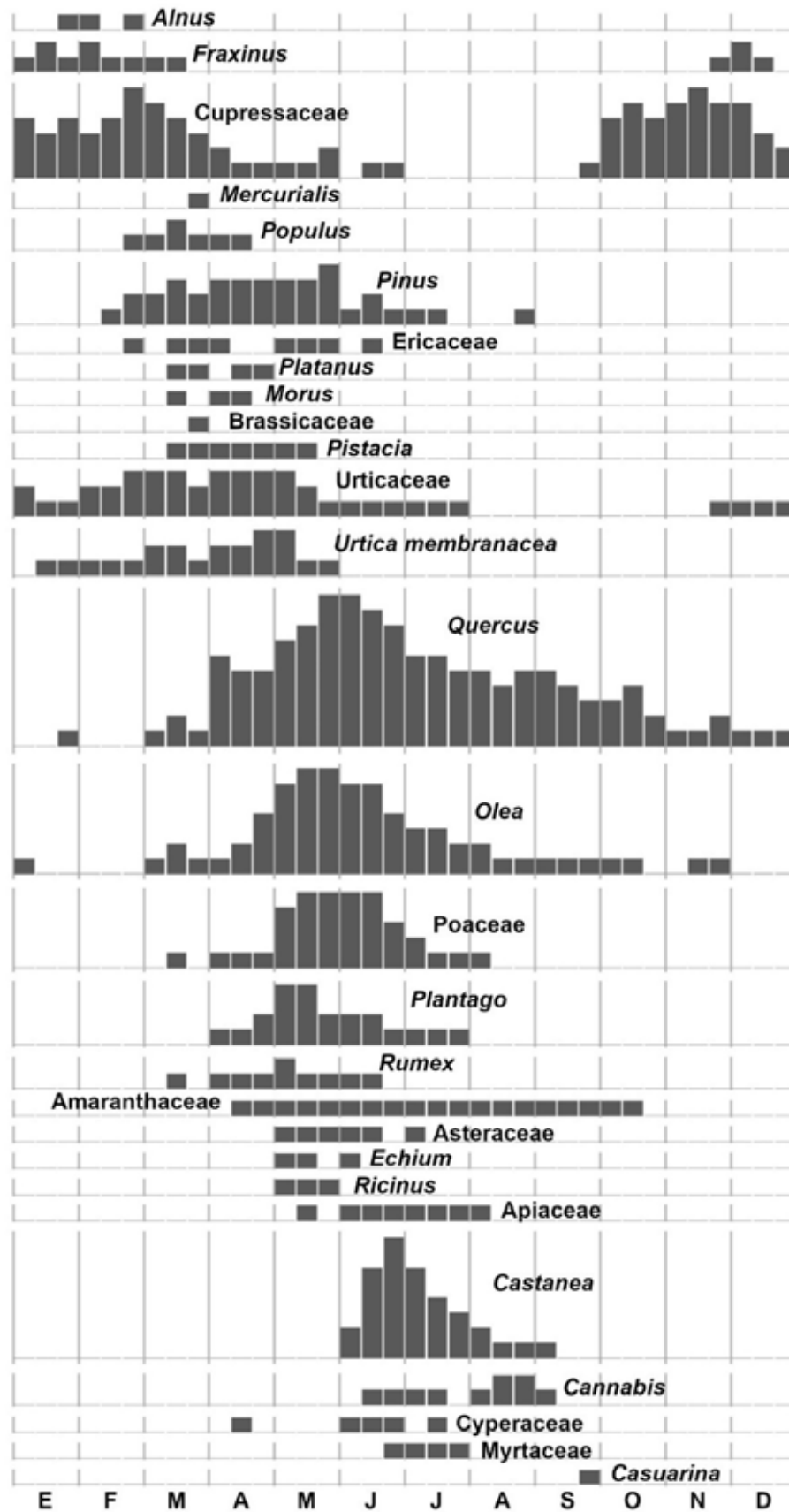


Figura 4.10. Calendario polínico de Sierra de las Nieves elaborado con datos desde el 24 de enero de 2018 hasta diciembre de 2019. Se representan todos aquellos tipos polínicos que alcanzaron de promedio más de 1 grano de polen/m³ en alguna decena del año.

4.4.2. Tipos polínicos mayoritarios

4.4.2.1. Tipo Cupressaceae

Este tipo polínico se encuentra representado en la zona de estudio por las siguientes especies: *Cupressus arizonica*, *Cupressus lusitanica*, *Cupressus sempervirens*, *Juniperus communis* subsp. *hemisphaerica* (K. Presl) Nyman, *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* L., *Juniperus oxycedrus* subsp. *transtagana* Franco, *Juniperus phoenicea*, *Juniperus sabina*, *Platycladus orientalis* y *Tetraclinis articulata* (Vahl) Mast.

El polen de tipo Cupressaceae se detecta en la atmósfera de la comarca de Ronda durante todo el año, aunque fundamentalmente desde octubre hasta abril, siendo muy escaso y ocasional en los meses de verano (figuras 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13, tablas 4.2-4.6). Se distinguen dos curvas de polen independientes dentro de cada año, por lo que se han analizado de forma separada como Cupressaceae de invierno y Cupressaceae de otoño.

En Ronda la mayor cantidad de polen de Cupressaceae se detecta en los meses de febrero y marzo. El periodo de polinación detectado en otoño, a pesar de tener una mayor extensión temporal, es mucho menos intenso (menor integral polínica y picos de concentración diaria con valores más bajos; Tabla 4.7). Las medias móviles de 5 días suavizan el ruido producido por la variabilidad diaria de concentraciones de polen, lo que permite observar con más claridad el periodo de mayor presencia en la atmósfera de este tipo polínico (Figura 4.13). En general, el periodo de invierno es mucho más homogéneo de un año a otro, y puede observarse una única curva de concentración polínica. En cambio, el periodo de otoño presenta mucha más variabilidad interanual, lo que repercute en la observación de varios picos en la media de los años de muestreo. Las diferencias de concentraciones de medias móviles máximas entre invierno y otoño son de más de un orden de magnitud.

En Sierra de las Nieves se observa una extensión temporal de la presencia de polen de Cupressaceae similar a Ronda. El muestreo aerobiológico comenzó el 24 de enero de 2018 y, aunque fueron bajas las concentraciones de Cupressaceae en las primeras semanas de muestreo y los registros paralelos de concentraciones de polen en Ronda indican lo contrario, es posible que se perdiesen algunos días de altas concentraciones, lo que explicaría el retraso en el inicio del PPP de ese año. En 2018, la curva de concentraciones de Cupressaceae de otoño fue mayor que la de invierno, al contrario que en 2019. A diferencia de lo observado en Ronda, la curva de medias móviles no es tan homogénea, sino que presenta varios picos (Figura 4.13). Es de esperar que con un mayor número de años de muestreo se vaya suavizando este patrón. En Sierra de las Nieves no hay tantas diferencias entre las curvas de medias móviles de invierno y otoño como las que se observan en Ronda, además en Sierra de las Nieves se alcanzan concentraciones más elevadas en otoño.

En general, las concentraciones de polen de Cupressaceae son mucho más bajas en Sierra de las Nieves que en Ronda durante el invierno y mayores durante el otoño. En invierno, las fuentes de emisión de Cupressaceae son principalmente especies ornamentales como *Cupressus sempervirens* y *Cupressus arizonica* (Capítulo 4.3), mucho más abundantes en Ronda, lo que explicaría las mayores concentraciones detectadas en esta localidad. En otoño, las fuentes de emisión

principales son especies de distribución natural como *Juniperus oxycedrus* subsp. *oxycedrus* y *Juniperus phoenicea* (Blanca *et al.*, 2011), que tienen una distribución más abundante y cercana en la localidad de muestreo de Sierra de las Nieves. En el caso de Ronda, las concentraciones elevadas de Cupressaceae detectadas a mediados y finales de diciembre también podrían deberse al comienzo de la floración de *Cupressus arizonica*. La mayor heterogeneidad de especies que contribuyen a las concentraciones de otoño junto con las precipitaciones de esta época y los fenómenos de transporte de polen desde las poblaciones naturales de floración otoñal podrían ser las responsables de la mayor variabilidad entre días consecutivos en otoño en Ronda (Figura 4.13).

El inicio del PPP de invierno en Ronda varió entre el 25 de enero y el 5 de febrero (Tabla 4.7) mientras que, en Sierra de las Nieves, presentó una amplitud mayor en tan solo dos años de muestreo (7 de enero y 14 de febrero). La fecha de fin del PPP de invierno en Sierra de las Nieves fue bastante más tardía que en Ronda, haciendo que su duración sea de más del doble en Sierra de las Nieves casi en todos los años de muestreo. Con el PPP de otoño ocurre lo contrario, es más duradero en Ronda que en Sierra de las Nieves. El inicio también es más tardío en Sierra de las Nieves. Esto podría deberse a que la presencia de taxones ornamentales de floración otoñal -como *Cupressus lusitanica* o *Tetraclinis articulata*- favoreciese la aparición de polen de Cupressaceae en el comienzo del otoño, lo que conllevaría un adelanto del PPP. La floración más temprana de *Cupressus arizonica* y *Cupressus sempervirens* en pisos bioclimáticos más cálidos es la responsable de la detección de concentraciones de polen más elevadas a final de año, lo que retrasa el final del PPP en Ronda (Capítulo 4.3) (Blanca *et al.*, 2011). La fecha del día pico fluctuó mucho de un año a otro, sobre todo en otoño (Tabla 4.7), lo que puede deberse a las condiciones meteorológicas particulares de cada año y a la dinámica de vientos que favorece la llegada de polen desde las fuentes de emisión. El valor del pico es mucho más elevado en Ronda en invierno, lo que puede explicarse por la elevada presencia de *Cupressus sempervirens* como ornamental en el interior de la ciudad. Por el contrario, en otoño el valor del pico es mayor en Sierra de las Nieves por la mayor cercanía y abundancia de los taxones de distribución natural mencionados anteriormente. Ocurre lo mismo con las integrales polínicas (Tabla 4.7). Las fechas de inicio y fin del PPP de invierno en Ronda y Sierra de las Nieves son similares a las de otras localidades españolas como Granada, Córdoba, Toledo o Málaga. Tampoco se detecta un retraso apreciable en el inicio o fin del PPP de otras localidades del norte de España (Belmonte *et al.*, 1999b; Díaz de la Guardia *et al.*, 2006; Galfin *et al.*, 1998; Hidalgo *et al.*, 2003; Sabariego *et al.*, 2012; Tormo-Molina *et al.*, 2011). No es frecuente el cálculo del PPP de otoño, por lo que no hay datos para comparar las fechas obtenidas con otras localidades. Pese a que se han detectado tendencias significativas a adelantar el inicio del PPP de invierno en este tipo polínico en algunas localidades de España, las fechas de inicio y fin del PPP de hace más de 20 años en localidades vecinas no difieren sustancialmente de las de este estudio (Galfin *et al.*, 1998; Velasco-Jiménez *et al.*, 2020).

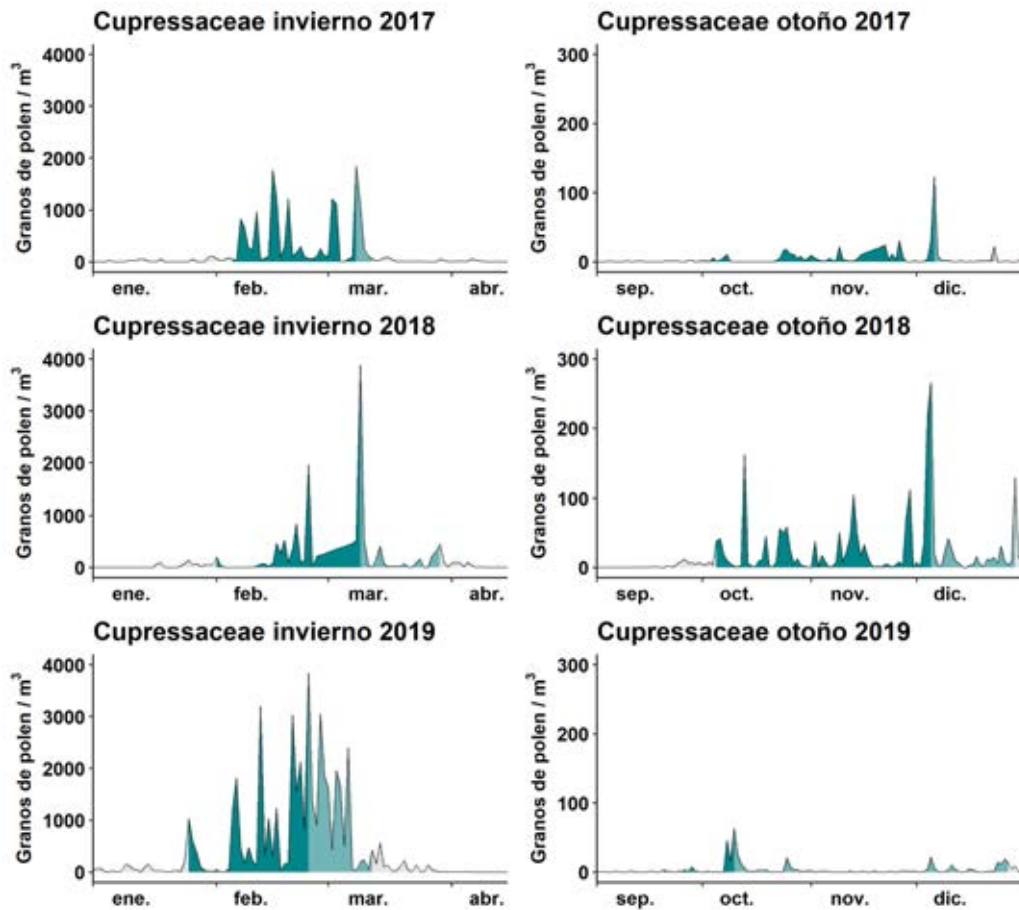


Figura 4.11. Concentraciones diarias de polen de Cupressaceae durante los periodos de polinación principal de invierno y otoño en Ronda. En turquesa oscuro, el prepico; en turquesa claro, el postpico.

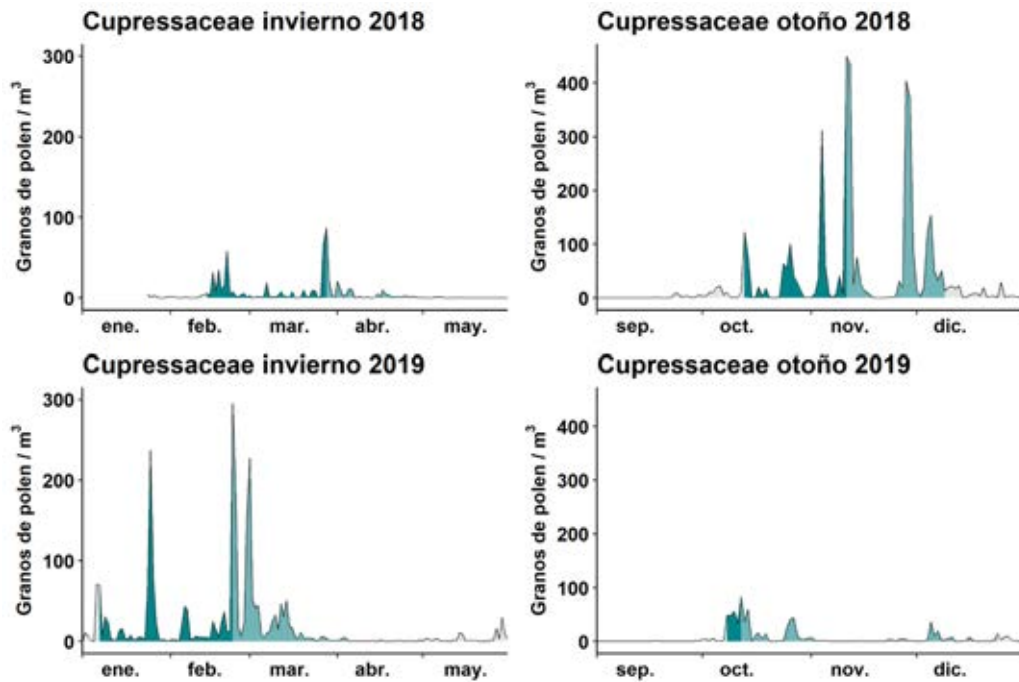


Figura 4.12. Concentraciones diarias de polen de Cupressaceae durante los periodos de polinación principal de invierno y otoño en Sierra de las Nieves. En turquesa oscuro, el prepico; en turquesa claro, el postpico.

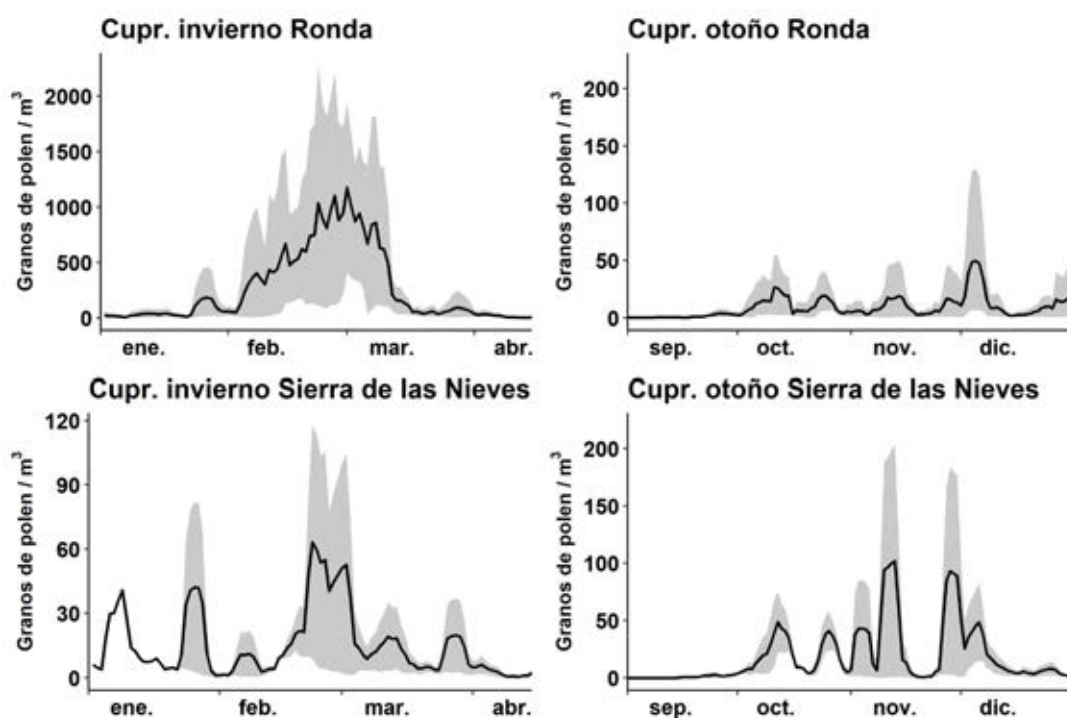


Figura 4.13. Concentraciones diarias promedio de medias móviles de 5 días de amplitud (línea negra), valores máximos (área gris) y mínimos (área blanca sobre la gris) diarios de medias móviles de Cupressaceae de invierno y otoño durante el periodo de estudio en Ronda y Sierra de las Nieves. Cupr., Cupressaceae.

Tabla 4.7. Principales parámetros del Periodo Principal de Polinación (PPP) de Cupressaceae en Ronda y Sierra de las Nieves (S. Nieves) durante el periodo de estudio.

	Año	Inicio PPP	Fin PPP	Duración (días)	Día pico	Valor pico (granos de polen/m ³)	Integral PPP (Polen*día/m ³)	Integral total (Polen*día/m ³)
Ronda invierno	2017	05-feb	12-mar	36	08-mar	1843	15 165	16 794
	2018	01-feb	29-mar	57	09-mar	3884	15 725	17 251
	2019	25-ene	12-mar	47	24-feb	3839	41 456	44 779
Ronda otoño	2017	30-sep	23-dic	85	06-dic	123	578	618
	2018	05-oct	29-dic	86	05-dic	266	2143	2265
	2019	20-sep	27-dic	99	10-oct	63	393	430
S. Nieves invierno	2018	14-feb	14-may	90	28-mar	87	575	633
	2019	07-ene	30-abr	114	23-feb	295	2305	2520
S. Nieves otoño	2018	13-oct	09-dic	58	11-nov	450	3471	3800
	2019	08-oct	24-dic	78	12-oct	83	715	770

La integral polínica anual media de Cupressaceae en Ronda durante los años de muestreo fue de $27\,379 \pm 15\,477$ polen*día/m³, superior a las medias de todas las estaciones de muestreo de España (Aira *et al.*, 2016; Belmonte *et al.*, 1999b). No obstante, algunos años puntuales en Málaga, Granada, Manresa o Madrid sí alcanzaron niveles similares ($>15\,000$ polen*día/m³). En 2019 se registró una integral polínica invernal muy superior a la de los años anteriores en ambas estaciones ($44\,779$ polen*día/m³), lo que contrastó con la integral polínica detectada en otoño el mismo año, que fue la más baja de todo el periodo de muestreo en Ronda (430 polen*día/m³) y la más baja de las de otoño en Sierra de las Nieves (770 polen*día/m³) (Tabla 4.7). En otras localidades también se han detectado grandes cambios de las integrales polínicas de un año a otro (de incluso más del doble de la integral polínica de otros años), por lo que la gran variabilidad

interanual de este tipo polínico parece ser una característica propia del mismo (algunos años dedican más energía a la floración y otros al crecimiento vegetativo) (Díaz de la Guardia *et al.*, 2006). Otros autores también han establecido una relación fuerte entre la intensidad de la polinación del tipo Cupressaceae, las lluvias de otoño del año previo y las temperaturas mínimas del mismo periodo (Galfin *et al.*, 1998). La alternancia de producción floral entre años junto a la mayor disponibilidad hídrica por las lluvias del otoño previo podrían ser las responsables de la mayor integral polínica detectada en invierno de 2019.

Cabe destacar que la cercanía de individuos de *Cupressus sempervirens* en las inmediaciones del captador de Ronda puede ocasionar que este tipo polínico se encuentre sobrerrepresentado. Los valores de concentración del día pico también fueron superiores a los registrados históricamente en las estaciones de España, aunque el pico de 2017 fue similar a valores históricos registrados en Granada (Aira *et al.*, 2016; Belmonte *et al.*, 1999b).

Sierra de las Nieves tuvo una integral polínica anual media de 3862 ± 808 polen*día/m³, un valor similar a los registrados en otras estaciones de España como Málaga, Córdoba o Jaén (Aira *et al.*, 2016).

4.4.2.2. Tipo *Quercus*

Este tipo polínico se encuentra representado en la zona de estudio en mayor medida por *Quercus rotundifolia*, *Quercus coccifera* L., y *Quercus suber*, seguido de *Quercus faginea* subsp. *faginea*, *Quercus faginea* subsp. *alpestris*, *Quercus faginea* subsp. *broteroi*, *Quercus pyrenaica* Willd. y *Quercus lusitanica*. En la parte suroccidental de la zona de estudio (límite con la provincia de Cádiz) también abunda *Quercus canariensis*.

El polen de tipo *Quercus* se detecta en la atmósfera de la comarca de Ronda principalmente durante la primavera (figuras 4.9, 4.10, 4.14, 4.15 y 4.16, tablas 4.2-4.6). En Ronda, la mayor incidencia de este tipo polínico se registra durante los meses de abril y mayo (salvo en 2018, año en el que se retrasó a mayo-junio) (Figura 4.14). Al igual que se observó en el tipo polínico anterior, las medias móviles permiten observar con mayor claridad y menor ruido el patrón anual general de concentraciones de polen de *Quercus* (Figura 4.16).

En Sierra de las Nieves la detección de polen de *Quercus* es un poco más tardía, ocupando principalmente los meses de mayo, junio y julio (Figura 4.15). Este periodo coincide con el periodo de floración de las principales especies del género *Quercus* en las cercanías del captador (Capítulo 4.3). La curva de polen fue mucho más abrupta que en Ronda y ligeramente más tardía. Al igual que ocurre con Cupressaceae en Ronda, *Quercus* está sobrerrepresentado en Sierra de las Nieves. El captador de polen está instalado en un encinar dominado por *Quercus rotundifolia*, por lo que su dinámica de liberación de polen se representaría con mayor notoriedad en la curva de concentración este tipo polínico, lo que hace la curva más homogénea y marcada que la observada en Ronda (Figura 4.16). Las concentraciones de polen de *Quercus* también fueron mayores que las esperables en lugares más distantes de la fuente de emisión. El PPP de *Quercus* coincide con la fenología de floración de *Quercus rotundifolia* y *Quercus suber* de la zona (Capítulo 4.3). También se corresponde con el periodo de floración de *Quercus faginea* subsp. *alpestris*, cuyas principales poblaciones se encuentran en las zonas elevadas del Parque Natural Sierra de las Nieves (Blanca *et al.*, 2011). La cercanía de estas poblaciones sería la responsable de las

concentraciones de polen más elevadas que se registraron en Sierra de las Nieves en comparación con Ronda.

El inicio del PPP se retrasó casi un mes en 2018 (Tabla 4.8) tanto en Ronda como en Sierra de las Nieves con respecto al resto de años de muestreo, lo que podría explicarse por las temperaturas más bajas registradas en la zona de estudio durante los meses previos a la floración de ese año (capítulos 4.1.1 y 4.1.2) (García-Mozo *et al.*, 2006a; Recio *et al.*, 2018). La duración del PPP fue similar en ambas localidades, aunque el PPP fue más tardío en Sierra de las Nieves. La fecha del pico presentó grandes oscilaciones entre años, lo que puede explicarse por el retraso generalizado del PPP en 2018 y por las condiciones meteorológicas de cada año. El valor del pico en Sierra de las Nieves excedió el doble que el de Ronda en todos los años de muestreo, al igual que la integral polínica anual en 2018 (Tabla 4.8). Tanto la duración como las oscilaciones en las fechas de inicio y fin del PPP fueron similares a las que se registran en Málaga y en otras localidades del sur de España (Maya-Manzano *et al.*, 2016; Recio *et al.*, 2018; Ruiz-Valenzuela & Aguilera, 2018).

Los valores de concentración de polen en el día pico en Ronda fueron similares a los valores más elevados registrados en Málaga capital (Recio *et al.*, 2018) y similares a algunas localidades de España (García-Mozo *et al.*, 1999). En cambio, los valores de integral polínica anual tanto de Ronda como de Sierra de las Nieves fueron bastante superiores a la media de Málaga y de la mayoría de localidades de España (Aira *et al.*, 2016). Solo Badajoz tiene una integral polínica anual media similar a la de Ronda ($16\ 308 \pm 6210$ polen*día/m³). Sierra de las Nieves tuvo una integral polínica anual media de $41\ 546 \pm 10\ 287$ polen*día/m³, lo que la convierte en la media más elevada de las localidades muestreadas de España (Aira *et al.*, 2016; García-Mozo *et al.*, 1999; Oteros *et al.*, 2017; Recio *et al.*, 2018). Esto puede explicarse por la sobrerrepresentación de este tipo polínico en dicha estación tal y como se ha comentado anteriormente.

En 2019 se registró una integral polínica mucho mayor que en el resto de los años de muestreo en Ronda, sin embargo, ocurrió lo contrario en Sierra de las Nieves (Tabla 4.8). Esto descarta un comportamiento general de las poblaciones de *Quercus* en una primera instancia, y podría deberse a condiciones meteorológicas concretas de las estaciones de muestreo o a fenómenos locales de transporte de polen. A pesar de la ausencia de datos meteorológicos en Sierra de las Nieves para este año (Capítulo 4.1.2), en años previos, sí se han detectado diferencias en temperatura y precipitación entre ambas localidades pese a su cercanía geográfica. Otros autores han demostrado la relevancia de las temperaturas y precipitaciones sobre la integral polínica de *Quercus* en los meses anteriores a su floración (García-Mozo *et al.*, 2006a; Recio *et al.*, 2018). Diferencias en estas variables entre los sitios de muestreo podrían ser las responsables de los comportamientos opuestos observados.

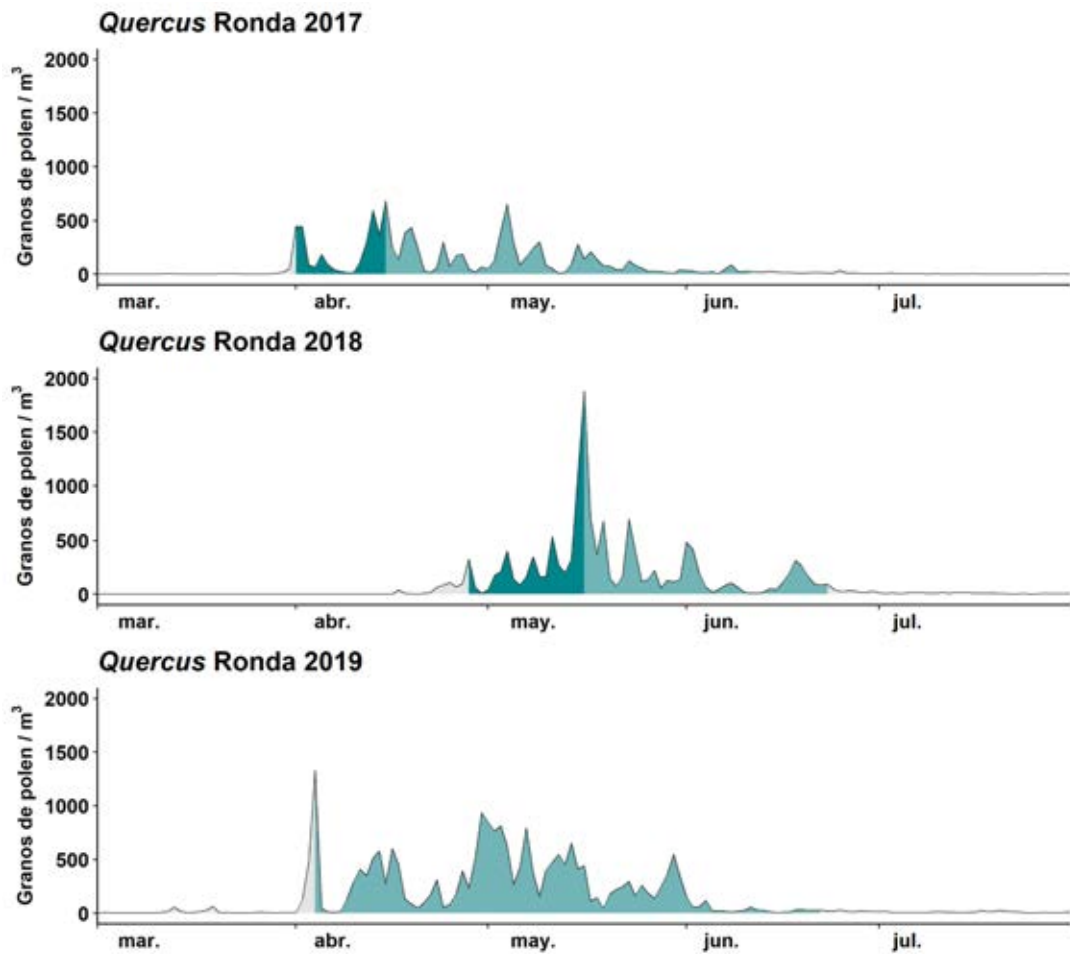


Figura 4.14. Concentraciones diarias de polen de *Quercus* durante los periodos de polinación principal en Ronda. En turquesa oscuro, el prepico; en turquesa claro, el postpico.

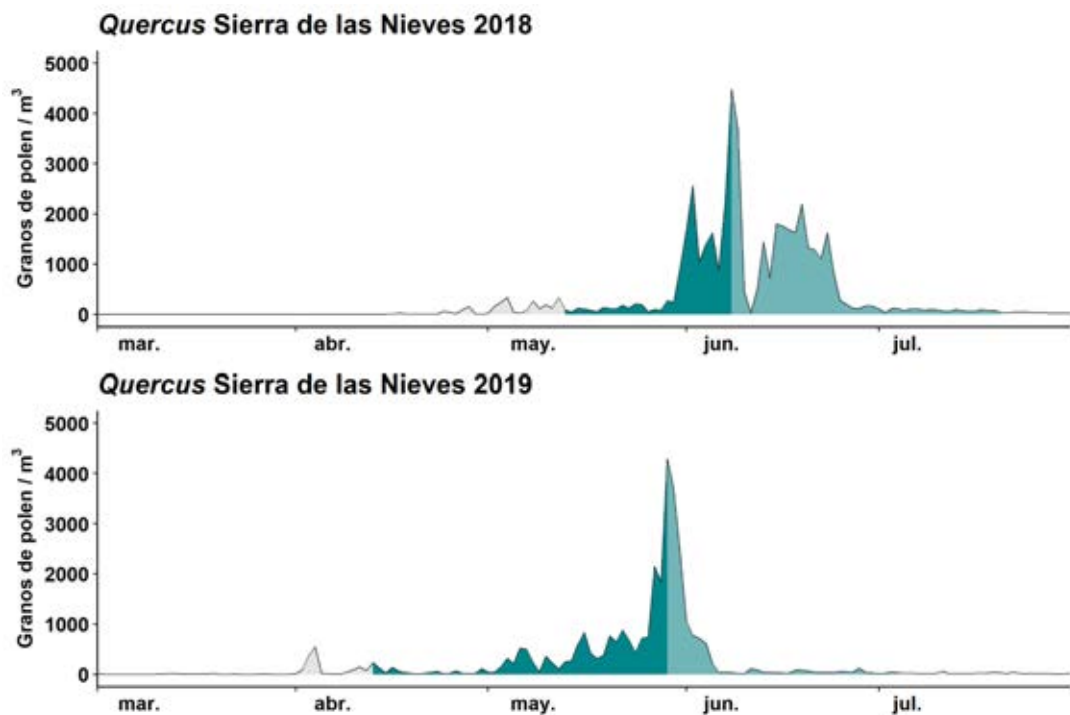


Figura 4.15. Concentraciones diarias de polen de *Quercus* durante los periodos de polinación principal en Sierra de las Nieves. En turquesa oscuro, el prepico; en turquesa claro, el postpico.

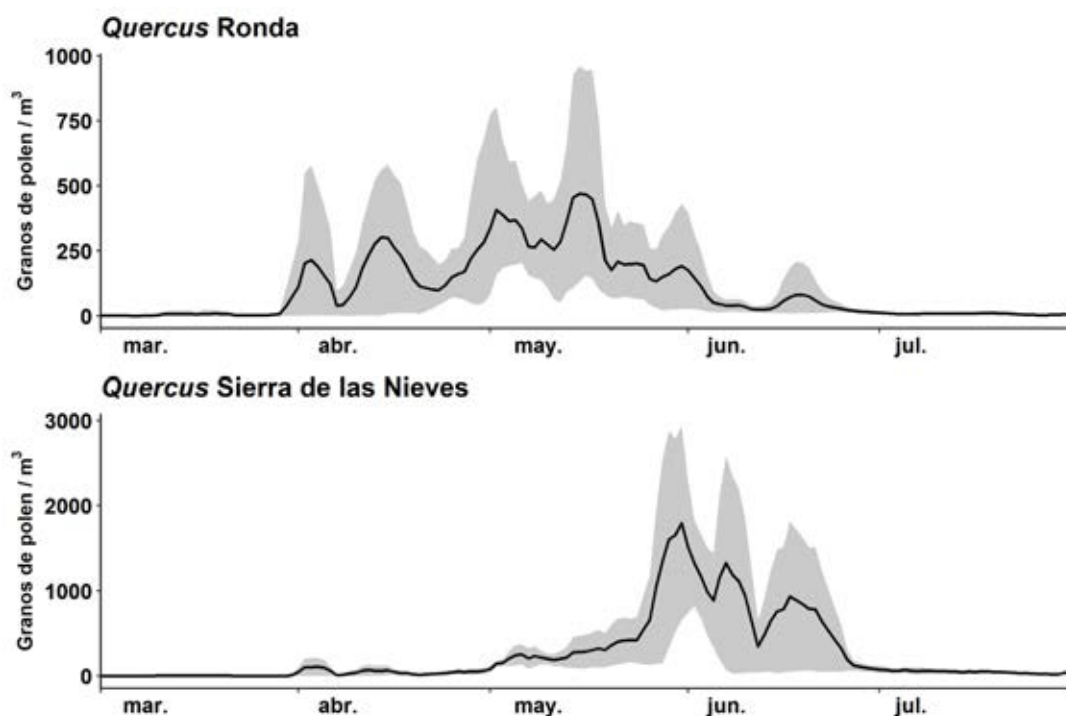


Figura 4.16. Concentraciones diarias promedio de medias móviles de 5 días de amplitud (línea negra), valores máximos (área gris) y mínimos (área blanca sobre la gris) diarios de medias móviles de *Quercus* durante el periodo de estudio en Ronda y Sierra de las Nieves.

Tabla 4.8. Principales parámetros del Periodo Principal de Polinación (PPP) de *Quercus* en Ronda y Sierra de las Nieves (S. Nieves) durante el periodo de estudio.

	Año	Inicio PPP	Fin PPP	Duración (días)	Día pico	Valor pico (granos de polen/m ³)	Integral PPP (Polen*día/m ³)	Integral anual (Polen*día/m ³)
Ronda	2017	01-abr	11-jun	72	15-abr	685	10 234	10 899
	2018	28-abr	23-jun	57	16-may	1880	13 693	14 935
	2019	04-abr	22-jun	80	04-abr	1328	21 033	23 090
S. Nieves	2018	13-may	20-jul	69	08-jun	4483	44 033	48 820
	2019	13-abr	04-jul	83	29-may	4293	31 001	34 272

4.4.2.3. Tipo *Olea*

Este tipo polínico se encuentra representado en la zona de estudio por *Olea europaea* y *Olea europaea* var. *sylvestris*.

El polen de tipo *Olea* se detecta en la comarca de Ronda fundamentalmente durante los meses de abril, mayo y junio (figuras 4.9, 4.10, 4.17, 4.18 y 4.19, tablas 4.2-4.6). Ronda alcanza concentraciones de polen de *Olea* más elevadas que Sierra de las Nieves, lo que se refleja en el valor de su máximo diario y de su integral polínica anual (más del doble que la de Sierra de las Nieves) (Figura 4.19 y Tabla 4.9) y que puede ser explicado por la presencia de extensos cultivos de *Olea europaea* en el entorno cercano de la ciudad de Ronda.

En ambas localidades se detectaron algunos días con concentraciones de polen moderadas fuera del periodo de polinación principal. También se detectaron varios picos de elevadas concentraciones durante el PPP espaciados en el tiempo

que, aunque alcanzaron concentraciones diferentes en ambas estaciones, coincidieron en el tiempo, lo que parece indicar un origen común del polen detectado (figuras 4.17 y 4.18). Todo esto podría explicarse con el aporte de polen de *Olea* de cultivos en diferentes pisos bioclimáticos o con pequeñas diferencias en fenología por la variedad de los cultivos (García-Mozo *et al.*, 2009b), lo que aumenta la variabilidad de concentraciones de polen de un día a otro a lo largo de todo el periodo. La duración del PPP en Sierra de las Nieves fue ligeramente superior a la de Ronda durante los dos años de muestreo simultáneo. El comienzo del PPP fue muy similar en Ronda y Sierra de las Nieves, pero el final fue más tardío en esta última localidad. La mayor duración de su PPP podría explicarse por el método elegido para definirla (90%) y por su dinámica de acumulación de polen. Curvas de polen con picos menos acusados como las de Sierra de las Nieves hacen que el acúmulo de la integral polínica anual sea más progresivo día a día, por lo que el día en el que se alcanza el 95% de la integral polínica anual es más tardío, aumentando la duración del PPP. Por otro lado, y en ambas estaciones, en 2018 se retrasó el PPP casi un mes con respecto a los otros años de muestreo, al igual que ocurrió en *Quercus* durante este mismo año. El inicio del PPP de *Olea* está altamente influenciado por las temperaturas de febrero y marzo en Andalucía (Aguilera *et al.*, 2014; Galán *et al.*, 2001b, 2001a; Ruiz-Valenzuela & Aguilera, 2018). Tal como se ha mencionado anteriormente, las temperaturas medias durante estos meses fueron más bajas que en otros años (capítulos 4.1.1 y 4.1.2), por lo que los requerimientos térmicos necesarios para la floración de esta especie se alcanzaron más tarde, lo que desembocó en un inicio más tardío del PPP. Las fechas de inicio y fin fueron similares a las de localidades cercanas, aunque suelen ser fechas más tempranas que las detectadas en algunas localidades del norte y del interior de la Península Ibérica (ej.: Barcelona o Madrid) (Díaz de la Guardia *et al.*, 1999a; Galán *et al.*, 2001b; Ruiz-Valenzuela & Aguilera, 2018). La fecha del pico presentó grandes variaciones entre años de muestreo (Tabla 4.9), en gran parte influenciadas por el retraso fenológico del año 2018, aunque estas oscilaciones son frecuentes en la mayoría de localidades de muestreo (Díaz de la Guardia *et al.*, 1999a).

La integral polínica anual media en Ronda fue de $11\ 212 \pm 2045$ polen*día/m³, muy similar a la integral polínica anual media detectada en Málaga (Aira *et al.*, 2016). Otras provincias del interior de Andalucía con mayor abundancia de cultivos de olivo -como Córdoba, Jaén o Granada- tienen integrales polínicas anuales medias mucho mayores (Aira *et al.*, 2016). Sierra de las Nieves tuvo una integral polínica anual media de 5931 ± 37 polen*día/m³. Estos valores, aunque se alejan de la media de Málaga ciudad, son similares a los detectados durante algunos años de muestreo (Aira *et al.*, 2016; Díaz de la Guardia *et al.*, 1999a).

Tabla 4.9. Principales parámetros del Periodo Principal de Polinación (PPP) de *Olea* en Ronda y Sierra de las Nieves (S. Nieves) durante el periodo de estudio.

	Año	Inicio PPP	Fin PPP	Duración (días)	Día pico	Valor pico (granos de polen/m ³)	Integral PPP (Polen*día/m ³)	Integral anual (Polen*día/m ³)
Ronda	2017	19-abr	29-jun	72	14-may	1048	8094	8965
	2018	14-may	29-jun	47	18-jun	1010	10 615	11 710
	2019	26-abr	08-jun	44	29-may	896	11 767	12 963
S. Nieves	2018	12-may	11-jul	61	01-jun	453	5391	5957
	2019	25-abr	26-jun	63	15-may	458	5323	5905

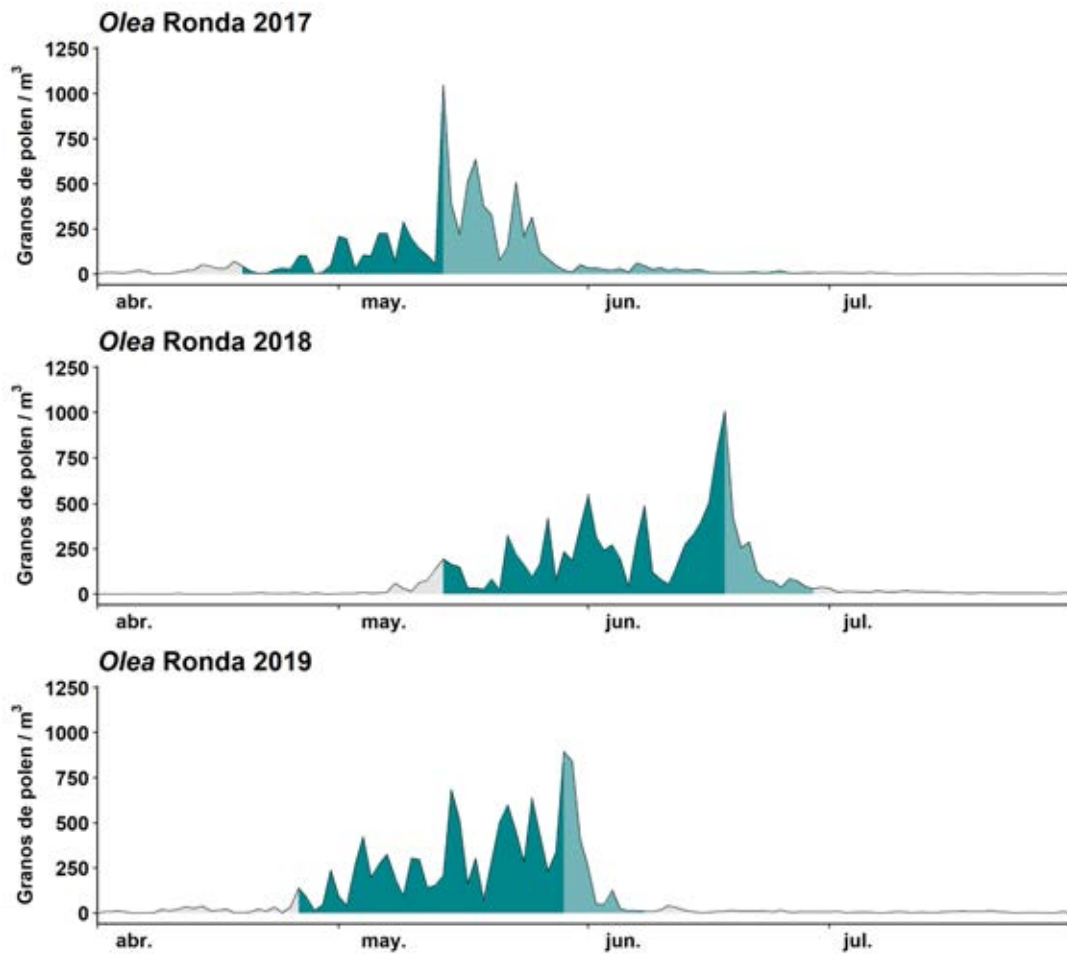


Figura 4.17. Concentraciones diarias de polen de *Olea* durante los periodos de polinación principal en Ronda. En turquesa oscuro, el prepico; en turquesa claro, el postpico.

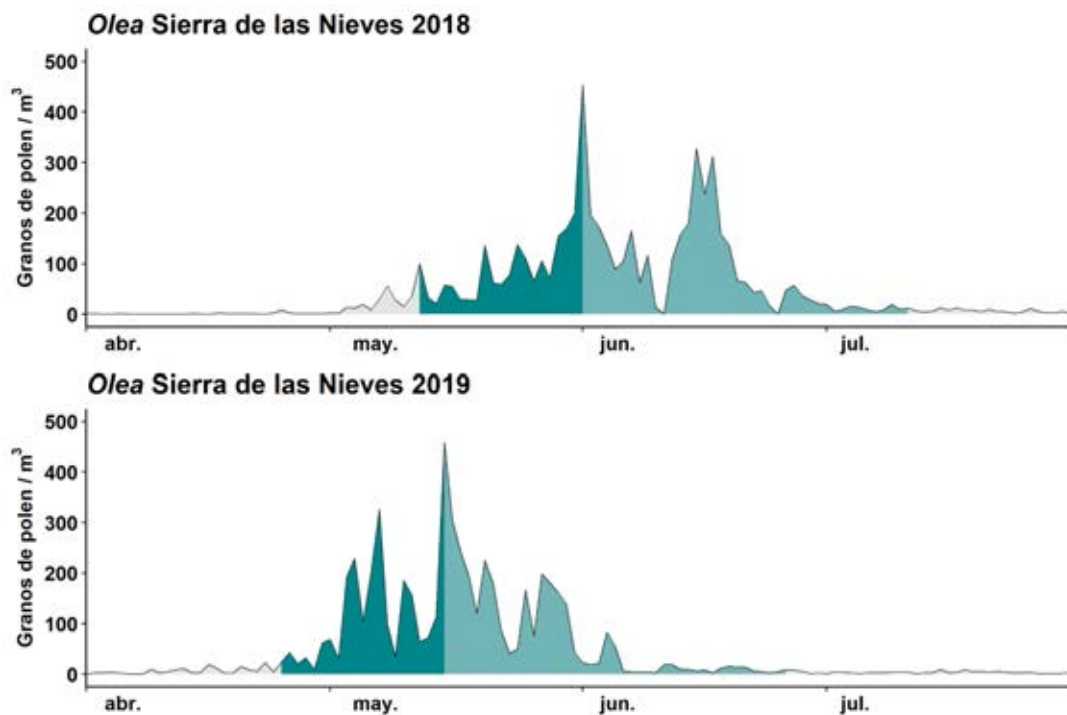


Figura 4.18. Concentraciones diarias de polen de *Olea* durante los periodos de polinación principal en Sierra de las Nieves. En turquesa oscuro, el prepico; en turquesa claro, el postpico.

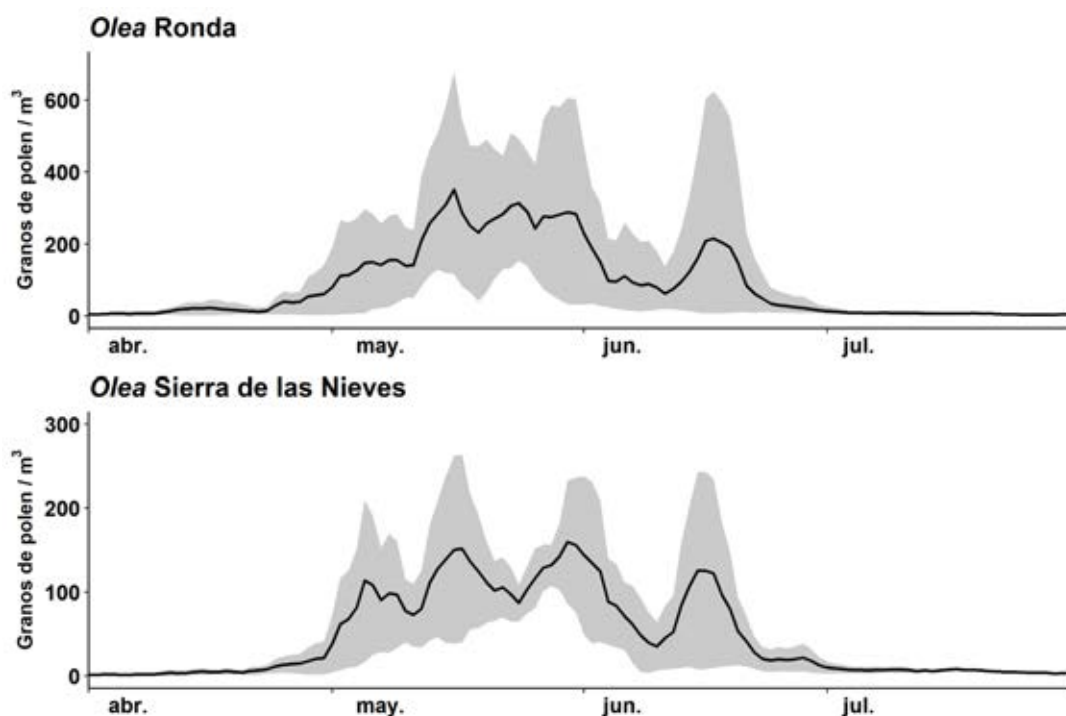


Figura 4.19. Concentraciones diarias promedio de medias móviles de 5 días de amplitud (línea negra), valores máximos (área gris) y mínimos (área blanca sobre la gris) diarios de medias móviles de *Olea* durante el periodo de estudio en Ronda y Sierra de las Nieves.

4.4.2.4. Tipo *Castanea*

Este tipo polínico está representado por una única especie en la zona de estudio: *Castanea sativa*.

El polen de tipo *Castanea* se detecta durante los meses de junio y julio en Ronda y Sierra de las Nieves. Ocasionalmente se detectan algunas concentraciones bajas a finales de mayo y durante agosto (figuras 4.9, 4.10, 4.20, 4.21 y 4.22, tablas 4.2-4.6). Presentó una temporalidad muy similar en ambas localidades, aunque en Sierra de las Nieves se detectaron valores de concentración superiores (Figura 4.22). La aparición del polen de *Castanea* en los dos lugares de muestreo fue bastante abrupta y repentina, alcanzando en pocos días concentraciones elevadas. Se ha observado también un fenómeno similar en Estepona (Iglesias *et al.*, 1999), una localidad cercana de la provincia de Málaga, lo que sugiere que su origen es una fuente de emisión cercana a estas tres localidades: los cultivos de castaño del Valle del Genal. La mayor cercanía de Sierra de las Nieves a las principales masas de cultivos explicaría las mayores concentraciones de polen de *Castanea* detectadas en esta localidad con respecto a Ronda.

Al igual que en tipos polínicos mencionados en apartados previos, en 2018 se observó un retraso del PPP (Tabla 4.10). Este retraso podría ser explicado por las temperaturas medias más frías que las del resto de años registradas durante la primera mitad de 2018 (capítulos 4.1.1 y 4.1.2) (Rodríguez-Rajo *et al.*, 2005b). La duración del PPP fue similar a la de otras localidades de España (Iglesias *et al.*, 1999; Rodríguez-Rajo *et al.*, 2005b) y las fechas de inicio y fin fueron muy similares en Ronda y Sierra de las Nieves. Estas fechas también coinciden con las de localidades cercanas y del resto de España (Astray *et al.*, 2016; Iglesias *et al.*, 1999; Rodríguez-Rajo *et al.*, 2005b). La integral polínica anual media en Ronda

fue de 2270 ± 1170 polen*día/m³ y de 4855 ± 1911 polen*día/m³ en Sierra de las Nieves, valores en ambos casos muy superiores a los valores medios registrados en otras localidades de Málaga y superiores al resto de la Península Ibérica (Astray *et al.*, 2016; Iglesias *et al.*, 1999; Jato *et al.*, 2001; Ribeiro & Abreu, 2014; Rodríguez-Rajo *et al.*, 2005b). Los valores del pico de polinación (valores máximos diarios) también fueron mucho más elevados que los de otras localidades. En este tipo polínico la fecha pico presentó menores variaciones entre años que en el resto (Tabla 4.10), lo que también ocurre en otras localidades (Jato *et al.*, 2001).

Tabla 4.10. Principales parámetros del Periodo Principal de Polinación (PPP) de *Castanea* en Ronda y Sierra de las Nieves (S. Nieves) durante el periodo de estudio.

	Año	Inicio PPP	Fin PPP	Duración (días)	Día pico	Valor pico (granos de polen/m ³)	Integral PPP (Polen*día/m ³)	Integral anual (Polen*día/m ³)
Ronda	2017	08-jun	25-jun	18	11-jun	314	2507	2721
	2018	20-jun	01-ago	43	07-jul	197	853	941
	2019	12-jun	20-jul	39	22-jun	434	2894	3147
S. Nieves	2018	24-jun	14-jul	21	26-jun	541	3304	3503
	2019	14-jun	09-jul	26	26-jun	713	5688	6206

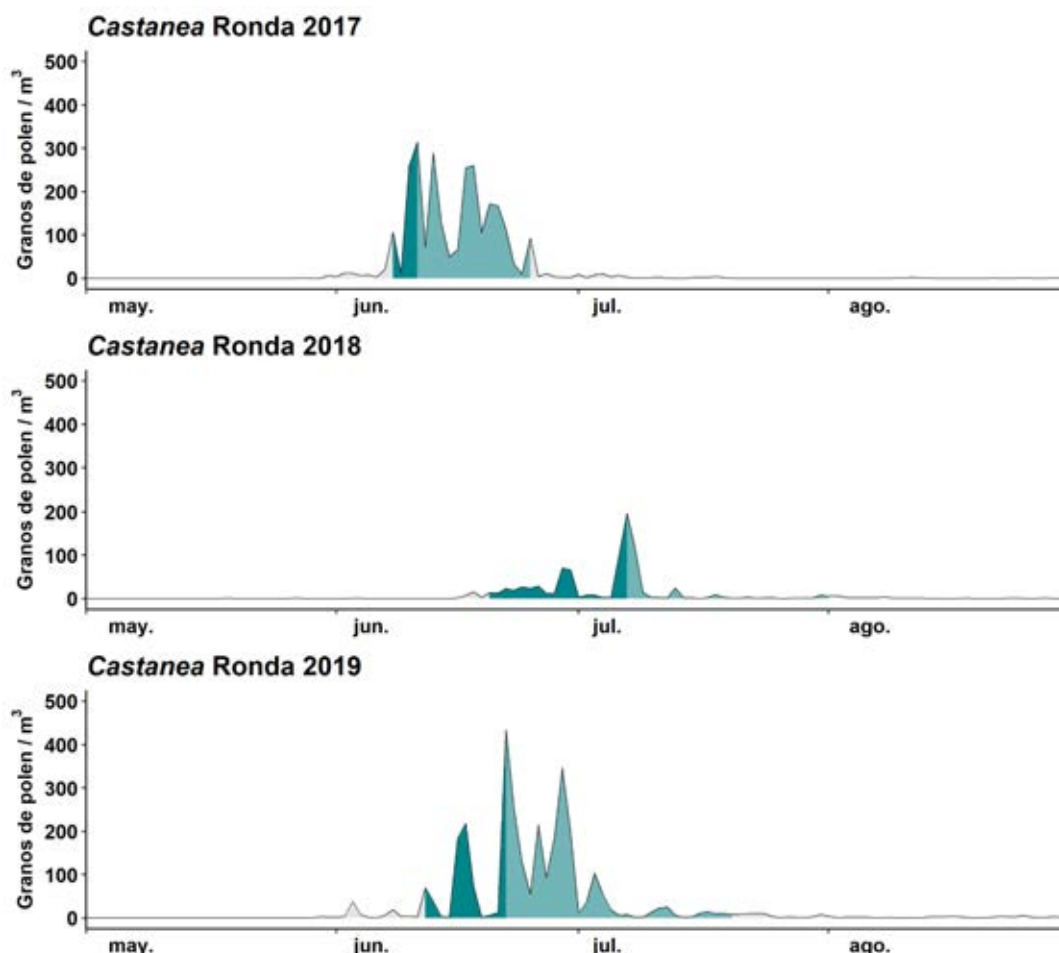


Figura 4.20. Concentraciones diarias de polen de *Castanea* durante los periodos de polinación principal en Ronda. En turquesa oscuro, el prepico; en turquesa claro, el postpico.

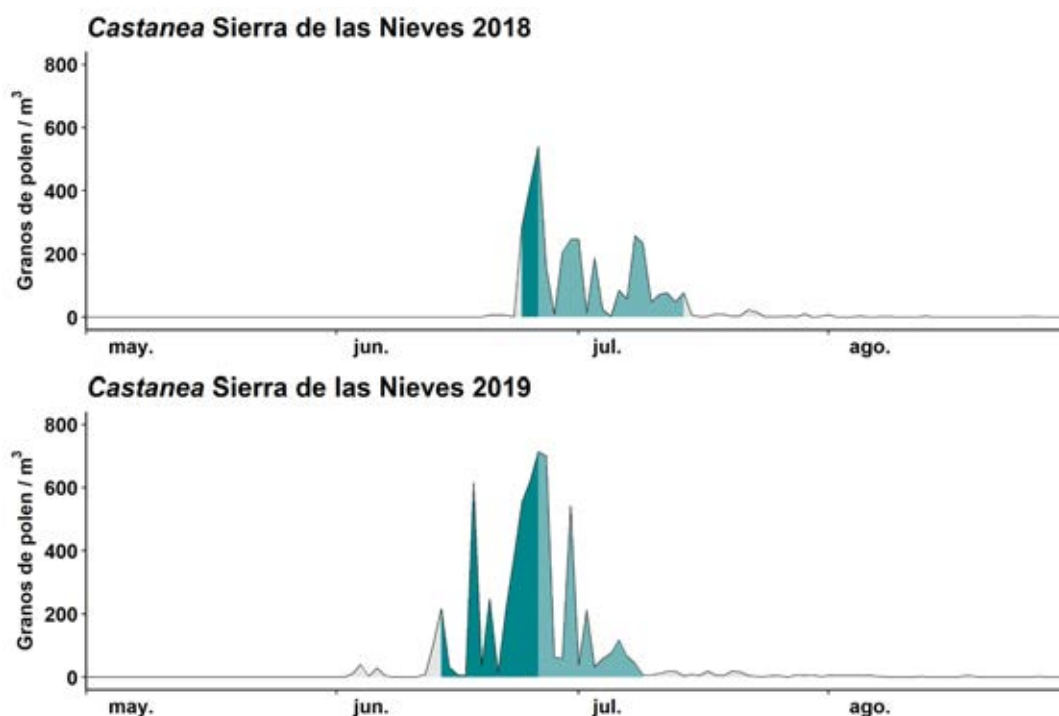


Figura 4.21. Concentraciones diarias de polen de *Castanea* durante los periodos de polinación principal en Sierra de las Nieves. En turquesa oscuro, el prepico; en turquesa claro, el postpico.

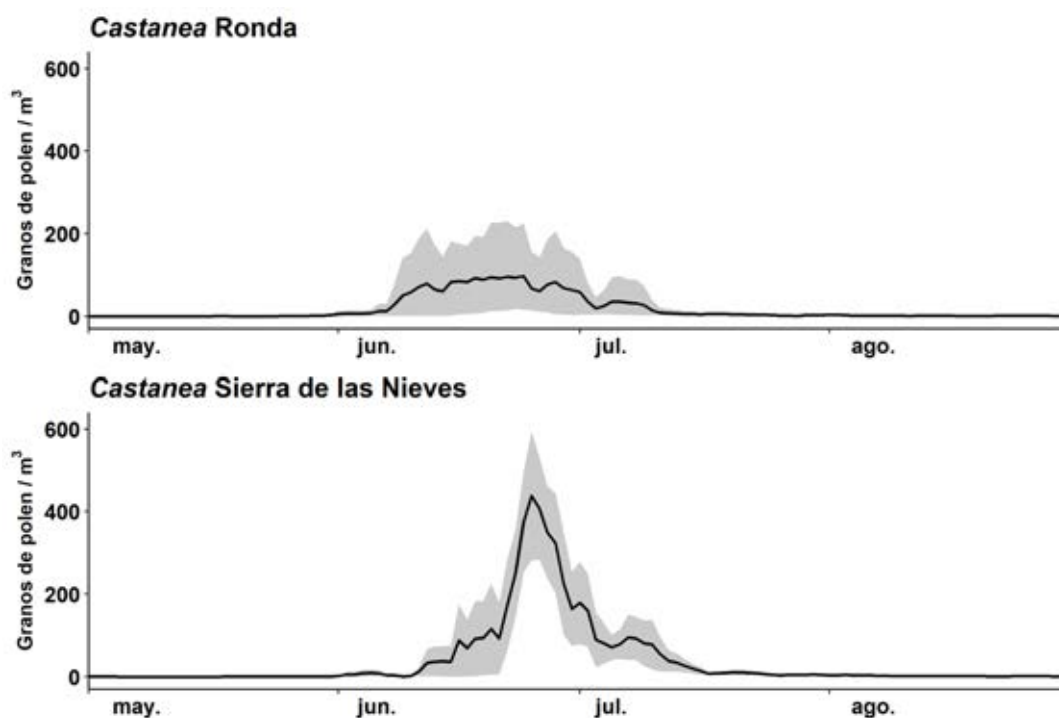


Figura 4.22. Concentraciones diarias promedio de medias móviles de 5 días de amplitud (línea negra), valores máximos (área gris) y mínimos (área blanca sobre la gris) diarios de medias móviles de *Castanea* durante el periodo de estudio en Ronda y Sierra de las Nieves.

4.4.2.5. Tipo Urticaceae

Este tipo polínico se encuentra representado en la zona de estudio principalmente por las siguientes especies: *Parietaria judaica* L., *Parietaria lusitanica* L., *Parietaria mauritanica* Durieu, *Urtica dioica* L., *Urtica membranacea* Poir. ex Savigny, y *Urtica urens* L.

El polen de tipo Urticaceae se detecta en Ronda y Sierra de las Nieves durante todo el año (figuras 4.9, 4.10, 4.23, 4.24 y 4.25, tablas 4.2-4.6), aunque con mayor intensidad durante los meses de febrero a junio. Su PPP también es muy extenso (Tabla 4.11). Los periodos de floración de las distintas especies que integran este tipo polínico tienden a solaparse en el tiempo, y hay especies que incluso presentan varias floraciones a lo largo del año en la provincia de Málaga (Belmonte *et al.*, 1999a; Blanca *et al.*, 2011; Trigo *et al.*, 1996). Esto impide distinguir una única curva de polen a lo largo del año, lo que resulta en una curva general de concentraciones polínicas más extensa y menos acusada (Figura 4.25). Este solapamiento de curvas se observa con mayor claridad en 2019. En general, los niveles de concentración de polen de Urticaceae son mayores en Ronda que en Sierra de las Nieves (figuras 4.23 y 4.24).

La gran cantidad de polen registrado fuera de su PPP y durante todo el año en ambas estaciones dificulta el establecimiento de su fecha de inicio y fin por los métodos de porcentaje de la integral polínica. Por este motivo, se utilizó el método de modelo logístico para definir el PPP descrito en la metodología (Capítulo 3.4.4). En las dos localidades muestreadas se detectó un retraso en el PPP de 2018 con respecto a los otros años de muestreo. Este retraso fue mayor en Sierra de las Nieves, aunque esto podría deberse a que faltaron los primeros 24 días del año en los que eran esperables concentraciones bajas-moderadas. Esto también podría haber influido en la menor duración del PPP en este año. Otros autores han establecido una fuerte relación entre las temperaturas y la floración de este taxon (Recio *et al.*, 2009; Trigo *et al.*, 1996), por lo que el retraso generalizado del PPP en 2018 podría deberse, de nuevo, a las bajas temperaturas medias detectadas durante la primera mitad de 2018 (capítulos 4.1.1 y 4.1.2). La menor duración del PPP en 2017 podría deberse a un aumento de las temperaturas durante los meses de junio y julio. Durante 2019 las fechas de inicio y fin en ambas localidades fueron similares, también fueron parecidas a las de otras localidades cercanas como Málaga, Córdoba o Granada (Belmonte *et al.*, 1999a; Trigo *et al.*, 1996), aunque en algunos casos como Jaén, el PPP es ligeramente más amplio, lo que puede deberse al método escogido para definirlo (Ruiz-Valenzuela & Aguilera, 2018).

Las especies que integran este tipo polínico son predominantemente nitrófilas y ruderales (Blanca *et al.*, 2011; Trigo *et al.*, 1996), por lo que son más abundantes en ambientes urbanos o con elevada influencia antrópica. Por este motivo se registró una mayor integral polínica anual media en Ronda (1990 ± 308 polen*día/m³) que en Sierra de las Nieves (860 ± 41 polen*día/m³). La integral anual media de Sierra de las Nieves fue inferior a la de las principales ciudades del sur de España. Por el contrario, la de Ronda fue similar a la de Málaga capital y otras ciudades cercanas (Aira *et al.*, 2016; Belmonte *et al.*, 1999a; De Linares *et al.*, 2019; Ruiz-Valenzuela & Aguilera, 2018; Trigo *et al.*, 1996). Durante 2019, en Ronda se registró una mayor integral polínica anual que en años anteriores, lo que podría explicarse por la mayor abundancia de precipitaciones durante el otoño anterior y por mayores temperaturas medias durante el comienzo del año (Capítulo 4.1.1). De la misma forma, la menor integral anual de 2017 podría explicarse por las temperaturas más bajas y menores precipitaciones registradas durante la primavera con respecto a años previos (Aira *et al.*, 2016; Galán *et al.*, 2000; Recio *et al.*, 2009; Trigo *et al.*, 1996). La fecha del día pico osciló considerablemente en el periodo de estudio, en gran medida debido al retraso fenológico de 2018. Los valores de concentración máxima diaria fueron mayores en Ronda que en Sierra

de las Nieves. En Ronda alcanzaron el mismo rango de los observados en ciudades cercanas, mientras que en Sierra de las Nieves fueron ligeramente inferiores (Belmonte *et al.*, 1999a; De Linares *et al.*, 2019; Trigo *et al.*, 1996).

Tabla 4.11. Principales parámetros del Periodo Principal de Polinación (PPP) de Urticaceae en Ronda y Sierra de las Nieves (S. Nieves) durante el periodo de estudio.

	Año	Inicio PPP	Fin PPP	Duración (días)	Día pico	Valor pico (granos de polen/m ³)	Integral PPP (Polen*día/m ³)	Integral anual (Polen*día/m ³)
Ronda	2017	12-feb	21-may	99	31-mar	66	1340	1781
	2018	14-feb	24-jun	131	10-may	39	1429	1846
	2019	31-ene	14-jun	135	12-mar	63	1948	2344
S. Nieves	2018	21-feb	13-jun	113	27-abr	28	584	831
	2019	23-ene	11-jun	162	12-mar	35	733	889

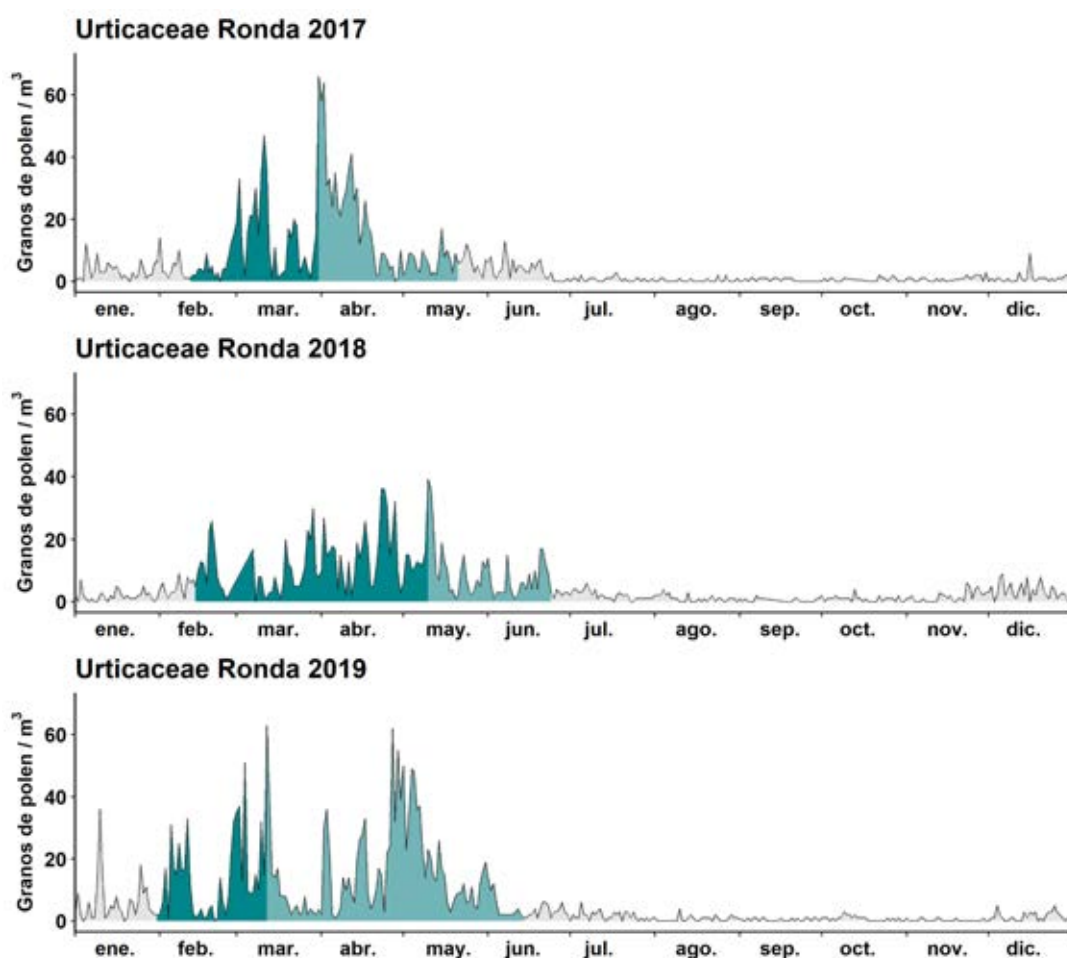


Figura 4.23. Concentraciones diarias de polen de Urticaceae durante los periodos de polinación principal en Ronda. En turquesa oscuro, el prepico; en turquesa claro, el postpico.

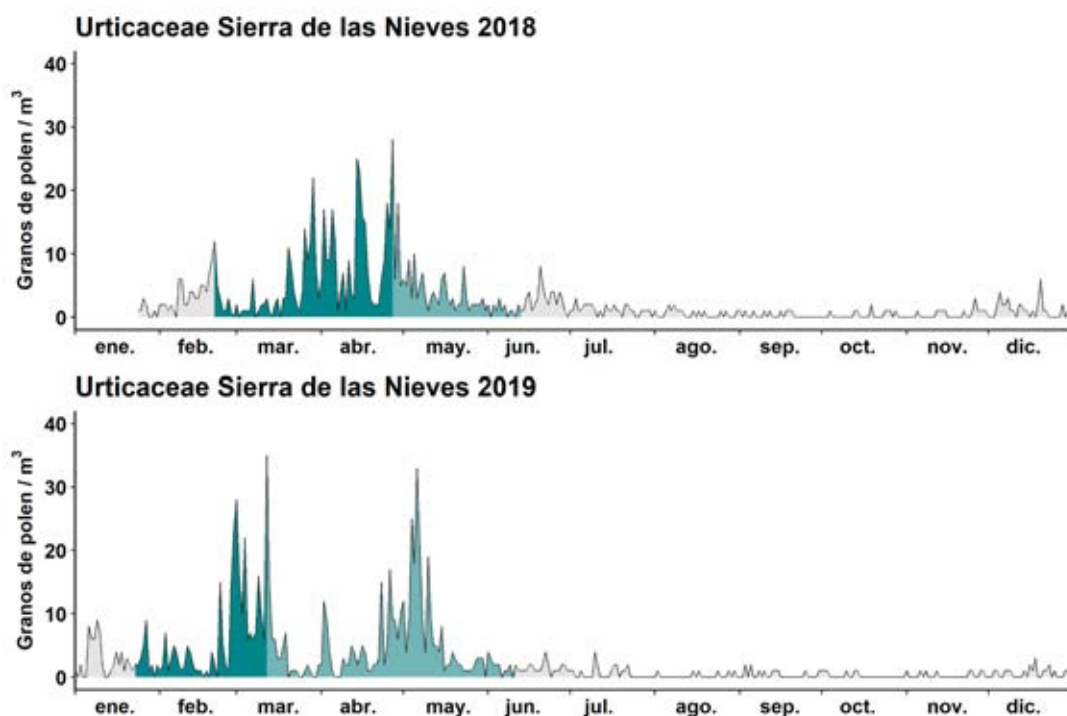


Figura 4.24. Concentraciones diarias de polen de Urticaceae durante los periodos de polinación principal en Sierra de las Nieves. En turquesa oscuro, el prepico; en turquesa claro, el postpico.

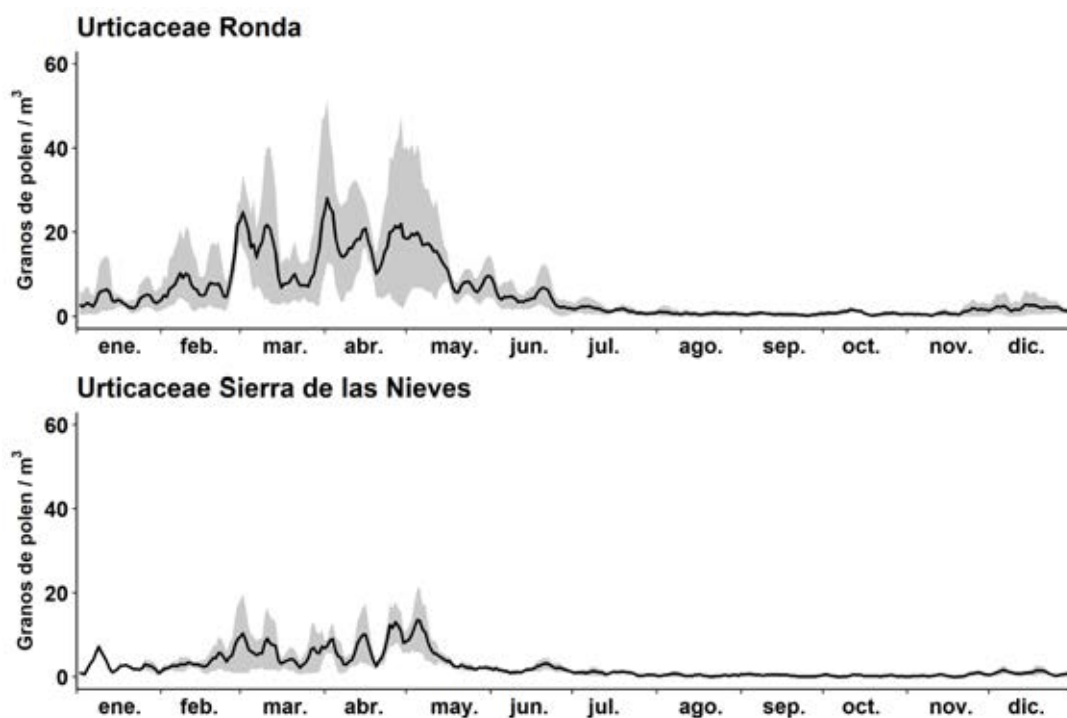


Figura 4.25. Concentraciones diarias promedio de medias móviles de 5 días de amplitud (línea negra), valores máximos (área gris) y mínimos (área blanca sobre la gris) diarios de medias móviles de Urticaceae durante el periodo de estudio en Ronda y Sierra de las Nieves.

4.4.2.6. Tipo Poaceae

En la zona de estudio hay una gran diversidad de especies pertenecientes a esta familia que contribuyen al polen detectado. Las más frecuentes y dominantes son: *Aegilops* spp. L., *Agrostis* spp. L., *Aira* spp. L., *Brachypodium dystachyon* (L.) P. Beauv., *Brachypodium retusum* (Pers.) P. Beauv., *Bromus* spp. DC., *Dactylis*

glomerata L. (s.l.), *Festuca* spp. L., *Helictotrichon filifolium* subsp. *arundanum* Romero Zarco, *Melica minuta* L., *Poa bulbosa* L., *Stipa capensis* Thunb., *Stipa offneri* Breistr., *Stipa tenacissima* L. y *Vulpia* spp. C.C. Gmel. (comunicación personal de Federico Casimiro Soliguer).

El tipo polínico Poaceae se detecta en Ronda y Sierra de las Nieves durante los meses de mayo y junio principalmente (figuras 4.9, 4.10, 4.26, 4.27 y 4.28, tablas 4.2-4.6). A pesar de ser un tipo polínico integrado por numerosas especies, la extensión temporal de su presencia en la atmósfera de las localidades muestreadas es más reducida que en el caso del tipo Urticaceae (figuras 4.25 y 4.28), lo que puede deberse a que la floración de estas especies es menos extensa que las de Urticaceae (Blanca *et al.*, 2011). La presencia de polen de Poaceae fuera de su PPP es muy baja. En general se detectan concentraciones más elevadas de este tipo polínico en Ronda que en Sierra de las Nieves. Durante 2019 se registraron concentraciones más elevadas de polen de Poaceae en ambas estaciones.

El PPP de Poaceae, al igual que en todos los taxones anteriores, fue más tardío durante 2018 en ambas localidades de muestreo (Tabla 4.12). La duración del PPP en Ronda durante 2017 fue muy superior a la del resto de años de muestreo debido a un final más tardío. Su integral polínica fue menor que el resto de los años, con picos de concentración más bajos, por lo que el porcentaje del polen anual estuvo más repartido en el tiempo y prolongó el final del PPP. La menor integral polínica de 2017 podría deberse a las menores precipitaciones registradas durante los meses de primavera, sumado a las altas temperaturas de este periodo. Otros autores han establecido una fuerte relación entre las temperaturas previas a los meses de floración de especies de Poaceae y las concentraciones de polen registradas. Mayores temperaturas y lluvias previas producen un adelanto del inicio del PPP, mientras que menores temperaturas y periodos de sequía lo retrasan (El-Moslimany, 2019; García-Mozo, 2017; García-Mozo *et al.*, 2009a, 2010b; Recio *et al.*, 2010). Aunque la lluvia fue muy abundante durante el invierno y comienzo de primavera de 2018, las menores temperaturas registradas podrían haber sido las responsables de este ligero retraso en el inicio del PPP. El PPP tuvo una temporalidad similar a localidades cercanas, aunque estuvo un poco adelantado con respecto a localidades del norte de la Península Ibérica (Jato *et al.*, 2009; Recio *et al.*, 2010). El polen que se detectó al final del PPP alcanzó mayores concentraciones en Sierra de las Nieves, lo que puede deberse a que dicho polen es liberado por las especies de floración más tardía que se encuentran en la alta montaña, más cerca del punto de muestreo de la Sierra de las Nieves (Figura 4.27).

La integral polínica anual media de Ronda fue de 1835 ± 787 polen*día/m³, y la de Sierra de las Nieves de 2017 ± 42 polen*día/m³, por lo que tomaron rangos similares en ambas localidades. Los valores de pico de concentración también tuvieron valores y fechas similares (Tabla 4.12). Las fechas de las máximas concentraciones diarias no variaron tanto entre años como en otros tipos polínicos. Los valores de estas integrales están dentro del rango normal de otros lugares cercanos del sur de España, aunque son inferiores a los registrados en el norte del país (Aira *et al.*, 2016; Fernández-González *et al.*, 1999; Jato *et al.*, 2009; Recio *et al.*, 2010).

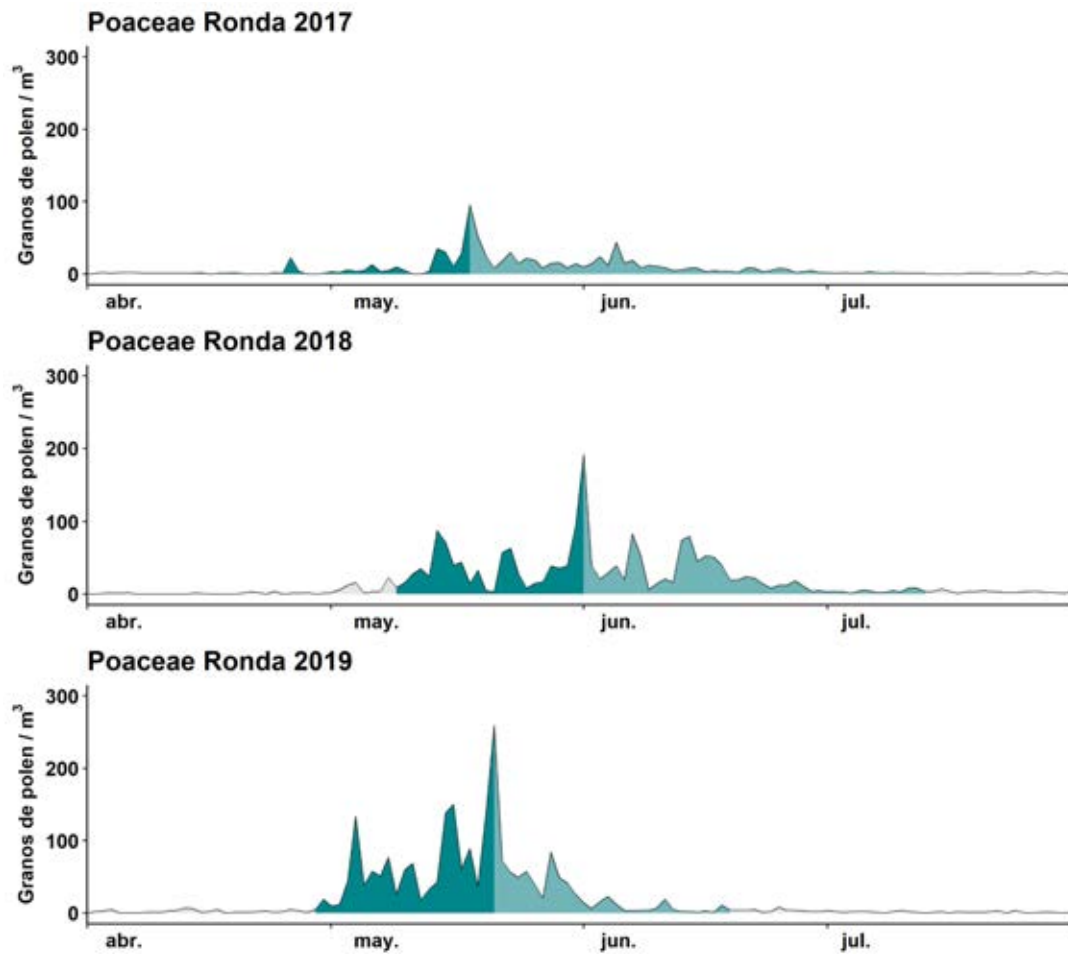


Figura 4.26. Concentraciones diarias de polen de Poaceae durante los periodos de polinación principal en Ronda. En turquesa oscuro, el prepico; en turquesa claro, el postpico.

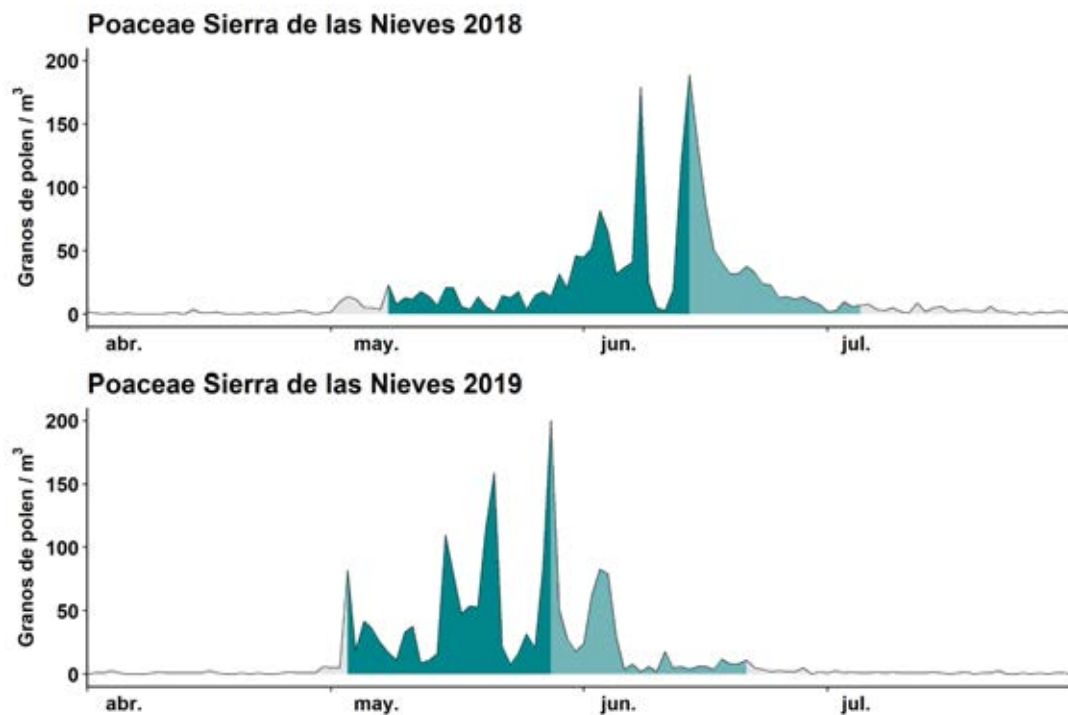


Figura 4.27. Concentraciones diarias de polen de Poaceae durante los periodos de polinación principal en Sierra de las Nieves. En turquesa oscuro, el prepico; en turquesa claro, el postpico.

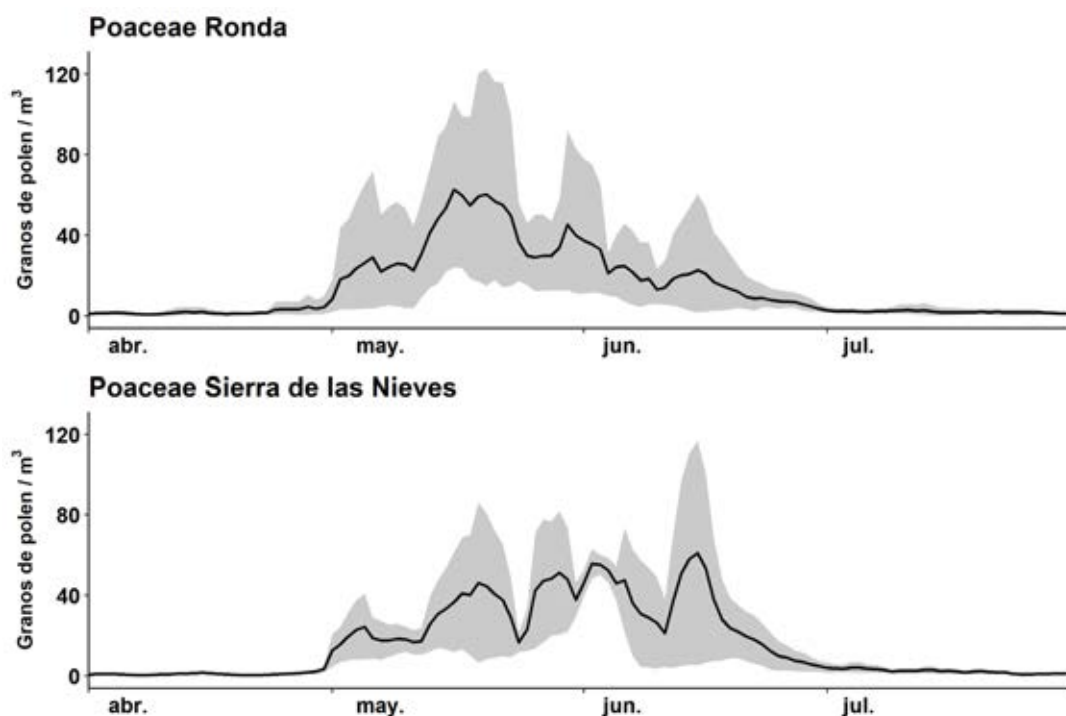


Figura 4.28. Concentraciones diarias promedio de medias móviles de 5 días de amplitud (línea negra), valores máximos (área gris) y mínimos (área blanca sobre la gris) diarios de medias móviles de Poaceae durante el periodo de estudio en Ronda y Sierra de las Nieves.

Tabla 4.12. Principales parámetros del Periodo Principal de Polinación (PPP) de Poaceae en Ronda y Sierra de las Nieves (S. Nieves) durante el periodo de estudio.

	Año	Inicio PPP	Fin PPP	Duración (días)	Día pico	Valor pico (granos de polen/m ³)	Integral PPP (Polen*día/m ³)	Integral anual (Polen*día/m ³)
Ronda	2017	14-abr	26-jul	104	18-may	95	854	946
	2018	09-may	13-jul	66	01-jun	191	1905	2115
	2019	29-abr	19-jun	52	21-may	259	2205	2444
S. Nieves	2018	08-may	05-jul	59	14-jun	189	1857	2047
	2019	03-may	21-jun	50	28-may	200	1826	1987

4.4.2.7. Tipo *Plantago*

Este tipo polínico se encuentra representado en la zona de estudio principalmente por las siguientes especies: *Plantago afra* L., *Plantago coronopus* L., *Plantago lagopus* L. y *Plantago major* L.

El polen de tipo *Plantago* se detecta en Ronda y Sierra de las Nieves durante los meses de abril a junio principalmente (figuras 4.9, 4.10, 4.29, 4.30 y 4.31, tablas 4.2-4.6), aunque con una incidencia notablemente mayor en el mes de mayo. Fuera de este periodo, las concentraciones son muy bajas o nulas. Las concentraciones alcanzadas y su temporalidad fueron similares en Ronda y Sierra de las Nieves (Figura 4.31).

El PPP tuvo una duración muy oscilante de un año a otro, coincidiendo con lo que han reportado previamente otros autores (Tormo-Molina *et al.*, 2001) (Tabla 4.13). Aunque se mantuvo la tendencia en ambas localidades (en ambas crece o decrece en los mismos años), la duración fue ligeramente superior en Sierra de

las Nieves. La temporalidad y duración del PPP están relacionadas estrechamente con las temperaturas. Temperaturas más elevadas junto con disponibilidad hídrica por lluvias previas favorecen una mayor germinación de semillas y, al ser en su mayoría terófitos, implica una mayor biomasa vegetal y, por lo tanto, una floración más temprana e intensa, que conlleva a un comienzo del PPP más temprano y una integral polínica más elevada (González-Parrado *et al.*, 2014; Recio *et al.*, 1997). Así pues, las abundantes precipitaciones registradas a comienzos de 2018 serían las responsables de su mayor integral polínica, mientras que las temperaturas más bajas en el periodo de floración serían las responsables del retraso en el comienzo de su PPP. La temporalidad del PPP fue similar al de otras localidades cercanas como Málaga, Córdoba, Estepona o Jaén, aunque en localidades del norte de la Península Ibérica se aprecia un retraso (Gutiérrez *et al.*, 1999; Iglesias-Otero *et al.*, 2015; Recio *et al.*, 1997, 2006; Ruiz-Valenzuela & Aguilera, 2018). La fecha del pico de polinación también varió mucho de un año a otro por el mismo motivo.

La integral polínica anual media de *Plantago* en Ronda fue de 942 ± 63 polen*día/m³, y en Sierra de las Nieves de 562 ± 60 polen*día/m³ (Tabla 4.13). Las especies de *Plantago* citadas anteriormente son predominantemente nitrófilas, propias de lugares con alta influencia antrópica (como las zonas de descampados o afueras de ciudades) (Blanca *et al.*, 2011; Fuentes Antón *et al.*, 2020; González-Parrado *et al.*, 2014; Recio *et al.*, 1997), lo que justifica su mayor abundancia y, por lo tanto, las mayores concentraciones de su polen detectadas en Ronda. Por el mismo motivo, en ambos casos la integral anual media fue inferior a la de Málaga (el captador está a las afueras de la ciudad). Sin embargo, tanto Ronda como Sierra de las Nieves tienen integrales polínicas anuales similares a algunas de las detectadas en otras ciudades de España (Aira *et al.*, 2016; Fuentes Antón *et al.*, 2020; Gutiérrez *et al.*, 1999; Maya-Manzano *et al.*, 2017; Recio *et al.*, 1997; Ruiz-Valenzuela & Aguilera, 2018).

Tabla 4.13. Principales parámetros del Periodo Principal de Polinación (PPP) de *Plantago* en Ronda y Sierra de las Nieves (S. Nieves) durante el periodo de estudio.

	Año	Inicio PPP	Fin PPP	Duración (días)	Día pico	Valor pico (granos de polen/m ³)	Integral PPP (Polen*día/m ³)	Integral anual (Polen*día/m ³)
Ronda	2017	31-mar	29-jul	121	15-abr	28	797	876
	2018	23-abr	28-jun	67	14-may	49	911	1001
	2019	30-mar	03-jul	96	04-may	38	857	949
S. Nieves	2018	23-abr	05-jul	74	03-may	32	544	604
	2019	04-abr	02-ago	121	05-may	33	469	519

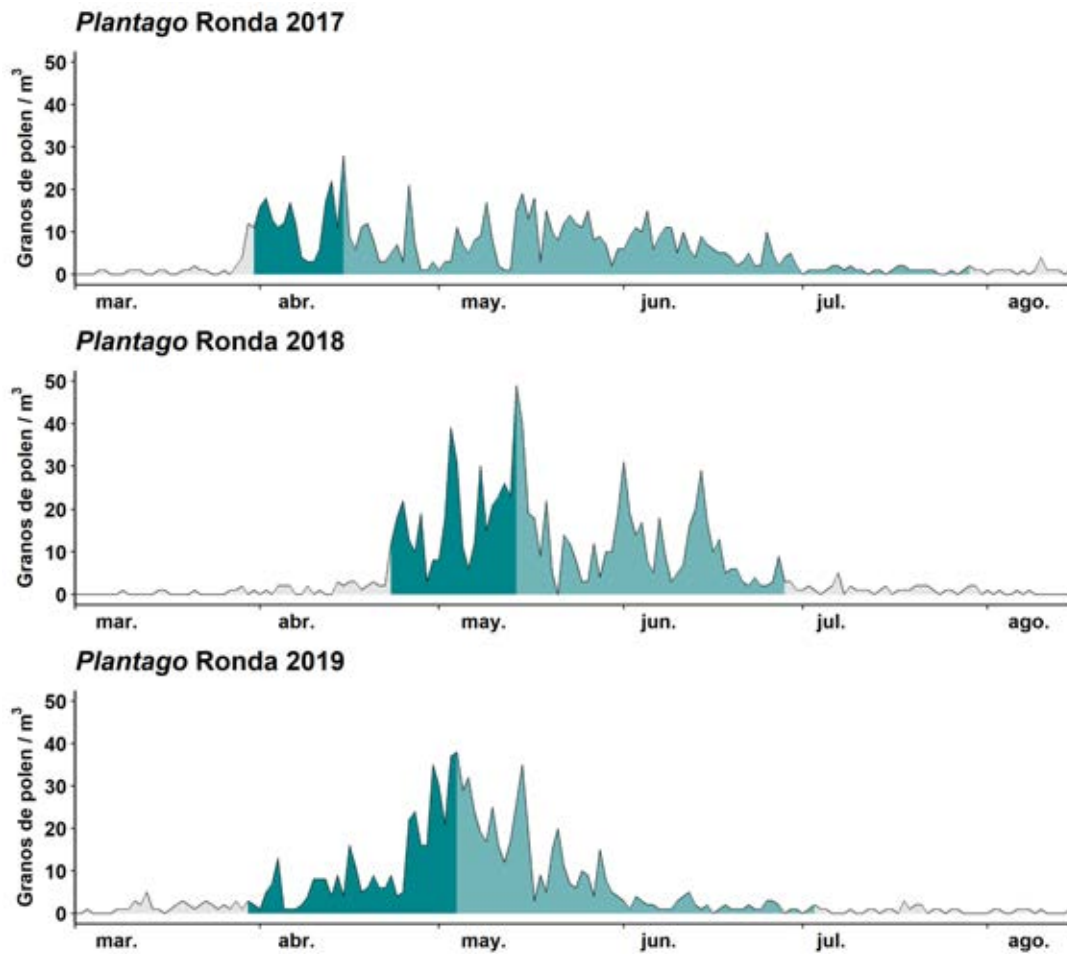


Figura 4.29. Concentraciones diarias de polen de *Plantago* durante los periodos de polinación principal en Ronda. En turquesa oscuro, el prepico; en turquesa claro, el postpico.

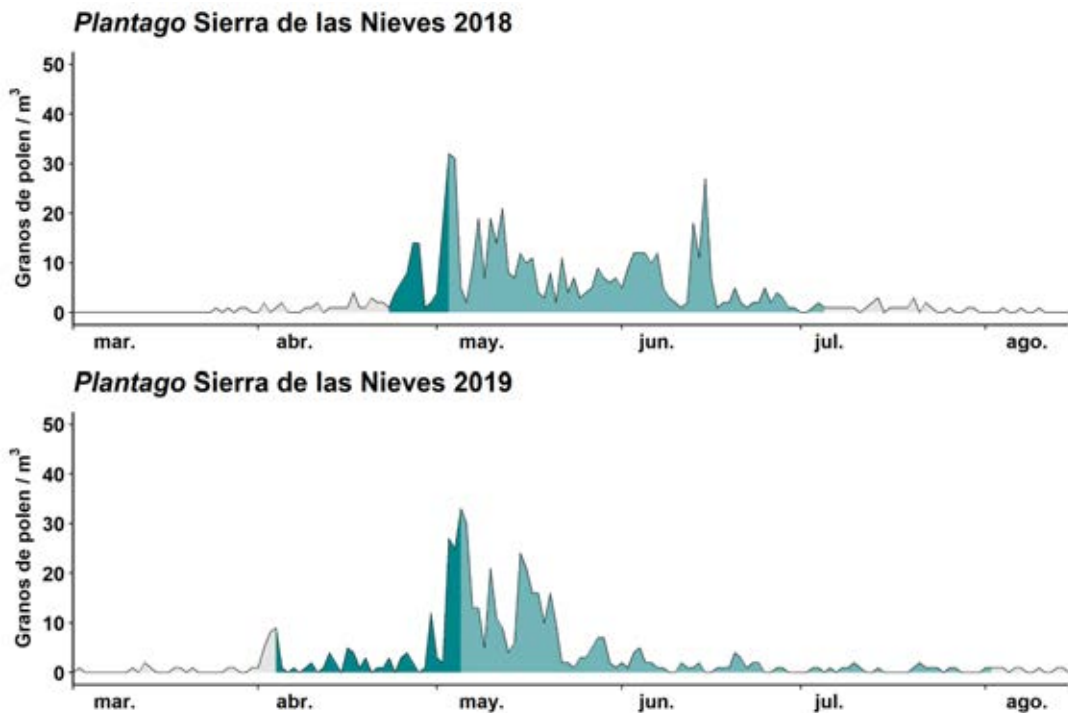


Figura 4.30. Concentraciones diarias de polen de *Plantago* durante los periodos de polinación principal en Sierra de las Nieves. En turquesa oscuro, el prepico; en turquesa claro, el postpico.

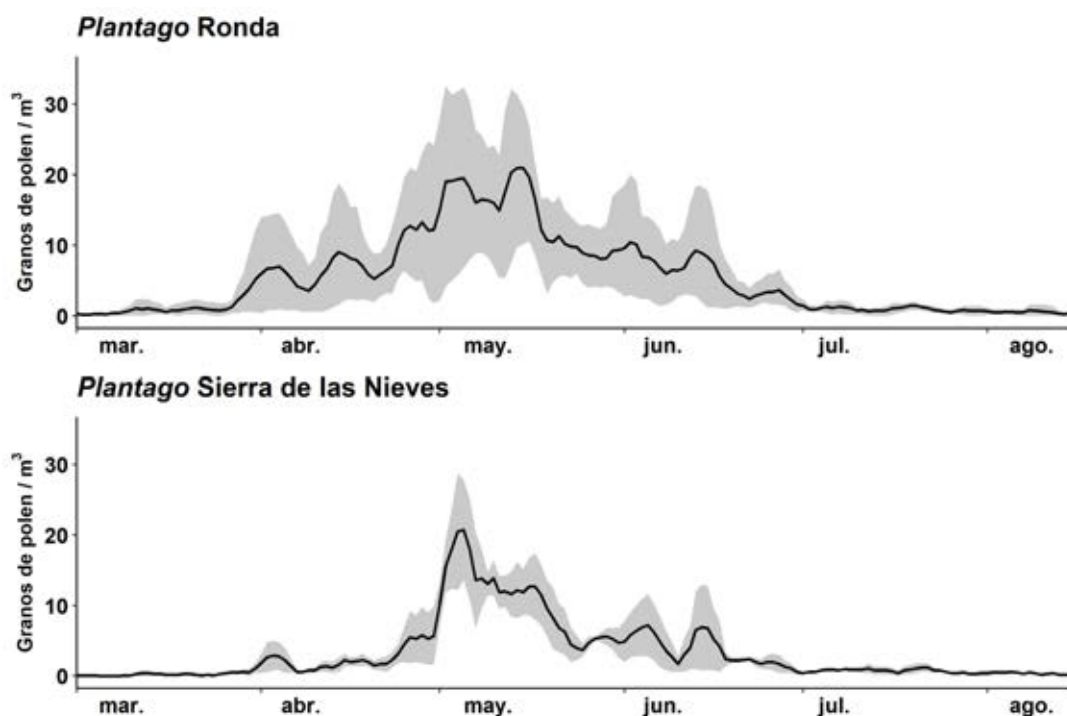


Figura 4.31. Concentraciones diarias promedio de medias móviles de 5 días de amplitud (línea negra), valores máximos (área gris) y mínimos (área blanca sobre la gris) diarios de medias móviles de *Plantago* durante el periodo de estudio en Ronda y Sierra de las Nieves.

4.4.2.8. Tipo *Pinus*

Este tipo polínico se encuentra representado en la zona de estudio por las siguientes especies: *Abies pinsapo*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*; y en menor medida: *Pinus pinea*, *Pinus nigra* subsp. *salzmanii* (Dunal) Franco y *Pinus sylvestris*. En Ronda ciudad hay además *Cedrus atlantica*, cuyo polen también se agrupa dentro del tipo *Pinus*. Hay también algunos ejemplares de esta especie de cedro y de *Pinus radiata* dispersos en algunas zonas antropizadas del Parque Natural Sierra de las Nieves, como bordes de caminos hacia áreas recreativas o zonas de acampada.

El polen de tipo *Pinus* se detecta en la atmósfera de Ronda y Sierra de las nieves principalmente durante los meses de febrero a junio (figuras 4.9, 4.10, 4.32, 4.33 y 4.34, tablas 4.2-4.6). Durante este periodo se distinguieron varios picos de concentración que se corresponden con la floración de las distintas especies y poblaciones en distintos pisos bioclimáticos (Capítulo 4.3). Son coincidentes en ambas localidades, lo que apunta a un origen común (Figura 4.34). No obstante, las diferencias en la temporalidad de la fenofase de floración de las especies que abarca este tipo polínico no son suficientes para determinar qué pico corresponde a qué especie o qué población. 2019 fue el año con mayores concentraciones de polen de *Pinus* en Ronda, mientras que en Sierra de las Nieves lo fue 2018.

Aunque las variaciones interanuales de fechas de inicio y fin fueron mayores en este tipo polínico que en otros comentados anteriormente, 2017 y 2019 presentaron un patrón similar en Ronda (Tabla 4.14). En 2018 se observó de nuevo el retraso causado por las temperaturas más frías del comienzo del año (capítulos 4.1.1 y 4.1.2), tal como han sugerido otros autores en trabajos previos (Velasco-Jiménez *et al.*, 2018). La duración del PPP fue similar en todos los años de muestreo -aunque ligeramente superior en Sierra de las Nieves-, y en ambas

localidades se encuentra muy cercana a la media del sur de España (107 días) (Velasco-Jiménez *et al.*, 2018). La fecha del pico varió sustancialmente entre localidades (Tabla 4.14), lo que podría deberse a que las poblaciones que más contribuyen al polen detectado en cada localidad son distintas y presentan diferencias en fenología de floración. El valor del pico tomó rangos similares en ambas localidades.

La integral polínica anual media de Ronda (1016 ± 508 polen*día/m³) fue superior a la de Sierra de las Nieves (950 ± 19 polen*día/m³), al contrario de lo que cabría esperar por la proximidad de los pinsapares a esta última localidad. Esto podría explicarse por la presencia de pinos, cedros y pinsapos ornamentales en las inmediaciones más cercanas del captador de Ronda que podrían influir en la detección de altas concentraciones de este tipo polínico. También se podría especular sobre la menor producción de polen de los pinsapos de avanzada edad. Algunos estudios han demostrado que los individuos de mayor edad tienen tasas de crecimiento más lentas que los jóvenes, lo que podría verse reflejado en la productividad floral de los mismos y, dado que los pinsapares de la Sierra de las Nieves están muy envejecidos (ej.: los de la Cañada del Cuerno son los más viejos del mundo), cabría esperar que contribuyesen menos al polen detectado que otras especies de Pinaceae que abundan en las inmediaciones de ambos captadores (Arista, 1995). Por lo tanto, estudiar la producción de polen en función de la edad en *A. pinsapo* sería muy interesante para investigaciones futuras.

La integral anual de Ronda presentó grandes variaciones en los años muestreados. Se esperan variaciones similares en Sierra de las Nieves con el aumento de los años de muestreo. Esto podría explicarse por la alternancia en la intensidad de floración que presenta *Abies pinsapo* cada uno o dos años: un año la intensidad de floración es muy elevada y se reduce mucho el crecimiento vegetativo, lo que disminuye la formación de yemas florales para el año siguiente (Arista & Talavera, 1994, 1995; Pérez-Latorre & Cabezudo, 2012). Las integrales polínicas anuales medias de Sierra de las Nieves y Ronda fueron similares a las de Málaga capital y otras ciudades del sur de España (Velasco-Jiménez *et al.*, 2018).

Tabla 4.14. Principales parámetros del Periodo Principal de Polinación (PPP) de *Pinus* en Ronda y Sierra de las Nieves (S. Nieves) durante el periodo de estudio.

	Año	Inicio PPP	Fin PPP	Duración (días)	Día pico	Valor pico (granos de polen/m ³)	Integral PPP (Polen*día/m ³)	Integral anual (Polen*día/m ³)
Ronda	2017	08-mar	12-jun	97	15-mar	37	454	503
	2018	03-abr	03-jul	92	17-abr	64	925	1025
	2019	21-feb	30-may	99	01-may	97	1380	1519
S. Nieves	2018	01-abr	19-jul	110	23-may	97	849	936
	2019	20-feb	12-jun	113	16-jun	48	876	963

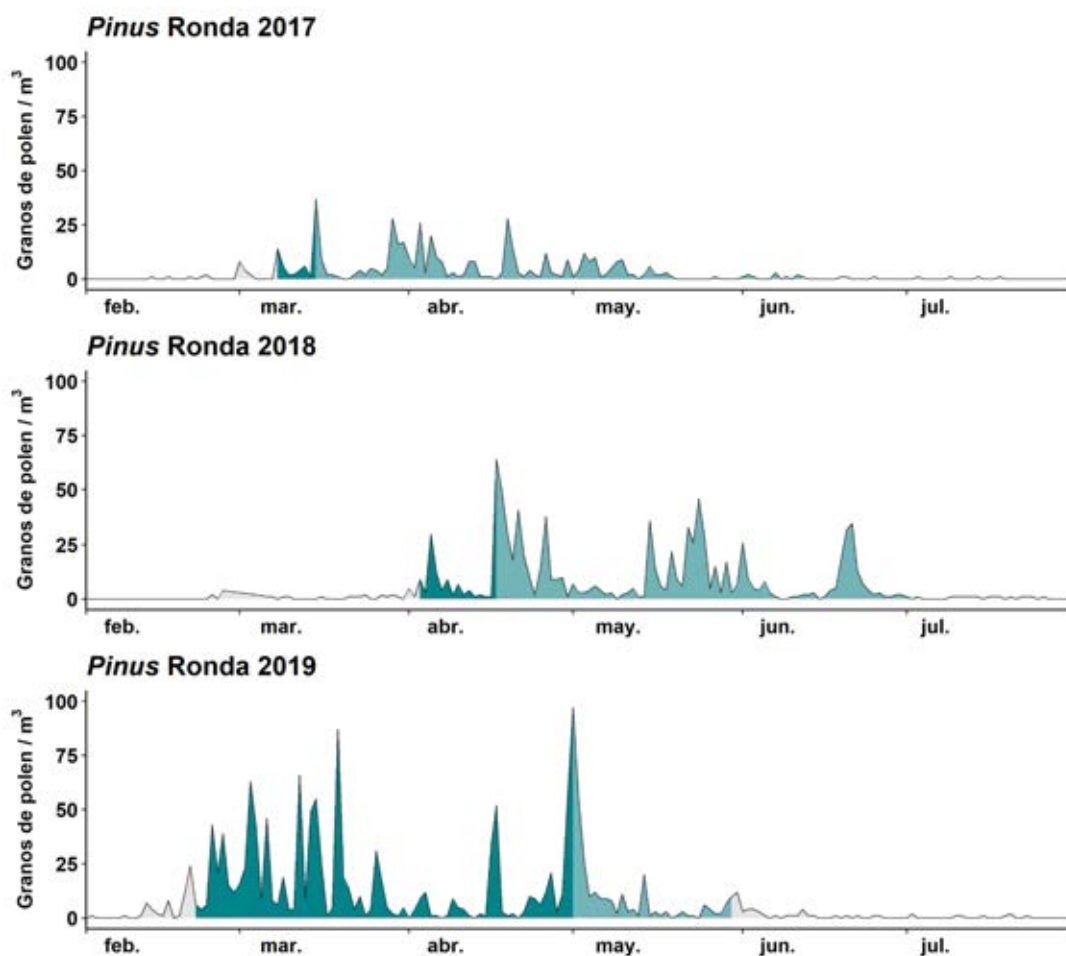


Figura 4.32. Concentraciones diarias de polen de *Pinus* durante los periodos de polinación principal en Ronda. En turquesa oscuro, el prepico; en turquesa claro, el postpico.

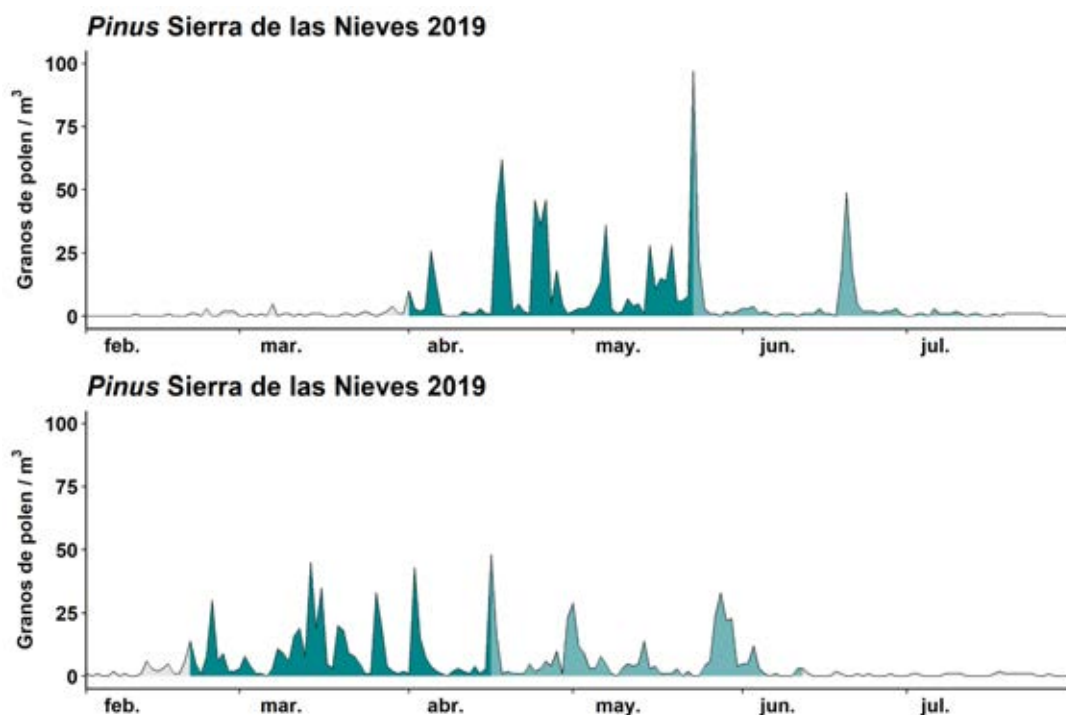


Figura 4.33. Concentraciones diarias de polen de *Pinus* durante los periodos de polinación principal en Sierra de las Nieves. En turquesa oscuro, el prepico; en turquesa claro, el postpico.

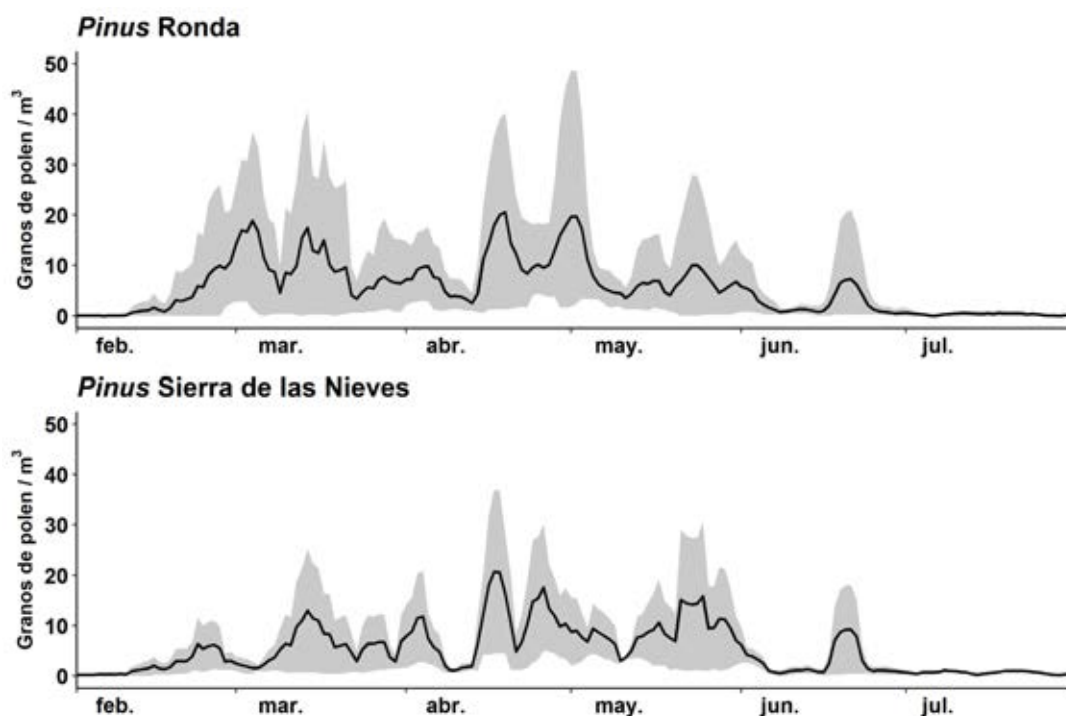


Figura 4.34. Concentraciones diarias promedio de medias móviles de 5 días de amplitud (línea negra), valores máximos (área gris) y mínimos (área blanca sobre la gris) diarios de medias móviles de *Pinus* durante el periodo de estudio en Ronda y Sierra de las Nieves.

4.4.2.9. Análisis de correlación entre concentraciones de polen y variables meteorológicas

En general se detectan correlaciones negativas significativas entre las concentraciones diarias de polen y las precipitaciones con casi todos los tipos polínicos mayoritarios (tablas 4.15 y 4.16). La lluvia arrastra las partículas en suspensión de la atmósfera, lo que produce un efecto de lavado de la misma y disminuye las concentraciones de polen (Figura 4.35) (Docampo *et al.*, 2007; Recio *et al.*, 2018). Algo similar ocurre con la elevada humedad relativa, ya que favorece el aglutinamiento y precipitación de las partículas en suspensión (Recio *et al.*, 2018; Rojo *et al.*, 2015). Sin embargo, se observaron correlaciones positivas significativas de esta última variable en Sierra de las Nieves con los tipos polínicos Cupressaceae de invierno, *Pinus* y Urticaceae (Tabla 4.16). Las correlaciones implican la existencia de una relación lineal entre dos variables, pero no causalidad entre las mismas. Estos tipos polínicos suelen comenzar su PPP durante los primeros meses del año y, a medida que pasan los días, se incrementan las concentraciones de polen de estos tipos por la propia dinámica de liberación del polen de las especies que los componen. Simultáneamente, la humedad relativa también se va incrementando durante estos meses por las precipitaciones y las variaciones de temperatura. Esta simultaneidad entre variables sumada a los pocos datos meteorológicos en Sierra de las Nieves podrían ser las responsables de las correlaciones positivas obtenidas.

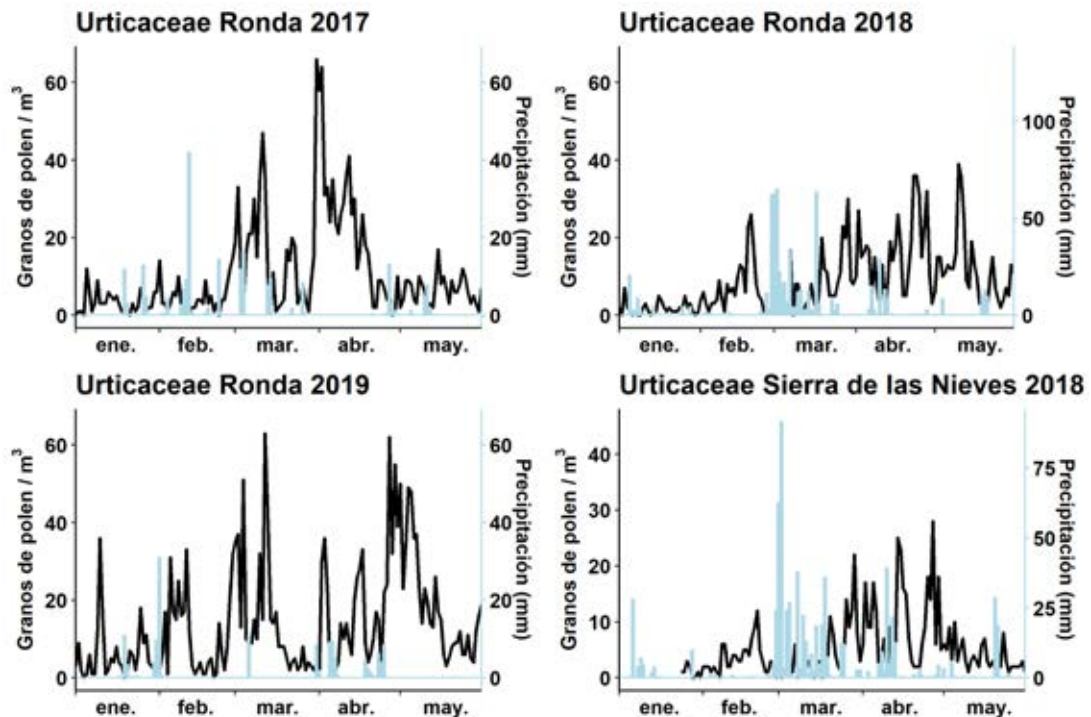


Figura 4.35. Concentraciones diarias de polen de tipo Urticaceae (granos de polen/m³) y precipitación total registrada durante esos mismos días.

Con respecto a las temperaturas medias, mínimas y máximas, en general se obtuvieron correlaciones positivas para el prepico y negativas para el postpico. Temperaturas elevadas favorecen la apertura de anteras y liberación de polen (Clot, 2001; Galán *et al.*, 2001a; Picornell *et al.*, 2019a; Recio *et al.*, 2000, 2018; Rojo *et al.*, 2015; Subba Reddi & Reddi, 2009), por lo que parecen estar estrechamente relacionadas con incrementos en las concentraciones de polen durante el prepico. En cambio, una vez abiertas flores, las temperaturas elevadas favorecen el secado y dehiscencia prematura de la flor (Picornell *et al.*, 2019a), lo que se refleja en correlaciones negativas con el postpico en algunos casos (Figura 4.36). Las correlaciones realizadas con el total del PPP de cada tipo polínico alternaron su signo según tuviera más peso la correlación del prepico o del postpico (tablas 4.15 y 4.16). A pesar de ser este el resultado general, se han detectado algunas correlaciones que no se ajustan a él, como el postpico de Cupressaceae de otoño en ambas localidades de muestreo, el prepico de Cupressaceae de invierno en Sierra de las Nieves, postpico de Cupressaceae de invierno en Ronda o el postpico de Urticaceae en Ronda.

En el caso de Cupressaceae de otoño, en ambas localidades de muestreo se observó un efecto de casualidad similar al descrito con la humedad relativa: al ser un taxon otoñal, la temperatura se reduce a medida que también decrecen las concentraciones de polen en el postpico por la propia dinámica de su PPP, lo que se refleja en una correlación positiva significativa con las temperaturas en este periodo.

En Sierra de las Nieves el mínimo anual de temperaturas se registra en febrero, que es cuando se suele detectar el prepico de Cupressaceae de invierno, por lo que durante este periodo se observa que la temperatura baja conforme aumenta la concentración de polen, lo que resulta en una correlación negativa significativa con la temperatura mínima.

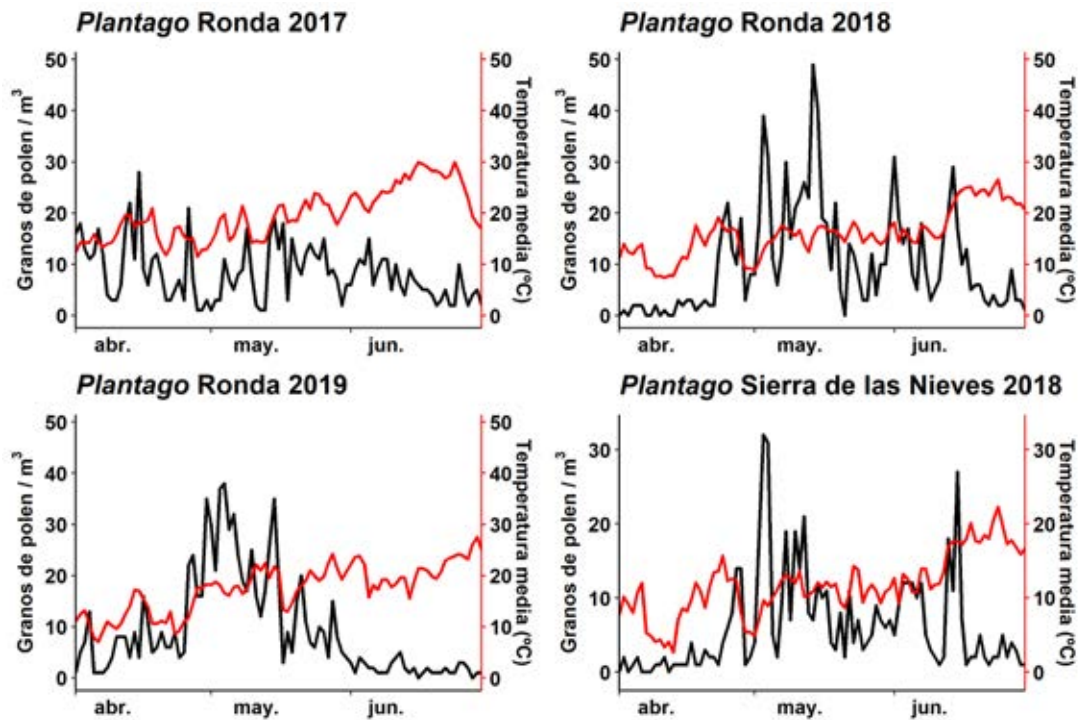


Figura 4.36. Concentraciones diarias de polen de tipo *Plantago* (granos de polen/m³) y temperatura media registrada durante esos mismos días.

Las correlaciones positivas significativas obtenidas entre las temperaturas y el postpico de Cupressaceae de invierno en Ronda podrían deberse a que durante los primeros meses del año las temperaturas no son lo suficientemente elevadas como para provocar el secado prematuro de la flor durante el postpico, por lo que seguirían favoreciendo la liberación de polen de las piñas masculinas hasta que termine su floración. También el aumento de temperaturas induce la maduración de yemas que todavía se mantenían inmaduras durante el prepico.

La correlación positiva significativa detectada entre la temperatura máxima de Ronda y las concentraciones de Urticaceae del postpico podría ser debida a que el tipo Urticaceae está integrado por especies que florecen varias veces durante el mismo año. Durante su PPP se observan diversos picos de concentración que se corresponden con varias floraciones de estas especies durante el mismo año, lo que se observa con mayor claridad en el PPP de Ronda de 2019 (Figura 4.23, Capítulo 4.4.2.5). Las temperaturas elevadas podrían favorecer estas otras nuevas floraciones durante periodos más tardíos, lo que resultaría en un aumento de las concentraciones de polen de Urticaceae durante ese periodo al que hemos denominado postpico y, por lo tanto, en una correlación positiva significativa entre las concentraciones del postpico y la temperatura.

Con las variables relacionadas con velocidad y dirección del viento se observaron resultados diferentes según el tipo polínico y localidad, por lo que se discutirán por separado.

En el caso de *Castanea* en Ronda se observaron correlaciones significativas positivas con la frecuencia de vientos procedentes del 2.º y 3.º cuadrante, es decir, con vientos procedentes del sur en sentido amplio, que es donde se encuentran las mayores áreas de cultivo de *Castanea sativa* de la zona. Por el contrario, se observaron correlaciones negativas significativas con frecuencias de vientos procedentes del noroeste, lo que se debería a la ausencia de cultivos en esta

dirección. Los cultivos de castaño más cercanos a Sierra de las Nieves no están localizados en una dirección tan clara como en el caso de Ronda, sino que hay castañares en distintas direcciones y, por lo tanto, el origen de este tipo polínico es más difuso. Solo se detectaron correlaciones significativas positivas con vientos procedentes del segundo cuadrante, que son vientos que provienen de los castañares de Ojén y Tolox (sureste). Hubo también una correlación significativa negativa con la frecuencia de vientos del 4.º cuadrante por la escasez de castañares en esta dirección. Aunque las principales masas de castaño están en el suroeste, los vientos de este cuadrante son muy escasos (Figura 4.5, Capítulo 4.1.3), por lo que no se obtienen correlaciones significativas con este cuadrante.

Los cipreses ornamentales (Cupressaceae de invierno) cercanos al captador de Ronda se encuentran al sur (en sentido amplio), motivo por el cual se observan correlaciones significativas positivas entre su polen atmosférico y las frecuencias de vientos procedentes del 2.º y 3.º cuadrante, y negativas con el 4.º cuadrante (el captador está situado al noroeste de la ciudad y no abundan las cupresáceas ornamentales fuera de los límites de esta). Las poblaciones más cercanas de cupresáceas naturales (Cupressaceae de otoño) también se sitúan al sur del captador, por lo que se observan correlaciones similares a las obtenidas con Cupressaceae de invierno. En el caso de Sierra de las Nieves, las cupresáceas de invierno se corresponden principalmente con individuos de especies ornamentales del norte en sentido amplio, lo que podría explicar la correlación positiva significativa obtenida entre el polen atmosférico de este taxon y la frecuencia de vientos del 1.º cuadrante. La correlación positiva significativa con la frecuencia de vientos procedentes del 2.º cuadrante podría ser debida al aporte de polen de poblaciones naturales de *Juniperus* que comiencen la floración en marzo (finales del prepico y durante todo el postpico) (Blanca *et al.*, 2011). Teniendo en cuenta que los vientos más abundantes y fuertes proceden del este y noroeste, y que los vientos procedentes de las direcciones en las que se encuentran las principales fuentes emisoras de este polen (especies ornamentales al norte) suelen ser menos intensos, se puede explicar la correlación negativa obtenida entre el polen y la velocidad del viento durante el prepico y la correlación positiva entre el polen y la frecuencia de calma. El aporte de polen de las poblaciones naturales (de floración más tardía que las ornamentales) al este del captador (en sentido amplio) durante el postpico de Cupressaceae de invierno podría explicar la correlación positiva obtenida con la velocidad del viento en este periodo. Cupressaceae de otoño se corresponde principalmente con polen de poblaciones naturales situadas al este del captador, lo que explica las correlaciones positivas significativas entre el polen y frecuencias de vientos del 1.º cuadrante y negativas significativas entre el polen y las del 4.º cuadrante.

En el caso del tipo *Olea* en Ronda, se detectaron correlaciones negativas significativas entre su polen atmosférico y la velocidad del viento, al tiempo que fueron positivas con la frecuencia de calma. Además, se detectaron correlaciones significativas entre el polen y determinadas direcciones de viento, siendo positivas con las frecuencias de vientos procedentes del 1.º y 4.º cuadrante, y negativas con las del 2.º. Por todo el norte de la ciudad de Ronda son abundantes los campos de cultivos de olivo, lo que explica estas correlaciones significativas obtenidas. La calma favorecería la permanencia del polen en el área cercana a las fuentes de emisión, mientras que vientos fuertes favorecerían su dispersión a otros lugares, lo que podría explicar el sentido de las correlaciones obtenidas con estas

variables. En Sierra de las Nieves solo se obtuvieron correlaciones negativas significativas con las frecuencias de vientos del 1.^{er} y 2.^o cuadrante. Estos cuadrantes se corresponden en su mayor parte con vientos procedentes del interior del Parque Natural, de las zonas menos antropizadas, por lo que los cultivos son muy escasos o casi nulos. Los vientos procedentes de estas zonas contienen bajas concentraciones de polen de tipo *Olea* en comparación con los vientos procedentes de otros cuadrantes, lo que podría explicar la correlación negativa obtenida.

Con el tipo *Pinus* en Ronda solo se obtuvieron correlaciones significativas entre su polen atmosférico y las frecuencias de vientos procedentes del 2.^o y 4.^o cuadrante (Tabla 4.15). Las correlaciones positivas significativas con la frecuencia de vientos del 2.^o cuadrante podrían explicarse por la proximidad de individuos ornamentales al este del captador. Al norte del aparato captador hay algunos pinares de repoblación de *Pinus halepensis*, no obstante, la mayoría de los vientos procedentes de este cuadrante tienen una componente mayoritaria del oeste (Figura 4.5, Capítulo 4.1.3), y en esta dirección, no hay ni pinares ni pinos ornamentales cercanos, lo que podría ser la explicación de las correlaciones negativas significativas obtenidas. En Sierra de las Nieves se obtuvieron correlaciones positivas significativas con la velocidad del viento, las frecuencias del 1.^{er}, 2.^o y 4.^o cuadrante, y negativas con el 3.^{er} cuadrante. Al noroeste, norte y noreste del captador hay grandes poblaciones de *Pinus pinaster*, y al noreste, este y sureste poblaciones de *Abies pinsapo*, lo que podría explicar las correlaciones positivas obtenidas. En este caso, vientos fuertes (principalmente de componente este y noroeste), sí favorecerían la captación de este tipo polínico, por lo que se obtienen correlaciones positivas con la velocidad del viento. La correlación negativa obtenida con la frecuencia de vientos del 3.^{er} cuadrante podría deberse a la menor abundancia de poblaciones de especies que se incluyen en este tipo polínico en dirección suroeste.

Con *Plantago* en Ronda solamente se obtuvo correlación positiva significativa entre su polen atmosférico y la frecuencia de vientos procedentes del 1.^{er} cuadrante durante el prepico. Al norte y noreste del instituto donde se encuentra el captador abundan los descampados y parcelas sin construir en las que es frecuente encontrar distintas especies de *Plantago*. En Sierra de las Nieves no se detectó ninguna correlación significativa entre este polen y alguna variable relacionada con el viento, lo que podría deberse a que no es necesaria una determinada velocidad y direccionalidad de viento para la captura de polen de *Plantago*, o a la falta de suficientes datos meteorológicos para poder obtener alguna correlación significativa.

Con Poaceae en Ronda solo se obtuvieron correlaciones positivas significativas entre su polen atmosférico y la frecuencia de calma y de vientos provenientes del 4.^o cuadrante. Los campos de cultivo de cereales más extensos se encuentran en las campiñas del norte y noroeste de la ciudad, lo que explicaría la correlación positiva detectada con este cuadrante. La calma de vientos favorecería que el polen se mantenga en el área cercana a sus fuentes de emisión (bastante próximas al captador), lo que explica la correlación positiva significativa obtenida con esta variable. En Sierra de las Nieves solo se obtuvieron correlaciones negativas significativas entre este polen y los vientos del 3.^{er} y 4.^o cuadrante durante el postpico. Las gramíneas son abundantes en todos los alrededores del captador. Al oeste del captador, debido a la poca profundidad del

suelo y la abundancia de afloramientos rocosos, predominan pastizales con escaso estrato arbóreo, por lo que las herbáceas se encuentran más expuestas. Durante el postpico, las zonas más expuestas sufren con mayor intensidad la desecación por elevadas temperaturas, por lo que el final de su periodo de floración podría acabar antes que en zonas refugiadas por el estrato arbóreo. Por lo tanto, el viento procedente de zonas expuestas (al oeste del captador, 3.^{er} y 4.^o cuadrante) no arrastraría tanto polen como el de zonas más húmedas y con floración más duradera, lo que podría explicar las correlaciones obtenidas. No se puede descartar tampoco el efecto de sesgo del reducido número de datos para esta estación durante ese periodo de postpico de Poaceae.

Con el tipo *Quercus* en Ronda solo se obtuvieron correlaciones positivas significativas entre su polen atmosférico y las frecuencias de vientos del 1.^{er} cuadrante en el prepico y del 2.^o cuadrante en el postpico. Las mayores extensiones de encinares en el entorno próximo a la ciudad se encuentran al este y noreste, mientras que las poblaciones naturales de áreas más elevadas (de floración ligeramente más tardía, Capítulo 4.3) se encuentran al sureste, lo que podría explicar estas correlaciones obtenidas en los distintos periodos. En Sierra de las Nieves se obtuvieron resultados similares: correlaciones significativas entre polen y frecuencia de vientos del 3.^{er} y 4.^o cuadrante, siendo positivas durante el prepico y negativas durante el postpico. En cambio, fueron positivas durante el postpico con el 2.^o cuadrante. El captador se encuentra instalado en el interior de un encinar, por lo que la dirección del viento influye poco en la captación de este tipo polínico. La variación del signo de las correlaciones según el periodo podría deberse a que las poblaciones situadas a mayor altitud y, por lo tanto, de floración más tardía se encuentran al este (en sentido amplio) del captador. Estas poblaciones aportarían la mayoría del polen detectado durante el postpico, lo que explicaría la correlación positiva obtenida con el 2.^o cuadrante. Los encinares del 3.^{er} y 4.^o cuadrante son los que se encuentran en pisos bioclimáticos más cálidos, por lo que serían el principal aporte de este tipo polínico durante el prepico y aportarían poco polen durante el postpico al haber terminado su floración.

Las correlaciones obtenidas con el tipo polínico Urticaceae en Ronda tienen explicaciones similares a las de *Plantago*. Los principales descampados y parcelas sin construir cercanas al captador se encuentran al norte y noreste, lo que explica las correlaciones positivas significativas obtenidas entre este polen y las frecuencias de vientos del 1.^{er} y 4.^o cuadrante. La cercanía de estas fuentes de emisión sería la responsable de la correlación negativa significativa obtenida con la velocidad del viento y la positiva con la frecuencia de calma. En Sierra de las Nieves se observa también posibles fuentes de emisión locales, pues las correlaciones significativas fueron negativas entre el polen y la velocidad del viento y positivas con la frecuencia de calma. Las correlaciones con las frecuencias de los distintos cuadrantes podrían deberse a la presencia de estas especies nitrófilas dentro del área antropizada en la que se encuentra instalado el captador.



Tabla 4.15. Coeficientes de correlación de Spearman entre los valores diarios de las principales variables meteorológicas y las concentraciones de los diferentes tipos polínicos durante el periodo de muestreo en Ronda.

Tipo polínico	Periodo	Prec	H Rel	Tmed	Tmax	Tmin	Vel Viento	Cuadrante 1	Cuadrante 2	Cuadrante 3	Cuadrante 4	Calma
<i>Castanea</i>	PPP (n=100)	0,00	-0,17	0,23	0,21	0,23	-0,01	-0,23	0,17	0,60***	-0,43***	-0,14
	Prepico (n=33)	-0,04	-0,45	0,51*	0,48*	0,48*	-0,27	-0,13	0,49*	0,71***	-0,62**	-0,22
	Postpico (n=67)	-	-0,16	0,35*	0,33	0,33	0,09	-0,28	0,04	0,59***	-0,37*	-0,13
Cupressaceae Invierno	PPP (n=132)	-0,16	-0,35***	0,58***	0,52***	0,50***	0,12	-0,21	0,53***	0,08	-0,47***	-0,15
	Prepico (n=92)	-0,11	-0,33*	0,55***	0,49***	0,46***	0,25	-0,21	0,52***	0,12	-0,49***	-0,35**
	Postpico (n=40)	-0,24	-0,40	0,60***	0,53**	0,61***	-0,17	-0,22	0,60***	0,01	-0,53**	0,26
Cupressaceae otoño	PPP (n=235)	-0,19*	-0,25**	0,13	0,16	0,10	0,00	-0,09	0,36***	0,22**	-0,34***	-0,05
	Prepico (n=137)	-0,10	-0,03	-0,06	-0,06	-0,03	0,04	-0,16	0,31**	0,19	-0,31**	-0,08
	Postpico (n=98)	-0,36**	-0,55***	0,27	0,39***	0,15	-0,13	0,06	0,36**	0,22	-0,32*	0,07
<i>Olea</i>	PPP (n=163)	-0,14	0,15	-0,11	-0,07	-0,19	-0,27**	0,19	-0,11	-0,08	0,10	0,30**
	Prepico (n=96)	-0,35**	-0,18	0,54***	0,62***	0,30*	-0,38**	0,32*	-0,31*	-0,04	0,36**	0,35**
	Postpico (n=67)	0,02	0,11	-0,33	-0,37*	-0,27	0,17	0,01	0,30	-0,13	-0,30	0,01
<i>Pinus</i>	PPP (n=288)	-0,01	0,00	-0,18*	-0,18*	-0,17*	0,06	-0,04	0,25***	-0,04	-0,25***	-0,08
	Prepico (n=93)	-0,37**	-0,36**	0,29	0,29	0,20	0,04	0,03	0,25	-0,06	-0,26	0,03
	Postpico (n=195)	0,17	0,11	-0,21*	-0,24**	-0,15	0,06	-0,05	0,24**	0,00	-0,23*	-0,11
<i>Plantago</i>	PPP (n=284)	-0,11	0,13	-0,29***	-0,27***	-0,31***	-0,13	0,15	0,07	-0,12	-0,05	0,13
	Prepico (n=74)	-0,42**	-0,34*	0,53***	0,59***	0,36*	-0,20	0,48***	0,01	-0,23	-0,02	0,25
	Postpico (n=210)	-0,08	0,14	-0,31***	-0,31***	-0,31***	-0,04	-0,01	0,10	-0,06	-0,06	0,09
Poaceae	PPP (n=222)	-0,17	0,16	-0,23**	-0,21*	-0,26**	-0,16	0,05	-0,11	-0,13	0,15	0,28***
	Prepico (n=82)	-0,35*	-0,16	0,29	0,33*	0,08	-0,16	0,16	-0,27	-0,27	0,51***	0,27
	Postpico (n=140)	-0,06	0,24*	-0,38***	-0,38***	-0,36***	-0,09	-0,04	0,01	-0,03	-0,06	0,22
<i>Quercus</i>	PPP (n=209)	-0,12	-0,09	-0,01	0,01	-0,05	-0,13	0,14	0,16	-0,02	-0,13	0,10
	Prepico (n=35)	0,02	-0,07	0,36	0,48*	0,19	-0,30	0,50*	-0,24	-0,04	0,27	0,39
	Postpico (n=174)	-0,13	-0,11	-0,03	-0,02	-0,04	-0,06	0,01	0,25*	-0,01	-0,20	0,05
Urticaceae	PPP (n=357)	-0,31***	-0,26***	0,24***	0,31***	0,11	-0,18**	0,24***	-0,03	-0,16*	0,10	0,15*
	Prepico (n=167)	-0,34***	-0,32***	0,43***	0,52***	0,19	-0,25*	0,31***	-0,19	-0,32***	0,32***	0,29**
	Postpico (n=190)	-0,31***	-0,29***	0,19	0,23*	0,10	-0,11	0,16	0,12	0,00	-0,09	0,05

Prec, precipitación total; H Rel, humedad relativa media; Tmed, temperatura media; Tmax, temperatura máxima; Tmin, temperatura mínima; Vel Viento, velocidad del viento media; Cuadrante 1/2/3/4, frecuencia de vientos del 1.^{er}/2.^{er}/3.^{er}/4.^o cuadrante; Calma, frecuencia de calma. * p valor ≤0,05; ** 0,01 ≤ p valor <0,05; *** p valor <0,001.

Tabla 4.16. Coeficientes de correlación de Spearman entre los valores diarios de las principales variables meteorológicas y las concentraciones de los diferentes tipos polínicos durante el período de muestreo en Sierra de las Nieves.

Tipo polínico	Periodo	Prec	H Rel	Tmed	Tmax	Tmin	Vel	Cuadrante 1	Cuadrante 2	Cuadrante 3	Cuadrante 4	Calma
<i>Castanea</i>	PPP (n=21)	0,07	-0,12	0,20	0,04	0,30	0,52	0,39	0,71**	-0,50	-0,66*	-0,17
	Prepico (n=3)	-	-0,50	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	0,50	-1,00	-	0,87	1,00
	Postpico (n=18)	0,12	-0,29	-0,05	0,04	0,08	0,30	0,36	0,56	-0,27	-0,56	-0,02
Cupressaceae Invierno	PPP (n=90)	-0,33*	0,30*	-0,04	-0,01	-0,32*	0,07	0,18	0,20	-0,07	-0,21	-0,02
	Prepico (n=43)	-0,63***	0,54***	0,01	0,28	-0,48*	-0,49**	0,43*	0,46*	0,27	-0,47*	0,43*
	Postpico (n=47)	-0,24	0,42*	0,13	-0,04	0,04	0,46*	-0,10	0,19	-0,27	-0,23	-0,24
Cupressaceae otoño	PPP (n=76)	-0,32	-0,51***	0,38**	0,53***	0,15	-0,06	0,45***	0,29	-0,48***	-0,26	0,05
	Prepico (n=11)	-0,47	-0,46	-0,14	0,24	-0,22	-0,16	-0,34	0,58	-0,28	-0,09	-0,36
	Postpico (n=65)	-0,41**	-0,48***	0,44**	0,57***	0,17	-0,04	0,49***	0,23	-0,44***	-0,31	0,04
<i>Olea</i>	PPP (n=61)	0,32	-0,13	-0,30	-0,35	-0,11	-0,13	-0,13	-0,12	0,06	0,14	0,07
	Prepico (n=21)	0,34	-0,51	-0,08	-0,07	-0,27	-0,41	-0,60*	-0,62*	0,58	0,61*	0,41
	Postpico (n=40)	0,27	0,11	-0,22	-0,35	0,07	0,03	0,01	0,04	-0,05	0,05	-0,08
<i>Pinus</i>	PPP (n=110)	0,08	0,32**	-0,17	-0,25	0,01	0,31*	0,13	0,42***	-0,38***	-0,44***	-0,06
	Prepico (n=53)	-0,42*	0,57***	0,56***	0,38*	0,46**	0,28	0,43*	0,58***	-0,33	-0,66***	-0,00
	Postpico (n=57)	0,35	0,10	-0,03	-0,14	0,02	0,18	0,03	0,21	-0,33	-0,32	0,09
<i>Plantago</i>	PPP (n=74)	0,11	-0,16	-0,34*	-0,29	-0,20	-0,25	-0,06	-0,23	0,07	-0,17	0,20
	Prepico (n=11)	-0,51	0,24	0,04	0,09	-0,17	-0,69	0,07	-0,12	0,25	-0,05	0,49
	Postpico (n=63)	0,22	-0,22	-0,38*	-0,34	-0,20	-0,19	-0,08	-0,22	0,06	0,20	0,14
Poaceae	PPP (n=59)	-0,08	0,15	0,23	0,14	0,29	0,14	0,10	0,00	-0,13	-0,02	-0,13
	Prepico (n=38)	-0,11	0,12	0,31	0,27	0,14	-0,06	-0,02	-0,37	0,24	0,35	-0,08
	Postpico (n=21)	-0,11	0,38	0,54	0,20	0,52	0,45	0,51	0,56	-0,75**	-0,76***	-0,18
<i>Quercus</i>	PPP (n=69)	0,10	-0,03	-0,06	-0,24	0,16	0,17	-0,07	0,09	-0,14	-0,07	-0,12
	Prepico (n=27)	0,07	-0,17	0,18	0,08	0,05	-0,10	-0,46	-0,52	0,55*	0,56*	0,03
	Postpico (n=42)	0,00	0,26	-0,02	-0,41	0,31	0,36	0,22	0,46*	-0,51**	-0,46*	-0,21
Urticaceae	PPP (n=113)	-0,30*	0,48***	-0,01	0,06	-0,26	-0,1	0,30*	0,19	-0,08	-0,25	0,08
	Prepico (n=66)	-0,66***	0,65***	0,28	0,48***	-0,25	-0,43**	0,52***	0,28	0,28	-0,44***	0,46***
	Postpico (n=47)	0,13	0,23	-0,21	-0,29	-0,14	0,37	0,10	0,12	-0,49**	-0,17	-0,19

Prec, precipitación total; H Rel, humedad relativa media; Tmed, temperatura media; Tmax, temperatura máxima; Tmin, temperatura mínima; Vel Viento, velocidad media del viento; Cuadrante 1/2/3/4, frecuencia de vientos del 1.^{er}/2.^o/3.^{er}/4.^o cuadrante; Calma, frecuencia de calma de vientos. * p valor ≤0,05; ** 0,01 ≤ p valor < 0,05; *** p valor < 0,001.

4.4.3. Tipos polínicos minoritarios

Se detectaron grandes diferencias entre las dos localidades de muestreo para algunos tipos polínicos minoritarios como: *Amaranthaceae*, *Casuarina*, *Fraxinus*, *Myrtaceae*, *Pistacia*, *Platanus*, *Populus* y *Urtica membranacea* (figuras 4.37 y 4.38, Tabla 4.17).

El polen de *Amaranthaceae* se encuentra en la atmósfera de ambas localidades durante gran parte del año (abril-octubre) (figuras 4.9, 4.10 y 4.37, tablas 4.2-4.6), y alcanza mayores niveles de concentración en Ronda. Está representado en la zona de estudio principalmente por *Amaranthus blitoides* S.Watson, *Chenopodium album* L. y *Chenopodium murale* L. Estas especies tienen un periodo de floración muy amplio (de más de 6 meses en la mayoría de los casos) (Blanca *et al.*, 2011), lo que explica la detección de este tipo polínico en la atmósfera durante casi todo el año. En ambas estaciones se detectó un retraso en el comienzo del PPP durante el año 2018 (Tabla 4.17). Tal como se ha mencionado anteriormente en otros tipos polínicos de especies herbáceas, 2018 fue un año frío en su primera mitad, lo que retrasó la adquisición de los requerimientos térmicos para la floración (Muñoz Rodríguez *et al.*, 2000). Las lluvias otoñales de 2018 también podrían ser las responsables de la mayor integral polínica anual detectada en 2019 con respecto a años previos (Aira *et al.*, 2016; Muñoz Rodríguez *et al.*, 2000). En general las especies de la zona que pertenecen a esta familia suelen ser ruderales, arvenses o nitrófilas (Blanca *et al.*, 2011), lo que explica la mayor abundancia de su polen en la atmósfera de Ronda con respecto a Sierra de las Nieves. En Málaga este tipo polínico tiene una mayor integral anual (hasta 4 veces mayor que la de Ronda y casi 10 veces mayor que la de Sierra de las Nieves) y mayor abundancia relativa -suele ser entre el 4.º y 7.º tipo polínico más abundante detectado-, lo que puede deberse a la mayor abundancia de estas especies en zonas antropizadas a las afueras de la ciudad. En algunas localidades costeras de la Península Ibérica como Huelva, Almería, Murcia o Alicante también tiene una mayor abundancia relativa, mientras que localidades del interior como Toledo, Córdoba o Évora su abundancia relativa e integrales anuales son similares a la de las localidades estudiadas (García-Mozo *et al.*, 2006b, 2007; Muñoz Rodríguez *et al.*, 2000; Sánchez Mesa *et al.*, 2005). Las fechas de inicio y fin y la duración del PPP fueron similares entre las dos localidades de muestreo y también similares a las de Málaga y otras ciudades españolas (Muñoz Rodríguez *et al.*, 2000; Recio *et al.*, 1998b).

El polen de *Apiaceae* se detecta, principalmente, en los meses de mayo a agosto en ambas localidades (figuras 4.9, 4.10 y 4.37, tablas 4.2-4.6). Está representado por una gran variedad de especies, entre las que destacan *Thapsia villosa* L. *Thapsia dissecta* (Boiss.) Arán & Mateo, *Elaeoselinum asclepium* subsp. *millefolium* (Boiss.) García-Martín & Silvestre, *Pimpinella villosa* Schousb. y *Ammoides pusilla* (Brot.) Breistr. (comunicación personal de Federico Casimiro Soliguer). En este tipo polínico también se detectó un retraso en el comienzo de su PPP en 2018 debido a las temperaturas de la primera mitad del año (Tabla 4.17). No hubo grandes diferencias entre las integrales polínicas anuales de los años de muestreo. De nuevo, Ronda tuvo una mayor integral polínica anual que Sierra de las Nieves, aunque estuvieron en rangos similares. Localidades cercanas como Málaga, Estepona, Antequera o Vélez-Málaga también registran integrales polínicas anuales, abundancias relativas y fechas de mayor detección similares en este tipo polínico (Recio *et al.*, 1998a, 2000, 2006; Trigo *et al.*, 2007).

El tipo polínico de *Cannabis* se detecta durante los meses de junio a septiembre en ambas localidades (figuras 4.9, 4.10 y 4.37, tablas 4.2-4.6). En este caso no se detectó un retraso apreciable del inicio del PPP en ninguno de los años de muestreo por provenir de un transporte a larga distancia desde el norte de África (Cabezudo *et al.*, 1997). Por el mismo motivo, las concentraciones de polen registradas y la integral polínica anual en ambas localidades y en otras localidades cercanas fueron similares (Tabla 4.17) (Cabezudo *et al.*, 1997).

El polen de *Casuarina* se detecta en los meses de septiembre, octubre y noviembre (figuras 4.9, 4.10 y 4.37, tablas 4.2-4.6). Está representado principalmente por *Casuarina cunninghamiana* Miq., que se cultiva como árbol ornamental en parques y jardines y como rompevientos en bordes de carretera. Las concentraciones detectadas en Sierra de las Nieves fueron casi nulas (Tabla 4.17). En Ronda, tanto las fechas de inicio del PPP como la integral polínica anual fueron similares en todos los años de muestreo. La estacionalidad de este tipo polínico en las localidades de muestreo es muy similar a la de localidades cercanas como Málaga, Estepona, Antequera o Vélez-Málaga. Localidades en las que este taxon no está tan extendido como ornamental -como Estepona o Vélez-Málaga- tienen integrales polínicas y concentraciones máximas anuales similares a Sierra de las Nieves, mientras que otras ciudades en las que estos árboles son un poco más abundantes, como Antequera, tienen integrales y valores máximos similares a Ronda. En Málaga las concentraciones detectadas de este tipo polínico son mucho mayores por su uso frecuente en parques y jardines (García *et al.*, 1997; Recio *et al.*, 1998a, 2000, 2006; Trigo *et al.*, 2007).

El polen de *Fraxinus* tiene una curva de polen interanual, es decir, comienza en noviembre y se prolonga hasta febrero del año siguiente (figuras 4.9, 4.10 y 4.37, tablas 4.2-4.6). Está representado en la zona de estudio principalmente por dos especies: *Fraxinus angustifolia* y *Phillyrea angustifolia* L. El inicio del PPP se adelantó durante la estación 2018-2019, lo que podría deberse a las lluvias de octubre de 2018 y a la subida repentina de temperaturas al final del mismo año (Gérard Peeters, 1998). La integral polínica anual varió considerablemente durante los años de muestreo. En 2019 alcanzó un valor muy superior a los años previos (Tabla 4.17) y podría deberse a una menor abundancia de lluvias durante el comienzo de 2019 que redujo el lavado de polen de la atmósfera (Gérard Peeters, 1998; Vara *et al.*, 2016), junto con una mayor disponibilidad hídrica en el otoño previo que favoreciese las condiciones para la formación de yemas florales. Del mismo modo, la abundancia de precipitaciones al comienzo de 2018 podría explicar la menor integral polínica del PPP de 2017-2018. En Sierra de las Nieves se detectó mucho menos polen de este tipo que en Ronda. Además de formar parte del bosque ripario en algunos tramos de ríos y arroyos que se encuentren bien conservados, en Ronda es frecuente su uso como ornamental en las inmediaciones del captador, lo que podría explicar estas diferencias. En localidades cercanas del sur de España como Córdoba, Málaga o Granada este tipo polínico tiene una estacionalidad similar, aunque las integrales anuales y concentraciones máximas anuales son muy inferiores a Ronda y ligeramente inferiores a Sierra de las Nieves (Velasco-Jiménez *et al.*, 2020). En localidades del norte de la Península Ibérica las integrales anuales y valores pico son similares, aunque la detección de este tipo polínico es más tardía (finales de diciembre o principios de enero) (Vara *et al.*, 2016).

El polen de tipo Myrtaceae se detecta durante los meses de verano, fundamentalmente junio y julio (figuras 4.9, 4.10 y 4.37, tablas 4.2-4.6). Está representado por *Myrtus communis* como especie silvestre, y por *Eucalyptus camaldulensis* y *Eucalyptus globulus* como especies cultivadas, naturalizadas u ornamentales. Durante 2018 se registró una integral muy baja de polen de Myrtaceae (Tabla 4.17) y en 2019 muy alta en comparación. En otras localidades de la Península Ibérica también se detectaron grandes variaciones en la integral polínica anual del Myrtaceae en años consecutivos, lo que podría reflejar un comportamiento de alternancia en su producción floral (Aira *et al.*, 2011; Velasco-Jiménez *et al.*, 2014). Las bajas concentraciones de polen de 2018 fueron las responsables de las grandes diferencias en las fechas de comienzo y final de este año con respecto al resto de años de muestreo. La estacionalidad, las integrales anuales y los valores máximos de concentración en Ronda son generalmente similares a los detectados en localidades cercanas (como Málaga, Sevilla, Córdoba o Granada) y en el norte de la Península Ibérica, mientras que la integral anual de Sierra de las Nieves es ligeramente inferior (Aira *et al.*, 2011; Velasco-Jiménez *et al.*, 2014).

El polen de *Pistacia* se detecta principalmente durante los meses de marzo a mayo en ambas localidades (figuras 4.9, 4.10, 4.38, tablas 4.2-4.6). Está representado por *Pistacia lentiscus* L. y *Pistacia terebinthus* L. Esporádicamente se detecta polen de *Pistacia* en septiembre, lo que en ocasiones llega a alargar el final del PPP, tal como se observó en 2018 (Tabla 4.17). Algunos autores han sugerido que una mayor disponibilidad de agua (como en 2018 por las abundantes precipitaciones) puede prolongar la floración de las distintas especies del género *Pistacia* (Velasco-Jiménez *et al.*, 2015), pero ninguna de las especies presentes en la zona llega a tener una floración tan tardía (Blanca *et al.*, 2011), por lo que lo más probable es que sean episodios de reflujo que, dadas las bajas concentraciones anuales de este tipo polínico, influyen en la elección del final del PPP. En Córdoba también se detectaron grandes variaciones en la integral polínica anual de este taxon (Velasco-Jiménez *et al.*, 2015). Las integrales polínicas anuales fueron ligeramente superiores en Ronda con respecto a Sierra de las Nieves, aunque la temporalidad de su PPP coincidió. Este tipo polínico se detecta en periodos similares en la atmósfera de localidades cercanas, como Málaga, Córdoba, Estepona, Vélez-Málaga o Nerja. En general las concentraciones máximas e integrales anuales detectadas en Ronda y Sierra de las Nieves son similares a las de Málaga, Estepona y Vélez-Málaga, aunque son inferiores a las detectadas en otras localidades en las que estas especies tienen una distribución más extendida, como Córdoba o Nerja (Recio *et al.*, 1998a, 2006; Trigo *et al.*, 2007; Velasco-Jiménez *et al.*, 2015).

El polen de *Platanus* se detecta prácticamente solo en dos meses: marzo y abril (figuras 4.9, 4.10 y 4.38, tablas 4.2-4.6). Está representado en la zona por ejemplares ornamentales de *Platanus hispanica* Münchh en Ronda y alrededores. En 2018 se detectó un retraso en su PPP, posiblemente debido a las menores temperaturas del comienzo del año, tal como han descrito otros autores (Díaz de la Guardia *et al.*, 1999b). El retraso de este año fue el responsable de que el PPP se prolongase hasta mayo (Tabla 4.17). Las escasas precipitaciones durante el invierno previo junto con las menores temperaturas pudieron ser las responsables de la menor integral polínica anual de 2018 (Díaz de la Guardia *et al.*, 1999b). Este tipo polínico fue mucho más abundante en Ronda por proceder de árboles

ornamentales. Las fechas de inicio y fin del PPP son similares en prácticamente toda la Península Ibérica. La integral anual de Ronda es similar a la de ciudades cercanas como Estepona, Málaga, Córdoba o Vélez-Málaga, aunque la de Sierra de las Nieves es ligeramente inferior (Aira *et al.*, 2011; Alcázar *et al.*, 2004; Díaz de la Guardia *et al.*, 1999b; Recio *et al.*, 1998a, 2000, 2006; Trigo *et al.*, 2007).

El polen de *Populus* se detecta durante los meses de febrero, marzo y abril (figuras 4.9, 4.10 y 4.38, tablas 4.2-4.6). En la zona de estudio está representado principalmente por *Populus alba*, *Populus nigra* y *Populus tremula* L. En este caso no se observó un retraso apreciable en Ronda en 2018, aunque sí en Sierra de las Nieves. En ambos lugares disminuyó la temperatura, aunque en Sierra de las Nieves fue más notable, pudiendo ser esta la causa (Puc & Wolski, 2002). La presencia de especies del género *Populus* (como *Populus alba* o *Populus nigra* como ornamentales en parques y jardines de Ronda, junto a la mayor abundancia de ríos y choperas blancas en las inmediaciones de la ciudad podrían ser las responsables de la mayor abundancia de este tipo polínico con respecto a Sierra de las Nieves. La estacionalidad de este tipo polínico es similar a la de otras localidades cercanas. La integral anual de Sierra de las Nieves es similar a la de localidades cercanas como Málaga, Estepona o Vélez-Málaga, mientras que la de Ronda es bastante superior (dos o tres veces mayor) y alcanza valores similares a los de Granada o Córdoba (Recio *et al.*, 1998a, 2006; Trigo *et al.*, 2007; Velasco-Jiménez *et al.*, 2020).

El polen de *Rumex* está presente fundamentalmente en los meses de marzo a junio, aunque es generalmente en mayo cuando se registran las mayores concentraciones (figuras 4.9, 4.10 y 4.38, tablas 4.2-4.6). Está representado principalmente por especies como: *Rumex bucephalophorus* L., *Rumex induratus* Boiss. & Reut. o *Rumex pulcher* L. Es más abundante en Ronda que en Sierra de las Nieves, por ser un tipo polínico integrado, en gran medida, por especies subnitrófilas (Blanca *et al.*, 2011). También se observó un retraso en el inicio de su PPP en 2018 que podría atribuirse a las menores temperaturas de los meses previos a su floración, aunque otros autores no han detectado correlaciones significativas entre estas variables (Bogawski *et al.*, 2014). La mayor integral polínica de este año podría deberse a la mayor disponibilidad hídrica (Aira *et al.*, 2016). La estacionalidad de este tipo polínico es similar a la de localidades cercanas y más temprana a localidades del centro de Europa, y las integrales polínicas de ambas localidades están también en rangos similares (Alcázar *et al.*, 2009; Recio *et al.*, 1998a, 2006; Trigo *et al.*, 2007).

El polen de *Urtica membranacea* se detecta durante los meses de febrero a mayo principalmente (figuras 4.9, 4.10 y 4.38, tablas 4.2-4.6). Es un tipo polínico que se corresponde con una única especie: *Urtica membranacea* Poir. Ex Savigny. Es una especie nitrófila (Blanca *et al.*, 2011), por lo que es más abundante en Ronda y, por lo tanto, se registran mayores concentraciones de su polen. Al igual que se ha comentado en el caso de Urticaceae, las temperaturas más frías durante la primera mitad de 2018 podrían haber causado el retraso observado en su PPP (Tabla 4.17) (Trigo *et al.*, 1996). La abundancia de lluvias durante el otoño de 2019 junto a las elevadas temperaturas pudieron ser las responsables de la mayor integral polínica anual detectada ese año (Aira *et al.*, 2016; Galán *et al.*, 2000; Trigo *et al.*, 1996). La estacionalidad e integral anual de este tipo polínico en ambas localidades adquiere rangos similares a los de otras localidades de

España, aunque en la localidad cercana de Estepona adquiere integrales mucho mayores (Muñoz Rodríguez *et al.*, 2006)

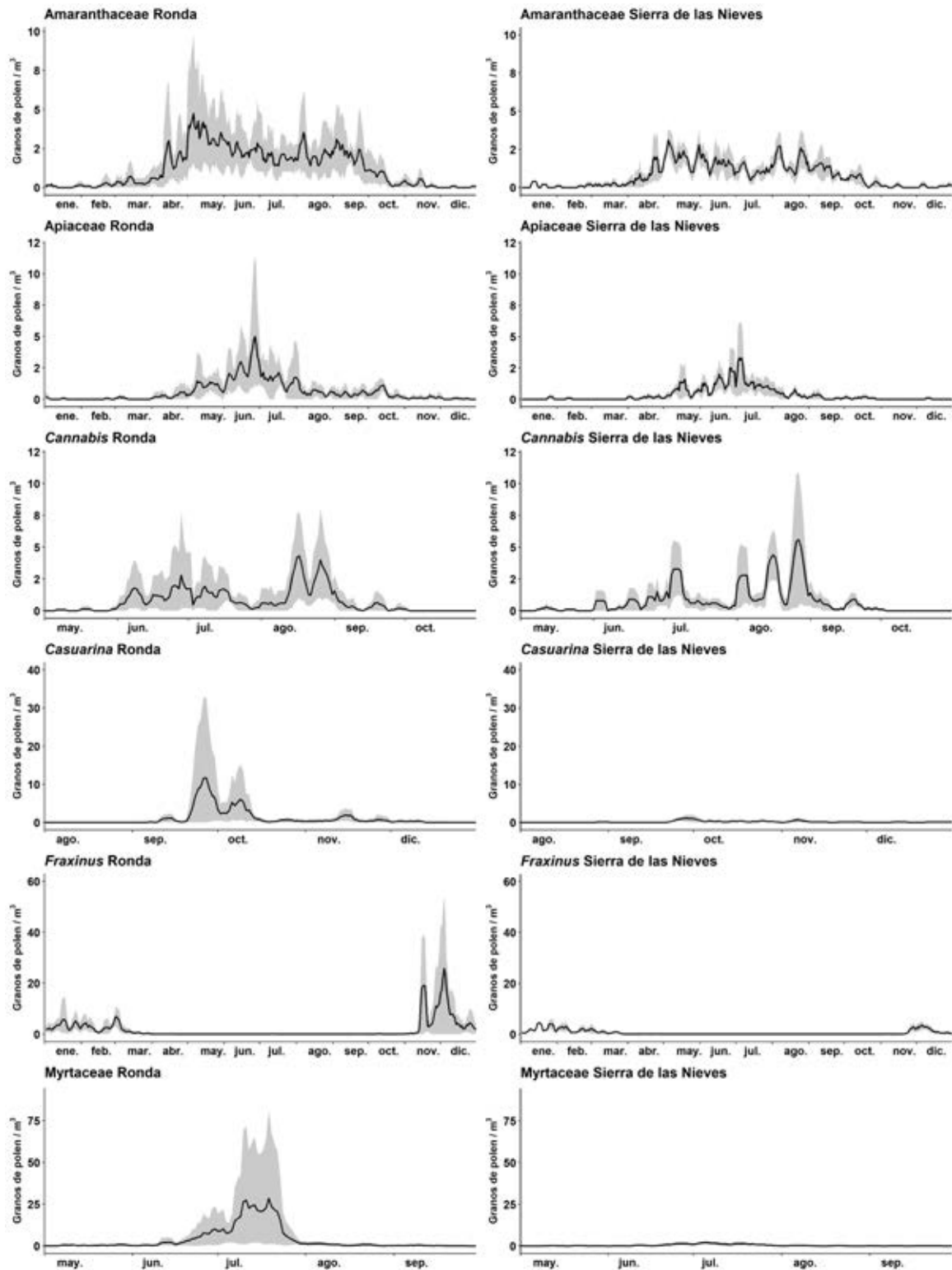


Figura 4.37. Concentraciones diarias promedio de medias móviles de 5 días de amplitud (línea negra), valores máximos (área gris) y mínimos (área blanca sobre la gris) diarios de medias móviles durante el periodo de estudio en Ronda y Sierra de las Nieves.

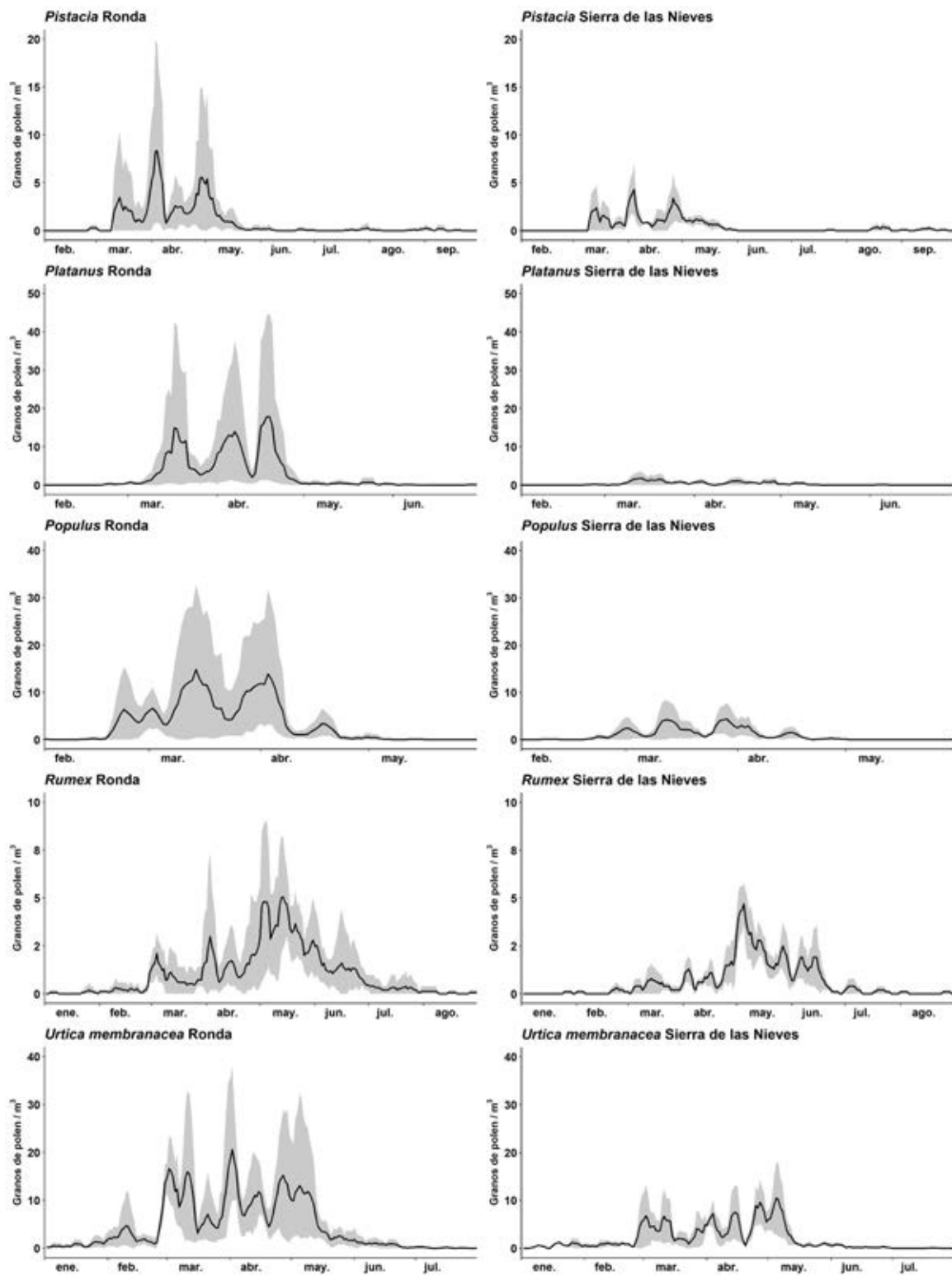


Figura 4.38. Concentraciones diarias promedio de medias móviles de 5 días de amplitud (línea negra), valores máximos (área gris) y mínimos (área blanca sobre la gris) diarios de medias móviles durante el periodo de estudio en Ronda y Sierra de las Nieves.

Tabla 4.17. Principales parámetros del Periodo Principal de Polinación (PPP) de los tipos polínicos minoritarios en Ronda y Sierra de las Nieves (SN) durante el periodo de estudio.

Tipo polínico	Año	Inicio PPP	Fin PPP	Duración (días)	Día pico	Valor pico (granos de polen/m ³)	Integral PPP (Polen*día/m ³)	Integral total (Polen*día/m ³)
Amaranthaceae Ronda	2017	7-abr.	8-oct.	185	15-abr.	8	334	370
	2018	22-abr.	29-sep.	161	8-may.	19	408	450
	2019	6-abr.	2-oct.	180	3-may.	15	474	526
Amaranthaceae SN	2018	22-abr.	1-oct.	163	24-abr.	9	253	279
	2019	29-mar.	12-oct.	198	6-ago.	7	257	285
Apiaceae Ronda	2017	6-may.	27-oct.	175	1-ago.	12	143	157
	2018	18-may.	15-oct.	151	26-jun.	16	248	274
	2019	11-abr.	9-oct.	182	11-may.	8	193	211
Apiaceae SN	2018	20-may.	4-sep.	108	5-jul.	13	141	155
	2019	16-abr.	9-sep.	147	17-may.	8	95	105
Cannabis Ronda	2017	7-jun.	30-ago.	85	18-ago.	11	105	112
	2018	5-jun.	12-sep.	100	30-jun.	18	137	151
	2019	9-jun.	2-sep.	86	26-jun.	12	147	161
Cannabis SN	2018	30-jun.	8-sep.	71	27-ago.	17	120	130
	2019	4-jun.	18-sep.	107	3-ago.	17	150	156
Casuarina Ronda	2017	13-sep.	28-nov.	77	4-oct.	12	109	119
	2018	21-sep.	16-nov.	57	25-sep.	43	183	199
	2019	28-sep.	15-nov.	49	28-sep.	47	184	198
Casuarina SN	2018	24-sep.	13-dic.	81	24-oct.	2	16	16
	2019	25-sep.	24-dic.	91	30-sep.	3	33	35
Fraxinus Ronda	2016-2017	17-dic.	12-mar.	86	26-dic.	15	239	264
	2017-2018	26-dic.	2-mar.	67	2-feb.	15	152	167
	2018-2019	16-nov.	1-mar.	106	3-dic.	98	995	1082
Fraxinus SN	2018-2019	2-dic.	12-mar.	101	26-ene.	18	207	228
Myrtaceae Ronda	2017	7-jun.	25-jul.	49	9-jul.	92	527	583
	2018	2-abr.	2-nov.	215	13-jun.	15	97	107
	2019	12-jun.	30-jul.	49	12-jul.	155	1020	1127
Myrtaceae SN	2018	26-feb.	13-dic.	291	6-jul.	3	30	32
	2019	22-mar.	19-sep.	182	27-jun.	5	99	109
Pistacia Ronda	2017	25-mar.	20-abr.	27	5-abr.	45	164	180
	2018	6-abr.	11-sep.	159	28-abr.	25	141	151
	2019	12-mar.	8-may.	58	30-abr.	30	255	268
Pistacia SN	2018	3-abr.	2-sep.	153	28-abr.	9	100	110
	2019	12-mar.	11-may.	61	2-abr.	13	103	108
Platanus Ronda	2017	18-mar.	19-abr.	33	5-abr.	38	377	412
	2018	4-abr.	17-may.	44	18-abr.	104	305	336
	2019	12-mar.	17-abr.	37	19-mar.	106	455	494
Platanus SN	2018	29-mar.	12-may.	45	27-abr.	8	37	39
	2019	9-mar.	13-abr.	36	19-mar.	7	56	62
Populus Ronda	2017	3-mar.	7-abr.	36	9-mar.	30	238	259
	2018	24-feb.	15-abr.	51	5-abr.	48	330	365
	2019	22-feb.	19-abr.	57	16-mar.	48	529	579
Populus SN	2018	15-mar.	17-abr.	34	28-mar.	16	85	93
	2019	27-feb.	3-abr.	36	12-mar.	16	112	122
Rumex Ronda	2017	2-mar.	29-jun.	120	1-abr.	10	165	183
	2018	24-mar.	20-jul.	119	3-may.	15	292	320
	2019	4-mar.	6-jun.	95	4-may.	15	210	230
Rumex SN	2018	2-abr.	5-jul.	95	3-may.	9	150	166
	2019	6-mar.	19-jun.	106	3-may.	7	134	147
Urtica membranacea Ronda	2017	10-feb.	24-may.	104	31-mar.	54	850	935
	2018	20-feb.	30-may.	100	10-may.	36	658	729
	2019	6-feb.	19-may.	103	12-mar.	53	1016	1122
Urtica membranacea SN	2018	4-mar.	29-may.	87	27-abr.	24	344	380
	2019	1-feb.	16-may.	105	12-mar.	31	415	461

4.4.3.1. Análisis de los episodios de transporte de polen de *Alnus*

El polen de tipo *Alnus* es poco abundante en las localidades de muestreo, tal como se ha observado en el Capítulo 4.4.1. Constituye un $0,20\pm 0,05\%$ del polen total anual detectado en Málaga ciudad, el $0,11\pm 0,03\%$ en Ronda y el $0,08\pm 0,03\%$ en Sierra de las Nieves. Sus integrales polínicas medias son $35,82\pm 25,29$ granos de polen*día/m³ en Málaga, $77,33\pm 46,06$ granos de polen*día/m³ en Ronda y $49,50\pm 12,02$ granos de polen*día/m³ en Sierra de las Nieves.

El polen de *Alnus* presentó grandes oscilaciones entre días consecutivos, así como oscilaciones interanuales. Se detecta principalmente durante los meses de enero, febrero y marzo (Figura 4.39, Anexo A). Las concentraciones medias diarias detectadas fueron generalmente menores en Málaga que en el resto de las localidades. El máximo histórico de concentraciones medias diarias de este tipo polínico en Málaga fue de 26 granos de polen/m³ (28/01/2019), el de Ronda fue de 33 granos de polen/m³ (28/01/2019) y el de Sierra de las Nieves de 12 granos de polen/m³ (03/02/2019) (Picornell *et al.*, 2020).

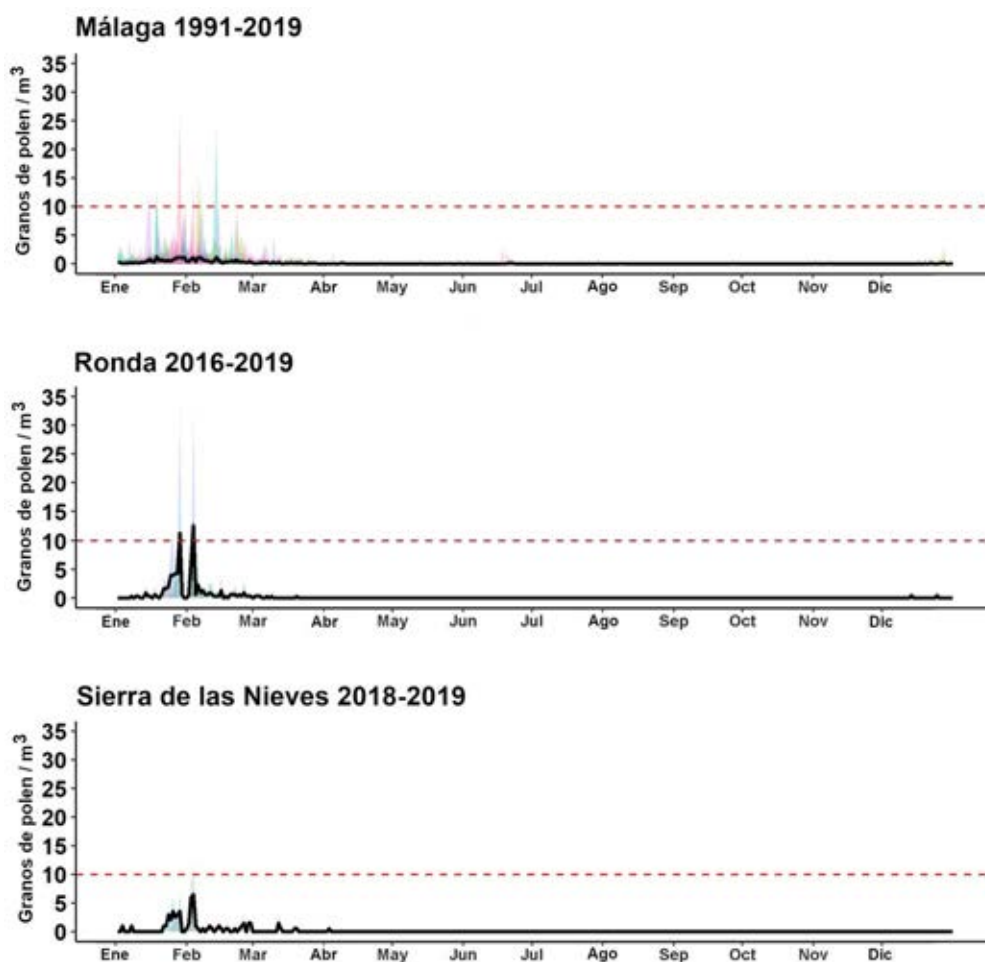


Figura 4.39. Concentraciones medias (línea negra) y máximas (límite superior de las áreas coloreadas) diarias de polen de tipo *Alnus* en las localidades de muestreo de Málaga, Ronda y Sierra de las Nieves durante el periodo de estudio. Las áreas de cada color representan las concentraciones medias diarias de cada uno de los años de muestreo. Las líneas rojas discontinuas marcan el límite de 10 granos de polen/m³ y, por lo tanto, indican todos los días que fueron estudiados como posibles eventos de transporte de larga distancia. Datos de Málaga desde el 11/05/1991 hasta el 30/06/2019; datos de Ronda desde el 16/12/2016 hasta el 30/06/2019; datos de Sierra de las Nieves desde el 24/01/2018 hasta el 30/06/2019.

En general el polen de tipo *Alnus* se detecta en concentraciones bajas en la atmósfera de toda la provincia de Málaga. Las poblaciones de *Alnus* en la provincia son escasas y están a bastante distancia de los puntos de muestreo, lo que posiciona a este tipo polínico como un candidato óptimo para estudiar fenómenos de transporte a media o larga distancia. Aparentemente, Ronda y Sierra de las Nieves suelen registrar concentraciones mayores que Málaga, aunque la gran variabilidad interanual de las integrales polínicas de Málaga podría sugerir un comportamiento similar en las localidades de Ronda y Sierra de las Nieves. Debido a esta elevada variabilidad interanual, el escaso número de años de muestreo en estas dos últimas localidades podría constituir un sesgo a la hora de extraer conclusiones sobre qué estación registra mayores integrales polínicas anuales. También es esperable que las concentraciones medias diarias de Ronda y Sierra de las Nieves (líneas negras, Figura 4.39) disminuyan al incluir datos de más años de muestreo.

Para la estación de Málaga ciudad se han analizado un total de 28 años de muestreo, lo que puede considerarse como un periodo suficiente para establecer el comportamiento estacional general del polen de *Alnus* en la atmósfera de la zona de estudio (Galán *et al.*, 2017; Martínez-Bracero *et al.*, 2015). El periodo de mayor abundancia de polen de *Alnus* en las estaciones de muestreo coincide con las fenofases de floración de diferentes poblaciones de *Alnus* en puntos distantes de la Península Ibérica, por lo que no puede utilizarse la fenología para discriminar el origen del polen detectado (Jato *et al.*, 2013; Rodríguez-Rajo *et al.*, 2017; Velasco-Jiménez *et al.*, 2020). Por otro lado, el polen detectado fuera de los meses de enero a marzo es poco frecuente y, cuando se detecta, lo hace en bajas concentraciones por lo que podría corresponderse con fenómenos de resuspensión del polen.

Las concentraciones polen de *Alnus* detectadas fueron generalmente bajas, no tuvieron continuidad temporal y mostraron una elevada variabilidad interanual, lo que imposibilitó el cálculo de un periodo de polinación principal (Anexo A). Esta situación es más atribuible a polen transportado a larga o media distancia desde su fuente de emisión que a polen procedente de fuentes de emisión locales (Sofiev *et al.*, 2006). La variabilidad de las concentraciones detectadas podría deberse a las condiciones meteorológicas que imperen durante el fenómeno de transporte, lo que a su vez se ve reforzado por las retrotrayectorias de masas de aire.

Se estudiaron las trayectorias de masas de aire de 12 días distintos en Málaga capital (Figura 4.40). No se observó un patrón intradiario común durante esos días, por lo que se estudiaron las trayectorias de todas las franjas horarias para determinar las posibles fuentes de emisión de este tipo polínico.

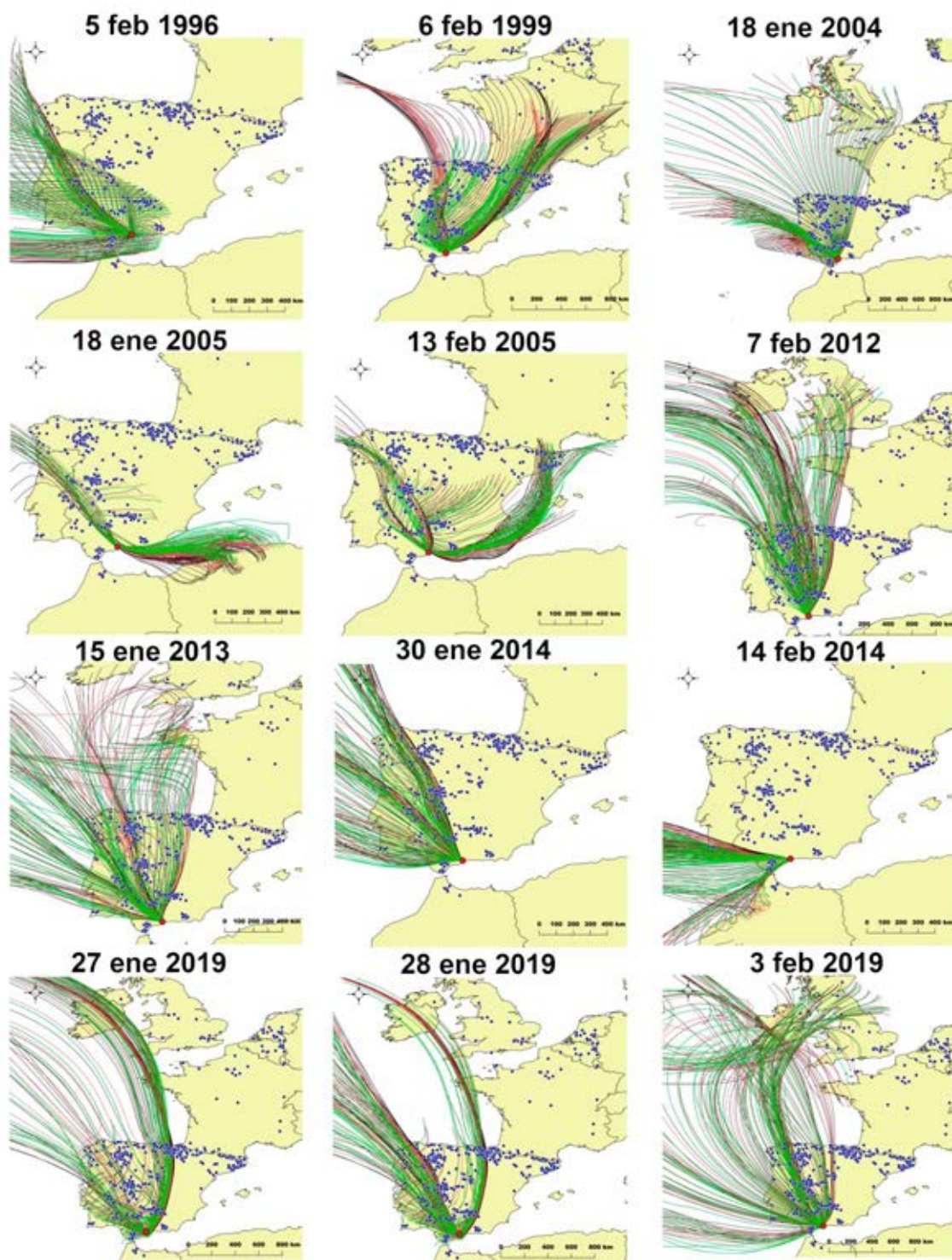


Figura 4.40. Retro trayectorias horarias de masas de aire durante los 12 días con concentraciones de polen de tipo *Alnus* superiores o iguales a 10 granos de polen/m³ en Málaga. Las alturas del punto final de las trayectorias fueron: 500 m sobre el nivel del suelo (verde), 750 m sobre el nivel del suelo (rojo) y 1000 m sobre el nivel del suelo (negro). Cada línea representa el recorrido de las masas de aire durante las 48 horas previas a llegar a la localización del captador de polen. Los puntos azules representan la localización geográfica de los registros de *Alnus* en GBIF.

La ausencia de un patrón uniforme en las retro trayectorias apuntó a un origen múltiple del polen detectado en Málaga. Las poblaciones de *Alnus* más cercanas son las de la provincia de Cádiz y el valle del Genal (suroeste de la estación de muestreo). Estas poblaciones pueden haber contribuido a algunos de los picos

detectados como los del 5 de febrero de 1996, 18 de enero de 2004, 14 de febrero de 2014, 27 de enero de 2019, 28 de enero de 2019 y 3 de febrero de 2019. Sin embargo, en la otra mitad de los picos detectados las trayectorias no pasaron sobre estas poblaciones, sino sobre poblaciones más grandes del norte y noroeste del punto de muestreo (Figura 4.40).

Los parámetros meteorológicos de los días con picos de *Alnus* mostraron algunas diferencias con respecto al resto de días del mismo periodo (enero-marzo) (Figura 4.41).

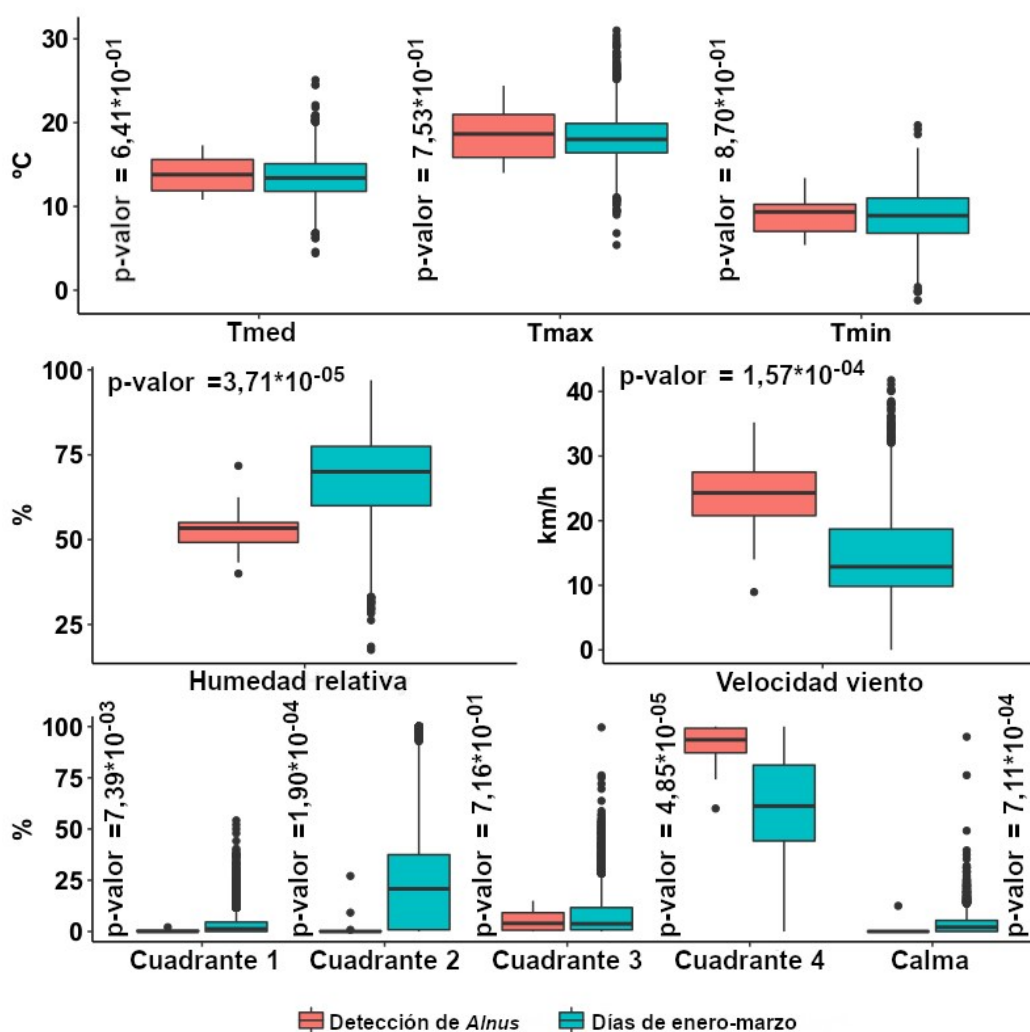


Figura 4.41. Comparativa entre las condiciones meteorológicas de los días con concentraciones iguales o superiores a 10 granos de polen/m³ de *Alnus* («Detección de *Alnus*») y el total de días de enero a marzo del periodo estudiado (1991-2019). Cada caja abarca el 50% de los datos de ese subconjunto (Q1-Q3). La línea negra gruesa de cada caja marca la mediana (Q2). Las barras marcan los límites del subconjunto de datos o, en casos en los que los límites sean demasiado extensos, marcan 1,5 veces el rango intercuartílico. Los p-valores se obtuvieron de pruebas de Mann-Whitney-Wilcoxon. Tmed: temperatura media diaria; Tmax: temperatura máxima diaria; Tmin: temperatura mínima diaria; Cuadrante 1, 2, 3 y 4: frecuencia diaria de vientos procedentes del 1.º, 2.º, 3.º y 4.º cuadrante (NE, SE, SO, NO, respectivamente); Calma: frecuencia diaria de calma de vientos. Detección de *Alnus*, n=12; días de enero-marzo, n=2617.

Durante los días de elevada detección de *Alnus* estudiados no se registraron precipitaciones. El nivel de significación se redujo a $5 \cdot 10^{-03}$ tras la corrección de Bonferroni, por lo que solo se obtuvieron diferencias significativas en la humedad

relativa, la velocidad del viento, las frecuencias de vientos procedentes del 2.º y 4.º cuadrante y la frecuencia de calma.

En Ronda y Sierra de las Nieves se detectaron solo 4 y 2 picos de concentración de polen de *Alnus* (≥ 10 granos de polen/m³) respectivamente (Figura 4.42). Al igual que en Málaga, no se detectó un patrón intradiario concreto, por lo que se estudiaron las trayectorias de masas de aire de los días al completo.

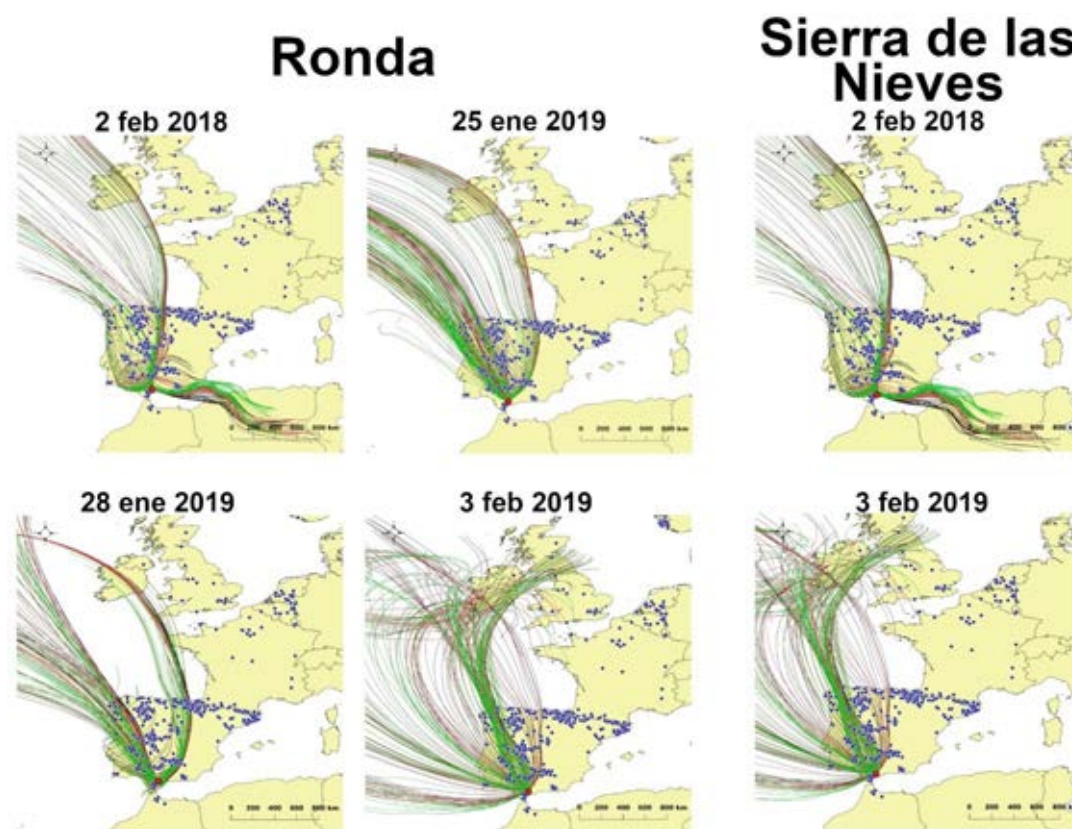


Figura 4.42. Retrotrayectorias horarias de masas de aire durante los 12 días con concentraciones de polen de tipo *Alnus* superiores o iguales a 10 granos de polen/m³ en Ronda y Sierra de las Nieves. Las alturas del punto final de las trayectorias fueron: 500 m sobre el nivel del suelo (verde), 750 m sobre el nivel del suelo (rojo) y 1000 m sobre el nivel del suelo (negro). Cada línea representa el recorrido de las masas de aire durante las 48 horas previas a llegar a la localización del captador de polen. Los puntos azules representan la localización geográfica de los registros de *Alnus* en GBIF.

Las trayectorias de masas de aire que alcanzaron las estaciones de Ronda y Sierra de las Nieves tampoco mostraron un patrón único. Las trayectorias se dividieron, al igual que en Málaga, entre las que pasaron sobre las poblaciones más cercanas de *Alnus* (28 de enero de 2019 y 3 de febrero de 2019 en Ronda; 3 de febrero de 2019 en Sierra de las Nieves) y las que pasaron sobre las poblaciones del norte y noroeste de los puntos de muestreo.

Los días con concentraciones de polen de *Alnus* iguales o superiores a 10 granos de polen/m³ en Ronda y Sierra de las Nieves son insuficientes como para realizar estudios estadísticos o representar gráficos de cajas, por lo que los resultados se han expresado en formato de tabla (Tabla 4.18).

Tabla 4.18. Media y desviación estándar de los parámetros meteorológicos en los días con elevadas concentraciones de polen de tipo *Alnus* («Detección *Alnus*»; ≥ 10 pollen grains/m³) en Ronda y Sierra de las Nieves y comparación con los parámetros en el total de días de enero-marzo (2017-2019 en Ronda y 2018-2019 en Sierra de las Nieves).

	Ronda		Sierra de las Nieves	
	Enero-marzo (n=270 días)	Detección <i>Alnus</i> (n=4 días)	Enero-marzo (n=180 días)	Detección <i>Alnus</i> (n=2 días)
Prec (mm)	2,76±9,03	0,00±0,00	3,19±10,32	0,00±0,00
H Rel (%)	67,41±13,92	66,88±6,69	66,70±13,75	61,25±1,77
Tmed (°C)	9,79±3,12	7,05±3,30	9,73±3,00	4,55±0,07
Tmax (°C)	14,17±4,02	11,20±3,57	14,17±3,94	8,55±0,35
Tmin (°C)	5,40±2,85	2,87±3,04	5,30±2,74	0,55±0,49
Vel Vient (km/h)	6,34±3,94	5,57±1,17	6,47±4,29	5,17±1,30
Cuadrante 1 (%)	16,65±17,17	45,52±29,27	15,75±15,69	45,00±25,34
Cuadrante 2 (%)	33,32±26,00	4,06±2,77	33,08±25,74	4,79±4,42
Cuadrante 3 (%)	12,45±13,81	2,29±2,11	11,65±13,12	1,46±0,29
Cuadrante 4 (%)	28,23±23,42	42,40±26,13	30,28±24,25	43,54±27,40
Calma (%)	9,34±8,43	5,73±3,65	9,25±8,00	5,21±2,06

Prec: precipitación total diaria; H Rel: humedad relativa media diaria; Tmed: temperatura media diaria; Tmax: temperatura máxima diaria; Tmin: temperatura mínima diaria; Vel Vient: velocidad del viento media diaria; Cuadrante 1, 2, 3 y 4: frecuencia diaria de vientos procedentes del 1.º, 2.º, 3.º y 4.º cuadrante (NE, SE, SO, NO, respectivamente); Calma: frecuencia diaria de calma de vientos.

Las condiciones meteorológicas dominantes en los días con altas concentraciones de polen de *Alnus* en Ronda y Sierra de las Nieves fueron temperaturas bajas, humedad relativa ligeramente baja y una elevada dominancia de vientos procedentes del primer y cuarto cuadrante (dominancia de componente norte). No se registraron precipitaciones en los días de alta detección de *Alnus*.

Tras aplicar la corrección de Bonferroni, el nivel de significancia para las correlaciones de Spearman realizadas entre las variables meteorológicas y las concentraciones diarias de polen de tipo *Alnus* se redujo a $4.55 \cdot 10^{-03}$ (Tabla 4.19).

Las correlaciones no mostraron un patrón homogéneo para todos los puntos de muestreo (Tabla 4.19), lo que podría deberse a las grandes diferencias en el número de datos disponibles entre estaciones. Es menos probable detectar correlaciones significativas en localidades con pocos datos. Por otro lado, las correlaciones *post-hoc* empleadas son bastante conservadoras, lo que podría aumentar la tasa de falsos negativos. En Málaga se detectaron correlaciones negativas significativas con la humedad relativa, la frecuencia de vientos del 2.º cuadrante (SE, provenientes del mar) y la frecuencia de calmas. También se detectaron correlaciones positivas significativas con la velocidad del viento y la frecuencia de vientos del 4.º cuadrante (NO). En Ronda se obtuvieron correlaciones negativas significativas con las temperaturas medias, las temperaturas mínimas y la frecuencia de vientos del 3.º cuadrante (SO). En Sierra de las Nieves se detectó una correlación negativa significativa con la frecuencia de vientos del 2.º cuadrante (SE). Málaga es una ciudad costera, y los vientos procedentes del 2.º y 3.º cuadrante provienen del mar, por lo que suelen traer concentraciones más bajas de polen que los vientos de componente norte. Las

correlaciones negativas obtenidas con la humedad relativa se deben al efecto de lavado de la atmósfera que producen valores elevados de esta variable. Vientos fuertes favorecen el transporte de polen, lo que podría explicar las correlaciones positivas significativas detectadas con la velocidad del viento (Recio *et al.*, 2018).

Tabla 4.19. Resultados de las correlaciones de Spearman entre las concentraciones diarias de polen de tipo *Alnus* y variables meteorológicas.

	Málaga (n=530 días)		Ronda (n=80 días)		Sierra de las Nieves (n=47 días)	
	Coef.	p-valor	Coef.	p-valor	Coef.	p-valor
Prec	-0,07	0,127	0,03	0,758	-0,21	0,164
H Rel	-0,26	0,000*	0,14	0,211	0,07	0,663
Tmed	-0,03	0,509	-0,37	0,001*	-0,10	0,495
Tmin	-0,02	0,681	-0,38	0,000*	-0,14	0,350
Tmax	-0,02	0,595	-0,27	0,017	-0,01	0,944
Vel Vient	0,25	0,000*	0,18	0,110	0,17	0,241
Cuadrante 1	-0,10	0,024	0,15	0,187	0,13	0,368
Cuadrante 2	-0,23	0,000*	-0,25	0,023	-0,45	0,002*
Cuadrante 3	0,02	0,592	-0,32	0,004*	-0,17	0,244
Cuadrante 4	0,21	0,000*	0,17	0,121	0,31	0,037
Calma	-0,23	0,000*	-0,25	0,024	-0,17	0,243

Coef.: coeficiente de correlación de Spearman; Prec: precipitación total diaria; H Rel: humedad relativa media diaria; Tmed: temperatura media diaria; Tmax: temperatura máxima diaria; Tmin: temperatura mínima diaria; Vel Vient: velocidad del viento media diaria; Cuadrante 1, 2, 3 y 4: frecuencia diaria de vientos procedentes del 1.º, 2.º, 3.º y 4.º cuadrante (NE, SE, SO, NO, respectivamente); Calma: frecuencia diaria de calma de vientos. *: Correlaciones significativas tras la corrección de Bonferroni.

La incidencia y discontinuidad de la detección de polen de *Alnus* (Figura 4.39), el recorrido de las retrotrayectorias de masas de aire (figuras 4.40 y 4.42), las condiciones meteorológicas de los días en los que se detectaron elevadas concentraciones de este tipo polínico y las correlaciones obtenidas (Figura 4.41, tablas 4.18 y 4.19) apuntaron a fenómenos de transporte a media o larga distancia para explicar el origen de estas concentraciones. Estudios previos ya han detectado fenómenos de transporte a larga distancia del polen de *Alnus* en el norte de la Península Ibérica (Izquierdo *et al.*, 2015). En las figuras 4.40 y 4.42, se observa como las masas de aire que alcanzan el punto de muestreo pasaron previamente por las principales poblaciones de *Alnus* del norte y sureste de los puntos de muestreo en los días en los que se detectaron las concentraciones más elevadas de este tipo polínico. Las trayectorias fueron muy similares a las tres alturas consideradas, por lo que se esperan trayectorias parecidas a alturas intermedias. Por la distancia recorrida, el transporte de polen desde estas poblaciones podría considerarse un transporte de media o incluso larga distancia (dependiendo de la población concreta). Además, las condiciones meteorológicas durante esos días fueron favorables para el transporte de polen (Figura 4.41 y Tabla 4.18): ausencia de precipitaciones, baja humedad relativa y elevada velocidad del viento (Bonofiglio *et al.*, 2008; Recio *et al.*, 2018; Rodríguez-Rajo *et al.*, 2004, 2017; Rojo *et al.*, 2015). De hecho, los días de altas concentraciones de polen de *Alnus* tuvieron menores frecuencias de viento en calma que la media para ese periodo (Figura 4.41). Los vientos dominantes en Málaga fueron los del

4.º cuadrante durante estos días, lo que apunta a las poblaciones del norte y noroeste como posibles fuentes de polen de *Alnus*. En Ronda y Sierra de las Nieves los vientos dominantes provinieron del 1.º y 4.º cuadrante, lo que también sugiere un origen norteño del polen detectado.

A pesar de que temperaturas elevadas suelen favorecer el secado y dehiscencia de las anteras (y por lo tanto, la liberación de polen) (Recio *et al.*, 2018; Rojo *et al.*, 2015), no se encontraron diferencias significativas con respecto a las temperaturas entre los días de elevada detección de *Alnus* y el resto de los días del periodo enero-marzo (Figura 4.41). Es posible que esto se deba a que no son las condiciones locales del lugar de destino las que influyen sobre la liberación del polen que es transportado a larga distancia, sino las condiciones de su origen. Además, los vientos provenientes del norte en esta época del año normalmente arrastran temperaturas frías, lo que podría explicar las correlaciones negativas significativas obtenidas en Ronda entre las concentraciones de polen de *Alnus* y las temperaturas medias y mínimas diarias.

Todos estos resultados apuntan a un origen norte del polen detectado, que podrían ser las poblaciones de *Alnus* de Sierra Morena (norte de Andalucía; a 160-200 km de distancia). No pueden descartarse contribuciones puntuales de las poblaciones situadas al suroeste de los puntos de muestreo (valle del Genal y provincia de Cádiz; a 50-100 km de distancia) o al este (Sierra Nevada; a 130-160 km de los puntos de muestreo) tal como se observa en algunas retrotrayectorias (figuras 4.40 y 4.42). Aunque son menos probables, no pueden descartarse tampoco contribuciones puntuales de poblaciones más al norte de Sierra Morena (>300 km de distancia).

Las concentraciones medias diarias de polen de tipo *Alnus* detectadas en otros lugares de Europa o incluso del norte de la Península Ibérica suelen ser más elevadas que las concentraciones más altas detectadas en las localidades de muestreo de este estudio (Ghasemifard *et al.*, 2020; Jantunen *et al.*, 2012; Rodríguez-Rajo *et al.*, 2017; Smith *et al.*, 2007; Velasco-Jiménez *et al.*, 2020). No es de esperar que las concentraciones normalmente detectadas en la provincia de Málaga puedan producir síntomas severos en la población alérgica por ellas mismas, aunque no está claro si algunos de los picos detectados pueden desencadenar algunas respuestas inmunológicas en la población sensible (Jantunen *et al.*, 2012; Rodríguez-Rajo *et al.*, 2017). La reactividad cruzada entre el polen de tipo *Alnus* y el de otras especies pertenecientes al orden Fagales está bien documentada en la bibliografía (Emberlin *et al.*, 2007; Gehrig *et al.*, 2015; Hauser *et al.*, 2011; Kasprzyk & Borycka, 2019; Skjøth *et al.*, 2015; Smith *et al.*, 2007). Sin embargo, la mayoría de los estudios se han centrado en la reactividad cruzada con el polen de *Betula*, y poco se sabe de la reactividad con el polen de tipo *Quercus*. El polen de tipo *Quercus* no es tan abundante en el centro y norte de Europa como lo es en el sur de la Península Ibérica, por lo que no se han realizado muchos estudios de reactividad cruzada entre estos dos tipos polínicos (Hauser *et al.*, 2011; Jantunen *et al.*, 2012; Skjøth *et al.*, 2015). Por este motivo y dado que el polen de *Quercus* es tan abundante en la zona de muestreo (Capítulo 4.4.2.2), sería interesante para trabajos futuros investigar con datos clínicos si picos esporádicos de polen de *Alnus* a finales de invierno son capaces de predetonar e incrementar la respuesta alérgica al polen de *Quercus* de esa primavera.

Los fenómenos de transporte a larga distancia detectados a partir de estos resultados junto a los detectados en otros estudios previos (Izquierdo *et al.*, 2015) podrían indicar una posible conectividad reproductiva entre las poblaciones de *Alnus* del sur de la Península Ibérica pese a la distancia existente entre ellas, lo que sería muy interesante para su gestión y conservación.

4.4.4. Variaciones intradiarias

Tras descartar la normalidad de la mayoría de los casos en los datos de recuento bihorarios (pruebas de Shapiro-Wilk; p -valores $> 0,05$), se compararon los distintos años de muestreo entre sí mediante pruebas de Mann-Whitney-Wilcoxon con datos apareados. No se encontraron diferencias significativas entre los patrones intradiarios de los años de muestreo para ninguna combinación de años en ninguno de los tipos polínicos estudiados (p -valores $> 0,05$) (figuras 4.43 y 4.44).

En general, *Castanea* y Cupressaceae de otoño mostraron un patrón intradiario más heterogéneo que los de *Olea*, Poaceae y *Quercus*, y presentaron porcentajes medios superiores al 20% en algunos intervalos bihorarios. Esto también se reflejó en los IDI, ya que los de *Castanea* y Cupressaceae fueron los más elevados de entre todos los tipos polínicos en Ronda y Sierra de las Nieves (Tabla 4.20). El pico de concentración diario se detectó generalmente al medio día y durante las primeras horas de la tarde. En el caso de *Castanea* en 2018, el pico se registró durante la noche.

Castanea, Cupressaceae de invierno y *Quercus* fueron los que más diferencias significativas mostraron entre los patrones intradiarios de ambas localidades (Figura 4.45, Tabla 4.20). Esto puede deberse a que su presencia en la atmósfera depende, principalmente, de fuentes de emisión locales que definen el patrón intradiario de dichos taxones.

En el caso de *Castanea*, en ambas localidades el IDI refleja elevadas oscilaciones en su patrón intradiario. El pico intradiario de polen se registró más tarde en Sierra de las Nieves que en Ronda. Se detectaron diferencias significativas durante la mayor parte del día, a excepción del periodo que abarca el pico intradiario en Ronda y las últimas horas del día. También se detectaron diferencias en el valor del IDI (Tabla 4.20), que fue mayor en Sierra de las Nieves (0,36). Las diferencias observadas y el desfase temporal del patrón intradiario en ambas estaciones podrían explicarse por la mayor cercanía de Sierra de las Nieves a las principales plantaciones de castaño de la zona. Las extensas plantaciones del Valle del Genal también se encuentran más próximas al captador instalado en Sierra de las Nieves (Figura 4.46). De acuerdo con un estudio previo de *Castanea* realizado en Galicia (Jato *et al.*, 2001), el patrón intradiario obtenido en ambas localidades es similar al de ciudades como Santiago, Ourense o Vigo. Estas ciudades también tienen fuentes de emisión de polen de *Castanea* en sus proximidades. La presencia de un único pico de *Castanea* durante el día en Ronda y Sierra de las Nieves reflejaría, así pues, el patrón de captación de polen transportado desde distancias cercanas/medias. Ciudades con menor presencia de polen de *Castanea* en su atmósfera, como Porto (Portugal), muestran un patrón intradiario mucho más homogéneo (Ribeiro & Abreu, 2014).

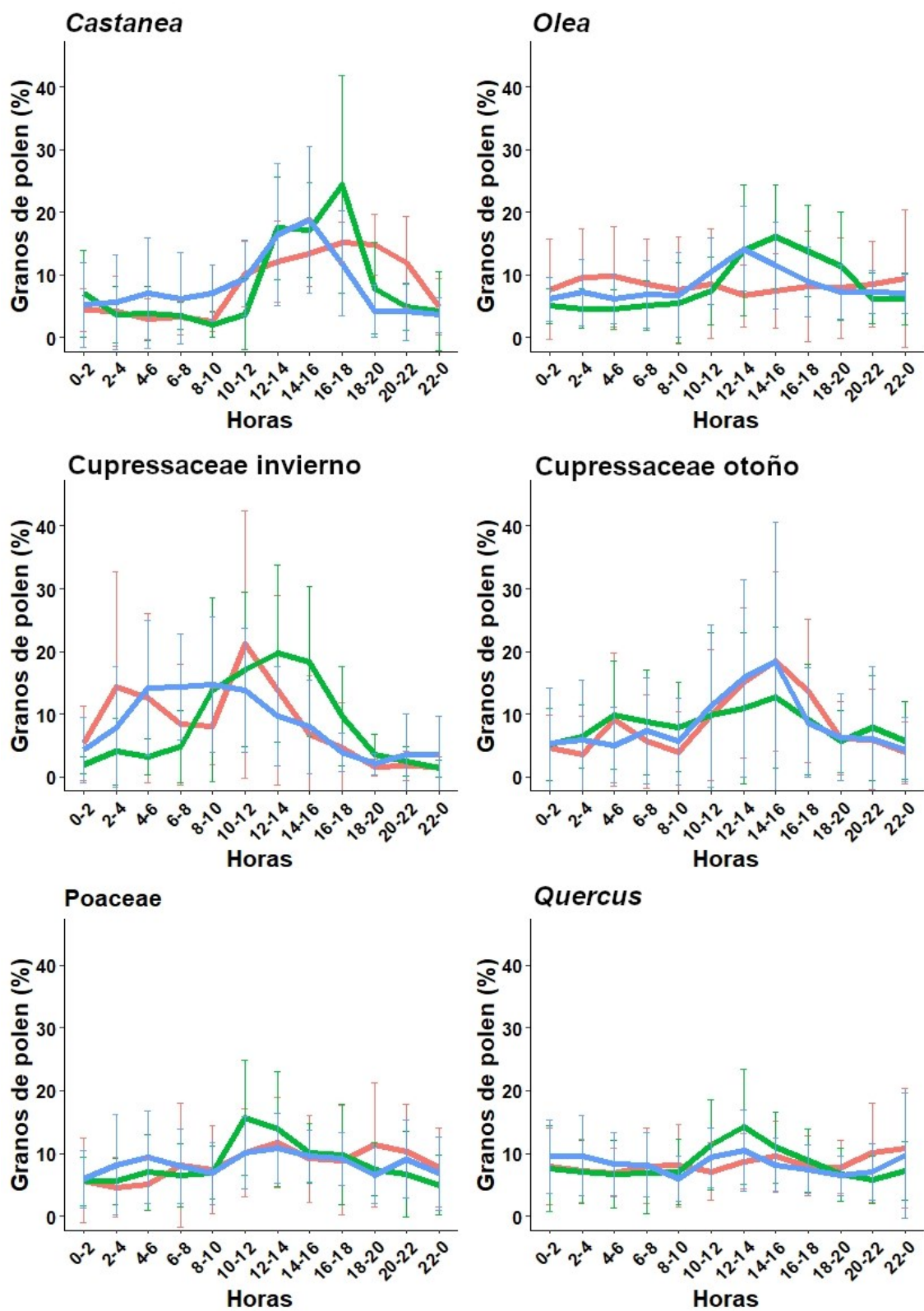


Figura 4.43. Medias (líneas) y desviaciones estándar (barras) anuales de los patrones intradiarios de los tipos polínicos más abundantes en Ronda. Rojo, 2017; verde, 2018; azul, 2019.

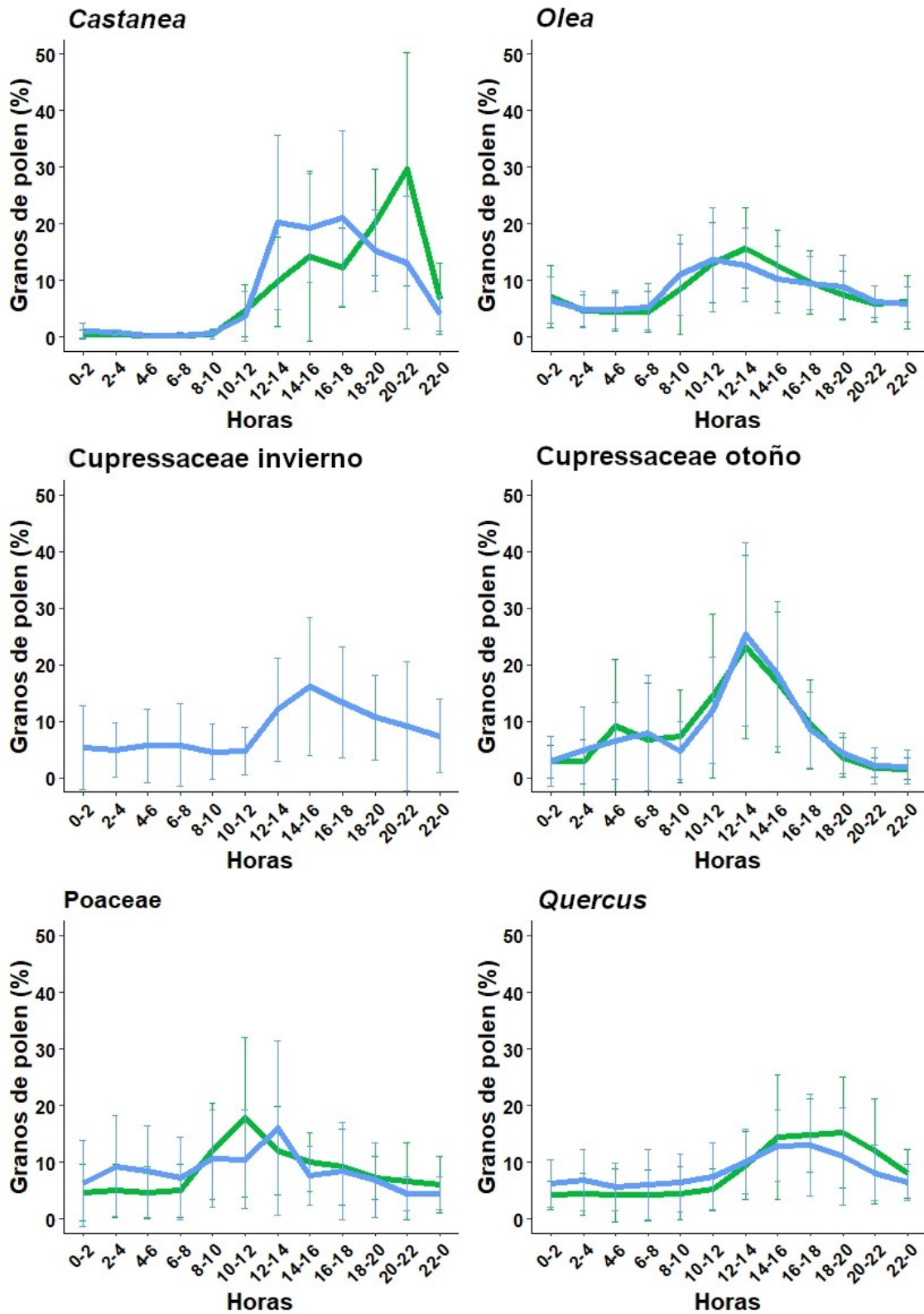


Figura 4.44. Medias (líneas) y desviaciones estándar (barras) anuales de los patrones intradiarios de los tipos polínicos más abundantes en Sierra de las Nieves. Verde, 2018; azul, 2019.

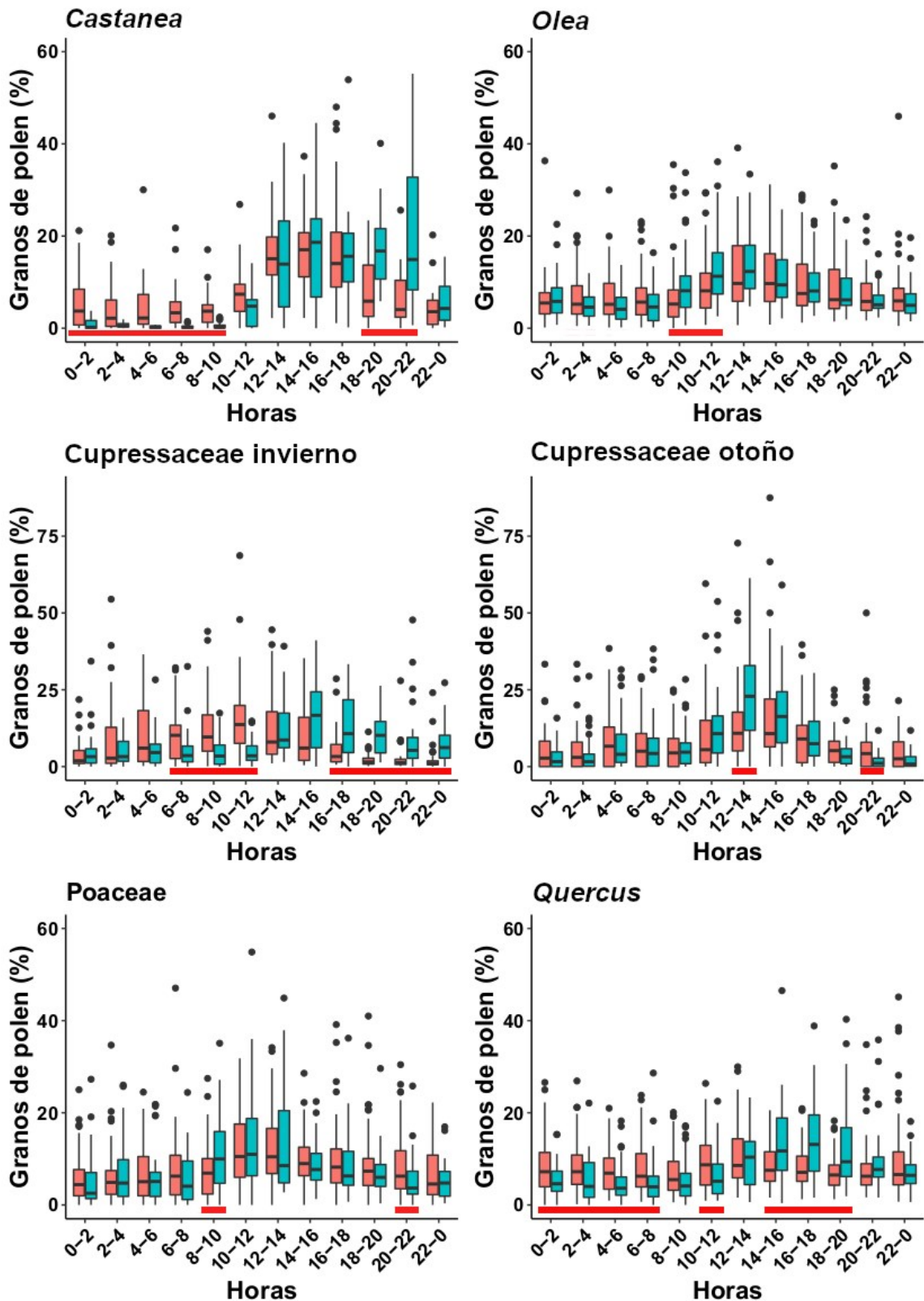


Figura 4.45. Comparativa de los patrones intradiarios de Ronda (rojo) y Sierra de las Nieves (turquesa). Se representan: las medianas (línea negra gruesa), los rangos intercuartílicos desde Q1 a Q3 (cajas), el rango de datos englobados entre 1,5 veces el máximo y mínimo del rango intercuartílico Q1-Q3 (líneas verticales), y los datos que se salen de dichos rangos (puntos). Las líneas rojas horizontales inferiores marcan aquellos periodos bihorarios en los que se obtuvieron diferencias significativas (p -valores $\leq 0,05$) entre las estaciones en pruebas de Mann-Whitney-Wilcoxon.

Tabla 4.20. Comparativa de las medias y desviaciones estándar de los Índices de Distribución Intradiurna (IDI) en Ronda y Sierra de las Nieves.

Tipo polínico	Ronda	Sierra de las Nieves	<i>p</i> -valor
Castanea	0,26 ± 0,10	0,36 ± 0,11	0,002
Cupressaceae invierno	0,32 ± 0,10	0,27 ± 0,09	0,058
Cupressaceae otoño	0,31 ± 0,15	0,35 ± 0,12	0,030
Olea	0,21 ± 0,08	0,19 ± 0,07	0,390
Poaceae	0,22 ± 0,08	0,26 ± 0,09	0,044
Quercus	0,18 ± 0,07	0,21 ± 0,09	0,103

p-valor: valores de *p* obtenidos en pruebas de Mann-Whitney-Wilcoxon. En negrita: diferencias significativas (*p*-valor ≤ 0,05).

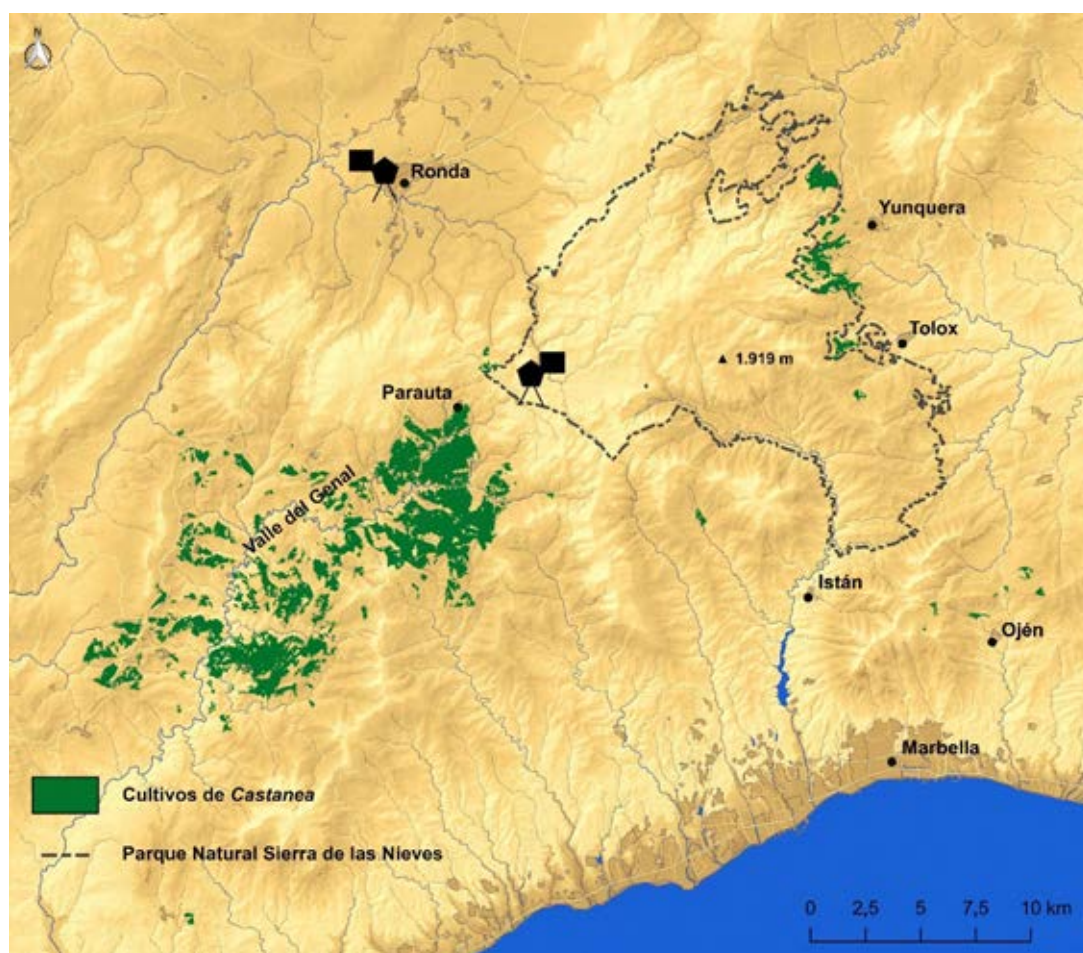


Figura 4.46. Mapa de distribución de los principales cultivos de *Castanea sativa* Mill. en el área de estudio (datos de 2007). Procesado a partir de datos obtenidos de la base de datos de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM), Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Junta de Andalucía. Consultados en febrero de 2019.

En Cupressaceae de invierno, las fuentes de emisión son principalmente taxones ornamentales como *Cupressus sempervirens* y *Cupressus arizonica* (capítulos 4.2 y 4.3), que son más abundantes en Ronda que en Sierra de las

Nieves. Tampoco pueden descartarse contribuciones puntuales de taxones de floración típicamente otoñal (*Juniperus phoenicea* o *Juniperus oxycedrus*) cuyo periodo de floración se puede prolongar hasta principios de año (Blanca *et al.*, 2011). El retraso temporal observado en Sierra de las Nieves con respecto a Ronda podría deberse principalmente a la distancia que ha de recorrer el polen de los taxones ornamentales desde las fuentes de emisión en Ronda y alrededores hasta ser detectado en Sierra de las Nieves, junto a la mayor influencia de taxones no ornamentales en esta última localidad. Las diferencias detectadas en el IDI de ambas localidades estuvieron muy cerca de ser significativas (p -valor = 0,058, Tabla 4.20), con un mayor IDI en Ronda por su cercanía a las principales fuentes de emisión. La irregularidad del proceso de transporte de polen a lo largo del día podría ser la responsable de la detección de una mayor variabilidad de patrones en Sierra de las Nieves y, por lo tanto, de la ausencia de diferencias significativas entre localidades. Por el contrario, Cupressaceae de otoño se corresponde, mayoritariamente, con taxones silvestres como *Juniperus oxycedrus* y *Juniperus phoenicea*, que son más abundantes en las inmediaciones del captador de Sierra de las Nieves. Sin embargo, no puede descartarse la contribución de especies ornamentales como *Platycladus orientalis*, *Tetraclinis articulata*, *Cupressus lusitanica* o *Cupressus arizonica*. Estas especies son habituales en parques y jardines e influenciarían, en gran medida, los registros polínicos de Ronda. Aunque distintas en cuanto a composición, las fuentes de emisión son locales en ambas localidades, lo que produce un patrón intradiario similar. Ronda, por la abundancia de varios taxones ornamentales, tiene una mayor diversidad de fuentes de emisión de polen de Cupressaceae de otoño que Sierra de las Nieves. La composición multiespecífica de los tipos polínicos suele suavizar el patrón intradiario (Trigo *et al.*, 1997), lo que explicaría el menor IDI de la localidad de Ronda con respecto al de Sierra de las Nieves (Tabla 4.20). Los IDI obtenidos fueron similares a los de un estudio previo realizado en Málaga capital (Trigo *et al.*, 1997), aunque los resultados no son directamente comparables por haberse estudiado las Cupressaceae en su conjunto anual.

El captador de Sierra de las Nieves está instalado en el interior de un encinar (*Paeonio-Quercetum rotundifoliae*) con *Quercus rotundifolia* como especie dominante (Pérez-Latorre *et al.*, 1998), por lo que cabría asumir que el patrón obtenido se corresponde más con el patrón de liberación de polen que con el patrón de captación de polen en captadores más distantes (Jato *et al.*, 2001; Trigo *et al.*, 1997). La influencia de esta abundante fuente de polen local se observa en sus diferencias significativas con Ronda en el patrón intradiario (Figura 4.45). La ausencia de diferencias significativas en el IDI de ambas localidades (Tabla 4.20) puede deberse a la gran extensión de bosques de *Quercus* por la mayor parte de la comarca de Ronda. La presencia de distintos bosques de *Quercus* a diferentes altitudes y situaciones geográficas hace que los patrones de liberación de polen sean diferentes dependiendo del lugar (Jato *et al.*, 2001) y, por lo tanto, que se capte polen durante la mayor parte del día. Este fenómeno suaviza el patrón intradiario, evitando que se observen grandes contrastes entre las horas del día, aunque sí se observen diferencias en cuanto al momento en el que se detectan los máximos diarios. A pesar de este efecto de homogeneización del patrón intradiario, la proximidad del conjunto de las fuentes de emisión hace que el IDI sea mucho mayor que en localidades más lejanas como Málaga capital (Trigo *et al.*, 1997).

En *Olea*, se observa un patrón intradiario muy similar en ambas localidades. Solo se observaron diferencias significativas en el periodo comprendido entre las 8:00 y las 12:00. Los cultivos de olivo, por su abundancia y extensión, son los principales contribuyentes al polen de este tipo captado en la atmósfera, a pesar de que en él también se incluye el polen de acebuche (*Olea europaea* var. *sylvestris*). Al tratarse de una fuente común a ambos captadores, no se observaron diferencias significativas para la mayoría de los periodos bihorarios. Las únicas diferencias significativas observadas (8:00-12:00) podrían deberse a pequeñas diferencias en la distancia de los captadores a los cultivos. Tampoco se observaron diferencias significativas entre los IDI de ambas localidades (Tabla 4.20). No obstante, sí que se observaron diferencias entre los IDI de estas localidades y el IDI de un estudio llevado a cabo en Málaga capital (Trigo *et al.*, 1997), lo que podría explicarse de nuevo por la distancia desde las fuentes de emisión hasta el captador de Málaga (Kasprzyk, 2006; Trigo *et al.*, 1997).

El patrón intradiario de Poaceae (Figura 4.45) presentó pocas diferencias significativas entre las localidades de estudio ya que, como se ha mencionado anteriormente, los taxones multiespecíficos suelen tener un patrón intradiario más homogéneo (Trigo *et al.*, 1997). Sin embargo, sí se obtuvieron diferencias significativas entre el IDI de ambas localidades (Tabla 4.20). El IDI de Ronda fue mayor al IDI de Sierra de las Nieves, lo que puede explicarse por la mayor extensión de vegetación de porte herbáceo ruderal y arvense (en la que abundan gramíneas) y cultivos de cereales en las inmediaciones de la ciudad, en contraste con la vegetación dominada por matorrales y bosques en Sierra de las Nieves. Si bien el patrón intradiario está suavizado en ambas estaciones por la multiespecificidad del taxon, la cercanía a fuentes de emisión mono-específicas más abundantes en Ronda permitiría la distinción de un pico intradiario mayor que en Sierra de las Nieves.

4.4.4.1. Análisis de clusters de Ward

Solo se obtuvo un coeficiente de correlación cofenético superior a 0,7, y fue en el caso de *Castanea* en Sierra de las Nieves, por lo que el análisis *cluster* solo se realizó con este tipo polínico (Tabla 4.21).

Tabla 4.21. Coeficientes de correlación cofenéticos obtenidos a partir de análisis de *clusters* de Ward de distancias euclidianas.

	Ronda	Sierra de las Nieves
<i>Castanea</i>	0,47	0,72
<i>Cupressaceae</i> invierno	0,63	0,50
<i>Cupressaceae</i> otoño	0,50	0,63
<i>Olea</i>	0,47	0,63
<i>Quercus</i>	0,54	0,61
Poaceae	0,39	0,57

Se observaron dos grupos claramente diferenciados en el *cluster* de *Castanea* en Sierra de las Nieves (Figura 4.47), se separaron los días de cada grupo y se realizó una comparativa entre ellos (Figura 4.48).

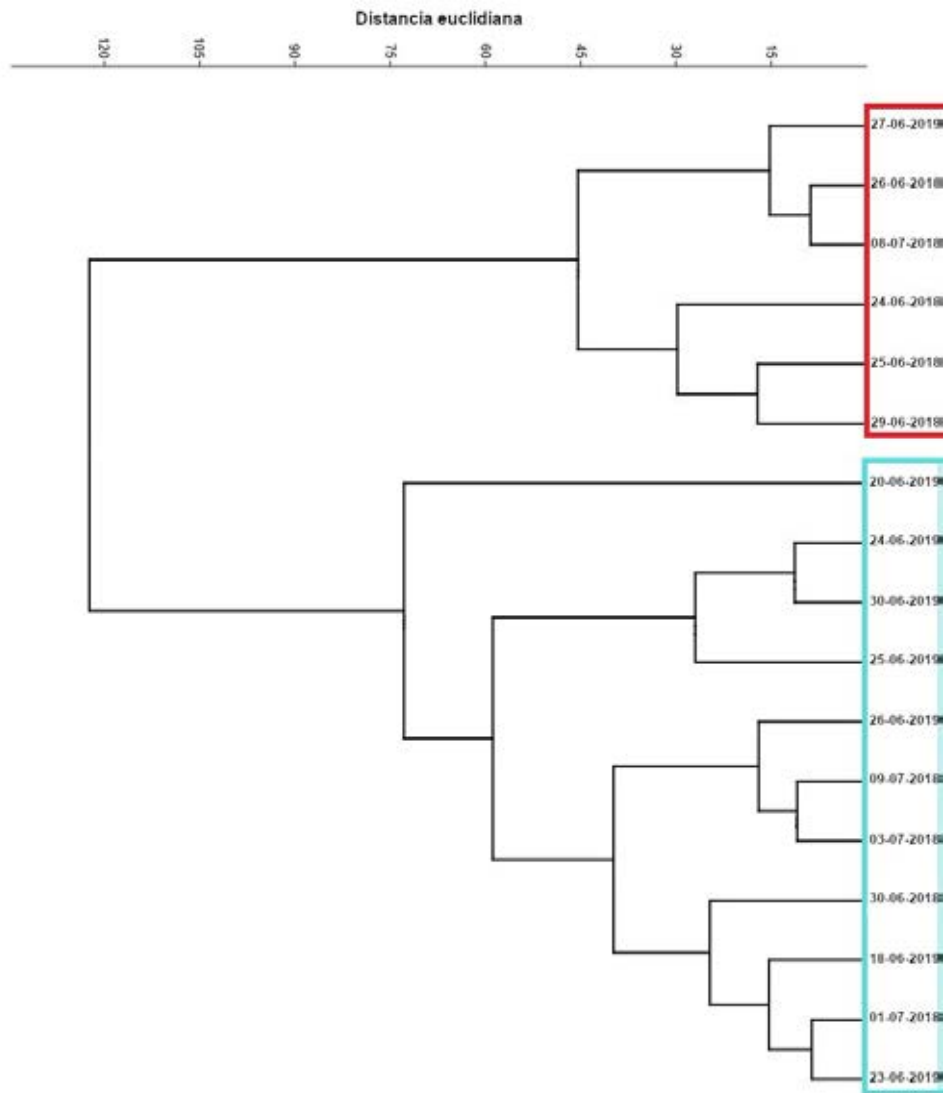


Figura 4.47. Cluster de Ward de distancias euclidianas realizado para los patrones intradiarios de *Castanea* en Sierra de las Nieves. En rojo el grupo 1, en azul el grupo 2. Los dos mismos grupos se establecieron en las 1000 simulaciones *cluster* realizadas (*bootstrap* = 1000).

El grupo 1 presentó un patrón con un marcado pico al final del día (Figura 4.48). En cambio, el patrón del grupo 2 fue muy similar al observado en Ronda (Figura 4.45, Capítulo 4.4.4), con mayor homogeneidad en su patrón intradiario y con el pico al medio día. Las diferencias observadas entre grupos en los periodos mencionados fueron significativas (p -valor $\leq 0,05$) de acuerdo con los resultados de pruebas de Mann-Whitney-Wilcoxon.

Se realizó un análisis de retro trayectorias de vientos para determinar el origen de estas diferencias (figuras 4.49 y 4.50).

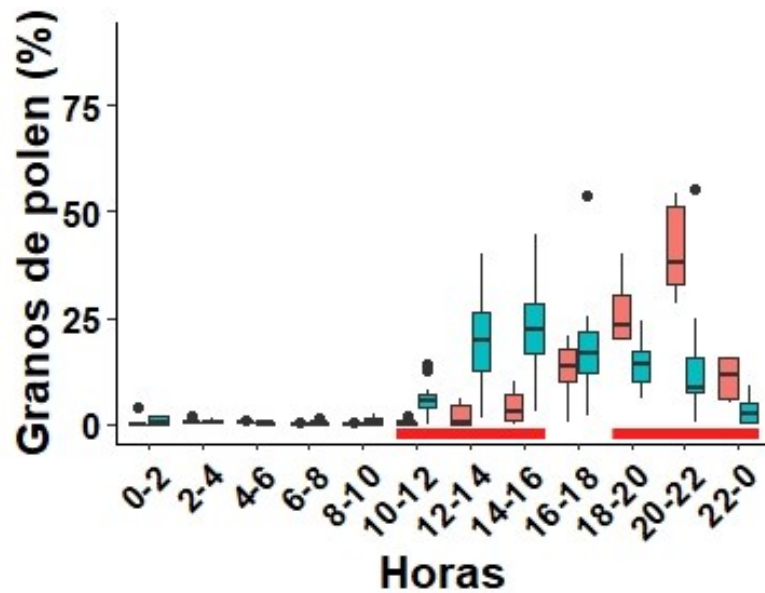


Figura 4.48. Comparativa entre los dos grupos de patrones intradiarios de *Castanea* en Sierra de las Nieves. En rojo, el grupo 1; en azul, el grupo 2. Se representan: las medianas (línea gruesa), los rangos intercuartílicos desde Q1 a Q3 (cajas), el rango de datos englobados entre 1,5 veces el máximo y mínimo del rango intercuartílico Q1-Q3 (líneas verticales), y los datos que se salen de dichos rangos (puntos). Las líneas rojas marcan aquellos periodos bihorarios en los que se obtuvieron diferencias significativas (p -valores $\leq 0,05$) entre las estaciones en pruebas de Mann-Whitney-Wilcoxon.

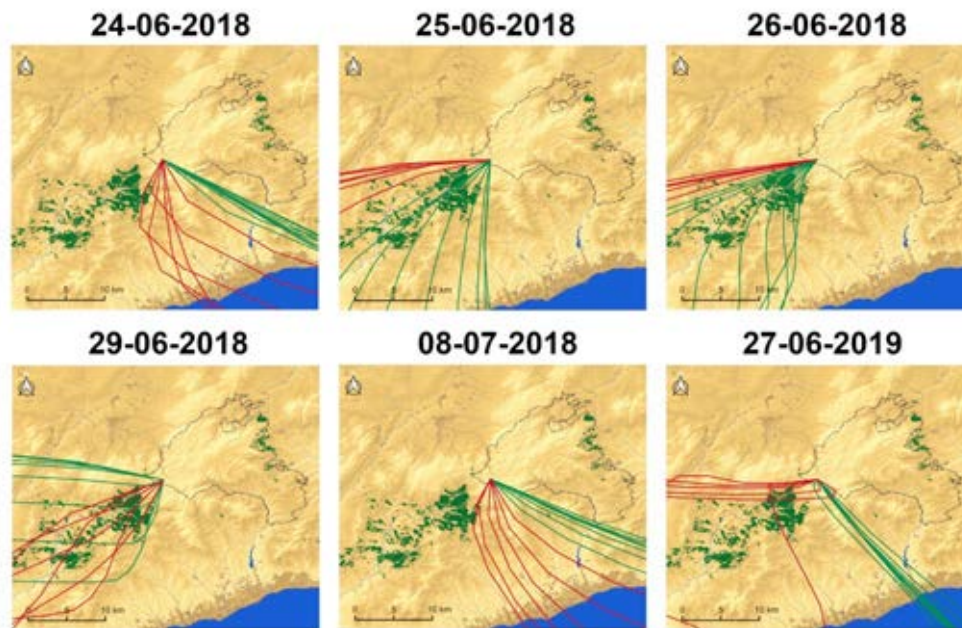


Figura 4.49. Recorrido de las retrotrayectorias de vientos a 500 m sobre el nivel del suelo en los días agrupados en el grupo 1. Cada trayectoria (líneas) tiene un recorrido máximo de 24 horas, y representa el recorrido de la masa de aire que llegó a las coordenadas de destino en cada una de las horas desde las 8:00 h hasta las 00:00h (UTC+2). En rojo, las trayectorias que llegaron al captador de Sierra de las Nieves en el periodo 18:00-00:00 h (horas de máximo registro de polen de *Castanea* en el grupo 1). Las áreas verdes representan las principales superficies de cultivo de castaño de la zona. Procesado a partir de datos obtenidos de la base de datos de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM), Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Junta de Andalucía. Consultados en febrero de 2019.

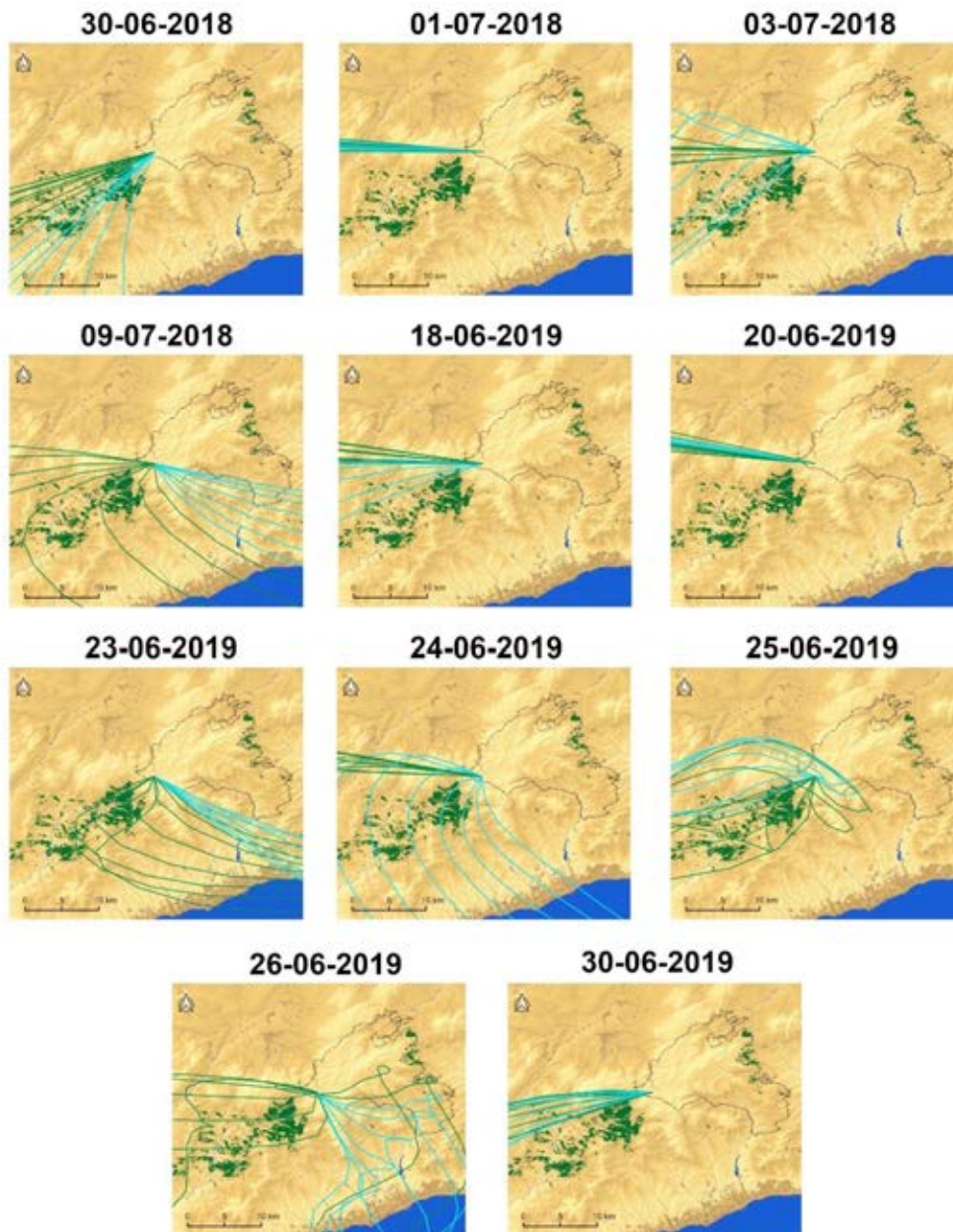


Figura 4.50. Recorrido de las retrotrayectorias de vientos a 500 m sobre el nivel del suelo en los días agrupados en el grupo 2. Cada trayectoria (líneas) tiene un recorrido máximo de 24 horas, y representa el recorrido de la masa de aire que llegó a las coordenadas de destino en cada una de las horas desde las 8:00 h hasta las 00:00h (UTC+2). En turquesa, las trayectorias que llegaron al captador de Sierra de las Nieves en el periodo 10:00-16:00 h (horas de máximo registro de polen de *Castanea* en el grupo 2). Las áreas verdes representan las principales superficies de cultivo de castaño de la zona. Procesado a partir de datos obtenidos de la base de datos de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM), Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Junta de Andalucía. Consultados en febrero de 2019.

Las diferencias observadas en el patrón intradiario de los grupos (Figura 4.48) podrían tener su origen, principalmente, en las horas del día en las que el viento proviene de las áreas con mayores cultivos de castaño de la zona. En la mayoría de los días del grupo 1 (Figura 4.49), el aire que llegó a la localización del captador durante las horas de máximo registro de polen de *Castanea* (últimas horas del día) procedía de las zonas con mayor abundancia de cultivos de castaño, a diferencia del resto de trayectorias. En cambio, en la mayoría de los días del grupo 2 (Figura

4.50) todas las trayectorias estuvieron agrupadas, lo que explicaría el patrón intradiario más homogéneo que se observó en este grupo (Figura 4.48). Hay algunos días que no cumplieron con estos patrones generales, como el 25/06/2018 y 26/06/2018 en el grupo 1; o el 9/07/2018, 23/06/2019 y 26/06/2019 en el grupo 2. Debe tenerse en consideración que, pese a que estos días están asignados a sus respectivos grupos de acuerdo con los resultados del análisis *cluster*, algunos de ellos muestran un patrón intermedio entre el grupo 1 y 2. Además, aunque la masa de aire que proceda de las fuentes de emisión de polen llegue a una hora determinada a la estación de muestreo, no implica necesariamente que el polen que contenga sea atrapado inmediatamente por el captador. Este efecto sería más notable en el caso del grupo 2, por ser las trayectorias seleccionadas (en color turquesa) las correspondientes a horas centrales del día. El polen arrastrado por dichas trayectorias podría captarse a lo largo de las horas restantes del día, lo que también podría explicar la mayor homogeneidad de su patrón intradiario. En este proceso de captura del polen también influirían las condiciones meteorológicas locales de las inmediaciones del captador.

4.5. Análisis de esporas de *Alternaria* y *Oidium*

4.5.1. Estacionalidad y abundancia de *Alternaria* y *Oidium*

Las esporas de tipo *Alternaria* se detectaron en Ronda y Sierra de las Nieves durante todo el año (Figura 4.51), aunque en mayor abundancia durante el periodo de final de la primavera y comienzos del verano (mayo, junio y julio), y durante finales de verano y comienzos de otoño (septiembre y octubre). El periodo de menor abundancia se corresponde con la primera mitad de enero y la segunda mitad de diciembre. Durante el invierno, las temperaturas medias son bajas y no se favorece la reproducción y rápida proliferación de especies de *Alternaria*. Con la llegada de la primavera se dan las condiciones óptimas para el desarrollo y reproducción de estas especies: temperaturas cálidas y lluvias abundantes. En el periodo de sequía estival las temperaturas son demasiado elevadas y las lluvias prácticamente ausentes, por lo que la proliferación y reproducción de estas especies disminuye. En otoño, con la caída de las temperaturas y el incremento de las precipitaciones, se dan unas condiciones similares a las de primavera hasta que las temperaturas bajan demasiado (Aira *et al.*, 2013; Grinn-Gofroñ & Rapiejko, 2009; Recio *et al.*, 2012).

Las esporas de tipo *Oidium*, pese a estar presentes también durante prácticamente todo el año, presentaron una estacionalidad más marcada que en el caso de *Alternaria*, sobre todo en Sierra de las Nieves. La mayor parte de la integral anual de esporas se concentró durante los meses de mayo a julio en ambas localidades, aunque en Ronda la abundancia en los meses de febrero a abril fue un poco mayor que en Sierra de las Nieves.

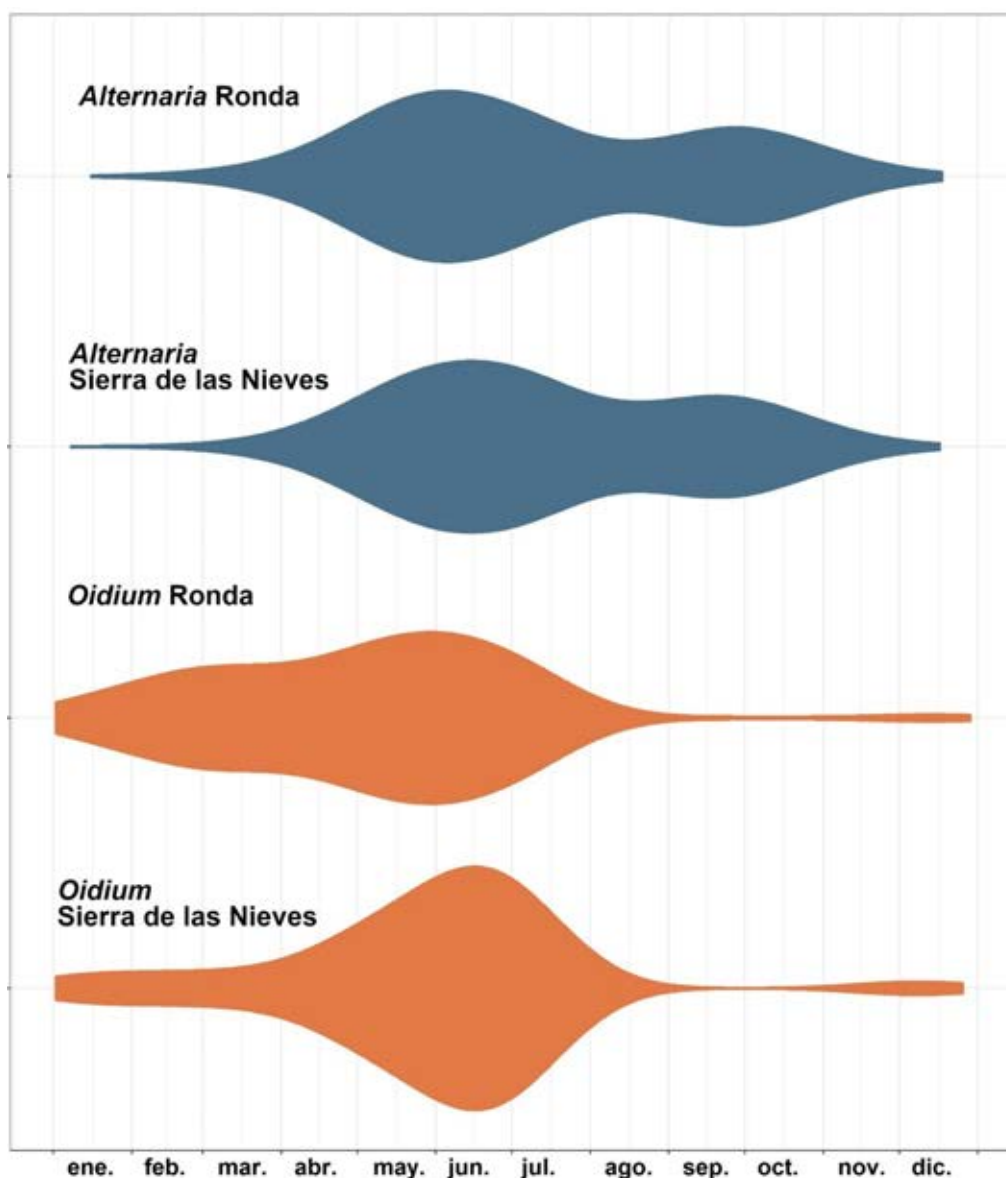


Figura 4.51. Diagrama de violines de la estacionalidad de esporas de tipo *Alternaria* y *Oidium* en Ronda y Sierra de las Nieves.

En general, se detectan concentraciones más elevadas de esporas de *Alternaria* en Ronda que en Sierra de las Nieves (figuras 4.52, 4.53 y 4.54). A pesar de esto, la temporalidad fue similar en ambas localidades. El mayor pico de concentración se detectó el 17 de octubre de 2018 en Ronda, con 100 esporas/m³. En Sierra de las Nieves, la concentración más alta se detectó el 5 de julio de 2018, con 97 esporas /m³.

Se observaron variaciones interanuales en las concentraciones detectadas que podrían deberse a las diferencias en las precipitaciones y temperaturas entre los años de muestreo (capítulos 4.1.1 y 4.1.2). De esta forma, las mayores concentraciones observadas en 2018 durante gran parte del año tanto en Ronda como en Sierra de las Nieves podrían deberse a las abundantes precipitaciones producidas en marzo y octubre. En Ronda hubo también cierto contraste entre las concentraciones de *Alternaria* de 2017 y 2019 (Figura 4.52). En la primavera, estas diferencias pudieron estar marcadas por la menor cantidad de precipitaciones registradas durante la primera mitad de 2019 en comparación con 2017. Durante

el otoño ocurrió justo lo contrario: tal como se observa en el Capítulo 4.1.1, las precipitaciones otoñales de 2019 fueron más prematuras, lo que permitió su combinación con temperaturas moderadamente elevadas. Por el contrario, las precipitaciones en 2017 fueron más tardías y no coincidieron con periodos de temperatura óptimos para el desarrollo de *Alternaria*, por lo que las concentraciones detectadas fueron menores que las de 2019.

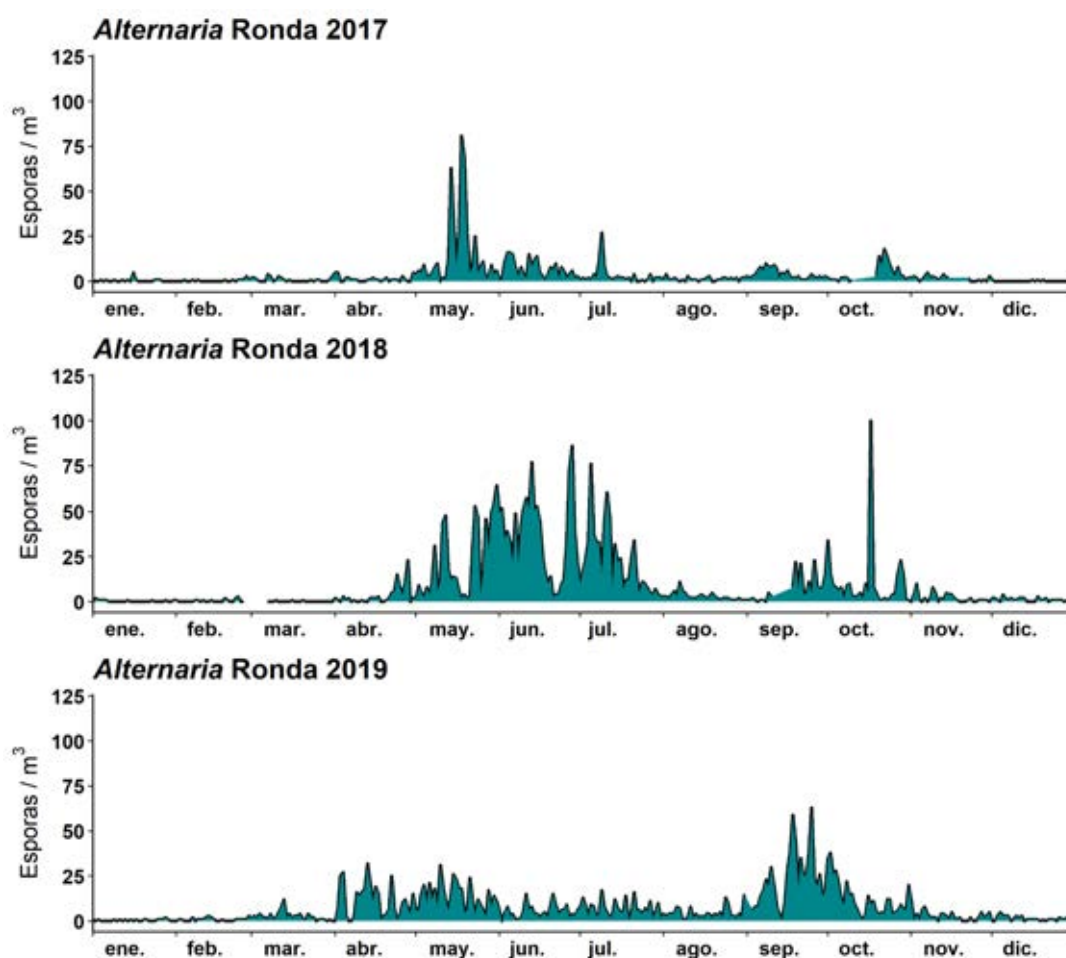


Figura 4.52. Concentraciones diarias de esporas de *Alternaria* en Ronda durante los años de muestreo.

También se detectaron concentraciones generalmente más elevadas de esporas de tipo *Oidium* en Ronda con respecto a Sierra de las Nieves (figuras 4.55, 4.56 y 4.57). Pese a esto, el mayor pico de concentración se detectó en Sierra de las Nieves (45 esporas/m³ en Sierra de las Nieves el 14 de junio de 2018; 29 esporas/m³ en Ronda el 17 de abril de 2019). Al igual que en el caso de *Alternaria*, se detectó una elevada variabilidad interanual. Por tener una aparición más cercana al comienzo del año, la proliferación de *Oidium* podría verse influenciada en mayor medida por las lluvias del otoño e invierno previos. Esto podría explicar las mayores concentraciones detectadas en Ronda al comienzo de 2019 con respecto a los años anteriores, que podrían deberse a las precipitaciones de otoño de 2018 junto a temperaturas medias más elevadas al comienzo del año (Capítulo 4.1.1). En Sierra de las Nieves se observa lo contrario: en 2018 se detectaron concentraciones generalmente más elevadas que en 2019 (Figura 4.56). No obstante, y dada la ausencia de datos meteorológicos para este periodo y localidad, no pueden extraerse conclusiones relacionadas con la meteorología.

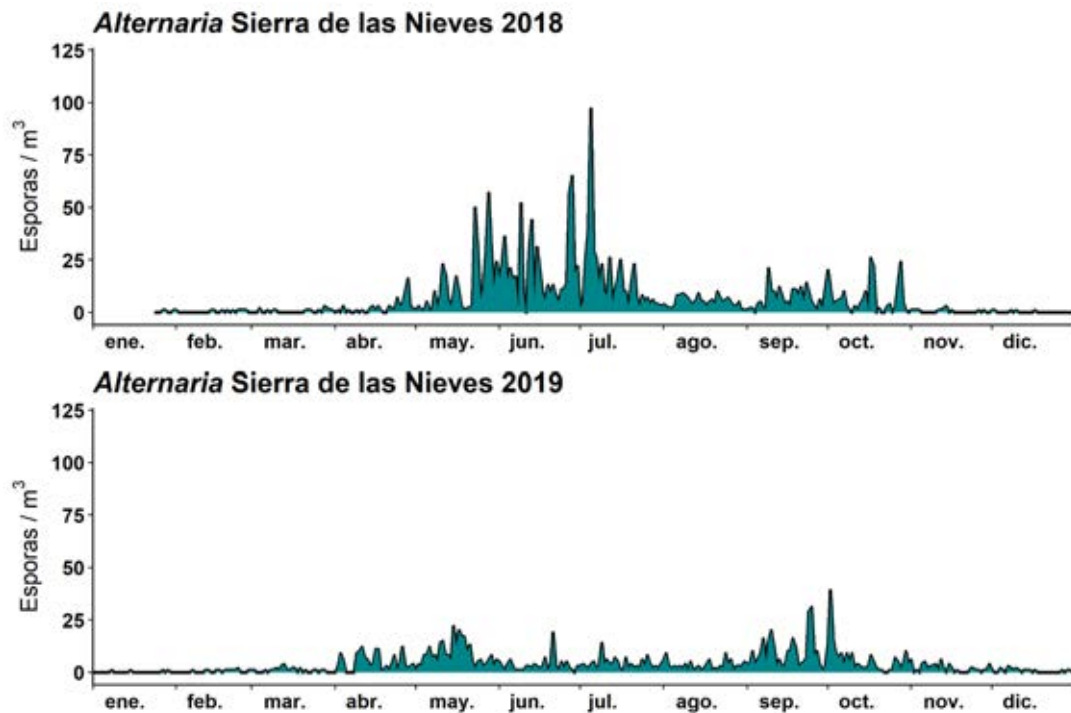


Figura 4.53. Concentraciones diarias de esporas de *Alternaria* en Sierra de las Nieves durante los años de muestreo.

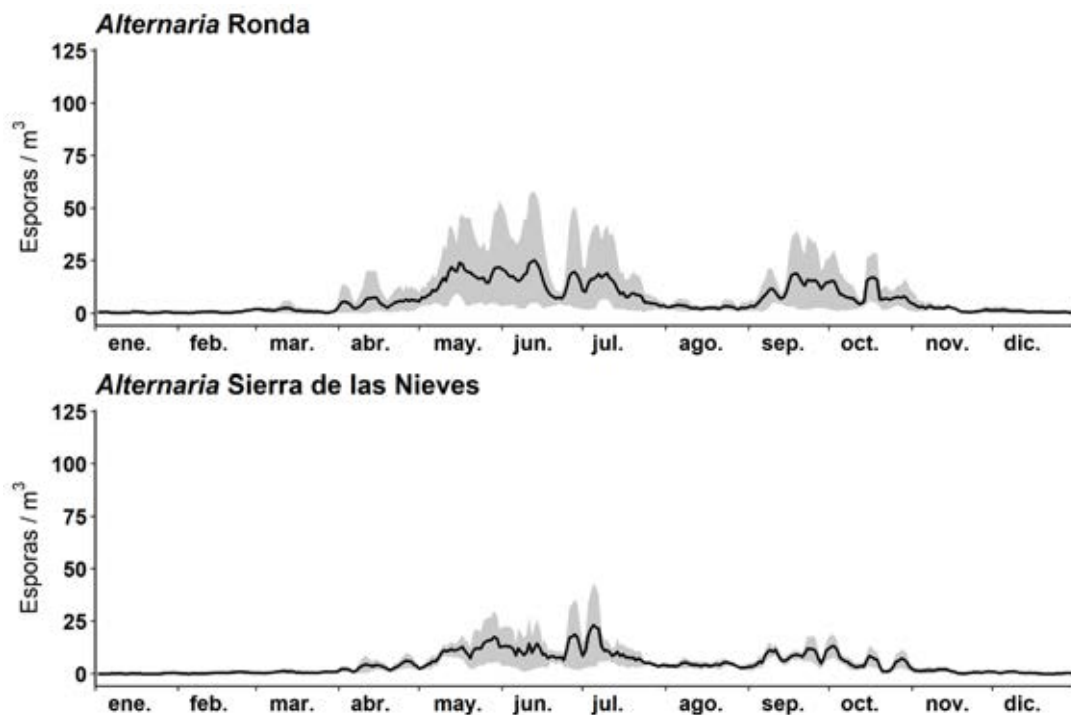


Figura 4.54. Concentraciones diarias promedio de medias móviles de 5 días de amplitud (línea negra), valores máximos (área gris) y mínimos (área blanca sobre la gris) diarios de medias móviles de *Alternaria* durante el periodo de estudio en Ronda y Sierra de las Nieves.

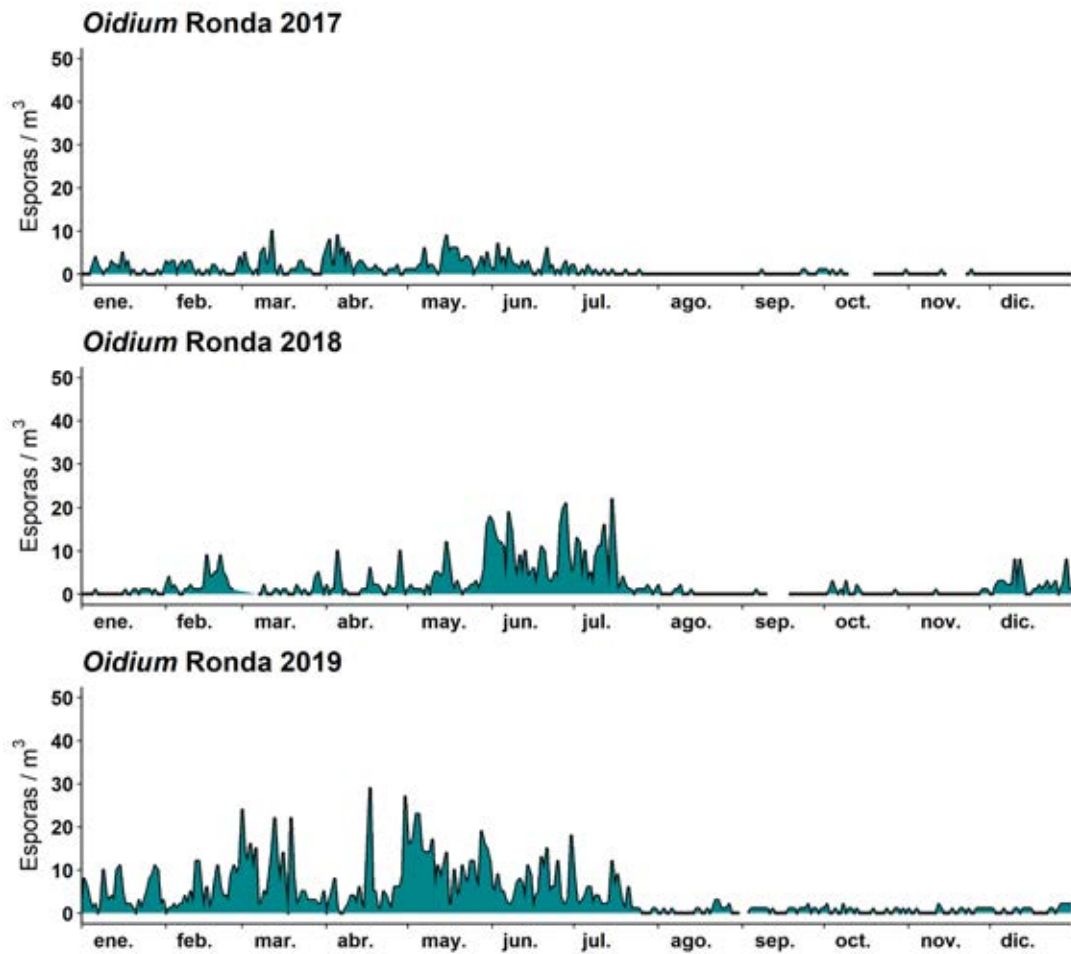


Figura 4.55. Concentraciones diarias de esporas de *Oidium* en Ronda durante los años de muestreo.

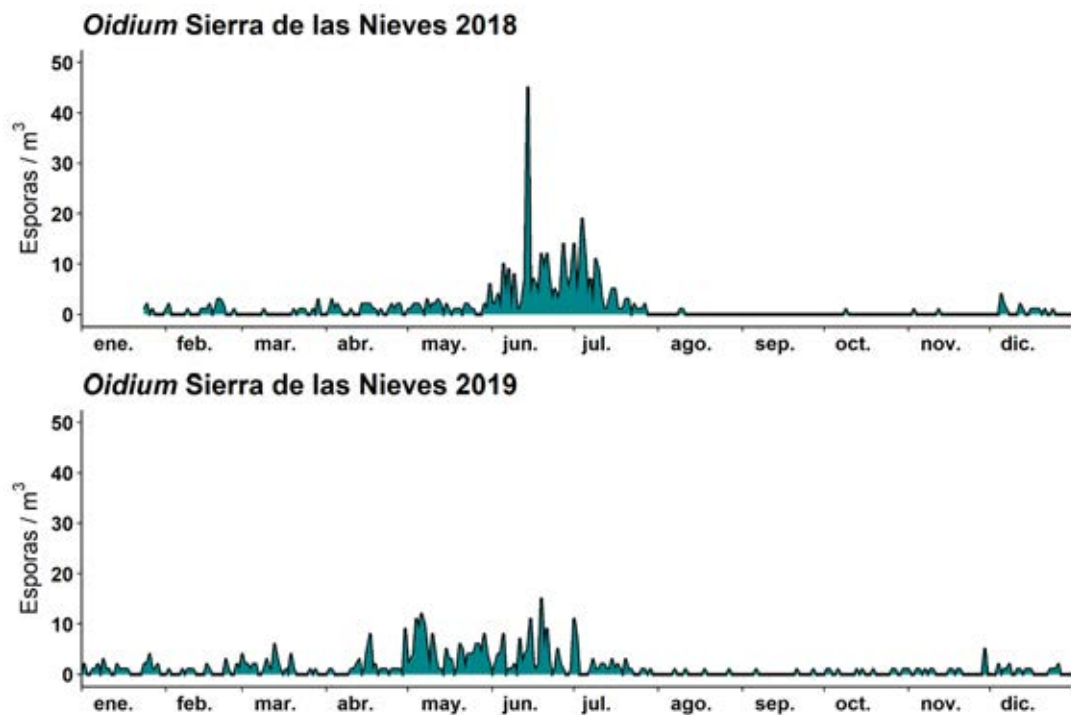


Figura 4.56. Concentraciones diarias de esporas de *Oidium* en Sierra de las Nieves durante los años de muestreo.

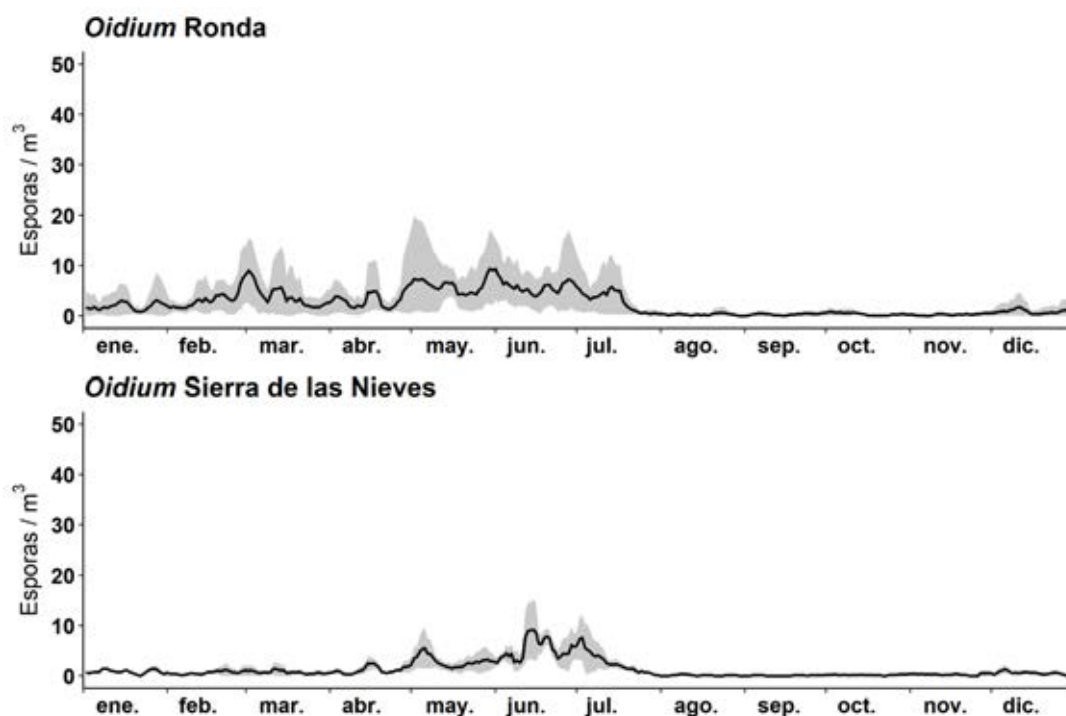


Figura 4.57. Concentraciones diarias promedio de medias móviles de 5 días de amplitud (línea negra), valores máximos (área gris) y mínimos (área blanca sobre la gris) diarios de medias móviles de *Oidium* durante el periodo de estudio en Ronda y Sierra de las Nieves.

Las variaciones en las integrales anuales de esporas de *Alternaria* (Figura 4.58) se corresponden con las variaciones comentadas anteriormente. En Ronda y Sierra de las Nieves se observaron mayores integrales anuales en el año 2018, posiblemente debido a las precipitaciones registradas durante dicho año. En Ronda hubo una mayor integral anual en 2019 con respecto a 2017, lo que pudo estar producido por unas precipitaciones otoñales más tempranas que se combinaron con temperaturas moderadamente elevadas.

Con respecto al *Oidium*, en Ronda se observó un incremento de la integral anual por cada año de muestreo, mientras que en Sierra de las Nieves se detectaron integrales muy similares. Temperaturas superiores a 20°C e inferiores a 30°C son las óptimas para la proliferación de las especies englobadas dentro de este tipo esporal, mientras que la humedad parece tener un papel menos relevante que en otras esporas (Cortiñas Rodríguez *et al.*, 2020; Fernández-González *et al.*, 2013; Legler *et al.*, 2012). En Ronda, las temperaturas más elevadas al comienzo del año pudieron ser las responsables de las mayores concentraciones detectadas durante 2019 y, por lo tanto, de su mayor integral anual (Fernández-González *et al.*, 2016). De nuevo, la ausencia de datos meteorológicos para la mayor parte de 2019 en Sierra de las Nieves impide relacionar la meteorología con las integrales detectadas.

Para ambos tipos esporales, se detectaron integrales y concentraciones diarias mayores en Ronda que en Sierra de las Nieves, lo que se debe principalmente a las diferencias de temperatura entre ambas localidades (Aira *et al.*, 2013). Se han detectado diferencias significativas entre las concentraciones diarias de cada uno de estos tipos esporales en las dos localidades muestreadas mediante pruebas de rangos de Mann-Whitney-Wilcoxon de muestras apareadas ($\alpha=0,05$; p -valores $< 2,2 \cdot 10^{-16}$ para *Alternaria* y *Oidium*). También se comprobó la existencia de

diferencias significativas entre estaciones mediante pruebas de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha=0,05$; p -valor= $1,9 \cdot 10^{-4}$ para *Alternaria* y p -valor= $3,7 \cdot 10^{-15}$ para *Oidium*). A pesar de esto, se han obtenido correlaciones positivas significativas de Spearman entre las mismas ($\alpha=0,05$; p -valores $< 2,2 \cdot 10^{-16}$ para *Alternaria* y *Oidium*). Los coeficientes de correlación de Spearman obtenidos fueron de 0,79 para *Alternaria* y de 0,60 para *Oidium*. Es decir, las concentraciones en ambas localidades fueron diferentes pero sus oscilaciones diarias fueron similares (aumentaron o decrecieron simultáneamente). Esto probablemente se deba a que ambas localidades son cercanas y en general, aunque las temperaturas y precipitaciones no sean iguales, normalmente varían en los mismos sentidos, por lo que las concentraciones atmosféricas detectadas aumentan o disminuyen de forma similar.

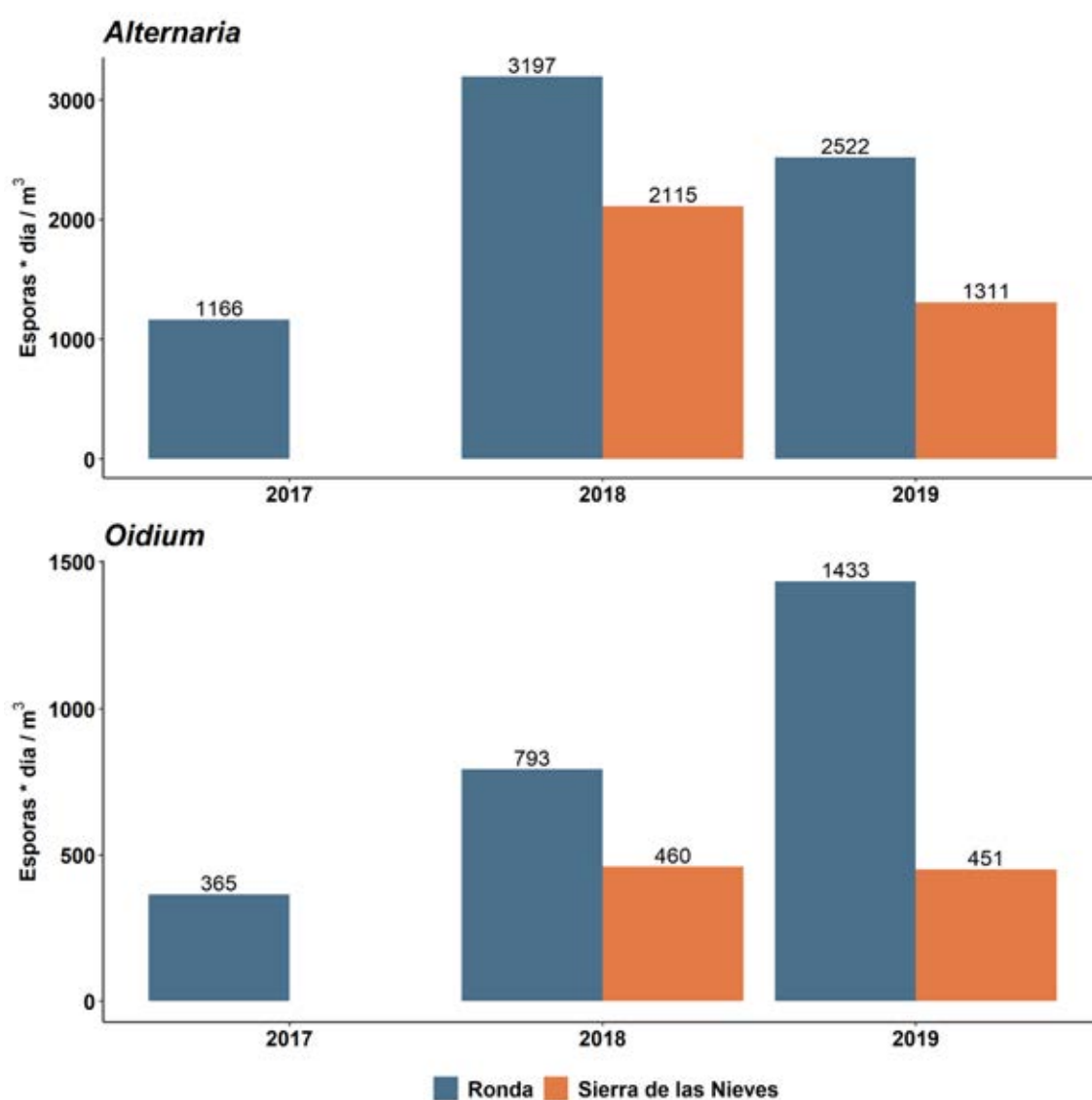


Figura 4.58. Integrales anuales de esporas de *Alternaria* y *Oidium* en Ronda y Sierra de las Nieves.

En general, las integrales anuales de *Alternaria* y *Oidium* detectadas fueron menores que las de puntos de muestreo localizados en grandes ciudades del suroeste de la Península Ibérica (Aira *et al.*, 2013; Martínez-Bracero *et al.*, 2019; Recio *et al.*, 2012). Estas variaciones están relacionadas con las temperaturas

medias registradas en las zonas de muestreo: temperaturas más elevadas favorecen el incremento de las integrales anuales. Ronda y Sierra de las Nieves, al estar a mayor altitud, tienen temperaturas medias inferiores a Málaga capital, lo que podría explicar la menor integral anual detectada en estas localidades con respecto a Málaga (Aira *et al.*, 2013). En el norte de la Península Ibérica se detecta una mayor abundancia de esporas de tipo *Oidium* que en las localidades estudiadas (Cortiñas Rodríguez *et al.*, 2020), lo que podría explicarse por sus temperaturas favorables para su desarrollo durante gran parte del año (sin un periodo desfavorable por temperaturas demasiado elevadas en verano) y a la gran abundancia de cultivos de vid, de la que son patógenas algunas especies englobadas en el tipo *Oidium* (ej.: *Uncinula necator* (Schw.) Burr) (Cortiñas Rodríguez *et al.*, 2020; Fernández-González *et al.*, 2009; Legler *et al.*, 2012).

Según una encuesta del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación del Gobierno de España (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2018), en 2018 se comercializaron 96 toneladas más de fungicidas y bactericidas para las cosechas que en 2017, lo que supuso un incremento del 0,25%. El incremento en la venta de estos productos fitosanitarios pudo ser debido a un incremento en la incidencia de enfermedades fúngicas de plantas, pero los datos no son concluyentes. Muchos productos fitosanitarios no son específicos de una enfermedad determinada, ni siquiera de un tipo de organismo concreto (algunos productos se utilizan indistintamente como fungicidas o bactericidas). Además, el incremento en las toneladas comercializadas fue mucho menor que en años previos y supuso un porcentaje muy bajo con respecto al total. Los datos son de todo el territorio español, y no están disponibles los datos por comunidades autónomas o provincias pese a haberse solicitado. Tampoco están disponibles los datos de 2019. Por lo tanto, y sin más años de muestreo, no es posible la obtención de conclusiones sobre si este incremento en la venta de productos fitosanitarios está relacionado con la mayor cantidad de esporas de *Alternaria* y *Oidium* detectadas en Ronda durante estos años.

4.5.2. Análisis de correlación entre concentración de esporas y variables meteorológicas

En general se obtuvieron resultados similares en las correlaciones de datos diarios de *Alternaria* y *Oidium* (Tabla 4.22). Se detectaron correlaciones negativas significativas con las precipitaciones y, en el caso de Ronda, también con la humedad relativa. Esto se debe al efecto de lavado de la atmósfera que también ha sido mencionado con el polen. Aunque la humedad relativa y la disponibilidad hídrica que conlleva la lluvia son favorables para el desarrollo y proliferación de los hongos, las precipitaciones y elevados valores de humedad relativa, favorecen el aglutinamiento y precipitación de las esporas (Recio *et al.*, 2012).

Temperaturas elevadas favorecen la proliferación de estos hongos, así como la formación y liberación de esporas (Aira *et al.*, 2013; Fernández-González *et al.*, 2016; Recio *et al.*, 2012). Por este motivo, se detectaron correlaciones positivas significativas entre las temperaturas diarias y las concentraciones de *Alternaria* y *Oidium* tanto en Ronda como en Sierra de las Nieves (Tabla 4.22). El menor número de correlaciones significativas detectadas entre *Oidium* y las temperaturas hace pensar que hay una relación menos estrecha entre estas variables que en el caso de *Alternaria*.

En Sierra de las Nieves se obtuvieron correlaciones negativas significativas con la velocidad del viento y, tanto en Ronda como en Sierra de las Nieves, positivas con la frecuencia de calma. Esto parece apuntar a que las esporas detectadas no son el resultado de un transporte a media o larga distancia, sino que provienen de fuentes locales. En Ronda se obtuvieron correlaciones positivas significativas con frecuencias de vientos procedentes del cuarto cuadrante y negativos significativos con vientos del segundo y tercer cuadrante. Es decir, se detectaron mayores concentraciones de esporas cuando los vientos provienen de los principales campos de cultivo cercanos, y menores cuando provienen del interior de la ciudad. En Sierra de las Nieves solo se obtuvieron correlaciones significativas con las frecuencias de vientos en *Alternaria*, que fueron positivas con el primer y segundo cuadrante (interior del Parque Natural) y negativas con el cuarto cuadrante.

En general, las correlaciones obtenidas con datos semanales fueron muy similares a las diarias (Tabla 4.23). El número de correlaciones significativas disminuyó con respecto a los datos diarios, lo que puede deberse a la menor resolución de los datos. Es más difícil encontrar una correlación entre variables si estas se corresponden a periodos más extensos (menor resolución). Los coeficientes de correlación fueron más elevados con las temperaturas semanales que en el caso de los datos diarios, lo que podría deberse a que los requerimientos de temperatura para la formación y liberación de esporas deben ser mantenidos en el tiempo para observar claramente su efecto. Es decir, las circunstancias puntuales (diarias) de temperaturas elevadas no son igual de efectivas para estimular la formación y liberación de esporas.

Al utilizar datos meteorológicos de días o semanas previas (tablas 4.24 y 4.25) se redujo el número de correlaciones significativas y el valor de los coeficientes de correlación, pero no cambió el signo de las correlaciones obtenidas. Lo esperable era obtener correlaciones positivas con las precipitaciones y humedad relativa de los periodos previos, pero no fue el caso. Quizás los periodos considerados fueron demasiado cercanos como para notar el efecto de una mayor disponibilidad hídrica y sea necesario considerar periodos más extensos y tardíos para observar la correlación positiva existente entre las precipitaciones y la producción de esporas tal como describen otros autores (Calderón *et al.*, 1997).

Los resultados de las correlaciones, tanto diarias como semanales, fueron similares a los obtenidos por otros autores en diversos puntos de la Península Ibérica, incluyendo Málaga capital (Aira *et al.*, 2013; Fernández-González *et al.*, 2016; Oliveira *et al.*, 2009; Recio *et al.*, 2012).

Tabla 4.22. Coeficientes de correlación de Spearman entre valores diarios de las principales variables meteorológicas y de concentraciones de esporas durante el periodo de muestreo en Ronda y Sierra de las Nieves.

Localidad	Tipo esporal	Prec	H Rel	Tmed	Tmax	Tmin	Vel Viento	Cuadrante 1	Cuadrante 2	Cuadrante 3	Cuadrante 4	Calma
Ronda (n=1042)	<i>Alternaria</i>	-0,28***	-0,29***	0,53***	0,54***	0,49***	-0,00	-0,04	-0,09*	0,01	0,17***	0,16***
	<i>Oidium</i>	-0,21***	-0,12**	-0,01	0,02	-0,06	0,07	-0,04	-0,05	-0,10*	0,09*	0,12**
Sierra de las Nieves (n=344)	<i>Alternaria</i>	-0,33***	-0,10	0,63***	0,67***	0,48***	-0,27***	0,20**	0,24***	-0,09	-0,16*	0,37***
	<i>Oidium</i>	-0,30***	0,07	0,13	0,19**	-0,05	-0,24***	0,05	-0,02	0,09	0,10	0,27***

Prec, precipitación total; H Rel, humedad relativa media; Tmed, temperatura media; Tmax, temperatura máxima diaria; Tmin, temperatura mínima; Vel Viento, velocidad media del viento, Cuadrante 1/2/3/4, frecuencia de vientos del primer/segundo/tercer/cuarto cuadrante; Calma, frecuencia de calma de vientos. * p valor $\leq 0,05$; ** 0,01 \leq p valor $< 0,05$; *** p valor $< 0,001$.

Tabla 4.23. Coeficientes de correlación de Spearman entre valores semanales de las principales variables meteorológicas y de concentraciones medias de esporas durante el periodo de muestreo en Ronda y Sierra de las Nieves.

Localidad	Tipo esporal	Prec	H Rel	Tmed	Tmax	Tmin	Vel Viento	Cuadrante 1	Cuadrante 2	Cuadrante 3	Cuadrante 4	Calma
Ronda (n=145)	<i>Alternaria</i>	-0,28**	-0,37***	0,62***	0,62***	0,59***	-0,04	-0,23	-0,08	0,21	0,15	0,18
	<i>Oidium</i>	-0,24*	-0,12	-0,03	0,02	-0,09	0,01	-0,03	-0,09	-0,15	0,12	0,19
Sierra de las Nieves (n=49)	<i>Alternaria</i>	-0,35	-0,1	0,73***	0,75***	0,63***	-0,43*	0,2	0,32	0,01	-0,2	0,57***
	<i>Oidium</i>	-0,33	0,1	-0,02	0,06	-0,17	-0,49**	-0,2	-0,08	0,31	0,29	0,3

Prec, precipitación total; H Rel, humedad relativa media; Tmed, promedio de temperaturas medias diarias; Tmax, promedio de temperaturas máximas diarias; Tmin, promedio de temperaturas mínimas diarias; Vel Viento, velocidad media del viento, Cuadrante 1/2/3/4, promedio de frecuencia de vientos del primer/segundo/tercer/cuarto cuadrante; Calma, promedio de frecuencia de calma de vientos. * p valor $\leq 0,05$; ** 0,01 \leq p valor $< 0,05$; *** p valor $< 0,001$.

Tabla 4.24. Coeficientes de correlación de Spearman entre valores diarios de las principales variables meteorológicas de uno (t-1), dos (t-2) o tres (t-3) días previos y de concentraciones de esporas durante el periodo de muestreo en Ronda y Sierra de las Nieves.

Desfase	Localidad	Tipo esporal	Prec	H Rel	T med	Tmax	Tmin	Vel Viento	Cuadrante 1	Cuadrante 2	Cuadrante 3	Cuadrante 4	Calma	
t-1	Ronda (n=1041)	<i>Alternaria</i>	-0,24***	-0,25***	0,53***	0,52***	0,51***	-0,02	-0,03	-0,10*	0,05	0,15***	0,18***	
		<i>Oidium</i>	-0,26***	-0,12***	0	0,04	-0,07	-0,03	0	-0,07	-0,09*	0,09*	0,17***	
	Sierra de las Nieves (n=343)	<i>Alternaria</i>	-0,28***	-0,15	0,64***	0,67***	0,50***	-0,23***	0,19**	0,26***	-0,1	-0,19**	0,38***	
		<i>Oidium</i>	-0,31***	0,03	0,11	0,17*	-0,07	-0,25***	0,05	0,02	0,07	0,07	0,29***	
	t-2	Ronda (n=1040)	<i>Alternaria</i>	-0,19***	-0,22***	0,52***	0,51***	0,51***	-0,02	-0,08	-0,07	0,10*	0,12***	0,16***
			<i>Oidium</i>	-0,25***	-0,11**	-0,02	0,02	-0,08	-0,02	0	-0,05	-0,11**	0,09	0,14***
Sierra de las Nieves (n=342)		<i>Alternaria</i>	-0,25***	-0,15	0,63***	0,64***	0,51***	-0,19**	0,20**	0,27***	-0,12	-0,21***	0,33***	
		<i>Oidium</i>	-0,19**	0,04	0,07	0,12	-0,04	-0,18*	-0,01	-0,01	0,08	0,06	0,24***	
t-3		Ronda (n=1039)	<i>Alternaria</i>	-0,15***	-0,2***	0,51***	0,50***	0,50***	-0,01	-0,09	-0,06	0,13***	0,09*	0,14***
			<i>Oidium</i>	-0,21***	-0,08	-0,04	0,00	-0,09*	-0,01	0,02	-0,05	-0,09	0,07	0,12***
	Sierra de las Nieves (n=341)	<i>Alternaria</i>	-0,21***	-0,15	0,61***	0,62***	0,50***	-0,12	0,17*	0,29***	-0,13	-0,24***	0,31***	
		<i>Oidium</i>	-0,15	0,05	0,04	0,09	-0,04	-0,13	-0,07	-0,09	0,09	0,12	0,20**	

Prec, precipitación total; H Rel, humedad relativa media; T med, temperatura media; Tmax, temperatura máxima; Tmin, temperatura mínima; Vel Viento, velocidad media del viento; Cuadrante 1/2/3/4, frecuencia de vientos del primer/segundo/tercer/cuarto cuadrante; Calma, frecuencia de calma de vientos. * p valor ≤0,05; ** 0,01≤p valor<0,05; *** p valor<0,001.

Tabla 4.25. Coeficientes de correlación de Spearman entre valores semanales de las principales variables meteorológicas de uno (t-1), dos (t-2) o tres (t-3) semanas previas y de concentraciones medias de esporas durante el periodo de muestreo en Ronda y Sierra de las Nieves.

Desfase	Localidad	Tipo esporal	Prec	H Rel	Tmed	Tmax	Tmin	Vel Viento	Cuadrante 1	Cuadrante 2	Cuadrante 3	Cuadrante 4	Calma
t-1	Ronda (n=144)	Alternaria	-0,17	-0,30**	0,57***	0,56***	0,55***	-0,02	-0,30**	-0,04	0,23	0,1	0,22
		Oidium	-0,21	0,00	-0,14	-0,10	-0,21	-0,03	-0,01	-0,1	-0,21	0,14	0,12
	Sierra de las Nieves (n=48)	Alternaria	-0,34	-0,12	0,66***	0,67***	0,60***	-0,28	0,2	0,35	-0,13	-0,29	0,48**
		Oidium	-0,24	0,16	-0,13	-0,08	-0,24	-0,42*	-0,33	-0,2	0,3	0,32	0,23
t-2	Ronda (n=143)	Alternaria	-0,14	-0,28**	0,53***	0,52***	0,54***	0,11	-0,31**	0,06	0,17	0,03	0,10
		Oidium	0,01	0,12	-0,24*	-0,22	-0,28**	0,06	-0,06	-0,12	-0,14	0,13	0,06
	Sierra de las Nieves (n=47)	Alternaria	-0,38	-0,20	0,64***	0,66***	0,60***	-0,25	0,17	0,33	-0,20	-0,25	0,48**
		Oidium	-0,15	0,07	-0,27	-0,24	-0,31	-0,34	-0,34	-0,26	0,17	0,35	0,15
t-3	Ronda (n=142)	Alternaria	-0,20	-0,32**	0,54***	0,53***	0,55***	0,16	-0,29**	0,18	0,15	-0,06	0,04
		Oidium	0,06	0,16	-0,29**	-0,27**	-0,31**	0,07	-0,04	-0,05	-0,18	0,05	0,09
	Sierra de las Nieves (n=46)	Alternaria	-0,40	-0,13	0,62***	0,58***	0,62***	0,02	0,00	0,43*	-0,23	-0,25	0,32
		Oidium	0,02	0,01	-0,3	-0,31	-0,25	-0,07	-0,46**	-0,23	0,09	0,40*	-0,03

Prec, precipitación total; H Rel, humedad relativa media; Tmed, promedio de temperaturas medias diarias; Tmax, promedio de temperaturas máximas diarias; Tmin, promedios de temperaturas mínimas diarias; Vel Viento, velocidad media del viento, Cuadrante 1/2/3/4, promedio de frecuencia de vientos del primer/segundo/tercer/cuarto cuadrante; Calma, promedio de frecuencia de calma de vientos. * p valor $\leq 0,05$; ** 0,01 \leq p valor $< 0,05$; *** p valor $< 0,001$.

4.6. Análisis de los modelos de pronóstico

Los modelos de pronóstico basados en *random forest* obtuvieron tasas de acierto generalmente superiores a las del resto de modelos (Figura 4.59). Estas tasas mostraron diferencias significativas con los modelos de regresiones lineales múltiples, aunque no con las redes neuronales.

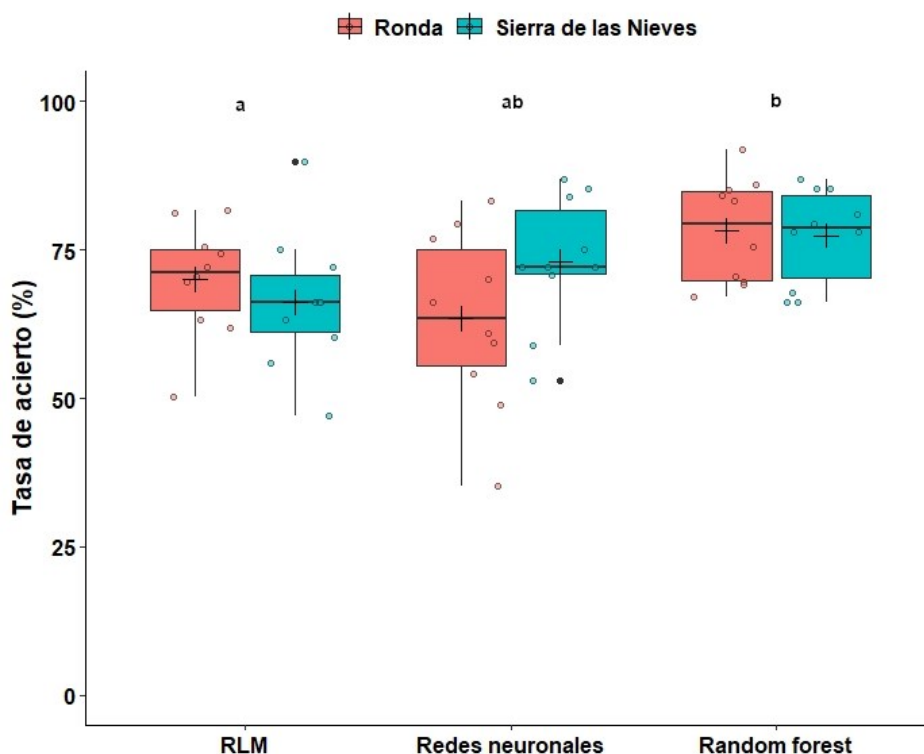


Figura 4.59. Tasas de acierto de los modelos de pronóstico en Ronda (rojo) y Sierra de las Nieves (turquesa). Los puntos coloreados representan la tasa de acierto de cada tipo polínico. Cada caja abarca el 50% de los datos de ese subconjunto (Q1-Q3). La línea negra gruesa de cada caja marca la mediana (Q2). Las barras marcan los límites del subconjunto de datos o, en casos en los que los límites sean demasiado extensos, marcan 1,5 veces el rango intercuartílico. Los puntos pequeños marcan datos que superan 1,5 veces el rango intercuartílico de distancia con las cajas (datos atípicos). RLM: regresiones lineales múltiples. Los modelos que tienen la misma letra no presentan diferencias significativas ($\alpha=0,05$) según pruebas de Mann-Whitney Wilcoxon con corrección *post-hoc* de Bonferroni.

Los modelos basados en redes neuronales artificiales presentaron tasas de acierto muy variables en función del tipo polínico (Figura 4.59), lo que dificultó la obtención de diferencias significativas con el resto de los modelos. En Ronda las tasas de acierto de este tipo de modelos fueron inferiores con respecto a las de Sierra de las Nieves. La baja tasa de acierto del tipo *Pinus* fue la responsable de la mayor amplitud de la caja de Ronda en comparación con Sierra de las Nieves. Los modelos de regresiones lineales múltiples por pasos (Tabla 4.26) también mostraron mayor variabilidad en la tasa de acierto con respecto a los modelos *random forest*. En estos dos últimos tipos de modelos las diferencias entre localidades fueron menores que en el caso de las redes neuronales.

Tabla 4.26. Modelos de pronóstico de regresiones lineales múltiples por pasos para cada tipo polínico en cada localidad.

Localidad	Tipo polínico/ esporal	Fórmula	R ²
Ronda	<i>Castanea</i>	$\text{polen}=0,32*\text{polen}(t-1)+0,55*MM5+0,22*Tmed-2,78$	0,49
	Cupressaceae	$\text{polen}=0,79*MM5-0,22*Día+57,22$	0,37
	<i>Olea</i>	$\text{polen}=0,42*\text{polen}(t-1)+0,40*MM5-0,04*Día+0,34*Hrel+0,85*Tmed-2,04*VelVient-9,39$	0,60
	<i>Pinus</i>	$\text{polen}=0,35*\text{polen}(t-1)+0,33*MM5-0,01*Día+0,14*VelVient+1,02$	0,34
	<i>Plantago</i>	$\text{polen}=0,54*\text{polen}(t-1)+0,35*MM5-0,002*Día-0,07*VelVient+0,95$	0,71
	Poaceae	$\text{polen}=0,28*\text{polen}(t-1)+0,47*MM5-0,19*VelVient+2,33$	0,54
	<i>Quercus</i>	$\text{polen}=0,71*\text{polen}(t-1)+0,17*MM5-0,05*Día-0,50*Hrel-1,91*VelVient+58,61$	0,59
	Urticaceae	$\text{polen}=0,57*\text{polen}(t-1)+0,20*MM5-0,01*Día-0,02*Hrel-0,18*VelVient+2,29$	0,58
	<i>Alternaria</i>	$\text{esporas}=0,49*\text{esporas}(t-1)+0,34*MM5-0,004*Día-0,08*Prec+0,005*Hrel+0,17*Tmed-0,16*VelVient-3,13$	0,60
	<i>Oidium</i>	$\text{esporas}=0,44*\text{esporas}(t-1)+0,38*MM5-0,002*Día+0,95$	0,53
Sierra de las Nieves	<i>Castanea</i>	$\text{polen}=0,79*\text{polen}(t-1)-0,18*MM5+0,86*Tmed-6,69$	0,51
	Cupressaceae	$\text{polen}=0,61*\text{polen}(t-1)+1,86$	0,21
	<i>Olea</i>	$\text{polen}=0,56*\text{polen}(t-1)+0,27*MM5-0,36*VelVient+5,73$	0,75
	<i>Pinus</i>	$\text{polen}=0,39*\text{polen}(t-1)-0,02*Día+0,08*Hrel+0,21*Tmed+0,14*VelVient-0,73$	0,28
	<i>Plantago</i>	$\text{polen}=0,43*\text{polen}(t-1)+0,37*MM5-0,04*VelVient+0,72$	0,59
	Poaceae	$\text{polen}=0,54*\text{polen}(t-1)+0,38*MM5-0,16*VelVient+2,35$	0,53
	<i>Quercus</i>	$\text{polen}=0,68*\text{polen}(t-1)+0,17*MM5+20,12$	0,66
	Urticaceae	$\text{polen}=0,44*\text{polen}(t-1)+0,23*MM5-0,01*Día+0,03*Hrel+0,06*Tmed-0,05*VelVient+1,81$	0,49
	<i>Alternaria</i>	$\text{esporas}=0,41*\text{esporas}(t-1)+0,28*MM5-0,01*Día+0,33*Tmed-0,19*VelVient+2,23$	0,38
	<i>Oidium</i>	$\text{esporas}=0,88*MM5-0,04*VelVient+0,68$	0,31

Polen: concentraciones medias diarias de polen (granos de polen/m³); polen(t-1): concentraciones medias diarias de polen del día previo (granos de polen/m³); MM5: concentraciones de media móvil de los 5 días previos (granos de polen/m³ o esporas/m³); Día: día del año (número); Tmed: temperatura media diaria (°C); Hrel: humedad relativa media (%), VelVient: media diaria de la velocidad del viento (km/h); Prec: precipitación total diaria (mm); esporas: concentraciones medias diarias de esporas (esporas/m³); esporas(t-1): concentraciones medias diarias de esporas del día previo (esporas/m³).

Las variables predictoras más influyentes en los modelos fueron las concentraciones medias diarias de polen/esporas del día previo, la media móvil de los 5 días previos, la temperatura media diaria, la precipitación total diaria, la humedad relativa media y la velocidad del viento media diaria. Estas variables fueron las que también obtuvieron un mayor número de correlaciones significativas con las concentraciones diarias de polen y esporas, y cuyo efecto ya se discutió en los capítulos 4.4.2.9 y 4.5.2. De acuerdo con estos modelos, la tendencia de los días previos es determinante para los pronósticos, mientras que la humedad relativa, la temperatura media y las precipitaciones modificarían las concentraciones detectadas. La velocidad del viento también es determinante para el transporte de polen.

En general los modelos de *random forest* presentaron mayores tasas de acierto para todos los tipos polínicos considerados salvo algunas excepciones (Figura 4.60). Los modelos de redes neuronales artificiales fueron los que obtuvieron menores errores para Cupressaceae en Ronda, para *Olea* en ambas localidades y para *Quercus* en Ronda. Los modelos de regresiones lineales múltiples por pasos fueron los de mayor tasa de acierto para *Platanus* en Sierra de las Nieves y para Urticaceae en ambas localidades. Los modelos de mayor tasa de acierto

para los tipos de esporas fueron muy variables: *random forest* para *Oidium*, regresiones lineales múltiples para *Alternaria* en Ronda y redes neuronales para *Alternaria* en Sierra de las Nieves. Las tasas de acierto de los mejores modelos de pronóstico para cada tipo polínico/de espора son bastante elevadas. En todos los casos superaron el 70%.

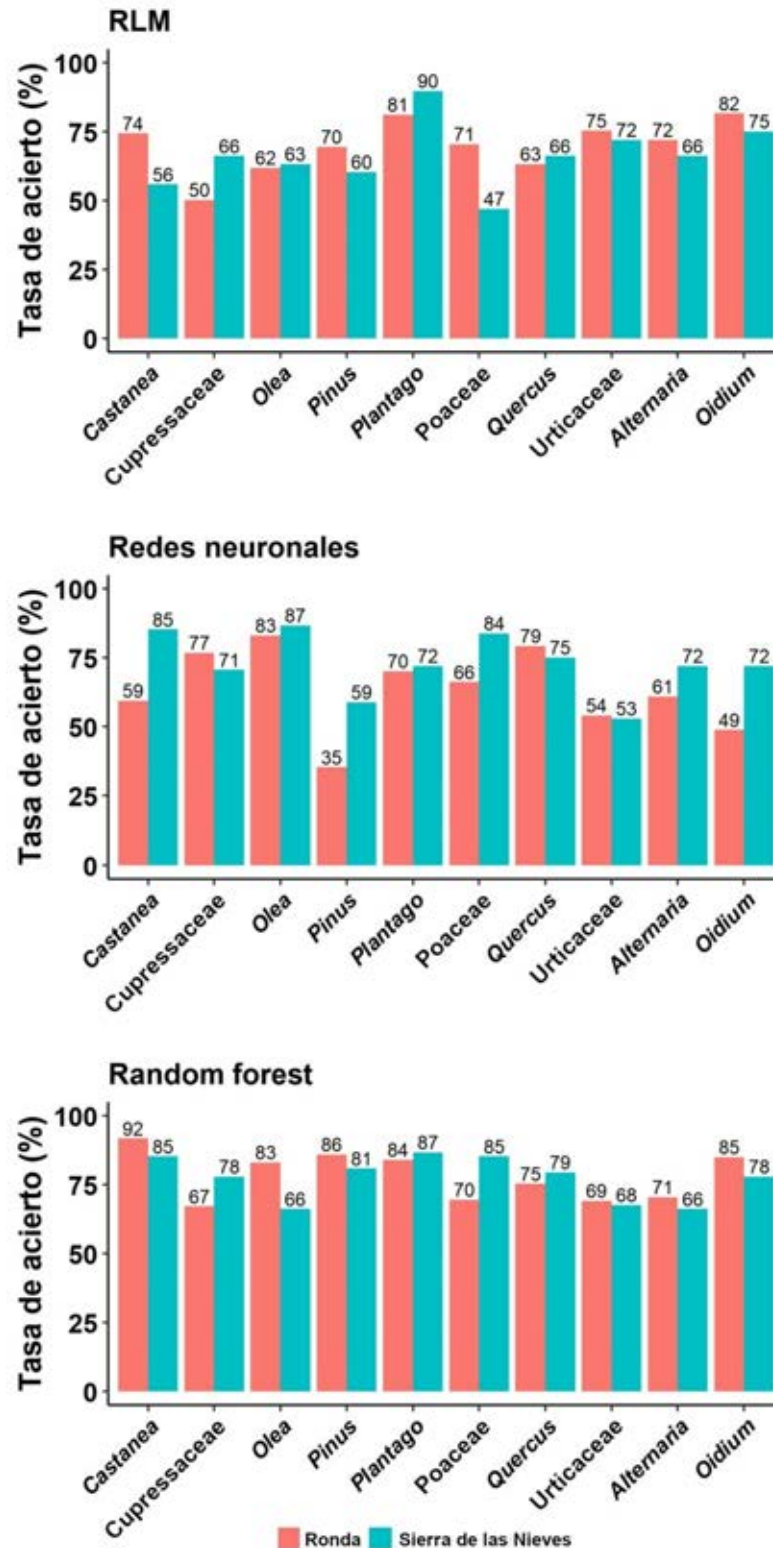


Figura 4.60. Tasas de acierto de cada tipo polínico/de espора en función del modelo y la localidad. RLM: regresiones lineales múltiples por pasos.

Los modelos elaborados requieren la utilización de predicciones de otras variables para elaborar las de polen/esporas (temperaturas del día siguiente, humedad relativa del día siguiente, etc.). Por lo tanto, al error de los modelos se le añade el error de los modelos predictivos del resto de variables. Sin embargo, esto es una limitación de cualquier modelo de pronóstico que se base en variables predictoras con la misma resolución temporal. Actualmente está muy extendido el uso de modelos autorregresivos basados en el análisis de series temporales de datos. En estos modelos se extrae la estacionalidad de las concentraciones de polen de bases de datos extensas y se pueden elaborar pronósticos con mayor antelación y con menos dependencia de otros modelos de pronóstico (Rodríguez-Rajo *et al.*, 2017). El escaso número de años de muestreo en Ronda y Sierra de las Nieves no permite obtener la estacionalidad y, por lo tanto, no se pueden elaborar este tipo de modelos ni incluir variables estacionales en los modelos ya elaborados. Por este mismo motivo tampoco pueden elaborarse modelos que predigan el inicio, pico y final de los periodos de polinación principal.

Inicialmente los pronósticos elaborados con los modelos propuestos solo predicen las concentraciones de polen/esporas del día siguiente, ya que requieren los datos del día previo para la elaboración del pronóstico. No obstante, los pronósticos pueden ir encadenándose y utilizar datos pronosticados para retroalimentar los modelos (con el consiguiente aumento del error de predicción). La concatenación de errores para pronósticos de más de un día puede presentar ciertas dificultades para los métodos de muestreo tradicionales (como el empleado en este estudio). Sin embargo, los métodos de muestreo con captadores automatizados están extendiéndose por Europa (Oteros *et al.*, 2019b; Rojo *et al.*, 2019) y proporcionan información de concentraciones de polen/esporas cada 3 horas, de forma que los niveles de polen de un día pueden utilizarse en el pronóstico del día siguiente. Por lo tanto, estos modelos de pronóstico podrían incrementar su utilidad cuando se combinasen con muestreos automáticos y/o diarios. También sería posible incrementar la escala temporal de los modelos cuando se disponga de una mayor serie de datos.

Las alergias respiratorias son la afección respiratoria más extendida en el mundo y tienen un gran impacto sobre la economía por la pérdida de productividad laboral y el gasto en medicación que suponen (Akdis *et al.*, 2015; Picornell *et al.*, 2019b; Ranzi *et al.*, 2003; Sánchez Mesa *et al.*, 2005). El tipo polínico Urticaceae tiene un potencial alergógeno muy elevado, el de Poaceae es elevado y el del resto de tipos polínicos modelados es moderado (Trigo *et al.*, 2007, 2008). Sin embargo, por ser muy abundantes en la atmósfera, algunos de los tipos polínicos de potencial alergógeno moderado pueden suponer un mayor perjuicio que tipos de gran potencial. De hecho, los tipos polínicos Cupressaceae, *Olea* y *Quercus* son algunas de las fuentes más relevantes de aeroalérgenos en el área mediterránea (Akdis *et al.*, 2015; Akdis & Agache, 2014). Por todo ello, estos modelos de pronóstico pueden ser muy útiles para informar a la población con sensibilidad a los alérgenos de estos tipos polínicos y que tomen medidas para reducir o evitar sus síntomas.

La concentración de esporas de *Alternaria* y *Oidium* proporciona información sobre la abundancia y estado reproductivo de las especies a las que engloban. Estas especies son, en muchos casos, patógenos de plantas que producen grandes pérdidas económicas en cultivos de cereales, frutales, plantas ornamentales y plantas de distribución natural. Por lo tanto, los modelos podrían

proporcionar información relevante para decidir el momento de aplicación de fungicidas en cultivos, y reducir así su uso indiscriminado y su efecto sobre el medio ambiente. En algunos casos también pueden producir rinitis alérgica o ser un factor de riesgo para personas asmáticas, por lo que los modelos de pronóstico de estos tipos esporales son también de gran relevancia para prevenir la exposición a estos alérgenos (Aira *et al.*, 2013; Corden *et al.*, 2003; Infante *et al.*, 1999; Oliveira *et al.*, 2009; Rodríguez-Rajo *et al.*, 2005a).

Los modelos aquí presentados consideran variables locales y están ajustados a una escala espacial reducida. Las concentraciones de polen y esporas en la atmósfera dependen de variables de escala local, por lo que los modelos mejor ajustados suelen ser de un ámbito de aplicación reducido (Akdis & Agache, 2014). Otros autores son partidarios de elaborar modelos regionales o incluso de mayor escala. Estos modelos, como SILAM o COSMO-ART, presentan la ventaja de que se puede estimar la contribución de las fuentes de emisión cercanas y tener en cuenta el transporte de polen en función de la dinámica atmosférica (Beggs *et al.*, 2017; Sofiev *et al.*, 2006, 2008; Vogel *et al.*, 2009). Sin embargo, presentan el inconveniente de ser menos precisos a escala local, requieren datos espaciales para toda la extensión que se desea modelar y en ocasiones son demasiado mecanicistas. Estos modelos ya han sido optimizados para algunos tipos polínicos concretos y requieren algunas adaptaciones para poder aplicarse al resto.

4.7. Análisis de los modelos de interpolación espacial

Los modelos interlocalidades permiten estimar las concentraciones de polen de las localidades muestreadas en la provincia de Málaga a partir de las concentraciones de Málaga capital. En la validación interna de los modelos interlocalidades se obtuvo un MAE promedio de 9,36 granos de polen/m³ para el polen total (todos los tipos polínicos en su conjunto) (Anexo B). La tasa de aciertos media obtenida en la validación externa de estos modelos fue superior al 0,70 en todas las localidades muestreadas en la provincia de Málaga, y superior al 0,75 en la mayoría de los casos (Figura 4.61A). La tasa más baja se obtuvo en Ronda (0,72 de media) y la tasa más elevada en Estepona (0,80 de media). En general, las localidades costeras -como Estepona, Nerja o Vélez-Málaga- presentan mayores tasas de acierto que las localidades del interior de la provincia por su similitud a Málaga capital en cuanto a concentraciones de polen. El Itc de las localidades costeras es mucho más similar entre sí que los de localidades del interior como Antequera o Ronda (Figura 4.62), lo que evita grandes desfases en la temporalidad de la fenología de floración. Las elevadas formaciones orográficas a escasa distancia de la franja costera de la provincia dificultan el flujo de masas de aire entre el interior y la costa lo que, junto a las diferencias de uso del suelo, también incrementa las diferencias detectadas en concentraciones de polen entre estos grupos de localidades.

La tasa de acierto por tipo polínico osciló entre 0,57 (Urticaceae) y 0,88 (*Platanus*) en el cómputo de todas las localidades (Figura 4.61B). Las fuentes de emisión del polen de tipo Urticaceae son especies nitrófilas cuya abundancia varía en función del entorno cercano de los aparatos captadores (Blanca *et al.*, 2011; Recio *et al.*, 2009), lo que dificulta la obtención de patrones generales para la provincia y, por lo tanto, de modelos de interpolación que obtengan tasas de acierto elevadas. El tipo Cupressaceae también está altamente influenciado por individuos de especies ornamentales cercanos a los lugares de muestreo, tal como

se ha observado en Ronda (Capítulo 4.4.2.1). Para otros tipos polínicos como *Olea*, *Pinus*, *Plantago*, *Platanus*, *Poaceae* y *Quercus* se obtuvieron tasas de acierto más elevadas durante esta primera validación externa.

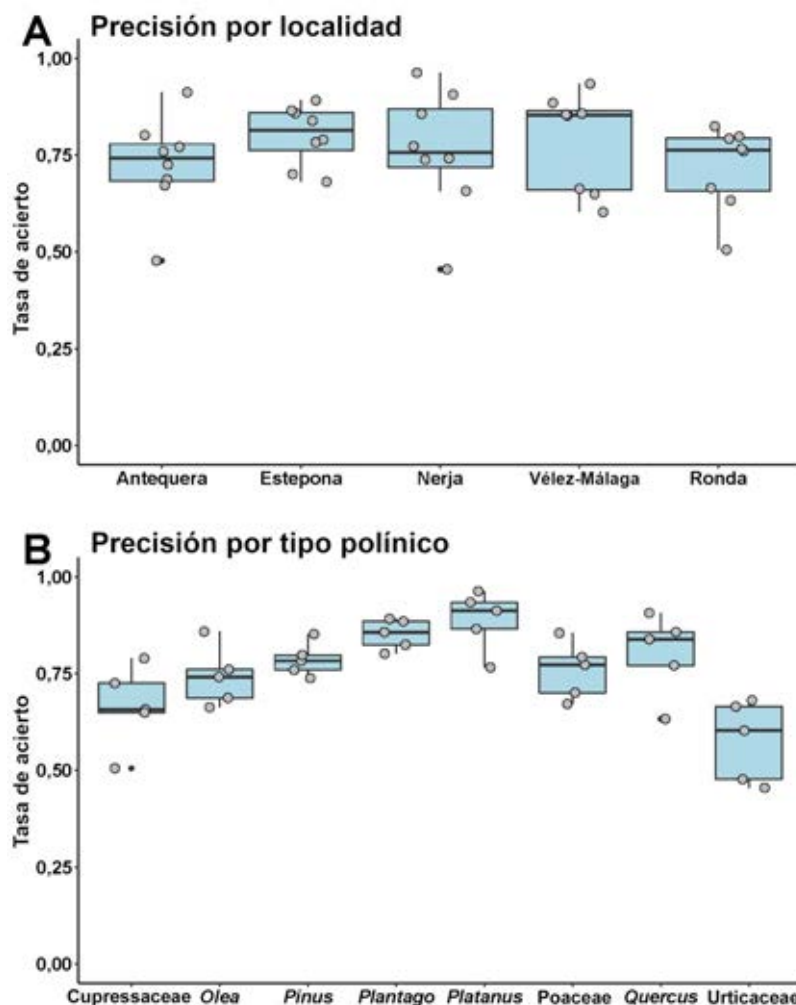


Figura 4.61. Precisión de los pronósticos de modelos interlocalidades durante la validación externa. A) Precisión por localidad. Los puntos grises representan la tasa de acierto de cada tipo polínico en esa localidad. B) Precisión por tipo polínico. Los puntos grises representan la tasa de acierto de cada localidad para ese tipo polínico. Cada caja abarca el 50% de los datos de ese subconjunto (Q1-Q3). La línea negra gruesa de cada caja marca la mediana (Q2). Las barras marcan los límites del subconjunto de datos o, en casos en los que los límites sean demasiado extensos, marcan 1,5 veces el rango intercuartílico. Los puntos negros pequeños marcan datos que superan 1,5 veces el rango intercuartílico de distancia con las cajas (datos atípicos).

El ltc en la provincia de Málaga se distribuye en consonancia con la altitud sobre el nivel del mar, con ligeras variaciones por condiciones climáticas locales y orientación del terreno (Figura 4.62). En general, es más elevado en valles de ríos y zonas costeras que en zonas de alta montaña o del interior de la provincia.

Debido a la interpolación espacial, el patrón observado en el ltc se refleja también en la distribución espacial de los parámetros de los modelos interlocalidades (figuras 4.63 y 4.64). Las zonas costeras muestran valores similares entre ellos, al igual que ocurre entre estaciones de zonas montañosas o del interior de la provincia.

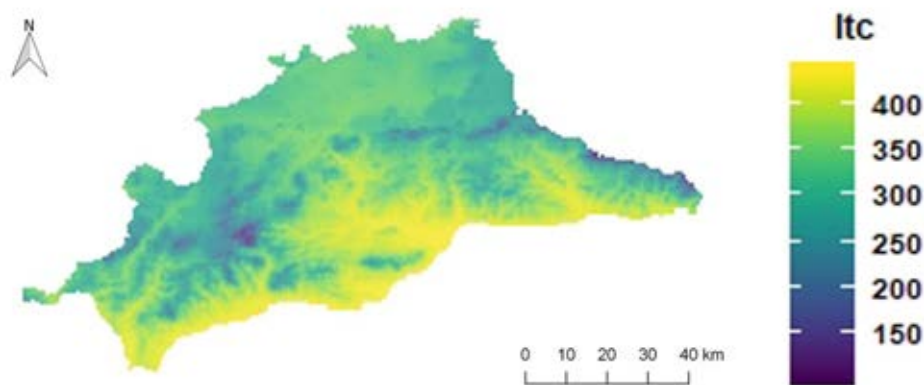


Figura 4.62. Índice de Termicidad Compensado (Itc) en la provincia de Málaga. Elaborado a partir de datos climáticos de WorldClim (periodo 1970-2000; resolución espacial de 1km²).

En general, los valores de distancia temporal de los modelos suelen ser inferiores a 10 días (en valor absoluto) en la mayor parte de la provincia.

Las tasas de aciertos durante el segundo proceso de validación externa (segunda validación externa de los modelos interlocalidades y validación externa de la interpolación espacial) con los datos de Sierra de las Nieves fueron generalmente superiores a 0,60 (Figura 4.65). La tasa de acierto más baja fue de 0,19 (Cupressaceae), y la más elevada de 0,82 (Poaceae). La baja tasa de acierto para el tipo Cupressaceae puede deberse a la influencia de especies de *Juniperus*, que están ausentes o son menos abundantes en el resto de las localidades muestreadas de la provincia. La presencia de estas especies, tal como se ha observado en capítulos previos (Capítulo 4.4.2.1), tiene gran peso sobre las concentraciones detectadas en Cupressaceae de otoño, lo que podría dificultar la predicción de estas concentraciones y, por lo tanto, justificaría la obtención de tasas de acierto bajas.

La localización del aparato captador de Sierra de las Nieves en el interior de un encinar causa una sobrerrepresentación del polen de tipo *Quercus*. Por este motivo, los pronósticos en función del Itc y las concentraciones detectadas en Málaga capital subestiman los niveles presentes en el Parque Natural y obtienen tasas de acierto más bajas que en otros tipos polínicos.

La tasa de aciertos de Urticaceae fue también baja en comparación con el resto de los tipos polínicos. En este tipo polínico las concentraciones de polen detectadas están influenciadas en gran medida por la abundancia de fuentes emisoras en las cercanías del captador, por lo que los modelos interlocalidades no dependen tanto del Itc, sino del uso del suelo y cobertura de estas especies nitrófilas.

Las tasas de aciertos del resto de tipos polínicos fueron generalmente similares a las obtenidas durante la primera validación externa. Las ligeras diferencias observadas se deben a la influencia del uso del suelo de la zona cercana al captador y a las comunidades vegetales presentes en la zona.

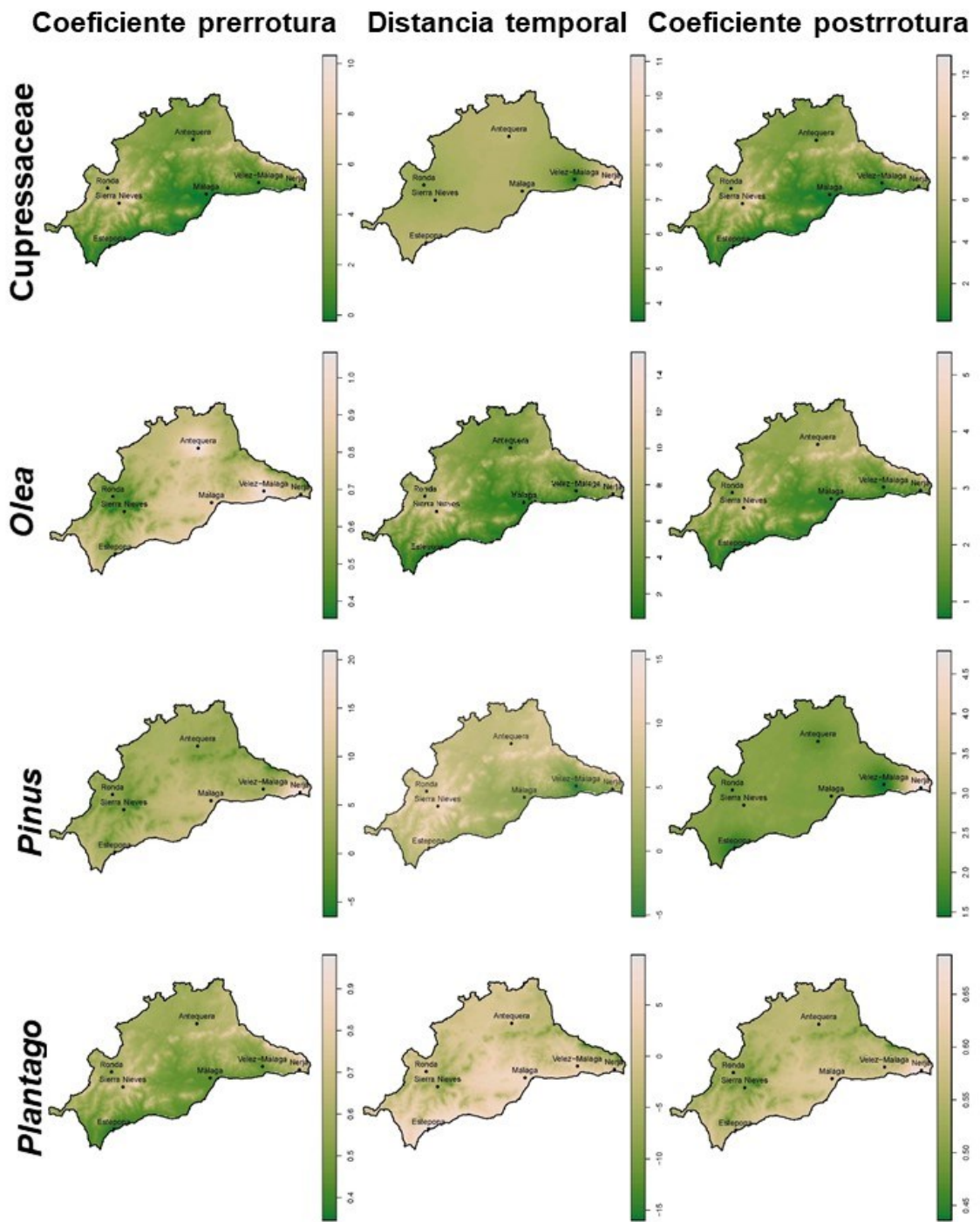


Figura 4.63. Representación espacial de los parámetros de modelos interlocalidades (coeficiente de regresión prerrotura, distancia temporal y coeficiente de regresión postrrotura) para los tipos polínicos *Cupressaceae*, *Olea*, *Pinus* y *Plantago*. Las localidades muestreadas a partir de las cuales se ha realizado la interpolación se marcan en cada mapa.

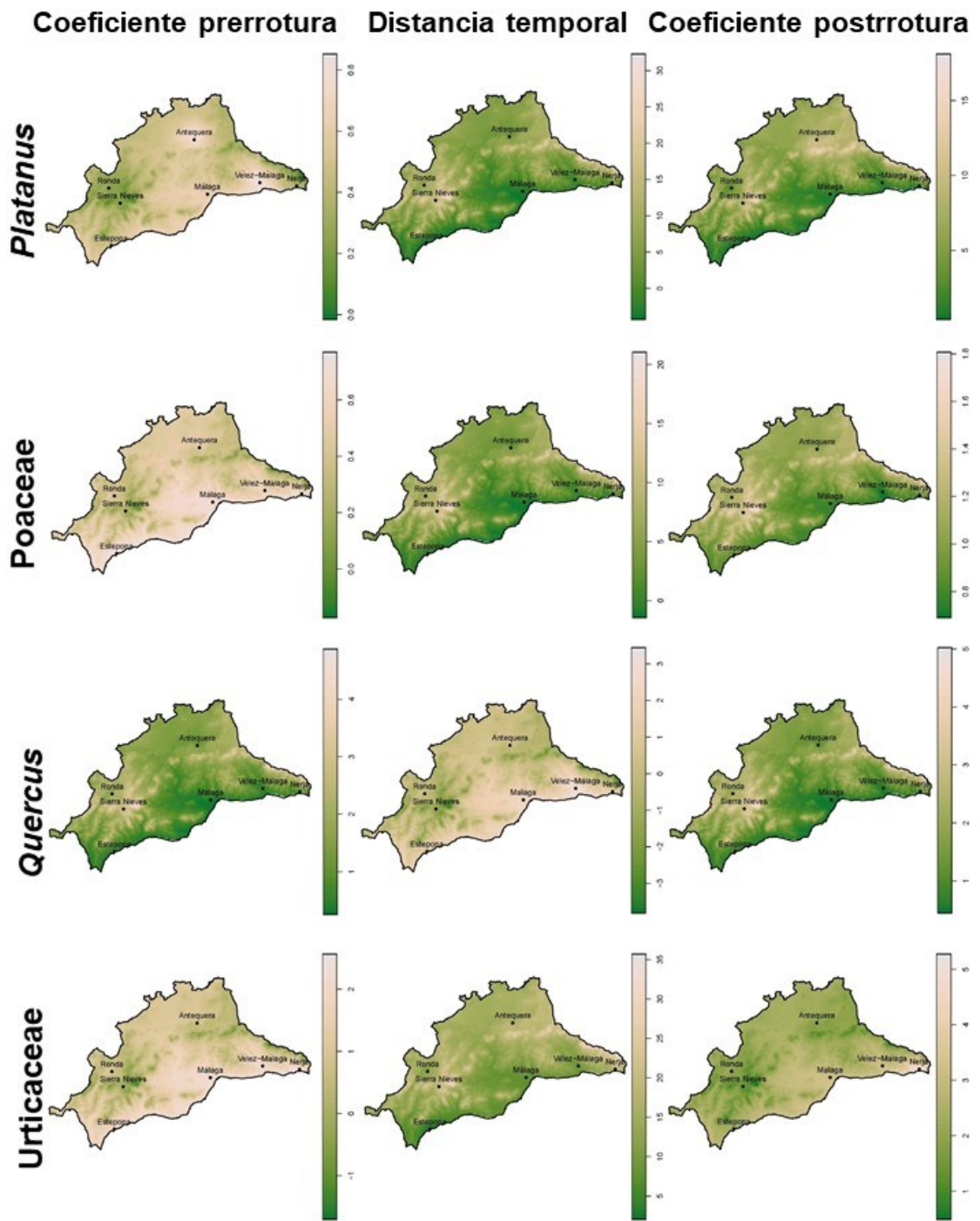


Figura 4.64. Representación espacial de los parámetros de modelos interlocalidades (coeficiente de regresión prerrotura, distancia temporal y coeficiente de regresión postrrotura) para los tipos polínicos *Platanus*, *Poaceae*, *Quercus* y *Urticaceae*. Las localidades muestreadas a partir de las cuales se ha realizado la interpolación se marcan en cada mapa.

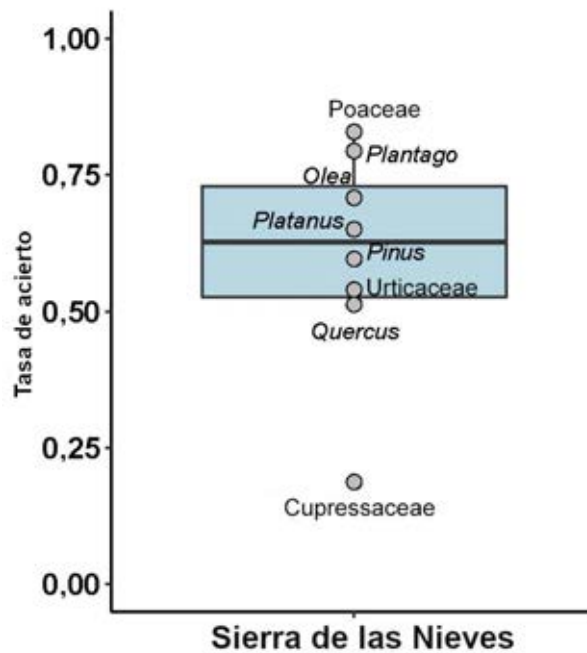


Figura 4.65. Tasas de acierto de las predicciones por tipo polínico de Sierra de las Nieves obtenidas durante la segunda validación externa.

Los modelos podrían mejorarse en futuros estudios incluyendo la cobertura vegetal en el área cercana a cada punto de la provincia. Podría integrarse en la interpolación espacial un factor de corrección en función del área de cobertura de las fuentes de emisión de cada tipo polínico en la provincia de Málaga. Para calcular la influencia de las fuentes de emisión sobre cada punto, podría utilizarse una metodología de anillos concéntricos similar a la propuesta por Oteros *et al.*, (2017), aunque sería necesaria la elaboración de mapas detallados de cobertura de suelo en función del tipo polínico. También podría incluirse en el pronóstico diario alguna variable que integrara el efecto del viento sobre el transporte de polen u otras variables meteorológicas como las precipitaciones o humedad relativa. No obstante, los modelos presentados constituyen una primera aproximación que permite estimar las concentraciones de polen en toda la provincia a partir de los datos de Málaga capital, lo que puede ser de gran utilidad para alertar a la población alérgica de cada lugar.

4.8. Paquete AeRobiology

El paquete AeRobiology se publicó en el repositorio público oficial de R, CRAN (*The Comprehensive R Archive Network*) en diciembre de 2018, tras un periodo de revisión externa por parte del equipo técnico de R. Se encuentra amparado bajo la licencia de uso libre GPL-3 (*General Public License 3*), que garantiza su uso y distribución gratuita sin permitir cambios por parte de otras personas que no sean sus autores. Para facilitar la utilización de las funciones desarrolladas al usuario se desarrolló un tutorial pormenorizado del uso del paquete (<http://rpubs.com/Picornell/AeRobiology>). La estructura y funcionalidades del paquete fueron publicadas en la revista *Methods in Ecology and Evolution* (Rojo *et al.*, 2019).

Actualmente, en su versión 2.0.1, dispone de 15 funciones (Tabla 4.27). Cada función tiene una metodología y argumentos asociados que pueden ser consultados en la sección de ayuda del programa R (<https://cran.r-project.org/web/packages/AeRobiology/index.html>). La mayor parte de las funciones están encaminadas a la representación gráfica de resultados (concentraciones diarias de varios años de muestreo o de varios tipos polínicos, datos horarios, medias móviles, tendencias anuales, etc.). Algunas de estas representaciones gráficas son interactivas, lo que resulta de gran utilidad para discutir resultados en reuniones de grupos de investigación, presentaciones o elaborar aplicaciones web de difusión de resultados.

Las funciones de análisis de datos se centran en el cálculo de tendencias, del PPP y de calendarios polínicos. Estas tareas son las que normalmente consumen más tiempo en los estudios aerobiológicos y se basan en procesos reiterativos que pueden ser automatizados, lo que las convierte en el objetivo perfecto de procesos computacionales. Mediante la automatización de estos procesos se puede reducir considerablemente el tiempo que los/as investigadores/as invierten en el procesado de datos y permitir que el esfuerzo humano se reduzca a la interpretación y discusión de resultados o tareas que no puedan ser automatizadas. La función *quality_control* permite comprobar si en una base de datos hay registros incompletos para uno o más tipos polínicos/de esporas que puedan comprometer la fiabilidad de los resultados, lo que resulta muy útil cuando se trabaja con bases de datos muy extensas. Para completar algunos de estos datos ausentes se pueden utilizar los métodos de interpolación integrados en la función *interpollen*, que se desarrollarán en el siguiente apartado.

Tabla 4.27: Principales funciones del paquete AeRobiology y su descripción. Modificado y traducido de (Rojo *et al.*, 2019).

Categoría	Función	Descripción
Gestión de la calidad de los datos	<i>interpollen</i>	Relleno de los registros ausentes en una base de datos mediante diferentes métodos matemáticos de interpolación.
	<i>quality_control</i>	Visualización rápida de la calidad de registros de una base de datos aerobiológica (ausencia de datos).
Análisis de datos	<i>analyse_trend</i>	Trazado y cálculo de tendencias de los principales índices anuales: fechas de inicio, pico y final del PPP e integral polínica anual.
	<i>calculate_ps</i>	Cálculo de los principales parámetros y fechas de la estación polínica o de esporulación principal.
	<i>pollen_calendar</i>	Elaboración de calendarios polínicos/de esporas utilizando diferentes representaciones gráficas.
Representación gráfica	<i>iplot_abundance</i>	Representación de la abundancia relativa de cada tipo polínico/de espora. Puede ser interactiva o estática.
	<i>iplot_pheno</i>	Representación gráfica (<i>boxplot</i>) de las fechas de inicio y final del periodo de polinación/esporulación principal. Puede ser interactiva o estática.
	<i>iplot_pollen</i>	Representación gráfica interactiva de la curva de concentraciones polínicas/de esporas de todos los tipos polínicos/de esporas de la base de datos en un determinado año.
	<i>iplot_years</i>	Representación gráfica interactiva de la curva de concentraciones polínicas/de esporas de cada uno de los años disponibles en la base de datos para un determinado tipo polínico/de espora.
	<i>plot_heathour</i>	Representación gráfica de las variaciones intradiarias de las concentraciones de cada uno de los tipos de polen/esporas de la base de datos con intensidades de color (<i>heatmap</i>).
	<i>plot_hour</i>	Representación gráfica de las variaciones intradiarias de las concentraciones de cada uno de los tipos de polen/esporas de la base de datos. Opciones para representar los datos de una única estación de muestreo o de varias (gráfico de barras).
	<i>plot_normsummary</i>	Representación gráfica de la amplitud y media de la curva anual de concentraciones de polen/esporas de un determinado tipo a lo largo de todos los años disponibles en la base de datos.
	<i>plot_ps</i>	Representación gráfica del periodo de polinación/esporulación principal de un determinado tipo polínico/de espora y año.
	<i>plot_summary</i>	Representación gráfica de la curva anual de concentraciones de polen/esporas de un determinado tipo en cada uno de los años de muestreo junto a la media de todos los años.
	<i>plot_trend</i>	Cálculo y representación gráfica de tendencias de las fechas de inicio, pico y final del periodo de polinación/esporulación principal, así como de la integral polínica/de esporas anual, junto con sus intervalos de confianza y <i>p</i> -valor.

4.8.1. Eficiencia de los métodos de interpolación de datos ausentes

De todos los métodos testados, la interpolación lineal y la interpolación basada en regresiones con el punto de muestreo de Sierra de las Nieves fueron los que obtuvieron menores errores (Figura 4.66). El método con un mayor error fue el de la media móvil. Todos los métodos presentaron errores relativos medios inferiores a 1 y superiores a 0,5.

El método de interpolación lineal no requiere ajustes previos ni parametrización de otras variables para poder aplicarlo. Es un método directo y representa la tendencia general de la curva. Aunque su ajuste matemático a los puntos ausentes puede ser peor que el de otros métodos, como las regresiones *spline* o las series temporales, es menos susceptible a producir grandes errores por ajustes incorrectos. Es suficientemente preciso y muy versátil, lo que en promedio le otorga una gran eficacia predictiva.

El método de la media móvil tiene la desventaja de realizar predicciones basándose en otras predicciones previas, ya que integra la media móvil de los primeros datos interpolados en el cálculo de los sucesivos. Por este motivo, los errores se van acrecentando y sumando, lo que conlleva un mayor error relativo promedio que el resto de los métodos.

Las regresiones basadas en otros puntos de muestreo cercano están altamente influenciadas por el punto de muestreo seleccionado. Estaciones con condiciones climáticas similares y a poca distancia (como es el caso de Sierra de las Nieves) proporcionan errores relativos más bajos que regresiones con puntos de muestreo más lejanos y en entornos diferentes (como Málaga). Las estaciones que presentan una mayor distancia geográfica se pueden ver afectadas por condiciones meteorológicas distintas lo que, aún en el supuesto de que las fuentes de emisión de polen fuesen idénticas, produciría grandes errores en las predicciones. En el caso de las regresiones con Málaga, no se pudieron interpolar los datos de *Arecaceae* y *Casuarina*; y en el caso de regresiones con Sierra de las Nieves además de estos tipos polínicos tampoco se pudo interpolar *Platanus*. Por lo tanto, la fiabilidad de este método de interpolación varía ampliamente según la estación y tipo polínico elegido. No es aconsejable su uso indiscriminado.

El método de interpolación basado en el análisis de series temporales presenta una tasa de error intermedia con respecto al resto de métodos. Es esperable que los errores se reduzcan al introducir datos de más años de muestreo, ya que la estacionalidad obtenida será más representativa de la estacionalidad real. El inconveniente de este método es que no puede utilizarse para puntos de muestreo con datos de pocos años.

El método basado en regresiones *spline* presenta el inconveniente de sobreajustarse a la tendencia de los días previos y posteriores al hueco, lo que puede llevar a tasas de errores muy bajas o, por el contrario, a tasas de errores muy elevadas dependiendo si la tendencia de los extremos de la curva era o no representativa de la tendencia general.

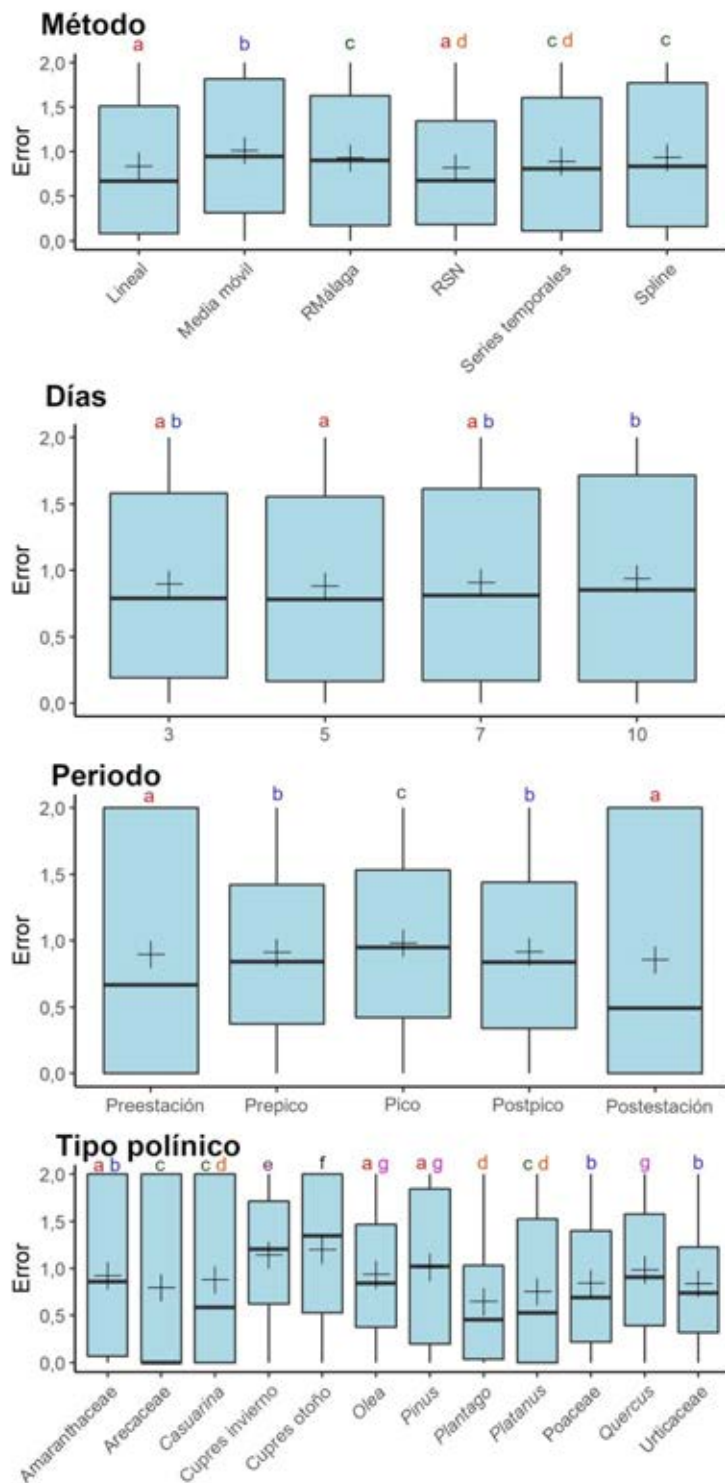


Figura 4.66. Errores relativos obtenidos para cada parámetro de las variables consideradas en la interpolación de datos ausentes utilizando la base de datos de Ronda. Cada caja abarca el 50% de los datos de ese subconjunto (Q1-Q3). La línea negra gruesa de cada caja marca la mediana (Q2). Las barras marcan los límites del subconjunto de datos o, en casos en los que los límites sean demasiado extensos, marcan 1,5 veces el rango intercuartílico. La cruz marca la media aritmética. Las letras indican aquellos parámetros que no mostraron diferencias significativas entre sí ($\alpha=0,05$) tras pruebas de Mann-Whitney Wilcoxon con correcciones *post-hoc* de Bonferroni. RMálaga: regresión con el punto de muestreo de Málaga. RSN: regresión con el punto de muestreo de Sierra de las Nieves. Cupres: Cupressaceae. Los tratamientos que tienen la misma letra no presentan diferencias significativas ($\alpha=0,05$) según pruebas de Mann-Whitney Wilcoxon con corrección *post-hoc* de Bonferroni.

En cuanto al número de días consecutivos a interpolar, no hubo diferencias significativas entre la mayoría de los tamaños (Figura 4.66). El subconjunto de valores del Q1-Q3 tomó un rango ligeramente más reducido en el caso de los huecos de 5 días, aunque solo con diferencias significativas frente a huecos de 10 días (que tuvieron el rango más amplio). En general, huecos de mayor tamaño son más difíciles de interpolar. En algunos periodos, la tendencia de la curva de concentraciones diarias de polen puede cambiar a lo largo de 10 días, por lo que los métodos basados en modelos matemáticos -como interpolaciones lineales, regresiones *spline* o medias móviles- presentan una eficacia reducida en estos casos. En huecos más pequeños es menos probable que cambie la tendencia, por lo que la eficacia de los métodos se estima más elevada pese a no detectarse diferencias significativas en la mayoría de los casos. Es también destacable que en muchos casos no fue posible realizar una interpolación de 10 días con los datos de entrenamiento, ya que algunos prepicos y postpicos tuvieron duraciones inferiores (Capítulo 4.4.2).

Con respecto a los errores por periodo interpolado hay que tener en cuenta una consideración previa: por la propia fórmula del error relativo (Capítulo 3.5.1, Ecuación 3.7) errores en predicciones con valores observados de 0 granos de polen/m³ dan errores relativos muy elevados (2, el límite teórico máximo de la fórmula). El cálculo de errores relativos genera muchos problemas cuando se integran valores observados de 0, por lo que suelen eliminarse dichos valores y considerarse solo observaciones superiores a un determinado valor. No obstante, concentraciones de 0 granos de polen/m³ son frecuentes y, en algunos casos, pueden encontrarse incluso dentro del PPP (fenómenos de lluvias o vientos poco favorables), por lo que se ha preferido conservar dichos valores. Al ser más abundantes fuera del PPP, en los periodos preestacional y postestacional se detectan errores relativos de valor 2 con mayor frecuencia (Figura 4.66). Se debe considerar que, aunque porcentualmente estos errores son elevados, representan concentraciones normalmente bajas de granos de polen/m³, por lo que es poco probable que alteren los niveles de concentración que se entregan a la población o que influyeran en la elección de fechas del PPP cuando se utilizan métodos de porcentajes de la integral polínica anual para definirlo. Pese a tener un mayor rango intercuartílico, las medias de errores relativos de estos periodos son inferiores a las del resto. El periodo que presentó una mayor media y mediana de errores relativos fue el pico (Figura 4.66). Predecir el valor pico a partir de valores cercanos no es sencillo desde un punto de vista matemático, ya que presenta una gran variabilidad interanual (Capítulo 4.4.2) y su valor depende también de las condiciones meteorológicas de ese día. Al pico le suceden en errores relativos medios los periodos de prepico y postpico (sin diferencias significativas entre ellos). En general, y como cabría esperar, datos interpolados dentro del PPP conllevan errores relativos superiores.

Con respecto al tipo polínico, se puede observar el mismo efecto de las concentraciones de 0 granos de polen/m³ que se ha descrito previamente: tipos polínicos poco abundantes y/o con un PPP corto (como *Amaranthaceae*, *Arecaceae*, *Casuarina* o *Platanus*), presentan concentraciones de polen cercanas a 0 granos de polen/m³ durante gran parte del año. Por lo tanto, tienen errores relativos de 2 con mayor frecuencia, lo que incrementa su rango intercuartílico (Figura 4.66). Los tipos polínicos menos abundantes generalmente presentan mayores oscilaciones en sus concentraciones entre días consecutivos, lo que en

algunos casos dificulta la obtención de una tendencia generalizada que permita la interpolación. No obstante, se detectaron pocas diferencias significativas entre estos tipos polínicos y el resto.

Tanto Cupressaceae de otoño como de invierno presentaron diferencias significativas entre sí y con el resto de los tipos polínicos. Pese a ser el tipo polínico más abundante en Ronda, se detectan grandes oscilaciones entre días de muestreo y entre años de muestreo consecutivos, lo que puede dificultar las interpolaciones basadas en métodos matemáticos. Tal como se ha comentado en el Capítulo 4.4.2.1, la elevada abundancia de cupresáceas ornamentales en Ronda hace que este tipo polínico se encuentre sobrerrepresentado, lo que también dificulta la interpolación mediante los métodos de regresiones con puntos de muestreo cercanos. Todo este conjunto de circunstancias es el responsable de que la mayor tasa de error relativo se obtenga para este tipo polínico.

Plantago fue el tipo polínico que obtuvo menores errores relativos medios en su interpolación. Es un tipo polínico mayoritario en Ronda y su curva de polen generalmente muestra tendencias muy homogéneas a lo largo de su PPP (Capítulo 4.4.2.7), lo que puede facilitar el ajuste de los métodos matemáticos de interpolación.

Los tipos polínicos correspondientes a especies arbóreas de distribución mayoritariamente natural o seminatural, como *Pinus* y *Quercus*, no presentaron diferencias significativas con *Olea*. Todos estos tipos polínicos son mayoritarios y representan a especies arbóreas mediterráneas. *Pinus* y *Olea* están más estrechamente relacionados entre sí que con *Quercus* y tampoco mostraron diferencias significativas con el tipo Amaranthaceae.

Amaranthaceae, Poaceae y Urticaceae tampoco presentaron diferencias entre sí. Todos son tipos polínicos que integran una gran variedad de especies de porte herbáceo (generalmente cosmopolitas) y que tienen un PPP muy extenso a lo largo del año.

Los tipos polínicos *Casuarina* y *Platanus* tampoco presentaron diferencias significativas entre sí. Ambos son tipos polínicos con un PPP muy breve, con pocas oscilaciones de concentraciones entre días consecutivos e integrados por especies arbóreas ornamentales. Tampoco obtuvieron diferencias significativas los errores de estos tipos polínicos con *Plantago*.

No hay un patrón general en el error relativo medio de los tipos polínicos en función del número de especies que integren el tipo polínico, ni del tipo biológico o abundancia de estas. No obstante, sí que se observan errores relativos medios mayores en tipos polínicos que muestran grandes contrastes en las concentraciones polínicas de varios días consecutivos.

Aunque varios métodos de interpolación presentaron errores relativos similares, la simplicidad y versatilidad de modelos matemáticos como la interpolación lineal o las regresiones *spline* (que son independientes de la existencia o similitud de puntos de muestreo cercanos o de muestreos durante una serie larga de tiempo) hace que sean la mejor alternativa a la hora de interpolar datos ausentes o perdidos. Sin embargo, circunstancias concretas como la existencia de un punto de muestreo cercano de características similares o la disponibilidad de series extensas de datos pueden convertir los métodos de las regresiones con puntos vecinos o las series temporales en buenos candidatos

para realizar interpolaciones. Los errores son similares entre huecos de hasta 7 días y comienzan a presentar algunas diferencias (errores mayores) a partir de los 10 días consecutivos.

Además de los métodos descritos en este capítulo hay muchos otros métodos de modelado matemático (ej.: redes neuronales, árboles de regresiones, curvas logísticas o regresiones robustas entre otras) y variables que podrían ser consideradas y ajustadas para tener una mayor eficiencia. Algunos de estos métodos han sido utilizados para interpolar datos fenológicos por satélite (Belda *et al.*, 2020), aunque todavía no han sido aplicados a la aerobiología. También se podrían hacer combinaciones de diferentes métodos:

- Combinando el análisis de series temporales con un ajuste de la estacionalidad mediante redes neuronales o árboles de regresiones.
- Combinar el método de interpolación con puntos de muestreo cercanos y el método de modelos compuestos descrito en el Capítulo 3.4.10 o utilizar datos procedentes de mapas interpolados espacialmente.
- Integrar la influencia de variables meteorológicas en los modelos.

5. Conclusiones

1. La temperatura media anual en Ronda y Sierra de las Nieves se ha incrementado 1,2°C y 1,1°C respectivamente en los últimos 30 años. En Ronda las temperaturas de los primeros meses del año se han reducido y las del resto del año han aumentado, lo que ha modificado su tipo de continentalidad de un semicontinental atenuado a un euoceánico acusado. Por el contrario, en Sierra de las Nieves el tipo de continentalidad no ha cambiado a pesar de que la subida de temperaturas máximas y mínimas mensuales ha sido más acusada que en Ronda. La precipitación total anual se ha incrementado ligeramente en Ronda y se ha reducido notablemente en Sierra de las Nieves a lo largo de las tres últimas décadas, aunque en ambas localidades las precipitaciones tienden a ser más intensas y menos frecuentes.

2. Las variaciones de temperatura en los meses previos al periodo de floración afectaron a la temporalidad y cantidad del polen detectado en la atmósfera de ambas localidades. En la mayoría de los casos, cuando aumentaron las temperaturas en los meses previos se adelantó la floración, mientras que temperaturas bajas la retrasaron. Por otro lado, el aumento de las precipitaciones junto a temperaturas más altas en los meses previos a la floración suele incrementar la cantidad de polen producida por taxones herbáceos (ej.: Urticaceae, *Plantago*, Poaceae, Amaranthaceae y *Rumex*), aunque también se ha observado en algunos táxones de porte arbóreo como *Fraxinus*.

3. Las diferencias encontradas entre los calendarios polínicos de Ronda y Sierra de las Nieves, sus integrales anuales y su comportamiento estacional pueden explicarse por las diferencias en la composición florística de ambas localidades, por el uso del suelo, por la influencia de cultivos, especies nitrófilas y taxones ornamentales en Ronda, así como por las diferencias fenológicas de las especies y por las características climáticas de ambas localidades.

4. El promedio de la integral total anual de polen de Ronda y Sierra de las Nieves fue de 67 184 y 63 109 polen*día/m³ respectivamente. 40 tipos polínicos distintos se identificaron en Ronda y 37 en Sierra de las Nieves. Casi el 90% de la integral total anual, como promedio, se detectó de febrero a junio en Ronda. En Sierra de las Nieves casi el 80% se detectó en mayo y junio. Los 8 tipos polínicos más abundantes en ambas localidades fueron los mismos: *Castanea*, Cupressaceae, *Olea*, *Pinus*, *Plantago*, Poaceae, *Quercus* and Urticaceae, en orden alfabético. Sin embargo, Cupressaceae, *Olea* y Urticaceae estuvieron sobrerrepresentados en Ronda, mientras que *Quercus* y *Castanea* lo estuvieron en Sierra de las Nieves debido a las circunstancias anteriormente mencionadas. *Quercus* en Sierra de las Nieves alcanzó los valores más altos registrados en la Península Ibérica (41 546 polen*día/m³; 65,34% de la integral total anual, como promedio).

5. La detección de polen de *Alnus* es resultado de un proceso de transporte a media y/o larga distancia. El polen de *Alnus* tiene un origen heterogéneo: principalmente procede de poblaciones situadas a más de 160 km al norte de las zonas de muestreo, aunque también hay contribuciones puntuales de las poblaciones del este (Sierra Nevada) y del suroeste del área de muestreo (Cádiz y Valle del Genal). El transporte a larga distancia detectado pone de manifiesto la posible conectividad reproductiva entre poblaciones distantes de este taxon, lo que podría resultar de gran interés para su gestión y conservación.

6. Las variables meteorológicas influyen notablemente sobre las concentraciones diarias de polen en la atmósfera. En general, las precipitaciones y humedad relativa favorecen la precipitación del polen del aire, mientras que temperaturas elevadas favorecen la liberación de polen desde las flores a la atmósfera. En algunos taxones, temperaturas elevadas cuando ya se ha producido el pico de floración favorecen el secado y dehiscencia prematura de las flores maduras, lo que repercute en una bajada de las concentraciones de polen en el aire. La dirección y velocidad del viento influye notablemente sobre el polen detectado cuando las fuentes de emisión están restringidas a área concreta.

7. La mayoría de los tipos polínicos, como Cupressaceae, *Olea*, Poaceae y *Quercus*, presentaron su pico de concentración máxima entre las 12:00 y 16:00 horas. Cupressaceae y *Castanea* mostraron el pico intradiario más elevado. En el caso de *Castanea*, los niveles máximos de concentración se detectaron durante el mediodía o en la noche, dependiendo de las dinámicas de transporte de polen desde sus fuentes de emisión. Los patrones intradiarios también se ven condicionados por el uso del suelo y la vegetación natural.

8. Las esporas de *Alternaria* y *Oidium* están presentes durante todo el año en la atmósfera de ambas localidades, y son más abundantes en Ronda que en Sierra de las Nieves. Sin embargo, sus concentraciones son mayores durante el periodo de mayo a octubre en el caso de *Alternaria* y de mayo a julio en el caso de *Oidium*. La combinación de temperaturas cálidas y precipitaciones abundantes favorecen la producción y liberación de estas esporas.

9. Los modelos de pronóstico basados en *random forest* obtuvieron las tasas de acierto más elevadas para la mayoría de los tipos polínicos, mientras que los modelos de redes neuronales fueron los más precisos para *Olea* en las dos localidades estudiadas, y para *Quercus* en Ronda. Las regresiones lineales múltiples por pasos lo fueron para *Platanus* en Sierra de las Nieves y para Urticaceae en ambas localidades.

10. Mediante los modelos de interpolación espacial propuestos es posible estimar el nivel de polen en el continuo de la provincia de Málaga utilizando solo el polen detectado en Málaga capital con tasas de acierto generalmente superiores al 60%. Los modelos obtuvieron tasas de acierto bajas con aquellos tipos polínicos cuya abundancia en la atmósfera estaba fuertemente influenciada por fuentes de emisión locales. Por lo tanto, la eficacia de los modelos podría incrementarse incluyendo el uso del suelo. Con los modelos obtenidos es posible maximizar los beneficios de un muestreo aerobiológico cuando no se puede incrementar el número de captadores o mantenerlos simultáneamente en funcionamiento.

11. El paquete AeRobiology integra las principales funciones utilizadas en la investigación aerobiológica, lo que permite reducir el tiempo en el procesado de datos y presentación de resultados, así como facilitar la integración de nuevas tecnologías en la aerobiología. El paquete incorpora funciones que permiten la interpolación de datos ausentes. Las tasas de error en la interpolación están condicionadas por el comportamiento del tipo polínico, el número de datos ausentes y la estacionalidad. La interpolación lineal y las regresiones con estaciones cercanas fueron los métodos que mostraron los errores más bajos.

6. Abstract and conclusions

1. Introduction

1.1. The study area

Ronda is located in the northwest part of Malaga province (Andalusia, southern Spain). It is one of the main cities inland the province being situated over the Ronda plateau, surrounded by Sierra de Grazalema mountains in the west, Sierra Bermeja mountains in the south and Serranía de Ronda mountains in the east and southeast. Is in this last mountain range where we can find Sierra de las Nieves Natural Park and also the highest mountainous peak of the area: the Torrecilla peak (1919 m a.s.l.). The area has a pronounced orography that results in high slopes in a great part of the territory what determines its particular wind dynamics (Figure 1.1) (Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, 2005).

The geologic materials of the area are mainly sedimentary and calcareous rocks (i.e., marls, limestones, dolomites and sandstones), but there are some important and singular igneous outcrops of peridotites, serpentines and gneiss (Figure 1.2). Metamorphic rocks are scarce and restricted to the south-eastern part of the Sierra de las Nieves Natural Park. Although there are some important rivers, being the main the Genal and Rio Grande, most water streams of the area are seasonal and, due to the calcareous nature of the materials, they can deeply modify the orography of the territory (Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, 2005; Pérez-Latorre et al., 1998).

The marked orography of the area increases the microclimatic variability. The annual total precipitation is ranged between 500 mm and 2100 mm, being the western area that which registers the highest precipitations (Figure 1.3). Most rainfalls are concentrated during spring and autumn and there is a dry period in summer what is a characteristic of the Mediterranean macrobioclimate (Pérez-Latorre et al., 1998). Annual mean temperature oscillates between 13°C and 18°C, the highest altitudes being the coldest (Figure 1.4). This combination of precipitations and temperatures gives rise to ombrotypes that go from hyper-humid to dry, as well as bioclimatic belts that go from the lower termomediterranean to the lower oromediterranean (figures 1.5 and 1.6) (Junta de Andalucía, 2011, 2019).

Regarding phytogeographic sectorization, most of the area of study is within the Bética province, sectors Rondeño and Bermejense. Nevertheless, there is a small portion of the area towards the south and southeast of the territory that belongs to the Tingitano-Onuvo-Algarviense province, Aljibe sector (Figure 1.7) (Pérez-Latorre et al., 2019).

Most of the study area is covered with natural or seminatural vegetation in different development stages. In the north, olive, fruit trees, vineyards and cereal crops dominate the land coverage. In the southwestern part (Genal Valley) there are the largest chestnut crops of Andalusia (figures 1.8 and 1.9) (Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, 2005; Junta de Andalucía, 2011, 2019).

Andalusia is characterised by a high biodiversity because of the confluence of Holarctic and African flora and fauna, being considered one of the biodiversity hot spots in the Mediterranean basin (Cueto et al., 2018). The region of Ronda, due to its climate, lithology and orographic heterogeneity, has a very high vegetal biodiversity, constituting one of the Malaga areas with more endemic species. The

natural vegetation in the surrounding places of Ronda city is reduced to the degradation stages of scrubs and pastures due to the anthropic pressure. In many cases, the climax vegetation has been substituted by crops and repopulation of pines (mainly *Pinus halepensis* Mill.). Nevertheless, there are three Natural Parks in the area in which the natural vegetation is well preserved: Sierra de las Nieves, Sierra de Grazalema and Los Alcornocales, being pollen counts influenced by the vegetation of these natural areas.

The vegetation of Sierra de las Nieves is mainly dominated by *Quercus* forests: holm oak forests (*Quercus rotundifolia* Lam.) mixed with pinsapos (*Abies pinsapo* Boiss.) and gall oaks (*Quercus faginea* Lam.). Cork oak forests (*Quercus suber* L.) are present in siliceous soils or areas with high precipitation. Gall oak forests mixed with maples (*Acer granatense* Boiss.) grow in very humid areas, and *Quercus faginea* subsp. *alpestris* (Boiss.) Maire is an endemic taxon that can be found at high altitudes. In fact, these are the gall oak formations that grow the highest distribution of the Iberian Peninsula. Additionally, there are also other forests of great relevance that are not dominated by *Quercus* species, such as the pinsapo forests, the high mountain juniper formations (*Juniperus communis* L.) and savin juniper formations (*Juniperus sabina* L., *Juniperus phoenicea* L. formations, as well as pine forests (*Pinus halepensis* and *Pinus pinaster* Aiton) (Pérez-Latorre et al., 1998).

A. pinsapo is a relict and endemic protected species present in the studied area, originated from the *Abies* populations that remained isolated in the high mountains once the last of the Pleistocene glacial periods ended. Its current distribution is limited to Sierra de las Nieves, Sierra de Grazalema and Sierra Bermeja (Arista, 1995; Linares, 2011), where this species grow on different soil types giving raise to forest with different floristic compositions. The most extense pinsapo forest are that located in Sierra de las Nieves (Figure 1.10) (Arista, 1995).

Riverside vegetation is represented by willow and oleander formations that grow in permanent and seasonal water courses respectively, as well as ash groves located in the high mountain (Pérez-Latorre et al., 1998).

The natural vegetation of Sierra de Grazalema National Park is mainly dominated by holm oak forests mixed with gall oaks and olive trees. The pinsapo forests have a singular relevance in the natural vegetation of this park (Gallego Fernández, 2004; Pérez-Latorre & Cabezudo, 2002a).

Los Alcornocales Natural park has mild temperatures during the whole year due to the coastal influence. Additionally, the precipitation is more abundant than in the study area. These climatic conditions allowed the development of vegetation with higher water requirements, such as *Quercus faginea* subsp. *broteroi* (Cout.) A.Camus, *Quercus canariensis* Willd. and *Quercus pirenaica* Willd. The dominant forests are the cork oak, holm oak and olive groves (Pérez-Latorre et al., 1999).

Andalusia has suffered a constant anthropic pressure due to its strategic geographical position and its mild climate (Cueto et al., 2018; Templado, 2014). The high biological singularity of the studied area and the high degree of threat to its diversity have led to establish different protection figures, such as the Sierra de las Nieves and its Environment, and the Mediterranean Intercontinental Biosphere Reserves, the three Natural Parks mentioned before, some Natura 2000 protected areas, and some Natural Sites and Special Protected Areas among others (Figure

1.11) (Gómez Moreno, 2010). Currently, the Sierra de las Nieves Natural Park is in ways to become a National Park of Spain (Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, 2005; Junta de Andalucía, 2011, 2019; Resolución de 17 de diciembre de 2018, del Organismo Autónomo Parques Nacionales, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 7 de diciembre de 2018, por el que se aprueba la propuesta final de declaración del Parque Nacional de la Sierra, 2019).

1.2. Aerobiology and state of the art

Aerobiology is the “scientific discipline centred in the passive transport of organisms and biotic particles in the atmosphere” (Mandrioli & Ariatti, 2001). During the second half of the 20th century, the aerobiology gained relevance in the European research. In 1974 the International Association for Aerobiology (IAA) was created, and in the early 90s the aerobiological research settled in Spain, with the establishment of the Spanish Aerobiology Network (REA) in 1992 that was created to cooperate with the European Aeroallergen Network (EAN) (Galán et al., 2007; Sozinova & Ariatti, 2019). The aerobiology team of the University of Malaga started sampling the pollen in the atmosphere of Malaga (the capital) in May 1991, Malaga sampling station being one of the firsts in joining the REA. Currently it has one of the most extensive pollen registers of Spain (Galán et al., 2007; Picornell et al., 2019b). Every week the pollen content in the atmosphere is analysed and the results sent to the REA for elaborating forecasts and technical reports at national and regional levels. The pollen information is also published online in the webpage of the aerobiology team of the University of Malaga (<http://www.aerobiologia.uma.es/>). Additionally, aerobiological studies have been carried out in some other localities of the province such as Antequera, Nerja, Velez-Malaga and Estepona (Figure 1.12).

1.3. Justification and objectives

The atmosphere of the northwest part of Malaga province had not been studied until now, where there are not sampling stations in nearby areas of Malaga or in the adjacent provinces (Docampo et al., 2007; Galán et al., 2007; Picornell et al., 2019b; Recio et al., 2000, 2006; Trigo et al., 2007). The high vegetal biodiversity, the endemic and protected species, and the presence of habitats with singular characteristics deserve a special study and conservation. Atmospheric pollen concentrations are an indirect measurement of flowering phenology of anemophilous plants. Therefore, it is possible to obtain information about the reproductive behaviour of the natural vegetation through its study and, consequently, useful information for their management and conservation (Lander et al., 2010; Morán-López et al., 2016; Picornell et al., 2020; Sork & Smouse, 2006; Zhang et al., 2019).

Understanding the reproductive behaviour of plants is crucial for estimating the effect that climate change will have over them. Until now, the Mediterranean area has suffered a higher temperature increase than the rest of the world, which turns it into a specially vulnerable area to future changes (Guiot & Cramer, 2016). Global warming is changing the distribution of native vegetal species in latitude and altitude but, those species living in isolated high mountain habitats are unable to change their distribution in order to compensate the temperature increase. Such species are more vulnerable to climate change, and some of them are changing

their reproductive phenology as an adaptation way (Dullinger et al., 2012; García-Mozo et al., 2010b; Wang et al., 2014). Precipitations are also affected by climate change. In the south of the Iberian Peninsula their frequency is reducing and the intensity increasing (De Luis et al., 2009; Sheffield et al., 2012). It is necessary an extensive temporal series of data to study climate change effects, but it is possible to estimate some effects through bioclimatic studies (Jeschke & Strayer, 2008; Ziska et al., 2019).

On the other hand, pollen is the main cause of allergic rhinitis, a disease suffered by approximately the 40% of the European population (Akdis et al., 2015; D'Amato et al., 2007). Besides the damage that it supposes to human health, it also causes relevant economic losses because of the cost of medication to palliate symptoms and the loss of work productivity (Smith et al., 2007). Therefore, pollen monitoring is an important service to minimize the pollen impact over population (Ranzi et al., 2003).

Parallel to pollen, the study of fungal spore concentrations in the atmosphere provides relevant information about the reproductive behaviour of fungi. Some fungi are phytopathogens that affect both natural vegetation and crops, and some of them even cause diseases in human beings. Climate change is also affecting the reproduction and distribution of fungi and, therefore, it could have negative consequences on vegetation, economy and human health (Anderson et al., 2004; Cortiñas Rodríguez et al., 2020; Launay et al., 2014; Martínez-Bracero et al., 2019; Oliveira et al., 2009). *Alternaria* spp. and *Oidium* spp. s.l. are two of the most common and cosmopolite phytopathogenic fungi. For all these reasons, it is crucial to determine the abundance and temporality of these fungal spores in the atmosphere, as well as their relationships with meteorological variables.

Objectives

1. To study the airborne pollen behaviour in the atmosphere of Ronda and Sierra de las Nieves Natural Park, in order to determine the pollen types with a highest incidence in the atmosphere, their temporal variations (seasonal, intradiurnal and interannual), as well as to compare the results obtained in both locations.
2. To elaborate a pollen calendar for each sampling site: Ronda and Sierra de las Nieves Natural Park.
3. To study the existing relationship between atmospheric pollen content and meteorological parameters, climatic parameters, *in situ* phenological studies, real vegetation coverage and land use.
4. To elaborate pollen forecast models that can be applied to allergy prevention, as well as with economic and environmental purposes.
5. To develop models to spatially interpolate aerobiological data.
6. To develop a computational package that integrates the main formulae and functions that are commonly used in Aerobiology and allow the interpolation of missing data.

2. Material and methods

2.1. Meteorological and climatic data

For the climatic characterisation of Ronda and Sierra de las Nieves, the historical series from Global Bioclimatics (1967-1989) were used (Rivas-Martínez & Rivas-Sáenz, 2009), as well as more recent climate data (2009-2019) obtained from the nearest meteorological stations with the most complete records. They are Pérez de Guzmán station, of the Spanish National Agency of Meteorology network (AEMet), and La Nava station, belonging to the Association of Storm Hunters and Meteorologists (ACAMET). Data from Ensemble-Observations database (E-OBS) (Cornes et al., 2018) were used for establishing the temperature and precipitation trends in the Iberian Peninsula.

2.2. Pollen sources

In 2017, the species of the parks and gardens of Ronda city were inventoried searching for possible pollen emission sources. Moreover, the flowering phenology of the most representative anemophilous species nearby the pollen sampling stations was studied too.

2.3. Aerobiological samplings

Pollen was captured by means of two Hirst-type volumetric samplers (Hirst, 1952). The air aspirated by the pollen traps was adjusted at a continuous flow of 10 l/min. Pollen samples were mounted and counted following the methodology proposed by the REA and the EAN procedures and recommendations. For that an optic microscope at 400X magnification was used (Galán et al., 2007, 2014).

Pollen types whose average annual relative abundance exceeded the 1% were considered as major pollen types. Minority pollen types only were studied separately when its relative abundance exceeded the 0.2% of the annual total.

The Main Pollen Season (MPS) was established as the 90% of the annual pollen integral, following the methodology by Nilsson and Persson (1981), with the exception of Urticaceae pollen type, whose MPS was established by adjusting a logistic curve and defining the start and end of the MPS as the dates when the 4th derivative of the logistic curve crossed the x-axis (Cunha et al., 2015; Ribeiro et al., 2007). Cupressaceae pollen season were separately studied for winter and autumn. *Fraxinus* pollen type was not studied by natural years but from 1st June to 31st May. A lineal interpolation was made when necessary in order to complete the few days with missing data before calculating the MPS.

2.4. Correlation analysis

Correlation analysis between atmospheric pollen concentrations and the main meteorological variables were carried out by means of Spearman correlation tests. The meteorological variables considered were: daily total rainfall (mm), daily mean relative humidity (%), maximum, minimum and mean daily temperature (°C), daily mean wind speed (km/h), daily frequencies of wind blowing from the 1st, 2nd, 3rd and 4th quadrants (%), as well as daily frequency of calms (%). The same analysis was carried out in the cases of *Alternaria* and *Oidium* fungal spores. P-values were adjusted according to Bonferroni correction.

2.5. Intradiurnal variation

Intradiurnal variations were studied for the five most abundant pollen types: *Castanea*, Cupressaceae, *Olea*, *Quercus* and Poaceae. Only the days whose pollen concentration was equal to or greater than the MPS daily average were taken. Bi-hourly pollen counts percentages of the daily total pollen were used in the graphs. The Intradiurnal Distribution Index (IDI) (Trigo et al., 1997) was also calculated for each pollen type and year (Equation 3.4). Comparisons among days and locations were made by means of Mann-Whitney-Wilcoxon tests, and *post-hoc* Bonferroni correction was applied when needed. Wards' cluster analysis were performed for each pollen type and location searching for different intradiurnal patterns. Only the cluster analysis whose cophenetic correlation coefficient exceeded 0.7 were considered for studying the possible origin of each cluster. For each one, hourly backward air trajectories were studied at 500 m AGL searching for possible pollen sources. Trajectories were calculated by using the Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory 4 (HYSPLIT4) (Rolph et al., 2017; Stein et al., 2015).

2.6. Pollen transport

For this study some data from Malaga city sampling station were analysed too, in order to carry out some backward air trajectories studies, as in the case of *Alnus* pollen. For that, all the days in which *Alnus* pollen concentrations were equal to or greater than 10 pollen grains/m³ were studied searching for their possible sources and the influence of the meteorological conditions during the transport. HYSPLIT4 model was used to study those backward air trajectories during the selected dates at three different heights (500, 750 and 1000 m AGL). The location of *Alnus* populations was estimated by using Global Biodiversity Information Facility database (GBIF) (GBIF, 2019). Meteorological conditions of the days with high *Alnus* pollen concentrations were compared to the average meteorological conditions in order to detect if there were special meteorological conditions that favoured pollen transport. Statistics comparisons were performed by means of Mann-Whitney-Wilcoxon tests applying Bonferroni *post-hoc* corrections (Picornell et al., 2020).

2.7. Forecast models

Three different methodologies were used in the elaboration of forecast models: stepwise multiple lineal regression, neural nets and random forest. Independent models were elaborated for the main pollen types, as well as for the *Alternaria* and *Oidium* spores. The different models were elaborated for each one of the locations.

Models were trained with the 80% of available data and the remaining 20% was used for external validation. Pollen and spore concentrations were transformed into categories (i.e., null, low, medium or high).

Predictor variables were: pollen/spore concentrations of the previous day (pollen grains/m³ or spores/m³), average concentrations of the 5 previous days (pollen grains/m³ or spores/m³), day of the year (numeric date from 1st January), daily total rainfall (mm), daily average relative humidity (%), daily maximum, minimum and mean temperature (°C), and daily mean wind speed (km/h). The functionality of the models during the external validation was calculated with the accuracy rate (Equation 3.5).

2.8. Spatial interpolation models: kriging

Spatial interpolation models were made in order to estimate pollen concentrations in the province of Malaga by using Malaga city pollen registers as input. For that, the historical database generated by all sampling stations in Malaga province was used to elaborate inter-station models. These models established relationships between the pollen concentrations detected in Malaga and the detected in other locations of the province. To consider the differences in phenology timing and intensity among stations, the models were built considering, separately, pre-peak and post-peak periods in two different lineal regressions (Figure 3.3). Once the models were made and externally validated, their parameters were spatially interpolated, by using cokriging techniques, to all Malaga province according to their relationship with the Compensated Thermicity Index (Itc) (Oteros et al., 2019a; Pebesma, 2004). This index is well known to have a relevant effect over flowering phenology and pollen forecast (Pesaresi et al., 2014; Rivas-Martínez et al., 1997; Valencia-Barrera et al., 2002). Therefore, by extracting the parameters of the models for certain location, a new inter-station model can be built for it and the pollen concentrations estimated by using Malaga city pollen concentrations as unique input. The spatial model was externally validated using data from Sierra de las Nieves station (Picornell et al., 2019b).

2.9. AeRobiology R package

AeRobiology R package is a computational tool elaborated in collaboration with José Oteros and Jesús Rojo. It is programmed in R language and integrates functions to automatize some methodologies commonly used in Aerobiology, such as to elaborate pollen calendars, calculate MPS by different methods, calculate annual pollen or spore integrals, calculate relative abundances, visualize graphics and trends, and interpolate missing data by different methods (Rojo et al., 2019).

The efficiency of each interpolation method integrated in the AeRobiology package (i.e., lineal interpolation, moving mean interpolation, spline regression interpolation, temporal series interpolation and interpolation by using nearby sampling locations) was tested with different pollen types and periods for gaps of 3, 5, 7 and 10 consecutive days. Accuracy was measured with relative errors (Equation 3.7). Mann-Whitney-Wilcoxon tests applying Bonferroni *post-hoc* correction were used in order to search for significant differences among methods and parameters.

3. Results and discussion

3.1. Climatic and meteorological analysis

A general temperature increase has been detected in the whole northern hemisphere since 2000 (Anders et al., 2014; Ziska et al., 2019). In the last three decades, the annual mean temperature has increased +1.2°C and +1.1°C in Ronda and Sierra de las Nieves respectively (figures 4.1 and 4.3). In Ronda, during this period, the continentality has changed from attenuated semi-continental to accused euoceanic while in Sierra de las Nieves it remained the same (attenuated euoceanic). The bioclimatic belts where are located both sampling stations remained the same, i.e. Ronda is located in the lower mesomediterranean bioclimatic belt and Sierra de las Nieves sampling location is in the limit between the upper mesomediterranean and lower supramediterranean belts. The annual total precipitation remained almost the same in Ronda but decreased in Sierra de

las Nieves. In both locations the precipitations are less frequent but more intense than 30 years ago, as it is the general trend in the Iberian Peninsula (De Luis et al., 2011). Some of the climatic differences in Sierra de las Nieves may be affected by the altitude differences (68 m) existing between both the historical and the current meteorological stations.

In Ronda, during the period 2017-2019, monthly temperatures were similar to the previous years, but minimum temperatures were generally higher than in the historic period considered (1973-1989) (Figure 4.2). In Sierra de las Nieves the thermal oscillation increased, i.e. generally higher maximum temperatures and lower minimum temperatures were obtained (Figure 4.4). Monthly total precipitation showed a high variability among years in both locations, but in all cases, they are mostly concentrated during winter and autumn. The annual total precipitation was higher in Sierra de las Nieves than in Ronda, what can be explained by the orography of the territory, because of the humid air masses coming from the sea that leave rainfalls in the mountains. Both locations have a droughtiness period during summer, but it is more intense in Ronda. The dominant winds in Ronda blow from the southeast and northeast while in Sierra de las Nieves they blow from the east and west due to the orography influence (Figure 4.5).

Regarding climatic trends in the rest of the Iberian Peninsula, temperatures have been increasing in general, but with less intensity during winter (Figure 4.6). This trend is more pronounced in the south, northeast and northwest part. On the other hand, precipitations, in general, show a tendency to increase during winter in the north and centre of the Iberian Peninsula but to decrease in the north during summer and autumn. Such trends have also been detected in other European areas (Anders et al., 2014; Ziska et al., 2019). Flowering phenology of vegetal species is affected by climate change. Temperatures prior to the flowering season strongly influence the flowering onset (Garcia et al., 2014; Menzel et al., 2006; Picornell et al., 2019a; Rosemartin et al., 2014). Therefore, it is expected an earlier start date in several European species (Bogawski et al., 2014; Huynen et al., 2003; Recio et al., 2018; Tormo-Molina et al., 2010). Changes in precipitation are also affecting the flowering timing of herbaceous and arid species (Aira et al., 2016; Peñuelas et al., 2004). Despite the trends detected, the effect that these changes will have over vegetation is uncertain. There are a high number of variables that affect the development and distribution of vegetation in different ways, and which interact among them. Furthermore, there are other non-climatic variables that can affect plants (e.g. exotic invasive species, fires or CO₂ increase in the atmosphere) and whose effects are sometimes even uncertain. In this scenario, it is difficult to predict the final effect that climate change will have over certain species, but in the worst case scenario it might destroy their habitats and leads some species to extinction if they are not able to adapt to the new environmental conditions (Dullinger et al., 2012; Elsen & Tingley, 2015). Given the temperature increase observed in Sierra de las Nieves, some high mountain species such as *Abies pinsapo* or *Quercus faginea* subsp. *alpestris* are more vulnerable to climate change and, consequently, it would be necessary to study their adaptation capacities in order to issue effective conservation strategies.

3.2. Analysis of the park and garden inventories made in Ronda

The largest green areas that can be found in Ronda are the Alameda del Tajo and the San Rafael park. Urbanización Norte is also an extensive green area, but

it is mostly integrated by disperse trees. Inventories were focused in arboreal and bush species, but in the sampling sites, seasonal weeds and grasses with anemophilous pollination are very common (e.g. Amaranthaceae, Asteraceae, Euphorbiaceae, Plantaginaceae, Poaceae and Urticaceae species). Some of them are nitrophilous plants, being more abundant in the northern part of the city where industrial areas and waste grounds are predominant. Apart from the inventoried areas there are also many ornamental cypresses, cedars and *Abies pinsapo* cultivated as ornamental trees.

The garden of Pérez de Guzmán high school, where the Ronda trap is located, showed a great diversity of trees and bushes. Due to its didactical purpose, there are many native species to the area, as well as ornamental plants. Most of them have anemophilous pollination strategies.

Cypresses, holm oaks, palms, ash trees, olives, poplars, cedars and pinsapo trees are very common in Ronda as ornamental trees. All of them have anemophilous strategies of pollination. In the garden and parks of Ronda there is a miscellanea of alien and native species that notably influence the pollen content in the atmosphere. Because of being a city situated in a rural environment, olive crops and cereal fields can also affect the pollen concentrations detected.

3.3. Analysis of the *in situ* phenological study

In a general extend, the flowering phenology of the studied species matched the periods cited in the bibliography (Blanca et al., 2011; Hidalgo et al., 2003; Pérez-Latorre y Cabezudo, 2012; Pérez Latorre et al., 1996).

In most cases, as we go up in height, a delay in the onset of flowering phenophase is detected in many species, such as *Castanea sativa* Mill., *Olea europaea* L., *Populus alba* L., *Quercus faginea* subsp. *faginea* Lam., *Quercus rotundifolia* and *Quercus suber* L. (Table 4.1). Bioclimatic belts are established in function of the Compensated Thermicity Index, which is also determined by annual temperatures (Rivas-Martínez et al., 1997). Therefore, an upper bioclimatic belt implies lower annual temperatures, what is normally associated with a delay in the flowering onset (Chuine, 2000; Chuine & Cour, 1999; Linkosalo et al., 2010; Picornell et al., 2019a; Rojo & Pérez-Badia, 2014; Wang et al., 2014; Wielgolaski, 1999), as observed in the mentioned taxa. In other cases, such as in *Abies pinsapo* and *Populus nigra* L., there was not an appreciable delay. This may be explained by other factors that affect the flowering onset, for example, genetic factors, water availability, photoperiod length or sun exposure (Picornell et al., 2019a; Rojo & Pérez-Badia, 2014; Wang et al., 2014). Other authors pointed to a possible adaptation of the thermal requirements in populations situated at different heights, what would allow a synchronous flowering season (Chuine & Cour, 1999; Wang et al., 2014).

Ornamental species that flower in winter or autumn, such as *Casuarina cunninghamiana* Miq., *Cupressus arizonica* Greene and *Cupressus sempervirens* L., presented an opposite behaviour: flowering starts earlier in the upper bioclimatic belts. Probably the flowering onset of these species may be strongly determined by other factors apart from temperatures, such as water availability, which is more abundant in early dates in these bioclimatic belts (Wang et al., 2014).

The duration of flowering phenophase is also tightly related to the accumulated temperature since its beginning, given that high temperatures induce dryness and

dehiscence of the flowers (Linkosalo & Lechowicz, 2006; Picornell et al., 2019a; Sarvas, 1972). Previous studies suggested that high temperatures reduce flowering duration (Sherry et al., 2011), as it was also observed in *Pinus halepensis* and *Pinus pinea* L. in warmer bioclimatic belts. In other species such as *Olea europaea*, *Quercus rotundifolia* and *Quercus suber*, the opposite effect was apparently observed, i.e. flowering is longer in warmer bioclimatic belts. However, the flowering start showed a notably delay in colder bioclimatic belts. This may be explained because later flowering phenophases are closer to summer and suffer higher temperatures. These temperatures would be responsible of the premature dryness and dehiscence of flowers in higher bioclimatic belts. Despite the strong influence that temperature have over flowering phenology, the influence of genetics is not despicable (Wilczek et al., 2010).

In the case of *Pinus pinea* there were not differences between the flowering onset phenology observed in the thermomediterranean and mesomediterranean belts. This can be explained by the adaptation of the thermal requirements of the populations situated at higher altitudes mentioned before. However, there were huge differences between the above-mentioned belts and the upper mesomediterranean/lower supramediterranean. In the last, the flowering period even exceeded the flowering limits found in the literature (Blanca et al., 2011; Recio, 2012; Valdivieso et al., 2017). This species is not naturally distributed in the supramediterranean belt and the individuals found there were grown as ornamental trees. Therefore, these populations are not adapted to the thermal conditions in this bioclimatic belt and they still have the thermal requirements of lower heights. Such requirements are reached much later, which results in a later flowering start.

3.4. Analysis of the pollen content in the atmosphere of the sampling sites

3.4.1. Diversity, abundance and pollen calendars

A total of 40 different pollen types were identified in Ronda and 37 in Sierra de las Nieves. A great part of the annual pollen integral is detected during the period February-June in Ronda, and in May and June in Sierra de las Nieves (tables 4.2-4.6). These differences can be explained by the most abundant pollen types present in the air of the different localities. In Ronda, Cupressaceae, *Olea* and *Quercus* pollen types represented more than 77% of the total annual pollen integral while, in Sierra de las Nieves, *Castanea*, Cupressaceae, *Quercus* and *Olea* reached together more than 87%.

Even though in both localities the 8 major pollen types were the same (Cupressaceae, *Quercus*, *Olea*, *Castanea*, Urticaceae, Poaceae, *Plantago* and *Pinus*), the order of abundance was different (Figure 4.8). The land use, the distribution and abundance of the natural vegetation, as well as the presence of ornamental species are the main factors influencing the relative abundance of the major pollen types.

In Ronda, 34 pollen types exceeded a 10-day mean minimum of 1 pollen grain/m³ and, consequently, they were represented in the pollen calendar (Figure 4.9). In Sierra de las Nieves only 27 pollen types were represented, following the same criteria (Figure 4.10). In both locations spring was the period with the highest pollen diversity (28 pollen types in Ronda and 23 in Sierra de las Nieves), followed by winter, summer and autumn. In both stations pollen curves showed long seasonal behaviour, being some pollen types present during the major part of the

year (e.g. Cupressaceae, Urticaceae, *Quercus*, *Olea* and Amaranthaceae). These pollen types are integrated by taxa or cultivars with different flowering seasons or populations that grow at different heights, with overlapping flowering periods.

The *Quercus* pollen season is longer than in other locations of Malaga province and Andalusia, with the exception of Antequera (Docampo et al., 2007; Martínez-Bracero et al., 2015; Recio et al., 1998a, 2006; Trigo et al., 2007). Ronda, Sierra de las Nieves and Antequera are located near *Quercus* formations what can explain the longer pollen detection. Other pollen types whose species are more equally distributed in all locations, such as Urticaceae or Amaranthaceae, did not show such differences in their seasonality. The longer pollen season detected in Cupressaceae could be also influenced by the high abundance of ornamental and natural species in the study area with different flowering periods.

On the other hand, pollen types such as *Castanea*, *Cannabis* or Myrtaceae presented a narrow pollen curve despite being more abundant when compared to other locations (Docampo et al., 2007; Martínez-Bracero et al., 2015; Recio et al., 1998a, 2006; Trigo et al., 2007). This is due to the species belonging to these pollen types have a short but intense flowering period.

3.4.2. Major pollen types

3.4.2.1. Cupressaceae

Cupressaceae pollen was detected in the atmosphere of the study area throughout the year, but mainly from October to April (figures 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 and 4.13, tables 4.2-4.6). There were two pollen periods within the year, therefore, they were studied separately as “winter Cupressaceae” and “autumn Cupressaceae”.

In Ronda, the major amount of Cupressaceae pollen was detected in February and March. The autumn pollination period was less intense than the spring one despite to be longer in time (Table 4.7). Winter Cupressaceae period had a more constant behaviour among years. In Sierra de las Nieves, the seasonality of this pollen type was similar to Ronda, but there were not so great differences between autumn and winter pollination periods (Figure 4.13).

Generally, Cupressaceae pollen concentrations were much lower in Sierra de las Nieves than in Ronda during winter but higher during autumn. In winter, the main pollen sources of this pollen type are ornamental species such as *Cupressus sempervirens* and *Cupressus arizonica*, which are much more abundant in Ronda than in Sierra de las Nieves. On the contrary, in autumn the main pollen emission sources are naturally distributed species, such as *Juniperus oxycedrus* L. subsp. *oxycedrus* and *Juniperus phoenicea*, which are more abundant in Sierra de las Nieves. The observed difference in the temporality of the MPS between both localities were probably due to the local pollen sources, meteorology and wind dynamics. Nevertheless, the start and end dates of the MPS were similar to other Spanish localities (Belmonte et al., 1999b; Díaz de la Guardia et al., 2006; Galfin et al., 1998; Hidalgo et al., 2003; Sabariego et al., 2012; Tormo-Molina et al., 2011). The oscillations observed in the annual pollen integral are a natural characteristic of the taxa, but they might be also influenced by rainfall and temperatures during autumn (Díaz de la Guardia et al., 2006; Galfin et al., 1998). This pollen type was over-represented in Ronda due to nearby ornamental trees, being the location with the highest annual pollen integral of Spain, according to the literature. The annual

pollen integral in Sierra de las Nieves was similar to those of nearby locations (Aira et al., 2016; Belmonte et al., 1999b).

3.4.2.2. *Quercus*

This pollen type was mainly detected during spring in the study area (figures 4.9, 4.10, 4.14, 4.15 and 4.16, tables 4.2-4.6). In Ronda the highest values were registered in April and May, while in Sierra de las Nieves they occurred in May-July (Figure 4.16). *Quercus* pollen was over-represented in Sierra de las Nieves due to the vegetation surrounding the pollen trap. The MPS of *Quercus* also matched the flowering phenology timing of the surrounding *Quercus* populations. In 2018 there was a delay in the beginning of the MPS in both locations due to the lower temperatures registered during the period prior to the flowering season, when compared with previous years (García-Mozo et al., 2006a; Recio et al., 2018). The MPS showed similar dates to other locations of southern Spain, but in Sierra de las Nieves the annual pollen integral was the highest detected in Spain (Aira et al., 2016; García-Mozo et al., 1999; Oteros et al., 2017; Recio et al., 2018).

3.4.2.3. *Olea*

Olea pollen was mainly detected during April, May and June in both locations (figures 4.9, 4.10, 4.17, 4.18 and 4.19, tables 4.2-4.6). In Ronda, this pollen type reached higher concentrations, its annual pollen integral being more than double than in Sierra de las Nieves (Figure 4.19 and Table 4.9). This was due to the strong influence that the extensive crops located near Ronda city had over the pollen detected there. Since most pollen concentration peaks were coincident in both locations, we consider the pollen source of *Olea* in Sierra de las Nieves may be the same. The different peaks detected within the same year may correspond to the flowering seasons of crops situated at different bioclimatic belts and with different *Olea* cultivars (García-Mozo et al., 2009b). The beginning of the MPS in 2018 in both locations was delayed due to low temperatures registered during the first half of the year. The start and end dates of the MPS were generally similar to other nearby locations of the Iberian Peninsula but slightly earlier than in some locations situated further north (Díaz de la Guardia et al., 1999a; Galán et al., 2001b; Ruiz-Valenzuela & Aguilera, 2018).

The annual pollen integral of Ronda was similar to Malaga city. However, other locations inland Andalusia have higher integrals due to the extensive surface covered by *Olea* crops. Sierra de las Nieves had lower annual pollen integrals, but they were similar to the registered in some exceptional years in Malaga city (Aira et al., 2016; Díaz de la Guardia et al., 1999a).

3.4.2.4. *Castanea*

Castanea pollen was detected only in June and July in the both localities studied (figures 4.9, 4.10, 4.20, 4.21 and 4.22, tables 4.2-4.6). This pollen type suddenly appeared in the atmosphere of both sampling sites, its pollination period being short and intense. This was also observed in the nearby locality of Estepona (Iglesias et al., 1999), what points to a common and near origin of the pollen detected: the Genal valley. Sierra de las Nieves is closer to this valley than other localities studied, what can explain the higher pollen concentration detected. In 2018, a delay in the onset of the MPS was also detected due to the low temperatures registered.

Although the annual pollen integral was much higher, the MPS duration, as well as the start and end dates in the both locations studied were similar to other Spanish localities (Astray et al., 2016; Iglesias et al., 1999; Rodríguez-Rajo et al., 2005b)

3.4.2.5. Urticaceae

Urticaceae pollen was detected during the whole year in both sampling sites, but with more intensity during February-June (figures 4.9, 4.10, 4.23, 4.24 and 4.25, tables 4.2-4.6). The long duration of its MPS was produced due to the overlapping flowering of the different species within the family, as well as by some species that intermittently flower throughout the year (Belmonte et al., 1999a; Blanca et al., 2011; Trigo et al., 1996). The MPS in both locations were similar to those of nearby localities (Belmonte et al., 1999a; Trigo et al., 1996), but there was a delay in 2018 due to the low temperatures registered. The annual pollen integrals of Ronda were similar to the integrals registered in other nearby cities while they were lower in Sierra de las Nieves (Aira et al., 2016; Belmonte et al., 1999a; De Linares et al., 2019; Ruiz-Valenzuela & Aguilera, 2018; Trigo et al., 1996). Most species of Urticaceae are nitrophilous and/or ruderal weeds and, therefore, they are more abundant in locations with higher anthropic pressure, such as Ronda, than in natural environment, such as Sierra de las Nieves (Blanca et al., 2011; Trigo et al., 1996). The pollen integral was also influenced by temperatures as well as precipitations registered during spring (Aira et al., 2016; Galán et al., 2000; Recio et al., 2009; Trigo et al., 1996).

3.4.2.6. Poaceae

Poaceae pollen was detected in Ronda and Sierra de las Nieves mainly in May and June (figures 4.9, 4.10, 4.26, 4.27 and 4.28, tables 4.2-4.6). Outside the MPS pollen was usually found in very low concentrations. In this pollen type a delay in the MPS of 2018 was also observed. Spring temperatures and precipitations determined the intensity and temporality of its MPS (El-Moslimany, 2019; Fernández-González et al., 1999; García-Mozo, 2017; García-Mozo et al., 2010b; Recio et al., 2010). At the end of the MPS, pollen concentrations were higher in Sierra de las Nieves, which may be explained by the late flowering of high mountain species. Annual pollen integrals and the MPS temporality were similar in both localities, and also similar to the integrals of other localities in southern Spain (Aira et al., 2016; Fernández-González et al., 1999; Jato et al., 2009; Recio et al., 2010).

3.4.2.7. *Plantago*

Plantago pollen was mainly detected in Ronda and Sierra de las Nieves from April to June, but May was the month with the highest pollen concentrations records (figures 4.9, 4.10, 4.29, 4.30 and 4.31, tables 4.2-4.6). The MPS temporality greatly oscillated among the different years, despite the fact that the annual pollen integral was similar. Both variables are highly influenced by temperatures and precipitations (González-Parrado et al., 2014; Recio et al., 1997). A delay in the onset of the MPS in 2018 was also appreciable in this pollen type. MPS temporality was similar to other nearby localities but it occurred earlier than in northern stations of the Iberian Peninsula, which may be explained by thermal differences (Gutiérrez et al., 1999; Iglesias-Otero et al., 2015; Recio et al., 1997, 2006; Ruiz-Valenzuela & Aguilera, 2018). Ronda had a higher annual pollen integral than Sierra de las Nieves. Many *Plantago* species are nitrophilous and,

therefore, they are more abundant in the nearby places to Ronda city (Blanca et al., 2011; Fuentes Antón et al., 2020; González-Parrado et al., 2014; Recio et al., 1997). For this same reason, the annual pollen integral in both localities were lower than in Malaga. Nevertheless, similar integrals to both stations were eventually detected in other cities of Spain (Aira et al., 2016; Fuentes Antón et al., 2020; Gutiérrez et al., 1999; Maya-Manzano et al., 2017; Recio et al., 1997; Ruiz-Valenzuela & Aguilera, 2018).

3.4.2.8. *Pinus*

Pinus pollen was detected from February to June in both sampling stations (figures 4.9, 4.10, 4.32, 4.33 and 4.34, tables 4.2-4.6). Different concentration peaks were registered along the year due to the flowering of the different species and populations that grow in different bioclimatic belts. The coincidence of some of such peaks pointed to a common origin of the pollen detected (Figure 4.34). Interannual variations in the temporality of the MPS were greater than in other pollen types. Again, a delay in the onset of the MPS in 2018 was detected in both locations. MPS temporality and length in both sites were similar to those recorded in other Spanish localities (Velasco-Jiménez et al., 2018). Ronda registered a higher mean annual pollen integral than Sierra de las Nieves due to ornamental trees located in the nearby area of the pollen trap. It is possible that *Abies pinsapo* forests located in Sierra de las Nieves produced low amount of pollen due to their advanced age, but this hypothesis must be proved in a future research. The annual pollen integral showed great variations among the different years studied, what seems to be an effect of the alternation in flowering intensity between consecutive years, detected in some species of Pinaceae (Arista & Talavera, 1994, 1995; Pérez-Latorre & Cabezudo, 2012). Similar annual integrals were documented in other locations of southern Spain (Velasco-Jiménez et al., 2018).

3.4.2.9. Correlation analysis between pollen concentrations and meteorological variables

In general, as previously reported by other authors, the results obtained unveil that precipitation and relative humidity had a negative effect in the atmospheric pollen, decreasing the concentrations. Precipitation causes an atmospheric washing effect while a high relative humidity diminish the buoyancy of the pollen grains (Figure 4.35, tables 4.15 and 4.16) (Docampo et al., 2007; Recio et al., 2018; Rojo et al., 2015). Temperatures generally had a positive correlation in the pre-peak period and negative in the post-peak. High temperatures favoured the anther dehiscence and pollen release when flowers were formed, but they induced premature senescence of the flowers once they are opened (Figure 4.36) (Clot, 2001; Galán et al., 2001a; Picornell et al., 2019a; Recio et al., 2000, 2018; Rojo et al., 2015; Subba Reddi & Reddi, 2009).

Correlations between pollen concentrations and wind direction or speed were different for the different pollen types (tables 4.15 and 4.16). Such differences were related to the orography of the territory, land use and the location of the pollen sources.

3.4.3. Minority pollen types

Regarding most minority pollen types, there were some important differences between Ronda and Sierra de las Nieves (e.g. Amaranthaceae, *Casuarina*,

Fraxinus, Myrtaceae, *Pistacia*, *Platanus*, *Populus* and *Urtica membranacea*) (figures 4.37 and 4.37, Table 4.17). In most of them a delay of the onset of the MPS was detected in 2018 due to the low temperatures registered during the first half of the year. The detected differences between both sampling sites can be explained by differences in the land use and vegetal coverage of their nearby areas. Nitrophilous or subnitrophilous taxa such as *Amaranthaceae*, *Rumex* and *Urtica membranacea* are more abundant in Ronda due to the higher anthropic pressure. Other pollen types with some species used as ornamental in Ronda, such as *Casuarina*, Myrtaceae, *Fraxinus*, *Platanus* and *Populus*, had higher pollen concentrations in this location than in Sierra de las Nieves (Table 4.17, figures 4.37 y 4.38).

3.4.3.1. Pollen transport: the case of *Alnus*

Alnus pollen is not an abundant pollen type in the atmosphere of Malaga province. Its annual pollen integrals widely changed from one year to another and its daily pollen concentrations oscillated between consecutive days too. This pollen type was detected in the sampling stations mainly during January, February and March (Figure 4.39, Appendix A), generally in lower concentration values in Malaga city than in the rest of the province. On the other hand, *Alnus* populations are very scarce in Malaga province, therefore, it could be expected that the pollen detected be product, at least in part, of a medium- or long- range transport.

Meteorological conditions favoured for pollen transport when the highest concentrations were detected (Figure 4.41, Table 4.19). In these days the air masses passed in most cases above *Alnus* populations situated in the north of Andalusia (160-200 km away), while in some other cases they passed above populations located in the southwest (50-100 km away) or in the east (130-160 km away) (figures 4.40 and 4.42).

The low concentrations detected, their high temporal variability, the lack of local pollen sources, the backward air trajectories studied and the meteorological conditions in the days when the highest *Alnus* pollen concentrations were detected supported the medium- and long-transport hypothesis to explain the pollen detection. *Alnus* pollen detected in the area mainly would come from the north of Andalusia but could have some contributions from other distant populations located in the southwest and the east as well as from further northern populations. The pollen concentrations detected are not expected to induce allergic symptoms in sensitive population, but this pollen type has a cross reactivity with other pollen types whose relevance should be studied in detail (Emberlin et al., 2007; Gehrig et al., 2015; Hauser et al., 2011; Kasprzyk & Borycka, 2019; Skjøth et al., 2015; Smith et al., 2007). The long-term transport detected might indicate a reproductive connectivity among distant populations in the south of the Iberian Peninsula, what would be very useful for their conservation and management (Picornell et al., 2020).

3.4.4. Intradiurnal variations

There were not detected significant differences among the intradiurnal patterns of the different years of study for the studied pollen types (p -values > 0.05). *Castanea* and autumn Cupressaceae had more heterogeneous intradiurnal patterns than *Olea*, *Poaceae* and *Quercus* (figures 4.43 and 4.44). They even had

bi-hourly pollen concentrations which exceeded the 20% of the daily total pollen at midday and in the afternoon.

The greatest differences between Ronda and Sierra de las Nieves were detected in the case of *Castanea*, winter Cupressaceae and *Quercus* pollen types (Figure 4.45, Table 4.20).

Pollen emission sources of winter Cupressaceae are mainly ornamental species (e.g., *Cupressus sempervirens* and *Cupressus arizonica*), which are more abundant in Ronda than in Sierra de las Nieves. The delay in the intradiurnal peak observed in Sierra de las Nieves when compared to Ronda may be explained by the distance that the pollen grains must travel from such emission sources to the sampling site in the Sierra de las Nieves. Furthermore, some naturally distributed *Juniperus* species, whose flowering period can extend to the first months of the year, might slightly influence the intradiurnal pattern detected. On the contrary, in autumn Cupressaceae the pollen emission sources are local in both locations: natural vegetation in Sierra de las Nieves and ornamental species in Ronda). Despite being different species, the closeness of both pollen sources to their respective pollen traps resulted in a similar intradiurnal pattern without any delay in the intradiurnal peak since no pollen transport was involved. In Ronda there are more species that contribute to the pollen detected in autumn due to ornamental species, what can explain the lower IDI detected in this location when compared to Sierra de las Nieves.

Quercus intradiurnal pattern was strongly influenced by the holm oak forest where the pollen trap of Sierra de las Nieves is installed. Therefore, the impact of additional pollen emission sources is minimal, and this circumstance makes the differences with the intradiurnal pattern detected in Ronda.

Olea intradiurnal patterns were similar in both locations. This can be explained by the presence of a common pollen source (olive crops) situated at almost the same distance from both pollen traps.

As mentioned above, pollen types corresponding to several species generally present a more evenly distributed intradiurnal pattern (Trigo et al., 1997), and this was observed in Poaceae pollen type. Despite that, there were significant differences in the IDI of both stations, probably due to the more abundant cereal crops in nearby areas to Ronda city and the different composition in species of the grassland located in Sierra de las Nieves.

In the case of *Castanea*, intradiurnal patterns obtained a high Intradiurnal Distribution Index (IDI), which was even higher in Sierra de las Nieves (Table 4.20). The daily peak in this last locality was obtained earlier when compared to Ronda, what indicates that the pollen emission source was closer to Sierra de las Nieves, arriving first to this sampling station. The IDI was similar to other Spanish localities with local emission sources but higher than in other localities with further far sources (Jato et al., 2001; Ribeiro & Abreu, 2014). When performing the cluster analysis, this pollen type in Sierra de las Nieves was the unique whose cophenetic correlation coefficient exceeded 0.7 and, therefore, a detailed analysis of the two groups obtained was performed (Table 4.21). One of the groups had a similar pattern to Ronda while the other group had a marked peak at the end of the day (Figure 4.48). Backward air trajectories during these days showed that the first group had an homogeneous intradiurnal pattern because the airmasses that

passed over the main *Castanea* crops arrived at the pollen trap location at different hours within the day, while in the second group they only arrived at certain hours during the night, causing a peak in the intradiurnal pattern (figures 4.49 and 4.50).

3.5. Analysis of *Alternaria* and *Oidium* fungal spores

Alternaria spores were detected in Ronda and Sierra de las Nieves during the whole year (Figure 4.51), but with a higher abundance from May to July and in September-October. These months have mild temperatures and abundant rainfall, which are the optimal conditions for *Alternaria* species growing (Aira et al., 2013; Grinn-Gofroń & Rapiejko, 2009; Recio et al., 2012). In general, *Alternaria* concentrations were higher in Ronda than in Sierra de las Nieves (figures 4.52, 4.53 and 4.54).

Oidium spores had a more restricted seasonality despite being found during almost the whole year. A great part of the annual spore integral was recorded during May, June and July in both localities, but especially in Sierra de las Nieves (Figure 4.51). This spore type was also more abundant in Ronda than in Sierra de las Nieves (figures 4.55, 4.56 and 4.57).

Interannual variations in spore concentrations as well as in annual spore integral were observed in both locations and spore types. Such variations probably depend on the distribution of temperatures and precipitations (Figure 4.58) (Cortiñas Rodríguez et al., 2020; Fernández-González et al., 2013; Legler et al., 2012). The annual spore integrals of both pollen types were higher in Ronda than in Sierra de las Nieves. Daily spore concentrations were also significantly higher in Ronda despite there were strong correlations between them. This may be explained because both locations had different temperatures and precipitations, but their variations are almost synchronous.

Correlations between weekly and daily meteorological variables and spore concentrations had similar results to the obtained with pollen: negative significant correlations with precipitation and relative humidity due to their washing effect, and positive correlations with temperatures since they induce spore formation and release (Aira et al., 2013; Fernández-González et al., 2016; Recio et al., 2012). The positive correlations obtained with the wind in calm pointed to a local spore source. When using meteorological data from previous days or weeks, less significant correlations and lower correlation coefficients were obtained.

3.6. Analysis of the forecast models

In general, random forest models obtained higher accuracy rates than the other models (Figure 4.59). These rates were significantly different to the stepwise multiple lineal regression models. In the case of neural net models, the accuracy rates were very variable depending on the pollen type and the location. They were normally higher in Ronda than in Sierra de las Nieves.

The variables with the highest weights in the models obtained were pollen/spore concentration of the previous day, pollen/spore concentrations running media of the previous 5 days, daily mean temperature, daily total precipitation, daily mean relative humidity and daily mean wind speed. As observed in the correlations, these meteorological variables are the most related to pollen/spore concentrations.

Random forest models obtained the highest accuracy rates for most pollen types while neural net models were the most accurate for *Olea* in both studied

locations and for *Quercus* in Ronda. Stepwise multiple lineal regressions were for *Platanus* in Sierra de las Nieves and for Urticaceae in both locations.

For the spore types, the most accurate models were very variable: random forest for *Oidium* in both locations, stepwise multiple lineal regressions for *Alternaria* in Ronda and neural net models in Sierra de las Nieves for this same spore type.

The best accuracy rates obtained, in general, taking into account all the pollen and spore types were higher than 70% (Figure 4.60).

The models obtained require the use of meteorological variables predictions. Therefore, when forecasting, the errors of both forecast models will be accumulated. Currently, autoregressive models based on the analysis of temporal series of data are frequently used. These models extract the seasonality from long temporal series of data in order to elaborate forecasts, so they are less dependent of other meteorological variables. Nevertheless, given the few years of data available in both locations, to elaborate such models was not possible for the study area. Moreover, more data are necessary for elaborating forecast models to predict the start, peak and end of the MPS.

In principle, the forecast models obtained are able to predict pollen/spore concentrations of the following day since they use pollen/spore data of the previous ones. However, it is possible to use the forecast obtained for a certain day as input for the following one, but with the consequent increase in the error of that forecast. Although the temporal limitations of the models could constitute a handicap for the traditional pollen/spore sampling methods, experimental automatic pollen traps are increasing their presence in Europe (Oteros et al., 2019b; Rojo et al., 2019), and they provide daily pollen/spore information. Therefore, the forecast models presented here could increase their utility when combined with automatic or daily pollen samplings. It is also expected to increase the temporal resolution of the models proposed when more years of sampling be available.

Respiratory allergies are the most extended breathing diseases in the world, and they have an important impact on the economy (Akdis et al., 2015; Picornell et al., 2019b; Ranzi et al., 2003; Sánchez Mesa et al., 2005). Some of the pollen types here modelled have a high allergenic potential or are frequently detected in high concentrations, which can trigger allergic symptoms. Therefore, the forecast models may be relevant in order to inform sensible populations and, therefore, to avoid unnecessary pollen exposure.

Alternaria and *Oidium* are some of the most cosmopolitan plant pathogens and, in some cases, they can induce respiratory diseases in human beings too. Consequently, the models obtained for such spore types, together with a continuous surveillance, are also useful in order to decide when applying anti-fungal treatments in crops, minimizing the cost of these phytosanitary products and their impact on the environment.

3.7. Spatial interpolation models

Inter-locality models carried out, try to estimate the pollen concentrations in the historically sampled locations of the province of Malaga using Malaga city pollen concentrations as unique input. In the external validation, the average accuracy rate was higher than 70% in all sampled localities in Malaga province. Coastal

localities obtained higher rates due to their environmental conditions are similar to those of Malaga city (Figure 4.61A). The accuracy rates obtained for the different pollen type ranged between 57 and 88%, the obtained for Urticaceae being the lowest value and for *Platanus* the highest. The abundance of nitrophilous taxa such as Urticaceae species is very heterogeneous in Malaga province, what makes it difficult to get a good model without considering land use and local vegetation. Ornamental species such as Cupressaceae also influenced the pollen concentrations detected and, therefore, are also difficult to model. However, other pollen types whose abundance is less heterogeneous in Malaga province obtained higher accuracy rates, such as *Olea*, *Pinus*, *Plantago*, *Platanus*, Poaceae and *Quercus*.

The external validation of the spatial interpolation showed that accuracy rates were generally higher than the 60% (Figure 4.65). The lower accuracy rates were obtained for pollen types whose abundance is deeply conditioned by local pollen sources which are not homogeneously distributed in the province of Malaga, as commented above. Therefore, a possible improvement for the proposed models would be to include the land coverage in nearby areas of the target locations as well as the vegetation distribution as complementary variables. Further improvements would include also meteorological variables into the models. Anywise, the models obtained constitute a first approach that can estimate pollen concentrations in locations where no pollen monitor exist anymore (Picornell et al., 2019b).

3.8. AeRobiology R package

The AeRobiology package was published in the official public repository of R in December 2018 after a review by the official technical team of R software. It is protected under the General Public License 3, which grants its free use and distribution but restricts modifications by third party. A public tutorial was published to facilitate its use (<http://rpubs.com/Picornell/AeRobiology>), and the structure and functionalities of the package were published in *Methods in Ecology and Evolution* scientific journal (Rojo et al., 2019).

In its current version (2.0.1) it includes 15 functions (Table 4.27). Most of them are intended for graphical representation of results (e.g., pollen curves of certain years or pollen types, hourly data, annual trends...) being some of them interactive in real time. Other functions are intended to calculate trends, MPS and pollen calendars calculations, or to complete missing data through different interpolation methods. These computational tools were elaborated to facilitate aerobiological researchers their most common and time-consuming tasks. So, it allows that most of the human effort be dedicated to the interpretation and discussion of results.

3.8.1 Accuracy rates of the interpolation methods

The most accurate interpolation methods were the lineal interpolation and the interpolation based on regressions with nearby station. Lineal interpolation does not require parametrization or previous adjustments. Despite the adjustment of a lineal equation to the pollen curve is less precise than other methods such as spline regressions or temporal series in some cases, it is enough accurate and versatile to have a better performance as average. The errors obtained by using regressions with nearby stations are strongly related to the nearby station considered. For example, for Ronda one of the best performances of interpolation was obtained by

using Sierra de las Nieves, while one of the worst was the one that used Malaga. For all these reasons, more accurate interpolations are expected with mathematical models such as lineal interpolation unless that concrete circumstances advise for the use of other methods.

The method based on spline regressions were sometimes over-adjusted to the trend of the previous or following days of the gap, which leded either very low or very high error rates.

In general, gaps longer than a week are difficult to interpolate because the trend in which some mathematical interpolation methods are based could not be representative of the whole missing period. As expected, gaps next to the maximum pollen concentrations are the most difficult to predict, followed by gaps in the pre-peak and post-peak periods. Besides this, pollen types whose concentrations in the atmosphere have great oscillations among consecutive days are the most difficult to interpolate.

In the future, new methods could be developed, such as combining temporal series with adjustments through neural net or regression trees or including the effect of meteorological variables.

4. Conclusions

1. The annual mean temperature in Ronda and Sierra de las Nieves has increased 1.2°C and 1.1°C respectively in the last 30 years. In Ronda, the temperatures in the first months of the year have reduced while in the rest of the year they have increased. This has modified the continentality type of Ronda, from attenuated semi-continental to accused euoceanic. However, in Sierra de las Nieves the continentality type remained the same, in spite of the fact that changes in maximum and minimum monthly temperatures have been more pronounced in Sierra de las Nieves than in Ronda. Regarding annual total precipitation, this parameter slightly increased in Ronda while it notably decreased in Sierra de las Nieves in the last three decades. Moreover, the trend in both locations for the precipitations is to be more intense and less frequent.

2. Temperature and precipitation variations in the months prior to the flowering seasons affected the temporality and intensity of the pollen types detected in the studied localities. In general, when pre-seasonal high temperatures were detected the flowering onset occurred earlier than habitual, while low temperatures delayed it. Additionally, the combination of pre-seasonal precipitations and high temperatures tended to increase the pollen amount produced by herbaceous taxa (e.g. Urticaceae, *Plantago*, Poaceae, Amaranthaceae and *Rumex*). This was also observed in some arboreal taxa such as *Fraxinus*.

3. The differences found between Ronda and Sierra de las Nieves regarding pollen calendars as well as their annual integrals and seasonal behaviour can be explained by differences in the floristic composition of both localities due to the different land use, the influence of crops, nitrophilous species and ornamental taxa (more abundant in Ronda) as well as by the different flowering phenology of the species and climatic characteristics in both localities.

4. The total annual pollen integrals for Ronda and Sierra de las Nieves were 67 184 and 63 109 pollen*day/m³, respectively as average. 40 different pollen types were identified in Ronda while they were 37 in Sierra de las Nieves. Almost 90% of the

total annual pollen integral, as average, was detected from February to June, both inclusive, in Ronda. In Sierra de las Nieves almost 80% was detected in May and June. The 8 more abundant pollen types in both localities were the same: *Castanea*, Cupressaceae, *Olea*, *Pinus*, *Plantago*, Poaceae, *Quercus* and Urticaceae, in alphabetical order. However Cupressaceae, *Olea* and Urticaceae were over-represented in Ronda, while *Quercus* and *Castanea* were in Sierra de las Nieves due to the aforementioned circumstances, where *Quercus* reached the highest values ever registered in the Iberian Peninsula (41 546 pollen*day/m³; 65.34% of the total annual pollen integral, as average).

5. The *Alnus* pollen detection is the result of a long- or medium-distance transport. *Alnus* pollen has an heterogeneous origin: it mainly comes from populations situated further north of the study area (more than 160 km away), but with some punctual contributions from populations located in the east (Sierra Nevada) and southwest of the sampling sites (Cadiz and Genal Valley). This long-distant pollen transport detected makes possible the reproductive connectivity among isolated *Alnus* populations, what would be of great interest for their management and conservation.

6. There is notable influence of the meteorological variables on daily pollen concentrations in the atmosphere. In general, rainfall and relative humidity favour the precipitation of pollen while high temperatures favour pollen liberation from the flowers to the atmosphere. In some taxa, high temperatures after the flowering peak induce premature dryness and senescence of mature flowers, what also implies a decrease in pollen concentrations in the air. Wind directions and speed strongly conditioned the pollen detected when emission sources are restricted to a specific area.

7. Most pollen types, such as Cupressaceae, *Olea*, Poaceae and *Quercus*, presented their maximum concentrations between 12:00 and 16:00 hours, Cupressaceae together with *Castanea* showing the highest intradiurnal peak. In the case of *Castanea*, the highest levels were detected during midday or in the night depending on the dynamics of pollen transport from its emission sources. Intradiurnal patterns are also conditioned by land use and natural vegetation.

8. *Alternaria* and *Oidium* spores were present in the atmosphere of the studied sampling stations throughout the year, being more abundant in Ronda than in Sierra de las Nieves. However, their concentrations were higher during the period May-October in the case of *Alternaria* and during May-July in the case of *Oidium*. The combination of warm temperatures and abundant precipitations favours the production and liberation of these spores.

9. Random forest forecast models obtained the highest accuracy rates for most pollen types while neural net models were the most accurate for *Olea* in both studied locations and for *Quercus* in Ronda. Stepwise multiple lineal regressions were for *Platanus* in Sierra de las Nieves and for Urticaceae in both locations.

10. By means of the spatial interpolation models proposed it is possible to estimate the pollen levels in the whole Malaga province by using Malaga city pollen data as sole input. The accuracy rates were generally higher than the 60%. The models obtained low accuracy rates for those pollen types whose abundance in the atmosphere was highly dependent of local emission sources. Therefore, the accuracy of such models could be increased by including land use. The models

obtained allow to maximize the benefits of aerobiological samplings when it is not possible to increase the number of pollen traps or to maintain them simultaneously working.

11. AeRobiology package integrates the main functions used in aerobiological research, what allows to reduce time in processing data or in the presentation of results, as well as to facilitate the integration of new technologies in Aerobiology. This package incorporates a functionality that enables the interpolation of missing data. The accuracy of the interpolation is conditioned by the pollen type behaviour, the number of missing data and seasonality. The lineal interpolation and the regressions with nearby stations were the methods that showed the lowest errors.

7. Referencias bibliográficas

- Aguilera, F., Fornaciari, M., Ruiz-Valenzuela, L., Galán, C., Msallem, M., Ben Dhiab, A., Díaz-de la Guardia, C., Trigo, M. M., Bonofiglio, T., & Orlandi, F. (2014). Phenological models to predict the main flowering phases of olive (*Olea europaea* L.) along a latitudinal and longitudinal gradient across the Mediterranean region. *International Journal of Biometeorology*, *59*(5), 629-641. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0876-7>
- Aira, M. J., Oteros, J., Belmonte, J., Alcázar, P., Fernández-González, D., Díaz de la Guardia, C., Moreno-Grau, S., Pérez-Badía, R., Gutierrez-Bustillo, M., Ruiz-Valenzuela, L., García-Mozo, H., Trigo, M. M., Rodríguez-Rajo, F. J., Galán, C., Tormo-Molina, R., & Domínguez-Vilches, E. (2016). Airborne pollen trends in the Iberian Peninsula. *Science of The Total Environment*, *550*, 53-59. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.069>
- Aira, M. J., Rodríguez-Rajo, F. J., Fernández-González, M., & Jato, V. (2011). Airborne pollen of ornamental tree species in the NW of Spain. *Environmental Monitoring and Assessment*, *173*(1-4), 765-775. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1421-8>
- Aira, M. J., Rodríguez-Rajo, F. J., Fernández-González, M., Seijo, M. C., Elvira-Rendueles, B., Abreu, I., Gutiérrez-Bustillo, M., Pérez-Sánchez, E., Oliveira, M., Recio, M., Tormo-Molina, R., & Morales, J. (2013). Spatial and temporal distribution of *Alternaria* spores in the Iberian Peninsula atmosphere, and meteorological relationships: 1993–2009. *International Journal of Biometeorology*, *57*, 265-274. <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0550-x>
- Akdis, C. A., & Agache, I. (2014). *Global atlas of allergy*. European Academy of Allergy and Clinical Immunology. <http://www.eaaci.org/GlobalAtlas/GlobalAtlasAllergy.pdf>
- Akdis, C. A., Helling, P. W., & Agache, I. (2015). *Global atlas of allergic rhinitis and chronic rhinosinusitis*. European Academy of Allergy and Clinical Immunology. http://www.eaaci.org/globalatlas/ENT_Atlas_web.pdf
- Alba, F., Nieto-Lugilde, D., Comtois, P., Díaz de la Guardia, C., De Linares, C., & Ruiz, L. (2006). Airborne-pollen map for *Olea europaea* L. in eastern Andalusia (Spain) using GIS: Estimation models. *Aerobiologia*, *22*(2), 109-118. <https://doi.org/10.1007/s10453-006-9024-0>
- Alcázar, P., Cariñanos, P., De Castro, C., Guerra, F., Moreno, C., Domínguez-Vilches, E., & Galán, C. (2004). Airborne plane-tree (*Platanus hispanica*) pollen distribution in the city of Córdoba, South-western Spain, and possible implications on pollen allergy. *J Invest Allergol Clin Immunol*, *14*(3), 238-243. <http://jiaci.org/issues/vol14issue03/238-243.pdf>
- Alcázar, P., Stach, A., Nowak, M., & Galán, C. (2009). Comparison of airborne herb pollen types in Córdoba (Southwestern Spain) and Poznan (Western Poland). *Aerobiologia*, *25*(2), 55-63. <https://doi.org/10.1007/s10453-009-9109-7>
- Anders, I., Stagl, J., Auer, I., & Pavlik, D. (2014). Climate change in central and eastern Europe. En S. Rannow & M. Neubert (Eds.), *Managing Protected Areas in Central and Eastern Europe Under Climate Change* (Vol. 58, pp. 17-

30). SpringerDordrecht Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7960-0>

- Anderson, P. K., Cunningham, A. A., Patel, N. G., Morales, F. J., Epstein, P. R., & Daszak, P. (2004). Emerging infectious diseases of plants: Pathogen pollution, climate change and agrotechnology drivers. *Trends in Ecology and Evolution*, *19*(10), 535-544. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2004.07.021>
- Arista, M. (1995). The structure and dynamics of an *Abies pinsapo* forest in southern Spain. *Forest Ecology and Management*, *74*(1-3), 81-89. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(94\)03507-S](https://doi.org/10.1016/0378-1127(94)03507-S)
- Arista, M., & Talavera, S. (1994). Phenology and anatomy of the reproductive phase of *Abies pinsapo* Boiss. (Pinaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society*, *116*, 223-234. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.1994.tb00431.x>
- Arista, M., & Talavera, S. (1995). Producción de piñas y ciclos de cosechas en *Abies pinsapo* Boiss. *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, *53*(1), 5-12.
- Astray, G., Fernández-González, M., Rodríguez-Rajo, F. J., López, D., & Mejuto, J. C. (2016). Airborne *Castanea* pollen forecasting model for ecological and allergological implementation. *Science of the Total Environment*, *548-549*, 110-121. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.035>
- Bañares, A., Blanca, G., Güemes, J., Moreno, J. C., & Ortiz, S. (2004). *Atlas y libro rojo de la flora vascular amenazada de España* (2.^a ed.). Dirección General para la Biodiversidad, O.A.P.N., Ministerio de Medio Ambiente. ISBN: 84-8014-521-8
- Bañares, A., Blanca, G., Güemes, J., Moreno, J. C., & Ortiz, S. (2008). *Lista roja 2008 de la flora vascular española*. Dirección General de Medio Natural y Forestal (Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino) - SEBICOP. ISBN: 978-84-691-7375-6
- Barriopedro, D., Fischer, E. M., Luterbacher, J., Trigo, R. M., & García-Herrera, R. (2011). The hot summer of 2010: Redrawing the temperature record map of Europe. *Science*, *332*(6026), 220-224. <https://doi.org/10.1126/science.1201224>
- Beggs, P. J., Šikoparija, B., & Smith, M. (2017). Aerobiology in the International Journal of Biometeorology, 1957–2017. *International Journal of Biometeorology*, *61*, 51-58. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1374-5>
- Belda, S., Pipia, L., Morcillo-Pallarés, P., Rivera-Caicedo, J. P., Amin, E., De Grave, C., & Verrelst, J. (2020). DATimeS: A machine learning time series GUI toolbox for gap-filling and vegetation phenology trends detection. *Environmental Modelling and Software*, *127*, 104666. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104666>
- Belmonte, J., Canela, M., Guàrdia, R. A., Sbai, L., Vendrell, M., Alba, F., Alcázar, P., Cabezudo, B., Gutiérrez, M., Méndez, J., & Valencia, R. (1999a). Aerobiological dynamics of the Urticaceae pollen in Spain, 1992-98. *Polen*, *10*, 79-91.

- Belmonte, J., Canela, M., Guàrdia, R. A., Sbai, L., Vendrell, M., Cariñanos, P., Díaz de la Guardia, C., Dopazo, A., Fernández, D., Gutiérrez, M., Trigo, M. M., Guàrdia, R. A., Sbai, L., Vendrell, M., Cariñanos, P., Díaz de la Guardia, C., Dopazo, A., Fernández, D., Gutiérrez, M., & Trigo, M. M. (1999b). Aerobiological dynamics of the Cupressaceae pollen in Spain, 1992-98. *Polen*, 10, 27-38.
- Bilińska, D., Skjøth, C. A., Werner, M., Kryza, M., Malkiewicz, M., Krynicka, J., & Drzeniecka-Osiadacz, A. (2017). Source regions of ragweed pollen arriving in south-western Poland and the influence of meteorological data on the HYSPLIT model results. *Aerobiologia*, 33(3), 315-326. <https://doi.org/10.1007/s10453-017-9471-9>
- Blanca, G., Cabezudo, B., Cueto, M., Salazar, C., & Morales Torres, C. (2011). *Flora Vascular de Andalucía Oriental* (2.^a ed.). Universidades de Almería, Granada, Jaén y Málaga. ISBN: 978-84-338-5217-5
- Boessenkool, B. (2019). *berryFunctions: Function Collection Related to Plotting and Hydrology* (R package version 1.18.2). CRAN Repository. <https://cran.r-project.org/package=berryFunctions>
- Bogawski, P., Grewling, Ł., Nowak, M., Smith, M., & Jackowiak, B. (2014). Trends in atmospheric concentrations of weed pollen in the context of recent climate warming in Poznań (Western Poland). *International Journal of Biometeorology*, 58(8), 1759-1768. <https://doi.org/10.1007/s00484-013-0781-5>
- Bonofiglio, T., Orlandi, F., Sgromo, C., Romano, B., & Fornaciari, M. (2008). Influence of temperature and rainfall on timing of olive (*Olea europaea*) flowering in Southern Italy. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 36(1), 59-69. <https://doi.org/10.1080/01140670809510221>
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45, 5-32.
- Cabezudo, B., Recio, M., Sánchez-Laulhé, J. M., Trigo, M. M., Toro, F. J., & Polvorinos, F. (1997). Atmospheric transportation of marijuana pollen from North Africa to the southwest of Europe. *Atmospheric Environment*, 31(20), 3323-3328. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00161-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00161-1)
- Cabezudo, B., Talavera, S., Blanca, G., Salazar, C., Cueto, M. J., Fernández Bermejo, J. E., Herrera, C., Rodríguez Hiraldo, C., & Navas, D. (2005). *Lista roja de la flora vascular de Andalucía*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.
- Calderón, C., Lacey, J., McCartney, A., & Rosas, I. (1997). Influence of urban climate upon distribution of airborne Deuteromycete spore concentrations in Mexico City. *International Journal of Biometeorology*, 40(2), 71-80. <https://doi.org/10.1007/s004840050021>
- Castroviejo, S., Laínz, M., López González, G., Montserrat, P., Muñoz Garmendia, F., Paiva, J., & Villar, L. (1990). *Flora iberica* 2. Real Jardín Botánico, CSIC. <https://doi.org/M.10.532-1990>
- Chaine, I. (2000). A unified model for budburst of trees. *Journal of Theoretical Biology*, 207(3), 337-347. <https://doi.org/10.1006/jtbi.2000.2178>

- Chuine, I., & Cour, P. (1999). Climatic determinants of budburst seasonality in four temperate-zone tree species. *New Phytologist*, 143(2), 339-349. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1999.00445.x>
- Cleveland, R. B., Cleveland, W. S., McRae, J. E., & Terpenning, I. (1990). STL: A Seasonal-Trend Decomposition Procedure based on Loess. *Journal of Official Statistics*, 6, 3-73.
- Clot, B. (2001). Airborne birch pollen in Neuchâtel (Switzerland): onset, peak and daily patterns. *Aerobiologia*, 17(1), 25-29. <https://doi.org/10.1023/A:1007652220568>
- Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. (2005). *PORN/PRUG/PDS Parque Natural Sierra de Las Nieves*. Akron Gráfica. Depósito legal: SE-1628-05
- Corden, J. M., Millington, W. M., & Mullins, J. (2003). Long-term trends and regional variation in the aeroallergen *Alternaria* in Cardiff and Derby UK – are differences in climate and cereal production having an effect? *Aerobiologia*, 19, 191-199. <https://doi.org/10.1023/B:AERO.0000006529.51252.2f>
- Cornes, R. C., van der Schrier, G., van den Besselaar, E. J. M., & Jones, P. D. (2018). An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(17), 9391-9409. <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>
- Cortiñas Rodríguez, J. A., González-Fernández, E., Fernández-González, M., Vázquez-Ruiz, R. A., & Aira, M. J. (2020). Fungal diseases in two north-west Spain vineyards: Relationship with meteorological conditions and predictive aerobiological model. *Agronomy*, 10(2), 219. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020219>
- Cueto, M., Melendo, M., Giménez, E., Fuentes, J., Carrique, E. L., & Blanca, G. (2018). First updated checklist of the vascular flora of Andalusia (S of Spain), one of the main biodiversity centres in the Mediterranean Basin. *Phytotaxa*, 339(1), 1-95. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.339.1.1>
- Cunha, M., Ribeiro, H., Costa, P., & Abreu, I. (2015). A comparative study of vineyard phenology and pollen metrics extracted from airborne pollen time series. *Aerobiologia*, 31(1), 45-56. <https://doi.org/10.1007/s10453-014-9345-3>
- D'Amato, G., Cecchi, L., Bonini, S., Nunes, C., Annesi-Maesano, I., Behrendt, H., Liccardi, G., Popov, T., & van Cauwenberge, P. (2007). Allergenic pollen and pollen allergy in Europe. *Allergy*, 62(9), 976-990. <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.2007.01393.x>
- De Linares, C., Alcázar, P., Valle, A. M., Díaz de la Guardia, C., & Galán, C. (2019). *Parietaria* major allergens vs pollen in the air we breathe. *Environmental Research*, 176, 108514. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.05.045>
- De Luis, M., González-Hidalgo, J. C., Brunetti, M., & Longares, L. A. (2011). Precipitation concentration changes in Spain 1946-2005. *Hazards Earth Syst. Sci*, 11, 1259-1265. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1259-2011>



- De Luis, M., González-Hidalgo, J. C., Longares, L. A., & Štěpánek, P. (2009). Seasonal precipitation trends in the Mediterranean Iberian Peninsula in second half of 20th century. *International Journal of Climatology*, 29(9), 1312-1323. <https://doi.org/10.1002/joc.1778>
- Decreto 23/2012, de 14 de febrero por el que se regula la conservación sostenible de la flora y fauna silvestres y sus hábitats. B.O.J.A. número 60, 114 (2012).
- Development-Core-Team. (2017). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. The R Foundation for Statistical Computing.
- Diario Ronda. (2018, marzo 2). La borrasca 'Emma' abandona la Serranía tras dejar inundaciones por la crecida de los ríos, caída de rocas y de árboles, y numerosas incidencias. *Diario Ronda*. <http://www.diarioronda.es/2018/03/02/ronda/la-borrasca-emma-abandona-la-serrania-tras-dejar-inundaciones-por-la-crecida-de-los-rios-caida-de-rocas-y-de-arboles-y-numerosas-incidencias/>
- Díaz de la Guardia, C., Alba, F., de Linares, C., Nieto-Lugilde, D., & López Caballero, J. (2006). Aerobiological and allergenic analysis of Cupressaceae pollen in Granada (Southern Spain). *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, 16(1), 24-33.
- Díaz de la Guardia, C., Galan, C., Domínguez, E., Alba, F., Ruiz, L., Sabariego, S., Recio, M., Fernández-González, D., Mendez, J., Vendrell, M., & Gutiérrez-Bustillo, M. (1999a). Variations in the main pollen season of *Olea europaea* L. at selected sites in the Iberian Peninsula. *Polen*, 10(10), 103-113.
- Díaz de la Guardia, C., Sabariego, S., Alba, F., Ruiz, L., García-Mozo, H., Toro, F. J., Valencia, R., Rodríguez Rajo, F. J., Guàrdia, A., & Cervigón, P. (1999b). Aeropalynological study of the genus *Platanus* L. in the Iberian Peninsula. *Polen*, 10, 93-101.
- Docampo, S., Recio, M., Trigo, M. M., Melgar, M., & Cabezudo, B. (2007). Risk of pollen allergy in Nerja (southern Spain): A pollen calendar. *Aerobiologia*, 23(3), 189-199. <https://doi.org/10.1007/s10453-007-9063-1>
- Dullinger, S., Gattringer, A., Thuiller, W., Moser, D., Zimmermann, N. E., Guisan, A., Willner, W., Plutzer, C., Leitner, M., Mang, T., Caccianiga, M., Dirnböck, T., Ertl, S., Fischer, A., Lenoir, J., Svenning, J.-C., Psomas, A., Schmatz, D. R., Silc, U., ... Hülber, K. (2012). Extinction debt of high-mountain plants under twenty-first-century climate change. *Nature Climate Change*, 2, 619-622. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE1514>
- Eckhardt, K., & Ulbrich, U. (2003). Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range. *Journal of Hydrology*, 284(1-4), 244-252. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.08.005>
- El-Moslimany, A. (2019). Reduced Poaceae pollen under conditions of severe summer drought in the Middle East: Implications for rainfall seasonality in pollen diagrams. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 271, 104068. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2019.04.007>
- Elsen, P. R., & Tingley, M. W. (2015). Global mountain topography and the fate of

montane species under climate change. *Nature Climate Change*, 5(8), 772-776. <https://doi.org/10.1038/nclimate2656>

- Emberlin, J., Smith, M., Close, R., & Adams-Groom, B. (2007). Changes in the pollen seasons of the early flowering trees *Alnus* spp. and *Corylus* spp. in Worcester, United Kingdom, 1996-2005. *International Journal of Biometeorology*, 51(3), 181-191. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0059-2>
- Environmental Modeling Center, National Centers for Environmental Prediction, National Weather Service, North Oceanic and Atmospheric Administration, & U.S. Department of Commerce. (2011). *Global Data Assimilation System (GDAS)*. <https://data.nodc.noaa.gov/cgi-bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00379#>
- Estrella, N., Menzel, A., Krämer, U., & Behrendt, H. (2006). Integration of flowering dates in phenology and pollen counts in aerobiology: Analysis of their spatial and temporal coherence in Germany (1992-1999). *International Journal of Biometeorology*, 51(1), 49-59. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0038-7>
- Fernández-González, D., Valencia-Barrera, R. M., Vega, A., Díaz de la Guardia, C., Trigo, M. M., Cariñanos, P., Guàrdia, A., Pertiñez, C., & Rodríguez-Rajo, F. J. (1999). Analysis of grass pollen concentrations in the atmosphere of several spanish sites. *Polen*, 10, 127-136.
- Fernández-González, M., Ramos-Valcárcel, D., Aira, M. J., & Rodríguez-Rajo, F. J. (2016). Prediction of biological sensors appearance with ARIMA models as a tool for integrated pest management protocols. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 23(1), 129-137. <https://doi.org/10.5604/12321966.1196868>
- Fernández-González, M., Rodríguez-Rajo, F. J., Escuredo, O., & Aira, M. J. (2013). Optimization of integrated pest management for powdery mildew (*Uncinula necator*) control in a vineyard based on a combination of phenological, meteorological and aerobiological data. *Journal of Agricultural Science*, 151(5), 648-658. <https://doi.org/10.1017/S0021859612000743>
- Fernández-González, M., Rodríguez-Rajo, F. J., Jato, V., & Aira, M. J. (2009). Incidence of fungals in a vineyard of the denomination of origin Ribeiro (Ourense - North-Western Spain). *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 16(2), 263-271.
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Fuentes Antón, S., Rodríguez de la Cruz, D., García Sánchez, A., Dávila, I., Sánchez Sánchez, J., & Sánchez Reyes, E. (2020). Urban atmospheric levels of allergenic pollen: comparison of two locations in Salamanca, Central-Western Spain. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(414), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08375-2>
- Galán, C., Alcázar, P., Cariñanos, P., García-Mozo, H., Domínguez-Vilches, E., García, H., & Domínguez-Vilches, E. (2000). Meteorological factors affecting daily Urticaceae pollen counts in southwest Spain. *International Journal of Biometeorology*, 43(4), 191-195. <https://doi.org/10.1007/s004840050008>

- Galán, C., Ariatti, A., Bonini, M., Clot, B., Crouzy, B., Dahl, A., Fernández-González, D., Frenguelli, G., Gehrig, R., Isard, S., Levetin, E., Li, D. W., Mandrioli, P., Rogers, C. A., Thibaudon, M., Sauliene, I., Skjoth, C., Smith, M., & Sofiev, M. (2017). Recommended terminology for aerobiological studies. *Aerobiologia*, *33*, 293-295. <https://doi.org/10.1007/s10453-017-9496-0>
- Galán, C., Cariñanos, P., Alcázar, P., & Domínguez-Vilches, E. (2007). *Spanish Aerobiology Network (REA): Management and Quality Manual*. Servicio de Publicaciones Universidad de Córdoba. http://www.redespanoladeaerobiologia.com/images/manual_eng.pdf
- Galán, C., Cariñanos, P., García-Mozo, H., Alcázar, P., & Domínguez-Vilches, E. (2001a). Model for forecasting *Olea europaea* L. airborne pollen in South-West Andalusia, Spain. *International Journal of Biometeorology*, *45*(2), 59-63. <https://doi.org/10.1007/s004840100089>
- Galán, C., García-Mozo, H., Cariñanos, P., Alcázar, P., & Domínguez-Vilches, E. (2001b). The role of temperature in the onset of the *Olea europaea* L. pollen season in southwestern Spain. *International Journal of Biometeorology*, *45*(1), 8-12. <https://doi.org/10.1007/s004840000081>
- Galán, C., Smith, M., Thibaudon, M., Frenguelli, G., Oteros, J., Gehrig, R., Berger, U., Clot, B., & Brandao, R. (2014). Pollen monitoring: minimum requirements and reproducibility of analysis. *Aerobiologia*, *30*(4), 385-395. <https://doi.org/10.1007/s10453-014-9335-5>
- Galfin, C., Fuillerat, M. J., Comtois, P., & Dominguez, E. (1998). A predictive study of Cupressaceae pollen season onset, severity, maximum value and maximum value date. *Aerobiologia*, *14*, 195-199.
- Gallego Fernández, J. B. (2004). Factores que condicionan el espectro de distribución del matorral mediterráneo de la Sierra de Grazalema, sur de España. *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, *61*(1), 73-80. <https://doi.org/10.3989/ajbm.2004.v61.i1.71>
- García-Mozo, H. (2017). Poaceae pollen as the leading aeroallergen worldwide: A review. *Allergy*, *72*(12), 1849-1858. <https://doi.org/10.1111/all.13210>
- García-Mozo, H., Domínguez-Vilches, E., & Galan, C. (2007). Airborne allergenic pollen in natural areas: Hornachuelos Natural Park, Cordoba, Southern Spain. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, *14*(1), 63-69.
- García-Mozo, H., Galán, C., Alcázar, P., Díaz de la Guardia, C., Nieto-Lugilde, D., Recio, M., Hidalgo, P., González-Minero, F., Ruiz, L., & Domínguez-Vilches, E. (2010a). Trends in grass pollen season in southern Spain. *Aerobiologia*, *26*(2), 157-169. <https://doi.org/10.1007/s10453-009-9153-3>
- García-Mozo, H., Galán, C., Belmonte, J., Bermejo, D., Candau, P., Díaz de la Guardia, C., Elvira, B., Gutiérrez, M., Jato, V., Silva, I., Trigo, M. M., Valencia, R., & Chuine, I. (2009a). Predicting the start and peak dates of the Poaceae pollen season in Spain using process-based models. *Agricultural and Forest Meteorology*, *149*(2), 256-262. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.08.013>
- García-Mozo, H., Galán, C., Cariñanos, P., Alcazar, P., Méndez, J., Vendrell, M.,

- Alba, F., Sáenz, C., Fernández, D., Cabezudo, B., & Domínguez, E. (1999). Variations in the *Quercus* sp. pollen season at selected sites in Spain. *Polen*, 10, 59-69.
- García-Mozo, H., Galán, C., Jato, V., Belmonte, J., Díaz de la Guardia, C., Fernández, D., Gutiérrez, M., Aira, M. J., Roure, J. M., Ruiz, L., Trigo, M. M., & Domínguez-Vilches, E. (2006a). *Quercus* pollen season dynamics in the Iberian Peninsula: response to meteorological parameters and possible consequences of climate change. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 13, 209-224.
- García-Mozo, H., Mestre, A., & Galán, C. (2010b). Phenological trends in southern Spain: A response to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(4), 575-580. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.01.023>
- García-Mozo, H., Orlandi, F., Galan, C., Fornaciari, M., Romano, B., Ruiz, L., Díaz de la Guardia, C., Trigo, M. M., & Chuine, I. (2009b). Olive flowering phenology variation between different cultivars in Spain and Italy: Modeling analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 95(3-4), 385-395. <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0016-6>
- García-Mozo, H., Pérez-Badía, R., Fernández-González, F., & Galán, C. (2006b). Airborne pollen sampling in Toledo, Central Spain. *Aerobiología*, 22(1), 55-66. <https://doi.org/10.1007/s10453-005-9015-6>
- García, J. J., Trigo, M. M., Cabezudo, B., Recio, M., Vega, J. M., Barber, D., Carmona, M. J., Cervera, J. A., Toro, F. J., & Miranda, A. (1997). Pollinosis due to Australian pine (*Casuarina*): an aerobiologic and clinical study in southern Spain. *Allergy*, 52(1), 11-17. <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.1997.tb02540.x>
- García, R. A., Cabeza, M., Rahbek, C., & Araújo, M. B. (2014). Multiple dimensions of climate change and their implications for biodiversity. *Science*, 344(6183), 1247579. <https://doi.org/10.1126/science.1247579>
- Gavira-Romero, O., & Pérez-Latorre, A. V. (2003). Aproximación al catálogo florístico del Valle del río Genal (Serranía de Ronda, Málaga, España). *Anales de Biología*, 25, 113-161. <https://revistas.um.es/analesbio/article/view/31001>
- GBIF: The Global Biodiversity Information Facility. (2019). *What is GBIF?* <https://www.gbif.org/what-is-gbif>
- GBIF.org. (2019). *GBIF Ocurrence Download*. 2019. <https://doi.org/https://doi.org/10.15468/dl.ws3xvc>
- GBIF. (2019). *GBIF: The Global Biodiversity Information Facility*. <https://doi.org/10.15468/dl.f4zjgg>
- Gehrig, R., Gassner, M., & Schmid-Grendelmeier, P. (2015). *Alnus x spaethii* pollen can cause allergies already at Christmas. *Aerobiología*, 31(2), 239-247. <https://doi.org/10.1007/s10453-014-9360-4>
- Gérard Peeters, A. (1998). Cumulative temperatures for prediction of the beginning of ash (*Fraxinus excelsior* L.) pollen season. *Aerobiología*, 14(4), 375-381. <https://doi.org/10.1007/BF02694306>



- Ghasemifard, H., Ghada, W., Estrella, N., Lüpke, M., Oteros, J., Damialis, A., Traidl-Hoffmann, C., Buters, J., & Menzel, A. (2020). High post-season *Alnus* pollen loads successfully identified as long-range transport of an alpine species. *Atmospheric Environment*, 231, 117453. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117453>
- Gómez Moreno, M. L. (2010). Los espacios naturales protegidos como categoría en la ordenación del territorio. El caso de la comunidad autónoma andaluza. *Cuadernos Geográficos*, 47, 317-346. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v47i0.611>
- González-Parrado, Z., Valencia-Barrera, R. M., Vega-Maray, A. M., Fuertes-Rodríguez, C. R., & Fernández-González, D. (2014). The weak effects of climatic change on *Plantago* pollen concentration: 17 years of monitoring in Northwestern Spain. *International Journal of Biometeorology*, 58(7), 1641-1650. <https://doi.org/10.1007/s00484-013-0768-2>
- Grant Smith, E. (1984). *Sampling and identifying allergenic pollens and molds*. Blewstone Press. <https://doi.org/0-930961-00-5>
- Grinn-Gofroń, A., & Rapiejko, P. (2009). Occurrence of *Cladosporium* spp. and *Alternaria* spp. spores in Western, Northern and Central-Eastern Poland in 2004–2006 and relation to some meteorological factors. *Atmospheric Research*, 93(4), 747-758. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2009.02.014>
- Guiot, J., & Cramer, W. (2016). Climate change: The 2015 Paris Agreement thresholds and Mediterranean basin ecosystems. *Science*, 354(6311), 465-468. <https://doi.org/10.1126/science.aah5015>
- Günther, F., & Fritsch, S. (2010). neuralnet: Training of Neural Networks. *The R Journal*, 2(1), 30-38.
- Gutiérrez, A. M., Sáenz, C., Cervigón, P., Alcázar, P., Dopazo, A., Ruiz, L., Trigo, M. M., Valencia, R., & Vendrell, M. (1999). Comparative study of the presence of aeropollen from *Plantago* sp. at several locations in Spain. *Polen*, 10, 115-125.
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). Past: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), 1-9. http://palaeo-electronica.orghttp://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm.
- Hastie, T. J., & Pregibon, D. (1992). Generalized linear models. En J. M. Chambers & T. J. Hastie (Eds.), *Statistical Models in S*. Wadsworth & Brooks/Cole. <https://doi.org/978-0412830402>
- Hauser, M., Asam, C., Himly, M., Palazzo, P., Voltolini, S., Montanari, C., Briza, P., Bernardi, M. L., Mari, A., Ferreira, F., & Wallner, M. (2011). Bet v 1-like pollen allergens of multiple Fagales species can sensitize atopic individuals. *Clinical & Experimental Allergy*, 41(12), 1804-1814. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2222.2011.03866.x>
- Hernández-Ceballos, M. A., García-Mozo, H., Adame, J. A., Domínguez-Vilches, E., Bolívar, J. P., De la Morena, B. A., Pérez-Badía, R., & Galán, C. (2011).

Determination of potential sources of *Quercus* airborne pollen in Córdoba city (southern Spain) using back-trajectory analysis. *Aerobiologia*, 27(3), 261-276. <https://doi.org/10.1007/s10453-011-9195-1>

Hernández-Ceballos, M. A., Skjøth, C. A., García-Mozo, H., Bolívar, J. P., & Galán, C. (2014). Improvement in the accuracy of back trajectories using WRF to identify pollen sources in southern Iberian Peninsula. *International Journal of Biometeorology*, 58(10), 2031-2043. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0804-x>

Hidalgo, P. J., Galán, C., & Domínguez, E. (2003). Male phenology of three species of *Cupressus*: Correlation with airborne pollen. *Trees*, 17(4), 336-344. <https://doi.org/10.1007/s00468-002-0243-x>

Hijmans, R. J., & van Etten, J. (2014). *raster: Geographic data analysis and modeling* (R package version 2,15). CRAN Repository. <https://cran.r-project.org/package=raster>

Hirst, J. M. (1952). An automatic volumetric spore trap. *Annals of Applied Biology*, 39(2), 257-265. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1952.tb00904.x>

Huynen, M., Menne, B., Behrendt, H., Bertollini, R., Bonini, S., Brandao, R., Brown-Fahrländer, C., Clot, B., Ambrosio, C. d', Nuntiis, P. De, Ebi, K. L., Emberlin, J., Orbanne, E. E., Galán, C., Jäger, S., Kovats, S., Mandrioli, P., Martens, P., Menzel, A., ... Wickman, M. (2003). *Phenology and human health: allergic disorders*. World Health Organization.

Iglesias-Otero, M. A., Fernández-González, M., Rodríguez-Caride, D., Astray, G., Mejuto, J. . C., & Rodríguez-Rajo, F. J. (2015). A model to forecast the risk periods of *Plantago* pollen allergy by using the ANN methodology. *Aerobiologia*, 31, 201-211. <https://doi.org/10.1007/s10453-014-9357-z>

Iglesias, I., Jato, V., Aira, M. J., Sbai, L., Valencia, R., Recio, M., Sabariego, S., Cervigón, P., & Cariñanos, P. (1999). Annual variations of *Castanea* airborne pollen at thirteen spanish sites. *Polen*, 10, 51-58.

Iglesias, I., Méndez, J., & Comtois, P. (2003). Aerobiological survey of *Alnus* pollen in Ourense (N.W. Iberian Peninsula), 1993–2000. *Grana*, 42(2), 112-120. <https://doi.org/10.1080/00173130310012503>

Infante, F., Castro, A., Domínguez, E., Guárdia, A., Méndez, J., Sabariego, S., & Vega, A. (1999). A comparative study of the incidence of *Alternaria* conidia in the atmosphere of five Spanish cities. *Polen*, 10, 15-23. <https://www.researchgate.net/publication/230819672>

Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía. (2011). *Infraestructura de Datos Espaciales de Andalucía*. <http://www.ideandalucia.es/wms/ortofoto2010?service=wms&>

Izquierdo, R., Alarcon, M., Periago, C., & Belmonte, J. (2015). Is long range transport of pollen in the NW Mediterranean basin influenced by Northern Hemisphere teleconnection patterns? *Science of the Total Environment*, 532, 771-779. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.047>

Jantunen, J., Saarinen, K., & Rantio-Lehtimäki, A. (2012). Allergy symptoms in

- relation to alder and birch pollen concentrations in Finland. *Aerobiologia*, 28(2), 169-176. <https://doi.org/10.1007/s10453-011-9221-3>
- Jato, V., Aira, M. J., Dopazo, A., Iglesias, M. I., Méndez, J., & Rodríguez-Rajo, F. J. (2001). Aerobiology of *Castanea* pollen in Galicia. *Aerobiologia*, 17(3), 233-240. <https://doi.org/10.1023/A:1011855806179>
- Jato, V., Rodríguez-Rajo, F. J., & Aira, M. J. (2007). Use of *Quercus ilex* subsp. *ballota* phenological and pollen-production data for interpreting *Quercus* pollen curves. *Aerobiologia*, 23(2), 91-105. <https://doi.org/10.1007/s10453-006-9046-7>
- Jato, V., Rodríguez-Rajo, F. J., Aira, M. J., Tedeschini, E., & Frenguelli, G. (2013). Differences in atmospheric trees pollen seasons in winter, spring and summer in two European geographic areas, Spain and Italy. *Aerobiologia*, 29(2), 263-278. <https://doi.org/10.1007/s10453-012-9278-7>
- Jato, V., Rodríguez-Rajo, F. J., Seijo, M. C., & Aira, M. J. (2009). Poaceae pollen in Galicia (N.W. Spain): Characterisation and recent trends in atmospheric pollen season. *International Journal of Biometeorology*, 53(4), 333-344. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0220-9>
- Jeschke, J. M., & Strayer, D. L. (2008). Usefulness of bioclimatic models for studying climate change and invasive species. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1134, 1-24. <https://doi.org/10.1196/annals.1439.002>
- Junta de Andalucía. (2011). *Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM)*. <https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/rediam>
- Junta de Andalucía. (2019). *Datos Espaciales de Referencia de Andalucía*. <https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/DERA/>
- Kasprzyk, I. (2006). Comparative study of seasonal and intradiurnal variation of airborne herbaceous pollen in urban and rural areas. *Aerobiologia*, 22(3), 185-195. <https://doi.org/10.1007/s10453-006-9031-1>
- Kasprzyk, I., & Borycka, K. (2019). Alder pollen concentrations in the air during snowfall. *International Journal of Biometeorology*, 63(12), 1651-1658. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01781-3>
- Krige, D. G. (1951). A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 52(6), 119-139. https://journals.co.za/content/saimm/52/6/AJA0038223X_4792
- Lander, T. A., Boshier, D. H., & Harris, S. A. (2010). Fragmented but not isolated: Contribution of single trees, small patches and long-distance pollen flow to genetic connectivity for *Gomortega keule*, an endangered Chilean tree. *Biological Conservation*, 143(11), 2583-2590. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.06.028>
- Launay, M., Caubel, J., Bourgeois, G., Huard, F., Garcia de Cortazar-Atauri, I., Bancal, M. O., & Brisson, N. (2014). Climatic indicators for crop infection risk: Application to climate change impacts on five major foliar fungal diseases in Northern France. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 197, 147-158.

<https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.07.020>

- Legler, S. E., Caffi, T., & Rossi, V. (2012). A nonlinear model for temperature-dependent development of *Erysiphe necator* chasmothecia on grapevine leaves. *Plant Pathology*, 61(1), 96-105. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2011.02498.x>
- Liaw, A., & Wiener, M. (2002). Classification and Regression by randomForest. *R News*, 2(3), 18-22. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Liñán Baena, C., Andreo, B., Mudry, J., & Carrasco Cantos, F. (2009). Groundwater temperature and electrical conductivity as tools to characterize flow patterns in carbonate aquifers: The Sierra de las Nieves karst aquifer, southern Spain. *Hydrogeology Journal*, 17(4), 843-853. <https://doi.org/10.1007/s10040-008-0395-x>
- Linares, J. C. (2011). Biogeography and evolution of *Abies* (Pinaceae) in the Mediterranean Basin: the roles of long-term climatic change and glacial refugia. *Journal of Biogeography*, 38(4), 619-630. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02458.x>
- Linkosalo, T., & Lechowicz, M. J. (2006). Twilight far-red treatment advances leaf bud burst of silver birch (*Betula pendula*). *Tree Physiology*, 26, 1249-1256. www.rosco.com
- Linkosalo, T., Ranta, H., Oksanen, A., Siljamo, P., Luomajoki, A., Kukkonen, J., & Sofiev, M. (2010). A double-threshold temperature sum model for predicting the flowering duration and relative intensity of *Betula pendula* and *B. pubescens*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(12), 1579-1584. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.08.007>
- López González, G. (2001). *Los árboles y arbustos de la Península Ibérica e Islas Baleares (especies silvestres y las principales cultivadas)*. Mundi Prensa Libros. Depósito legal: M.29.826-2001
- Mandrioli, P., & Ariatti, A. (2001). Aerobiology: Future course of action. *Aerobiologia*, 17(1), 1-10. <https://doi.org/10.1023/A:1007602928928>
- Martínez-Bracero, M., Alcázar, P., Díaz de la Guardia, C., González-Minero, F. J., Ruiz, L., Trigo, M. M., & Galán, C. (2015). Pollen calendars: a guide to common airborne pollen in Andalusia. *Aerobiologia*, 31(4), 549-557. <https://doi.org/10.1007/s10453-015-9385-3>
- Martínez-Bracero, M., Alcázar, P., Velasco-Jiménez, M. J., & Galán, C. (2019). Fungal spores affecting vineyards in Montilla-Moriles Southern Spain. *European Journal of Plant Pathology*, 153(1), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10658-018-1532-6>
- Maya-Manzano, J. M., Fernández-Rodríguez, S., Smith, M., Tormo-Molina, R., Reynolds, A. M., Silva-Palacios, I., Gonzalo-Garijo, A., & Sadyś, M. (2016). Airborne *Quercus* pollen in SW Spain: Identifying favourable conditions for atmospheric transport and potential source areas. *Science of the Total Environment*, 571, 1037-1047. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.094>
- Maya-Manzano, J. M., Fernández-Rodríguez, S., Vaquero Del Pino, C., Gonzalo



Garijo, Á., Silva-Palacios, I., Tormo-Molina, R., Moreno Corchero, A., Cosmes Martín, P. M., Blanco Pérez, R. M., Domínguez Noche, C., Fernández Moya, L., Alfonso Sanz, J. V., Vaquero Pérez, P., Pérez Marín, M. L., Rapp, A., Rojo, J., & Pérez-Badia, R. (2017). Variations in airborne pollen in central and south-western Spain in relation to the distribution of potential sources. *Grana*, 56(3), 228-239. <https://doi.org/10.1080/00173134.2016.1208680>

Meier, F. C. (1935). Microorganisms in the atmosphere of arctic regions. *Phytopathology*, 25, 27.

Meier, F. C., & Lindbergh, C. A. (1935). Collecting microorganisms from the Arctic atmosphere: with field notes and material. *The Scientific Monthly*, 40(1), 5-20.

Meier, U. (Ed.). (2001). *Growth stages of mono- and dicotyledonous plants*. BBCH Monograph. Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry. <https://www.politicheagricole.it/flex/AppData/WebLive/Agrometeo/MIEPFY800/BBCHengl2001.pdf>

Menzel, A., Sparks, T. H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alam-Kübler, K., Bissolli, P., Braslavská, O., Briede, A., Chmielewski, F. M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, Å., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatczak, K., Mage, F., ... Zust, A. (2006). European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, 12(10), 1969-1976. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x>

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (2018). *Encuesta de Comercialización de Productos Fitosanitarios 2018*. <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/estadisticas-medios-produccion/fitosanitarios.aspx>

Morán-López, T., Robledo-Arnuncio, J. J., Díaz, M., Morales, J. M., Lázaro-Nogal, A., Lorenzo, Z., & Valladares, F. (2016). Determinants of functional connectivity of holm oak woodlands: Fragment size and mouse foraging behavior. *Forest Ecology and Management*, 368, 111-122. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.03.010>

Muñoz Rodríguez, A. F., Silva-Palacios, I., Tormo-Molina, R., & Moreno Corchero, A. (2006). *Urtica membranacea* and the importance of its separation from the rest of the Urticaceae in aeropalynological studies carried out in the Mediterranean region. *Plant Biosystems*, 140(3), 321-332. <https://doi.org/10.1080/11263500600947814>

Muñoz Rodríguez, A. F., Silva-Palacios, I., Tormo-Molina, R., Moreno Corchero, A., & Tavira Muñoz, J. (2000). Dispersal of Amaranthaceae and Chenopodiaceae pollen in the atmosphere of Extremadura (sw Spain). *Grana*, 39(1), 56-62. <https://doi.org/10.1080/00173130150503812>

Naranjo-Barea, A. J., Rodrigo-Comino, J., & Senciales-González, J. M. (2017). Estimation of the Venturi effect as a leading factor of pluviometry in the Grazañema Mountain. *Pirineos*, 172, 1-20. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2017.172008>

National Centers for Environmental Prediction, & National Center for Atmospheric Research. (2003). *NCEP/NCAR Reanalysis Data Archive*.

<ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/reanalysis>

- Navarro, T., & Cabezudo, B. (1998). Estrategias fenomorfológicas de especies de un matorral mediterráneo (Andalucía, España). *Acta Botanica Malacitana*, 23, 133. <https://doi.org/10.24310/abm.v23i0.8556>
- Nilsson, S., & Persson, S. (1981). Tree pollen spectra in the Stockholm region (Sweden), 1973-1980. *Grana*, 20(3), 179-182. <https://doi.org/10.1080/00173138109427661>
- Norrant, C., & Douguédroit, A. (2006). Monthly and daily precipitation trends in the Mediterranean (1950-2000). *Theoretical and Applied Climatology*, 83(1-4), 89-106. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0163-y>
- O'Rourke, M. K. (1990). Comparative pollen calendars from Tucson, Arizona: Durham vs. Burkard samplers. *Aerobiologia*, 6(2), 136-140. <https://doi.org/10.1007/BF02539105>
- Oliveira, M., Guerner-Moreira, J., Mesquita, M. M., & Abreu, I. (2009). Important phytopathogenic airborne fungal spores in a rural area: incidence of *Botrytis cinerea* and *Oidium* spp. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 16, 197-204. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.annonc.a057902>
- Oliver, M. A., & Webster, R. (2014). A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *Catena*, 113, 56-69. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.006>
- Oteros, J., Bergmann, K.-C., Menzel, A., Damialis, A., Traidl-Hoffmann, C., Schmidt-Weber, C. B., & Buters, J. (2019a). Spatial interpolation of current airborne pollen concentrations where no monitoring exists. *Atmospheric Environment*, 199, 435-442. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2018.11.045>
- Oteros, J., Sofiev, M., Smith, M., Clot, B., Damialis, A., Prank, M., Werchan, M., Wachter, R., Weber, A., Kutzora, S., Heinze, S., Herr, C. E. W., Menzel, A., Bergmann, K.-C., Traidl-Hoffmann, C., Schmidt-Weber, C. B., & Buters, J. T. M. (2019b). Building an automatic pollen monitoring network (ePIN): Selection of optimal sites by clustering pollen stations. *Science of The Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.06.131>
- Oteros, J., Valencia-Barrera, R. M., del Río, S., Vega, A., García-Mozo, H., Galán, C., Gutiérrez, P., Mandrioli, P., & Fernández-González, D. (2017). Concentric Ring Method for generating pollen maps. *Quercus* as case study. *Science of the Total Environment*, 576, 637-645. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.121>
- Pebesma, E., & Bivand, R. S. (2005). Classes and Methods for Spatial Data: the sp Package. *R news*, 5(2), 9-13. ftp://200.236.31.2/CRAN/web/packages/sp/vignettes/intro_sp.pdf
- Pebesma, E. J. (2004). Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Computers & Geosciences*, 30(7), 683-691. <https://doi.org/10.1016/J.CAGEO.2004.03.012>
- Peñuelas, J., Filella, I., Zhang, X., Llorens, L., Ogaya, R., Lloret, F., Comas, P.,

- Estiarte, M., & Terradas, J. (2004). Complex spatiotemporal phenological shifts as a response to rainfall changes. *New Phytologist*, 161(3), 837-846. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01003.x>
- Pérez-Latorre, A. V., & Cabezudo, B. (2002a). La flora y el paisaje vegetal de la provincia de Málaga: Importancia y Conservación. *Jábega*, 90, 25-39. http://www.cedma.com/archivo/jabega_pdf/jabega90_25-39.pdf
- Pérez-Latorre, A. V., & Cabezudo, B. (2002b). Use of monocharacteristic growth forms and phenological phases to describe and differentiate plant communities in Mediterranean-type ecosystems. *Plant Ecology*, 161, 231-249. <https://doi.org/10.1023/A:1023292405621>
- Pérez-Latorre, A. V., & Cabezudo, B. (2012). Phenomorphology and ecomorphological traits in *Abies pinsapo*. A comparison to other Mediterranean species. *Phytocoenologia*, 42(1-2), 15-27. <https://doi.org/10.1127/0340>
- Pérez-Latorre, A. V., Cabezudo, B., Nieto-Caldera, J. M., & Navarro, T. (1996). Caracterización fenológica y ecomorfológica de alcornoques andaluces (málaga, españa). *Anales Jardín Botánico de Madrid*, 54, 554-560.
- Pérez-Latorre, A. V., Galán de Mera, A., Navas, P., Navas, D., Gil, Y., & Cabezudo, B. (1999). Datos sobre la flora y vegetación del Parque Natural de los Alcornocales (Cádiz-Málaga, España). *Acta Botanica Malacitana*, 24, 133-184. <https://doi.org/10.24310/abm.v30i0.7199>
- Pérez-Latorre, A. V., Hidalgo, N., Cabezudo, B., & Martos Martín, J. (2019). *Mapa Biogeográfico de la provincia de Málaga (España)*. Universidad de Málaga, Diputación de Málaga. ISBN: RG.2.2.12851.89129
- Pérez-Latorre, A. V., Navas, P., Navas, D., Gil, Y., & Cabezudo, B. (1998). Datos sobre la flora y vegetación de la Serranía de Ronda (Málaga, España). *Acta Botanica Malacitana*, 23, 149-191. http://www.biolveg.uma.es/abm/Volumenes/vol23/23_PerezLatorreRonda.pdf
- Periáñez, A. (2018, octubre 23). Así han quedado los Baños Árabes de Ronda tras el temporal de lluvia. *ABC Andalucía*. https://sevilla.abc.es/andalucia/malaga/sevi-queda-banos-arabes-ronda-tras-temporal-201810221239_noticia.html
- Pesaresi, S., Galdenzi, D., Biondi, E., & Casavecchia, S. (2014). Bioclimate of Italy: application of the worldwide bioclimatic classification system. *Journal of Maps*, 10(4), 538-553. <https://doi.org/10.1080/17445647.2014.891472>
- Picornell, A., Buters, J., Rojo, J., Traidl-Hoffmann, C., Damialis, A., Menzel, A., Bergmann, K. C., Werchan, M., Schmidt-Weber, C., & Oteros, J. (2019a). Predicting the start, peak and end of the *Betula* pollen season in Bavaria, Germany. *Science of The Total Environment*, 690, 1299-1309. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.06.485>
- Picornell, A., Oteros, J., Trigo, M. M., Gharbi, D., Docampo, S., Melgar, M., Toro, F. J., García-Sánchez, J., Ruiz-Mata, R., Cabezudo, B., & Recio, M. (2019b). Increasing resolution of airborne pollen forecasting at a discrete sampled area



in the southwest Mediterranean Basin. *Chemosphere*, 234, 668-681. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.019>

- Picornell, A., Recio, M., Ruiz-Mata, R., García-Sánchez, J., Cabezudo, B., & Trigo, M. M. (2020). Medium- and long-range transport events of *Alnus* pollen in western Mediterranean. *International Journal of Biometeorology*, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01944-7>
- Polunin, N., Pady, S. M., & Kelly, C. D. (1947). Arctic aerobiology. *Nature*, 160(4077), 876-877. <https://doi.org/10.1038/160876a0>
- Puc, M., & Wolski, T. (2002). *Betula* and *Populus* pollen counts and meteorological conditions in Szczecin, Poland. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 9(1), 65-69.
- QGIS Development Team. (2019). *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation Project.
- Ranzi, A., Lauriola, P., Marletto, V., & Zinoni, F. (2003). Forecasting airborne pollen concentrations: Development of local models. *Aerobiologia*, 19(1), 39-45. <https://doi.org/10.1023/A:1022626107746>
- Recio, M. (2012). *Plantas del Jardín Botánico de la Universidad de Málaga: Gimnospermas*. Servicio de Publicaciones Universidad de Málaga.
- Recio, M., Cabezudo, B., Trigo, M. M., & Toro, F. J. (1998a). Pollen calendar of Malaga (Southern Spain), 1991–1995. *Aerobiologia*, 14(2-3), 101-107. <https://doi.org/10.1007/BF02694193>
- Recio, M., Docampo, S., García-Sánchez, J., Trigo, M. M., Melgar, M., & Cabezudo, B. (2010). Influence of temperature, rainfall and wind trends on grass pollination in Malaga (western Mediterranean coast). *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(7-8), 931-940. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.02.012>
- Recio, M., Picornell, A., Trigo, M. M., Gharbi, D., García-Sánchez, J., & Cabezudo, B. (2018). Intensity and temporality of airborne *Quercus* pollen in the southwest Mediterranean area: Correlation with meteorological and phenoclimatic variables, trends and possible adaptation to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 250-251, 308-318. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.11.028>
- Recio, M., Rodríguez-Rajo, F. J., Jato, V., Trigo, M. M., & Cabezudo, B. (2009). The effect of recent climatic trends on Urticaceae pollination in two bioclimatically different areas in the Iberian Peninsula: Malaga and Vigo. *Climatic Change*, 97(1-2), 215-228. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9620-4>
- Recio, M., & Silva, P. (2018). Estudio fenológico de angiospermas leñosas mediterráneas del Jardín Botánico de la Universidad de Málaga. *Acta Botanica Malacitana*, 43, 5-20. <https://doi.org/10.24310/abm.v43i0.4070>
- Recio, M., Trigo, M. M., Docampo, S., Melgar, M., García-Sánchez, J., Bootello, L., & Cabezudo, B. (2012). Analysis of the predicting variables for daily and weekly fluctuations of two airborne fungal spores: *Alternaria* and

Cladosporium. *International Journal of Biometeorology*, 56(6), 983-991.
<https://doi.org/10.1007/s00484-011-0509-3>

- Recio, M., Trigo, M. M., Toro, F. J., & Cabezudo, B. (1997). Incidencia del polen de *Plantago* en la atmósfera de Málaga y su relación con los parámetros meteorológicos. *Acta Botanica Malacitana*, 22, 103-113.
- Recio, M., Trigo, M. M., Toro, F. J., & Cabezudo, B. (1998b). Incidencia del polen de Chenopodiaceae-Amaranthaceae en la atmósfera de Málaga y su relación con los parámetros meteorológicos. *Acta Botanica Malacitana*, 23, 121.
<https://doi.org/10.24310/abm.v23i0.8555>
- Recio, M., Trigo, M. M., Toro, F. J., & Docampo, S. (2000). Estudio aerobiológico de la localidad de Antequera (Málaga, España): 1998-1999. *Acta Botanica Malacitana*, 25, 165-174.
- Recio, M., Trigo, M. M., Toro, F. J., Docampo, S., García-González, J. J., & Cabezudo, B. (2006). A three-year aeropalynological study in Estepona (southern Spain). *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 13(2), 201-207.
- Resolución de 17 de diciembre de 2018, del Organismo Autónomo Parques Nacionales, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 7 de diciembre de 2018, por el que se aprueba la propuesta final de declaración del Parque Nacional de la Sierra, 1469 (2019). <https://doi.org/BOE-A-2019-228>
- Ribeiro, H., & Abreu, I. (2014). A 10-year survey of allergenic airborne pollen in the city of Porto (Portugal). *Aerobiología*, 30(3), 333-344.
<https://doi.org/10.1007/s10453-014-9331-9>
- Ribeiro, H., Cunha, M., & Abreu, I. (2007). Definition of main pollen season using a logistic model. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 14(2), 259-264.
- Ribeiro, P. J., & Diggle, P. J. (2015). *geoR: Package for Geostatistical Data Analysis An illustrative session* (R package version 1.7-5). <http://www.est.ufpr.br/geoR/geoR.html#help>
- Rivas-Martínez, S., Asensi, A., Diez-Garretas, B., Molero, J., & Valle, F. (1997). Biogeographical Synthesis of Andalusia (Southern Spain). *Journal of Biogeography*, 24(6), 915-928.
- Rivas-Martínez, S., Penas, Á., del Río, S., Díaz González, T. E., & Rivas-Sáenz, S. (2017). Bioclimatology of the Iberian Peninsula and the Balearic Islands. En J. Loidi (Ed.), *The Vegetation of the Iberian Peninsula* (pp. 29-80). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54784-8_2
- Rivas-Martínez, S., & Rivas-Sáenz, S. (2009). *Sistema de Clasificación Bioclimática Mundial*. Centro de Investigaciones Fitosociológicas, España. <http://www.ucm.es/info/cif%0A>
- Rodríguez-Rajo, F. J., Dopazo, A., & Jato, V. (2004). Environmental factors affecting the start of pollen season and concentrations of airborne *Alnus* pollen in two localities of Galicia (NW Spain). *Annals of Agriculture and*

Environmental Medicine, 11(1), 35-44.

- Rodríguez-Rajo, F. J., Iglesias, I., & Jato, V. (2005a). Variation assessment of airborne *Alternaria* and *Cladosporium* spores at different bioclimatical conditions. *Mycological Research*, 109(4), 497-507. <https://doi.org/10.1017/S0953756204001777>
- Rodríguez-Rajo, F. J., Jato, V., & Aira, M. J. (2005b). Relationship between meteorology and *Castanea* airborne pollen. *Belgian Journal of Botany*, 138(2), 129-140.
- Rodríguez-Rajo, F. J., Valencia-Barrera, R. M., Vega-Maray, A. M., Suárez, F. J., Fernández-González, D., & Jato, V. (2017). Prediction of airborne *Alnus* pollen concentration by using ARIMA models. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 13(1), 25-32. <http://www.aaem.pl/Prediction-of-airborne-Alnus-pollen-concentration-by-using-ARIMA-models-,72943,0,2.html>
- Roetzer, T., Wittenzeller, M., Haeckel, H., & Nekovar, J. (2000). Phenology in central Europe - Differences and trends of spring phenophases in urban and rural areas. *International Journal of Biometeorology*, 44(2), 60-66. <https://doi.org/10.1007/s004840000062>
- Rojo, J., Orlandi, F., Pérez-Badia, R., Aguilera, F., Ben Dhiab, A., Bouziane, H., Díaz de la Guardia, C., Galán, C., Gutiérrez-Bustillo, A. M., Moreno-Grau, S., Msallem, M., Trigo, M. M., & Fornaciari, M. (2016). Modeling olive pollen intensity in the Mediterranean region through analysis of emission sources. *Science of the Total Environment*, 551-552, 73-82. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.193>
- Rojo, J., & Pérez-Badia, R. (2014). Effects of topography and crown-exposure on olive tree phenology. *Trees*, 28, 449-459. <https://doi.org/10.1007/s00468-013-0962-1>
- Rojo, J., & Pérez-Badia, R. (2015). Spatiotemporal analysis of olive flowering using geostatistical techniques. *Science of the Total Environment*, 505, 860-869. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.022>
- Rojo, J., Picornell, A., & Oteros, J. (2019). AeRobiology: the computational tool for biological data in the air. *Methods in Ecology and Evolution*, 10, 1371-1376. <https://doi.org/10.1111/2041-210x.13203>
- Rojo, J., Rapp, A., Lara, B., Fernández-González, F., & Pérez-Badia, R. (2015). Effect of land uses and wind direction on the contribution of local sources to airborne pollen. *Science of The Total Environment*, 538, 672-682. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969715305775>
- Rolph, G., Stein, A., & Stunder, B. (2017). Real-time Environmental Applications and Display sYstem: READY. *Environmental Modelling & Software*, 95, 210-228. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815217302360?via%3Dihub>
- Rosemartin, A. H., Crimmins, T. M., Enquist, C. A. F., Gerst, K. L., Kellermann, J. L., Posthumus, E. E., Denny, E. G., Guertin, P., Marsh, L., & Weltzin, J. F.



- (2014). Organizing phenological data resources to inform natural resource conservation. *Biological Conservation*, 173, 90-97. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.07.003>
- Ruiz-Valenzuela, L., & Aguilera, F. (2018). Trends in airborne pollen and pollen-season-related features of anemophilous species in Jaen (south Spain): A 23-year perspective. *Atmospheric Environment*, 180, 234-243. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.03.012>
- Sabariego, S., Cuesta, P., Fernández-González, F., & Pérez-Badia, R. (2012). Models for forecasting airborne Cupressaceae pollen levels in central Spain. *International Journal of Biometeorology*, 56(2), 253-258. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0423-8>
- Sánchez de Lorenzo Cáceres, J. M. (Coord.) (2000). *Flora Ornamental Española* (Junta de Andalucía Consejería de Agricultura y Pesca, Ediciones Mundi-Prensa, & Asociación Española de Parques y Jardines Públicos (Eds.)). Junta de Andalucía.
- Sánchez Mesa, J. A., Brandao, R., Lopes, L., & Galan, C. (2005). Correlation between pollen counts and symptoms in two different areas of the Iberian Peninsula: Cordoba (Spain) and Evora (Portugal). *Journal of Investigational Allergology and Clinical Immunology*, 15(2), 112-116.
- Sarvas, R. (1972). Investigations on the annual cycle of development of forest trees active period. *Metsantutkimuslaitoksen Julkaisuja*, 76(3), 1-110.
- Šauliene, I., & Veriankaite, L. (2006). Application of backward air mass trajectory analysis in evaluating airborne pollen dispersion. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 14(3), 113-120. <https://doi.org/10.1080/16486897.2006.9636887>
- Seneviratne, S. I., Lüthi, D., Litschi, M., & Schär, C. (2006). Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature*, 443(7108), 205-209. <https://doi.org/10.1038/nature05095>
- Sheffield, J., Wood, E. F., & Roderick, M. L. (2012). Little change in global drought over the past 60 years. *Nature*, 491(7424), 435-438. <https://doi.org/10.1038/nature11575>
- Sherry, R. A., Zhou, X., Gu, S., Arnone, J. A., Johnson, D. W., Schimel, D. S., Verburg, P. S. J., Wallace, L. L., & Luo, Y. (2011). Changes in duration of reproductive phases and lagged phenological response to experimental climate warming. *Plant Ecology & Diversity*, 4(1), 23-35. <https://doi.org/10.1080/17550874.2011.557669>
- Skjøth, C. A., Baker, P., Sadyś, M., & Adams-Groom, B. (2015). Pollen from alder (*Alnus* sp.), birch (*Betula* sp.) and oak (*Quercus* sp.) in the UK originate from small woodlands. *Urban Climate*, 14, 414-428. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.09.007>
- Smith, M., Emberlin, J., Stach, A., Czarnecka-Operacz, M., Jenerowicz, D., & Silny, W. (2007). Regional importance of *Alnus* pollen as an aeroallergen: a comparative study of *Alnus* pollen counts from Worcester [UK] and Poznan [Poland]. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 14, 123-128.

<http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.agro-article-c7b219d7-d3a5-4ad6-8e72-58efbd9c6593>

- Sofiev, M., Galperin, M., & Genikhovich, E. (2008). A Construction and Evaluation of Eulerian Dynamic Core for the Air Quality and Emergency Modelling System SILAM. En *Air Pollution Modeling and Its Application XIX* (pp. 699-701). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8453-9_94
- Sofiev, M., Siljamo, P., Ranta, H., & Rantio-Lehtimäki, A. (2006). Towards numerical forecasting of long-range air transport of birch pollen: Theoretical considerations and a feasibility study. *International Journal of Biometeorology*, 50(6), 392-402. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0027-x>
- Sork, V. L., & Smouse, P. E. (2006). Genetic analysis of landscape connectivity in tree populations. *Landscape Ecology*, 21(6), 821-836. <https://doi.org/10.1007/s10980-005-5415-9>
- Sozinova, O., & Ariatti, A. (2019). *International Association for Aerobiology*. <https://sites.google.com/site/aerobiologyinternational/>
- Spieksma, F. (1991). Regional European pollen calendars. En G. D'Amato, F. T. Spieksma, & S. Bonini (Eds.), *Allergenic pollen and pollinosis in Europe* (pp. 49-65). Blackwell Scientific.
- Spieksma, F. T. M. (1992). Allergological aerobiology. *Aerobiologia*, 8(1), 5-8. <https://doi.org/10.1007/BF02291320>
- Stach, A., Smith, M., Skjøth, C. A., & Brandt, J. (2007). Examining Ambrosia pollen episodes at Poznań (Poland) using back-trajectory analysis. *International Journal of Biometeorology*, 51(4), 275-286. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0068-1>
- Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J. B., Cohen, M. D., & Ngan, F. (2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2059-2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Stix, E., & Ferretti, M. L. (1974). Pollen calendars of three locations in Western Germany. En J. Charpin, R. Surinyach, & A. W. Frankland (Eds.), *Atlas European des Pollens Allergisants* (pp. 85-94).
- Subba Reddi, C., & Reddi, N. S. (2009). *Relation of Pollen Release to Pollen Concentrations in Air*. <https://doi.org/10.1080/00173138509429921>
- Templado, J. (2014). Future trends of mediterranean biodiversity. En S. Goffredo & Z. Dubinsky (Eds.), *The Mediterranean Sea: Its History and Present Challenges* (pp. 479-498). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6704-1_28
- Title, P. O., & Bemmels, J. B. (2018). ENVIREM: an expanded set of bioclimatic and topographic variables increases flexibility and improves performance of ecological niche modeling. *Ecography*, 41, 291-307.
- Tormo-Molina, R., Gonzalo-Garijo, M. A., Silva-Palacios, I., & Muñoz-Rodríguez, A. F. (2010). General trends in airborne pollen production and pollination periods at a Mediterranean site (Badajoz, Southwest Spain). *J Investig Allergol*

Clin Immunol, 20(7), 567-574.
<https://pdfs.semanticscholar.org/c2d5/efd4505831e094f7300834c10199275168da.pdf>

- Tormo-Molina, R., Silva-Palacios, I., Gonzalo Garijo, Á., Moreno, A., Pérez, R., & Fernández-Rodríguez, S. (2011). Phenological records as a complement to aerobiological data. *International Journal of Biometeorology*, 55(1), 51-65. <https://doi.org/10.1007/s00484-010-0308-2>
- Tormo-Molina, R., Silva Palacios, I., Muñoz Rodríguez, A. F., Tavira Muñoz, J., & Moreno Corchero, A. (2001). Environmental factors affecting airborne pollen concentration in anemophilous species of *Plantago*. *Annals of Botany*, 87(1), 1-8. <https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1292>
- Trigo, M. M., Cabezudo, B., Recio, M., & Toro, F. J. (1996). Annual, daily and diurnal variations of Urticaceae airborne pollen in Málaga (Spain). *Aerobiologia*, 12(1), 85-90. <https://doi.org/10.1007/bf02248131>
- Trigo, M. M., Jato, V., Fernández, D., & Galán, C. (2008). *Atlas aeropalínológico de España*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de León. Depósito legal: LE-568-2008
- Trigo, M. M., Melgar, M., García-Sánchez, J., Recio, M., Docampo, S., & Cabezudo, B. (2007). *El polen en la atmósfera de Vélez-Málaga*. Concejalía de Medio Ambiente. Ayuntamiento de Vélez-Málaga. ISBN: 978-84-88430-14-4
- Trigo, M. M., Recio, M., Toro, F. J., & Cabezudo, B. (1997). Intradial fluctuations in airborne pollen in Málaga (S. Spain): A quantitative method. *Grana*, 36(1), 39-43. <https://doi.org/10.1080/00173139709362588>
- Tubiello, F. N., Donatelli, M., Rosenzweig, C., & Stockle, C. O. (2000). Effects of climate change and elevated CO₂ on cropping systems: Model predictions at two Italian locations. *European Journal of Agronomy*, 13(2-3), 179-189. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00073-3](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00073-3)
- Valdés, B., Díez, M. J., & Fernández, I. (Eds.). (1987a). *Atlas polínico de Andalucía Occidental*. Instituto de Desarrollo Regional de la Universidad de Sevilla y Excma. Diputación de Cádiz. <https://doi.org/SE-640-1987>
- Valdés, B., Talavera, S., & Fernández-Galiano, E. (Eds.). (1987b). *Flora Vascular de Andalucía Occidental*. KETRES Editora S.A. Depósito legal: B-16.640-1987
- Valdivieso, T., Pimpão, M., Trindade, C. S., & Varela, M. C. (2017). Reproductive phenology of *Pinus pinea*. En I. Carrasquinho, A. C. Correia, & S. Mutke (Eds.), *Mediterranean pine nuts from forests and plantations (Options Méditerranéennes: Série A. Séminaires Méditerranéens)* (Vol. 122, pp. 63-68). CIHEAM.
- Valencia-Barrera, R. M., Comtois, P., & Fernández-González, D. (2002). Bioclimatic indices as a tool in pollen forecasting. *International Journal of Biometeorology*, 46(4), 171-175. <https://doi.org/10.1007/s00484-002-0138-y>
- Vara, A., Fernández-González, M., Aira, M. J., & Rodríguez-Rajo, F. J. (2016).

Fraxinus pollen and allergen concentrations in Ourense (South-western Europe). *Environmental Research*, 147, 241-248. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.02.014>

Velasco-Jiménez, M. J., Alcázar, P., Díaz de la Guardia, C., Trigo, M. M., De Linares, C., Recio, M., & Galán, C. (2020). Pollen season trends in winter flowering trees in South Spain. *Aerobiologia*, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10453-019-09622-x>

Velasco-Jiménez, M. J., Alcázar, P., Valenzuela, L. R., Gharbi, D., Díaz de la Guardia, C., & Galán, C. (2018). *Pinus* pollen season trend in South Spain. *Plant Biosystems*, 152(4), 657-665. <https://doi.org/10.1080/11263504.2017.1311962>

Velasco-Jiménez, M. J., Alcázar, P., Valle, A., Trigo, M. M., Minero, F., Domínguez-Vilches, E., & Galán, C. (2014). Aerobiological and ecological study of the potentially allergenic ornamental plants in south Spain. *Aerobiologia*, 30(1), 91-101. <https://doi.org/10.1007/s10453-013-9311-5>

Velasco-Jiménez, M. J., Arenas, M., Alcázar, P., Galán, C., & Domínguez-Vilches, E. (2015). Aerobiological and phenological study of *Pistacia* in Córdoba city (Spain). *Science of the Total Environment*, 505, 1036-1042. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.017>

Venables, W. N., & Ripley, B. D. (2002). *Modern Applied Statistics with S* (4.^a ed.). Springer. <https://doi.org/978-0-387-95457-8>

Vogel, B., Vogel, H., Bäumer, D., Bangert, M., Lundgren, K., Rinke, R., & Stanelle, T. (2009). The comprehensive model system COSMO-ART – Radiative impact of aerosol on the state of the atmosphere on the regional scale. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(22), 8661-8680. <https://doi.org/10.5194/acp-9-8661-2009>

Wang, S., Wang, C., Duan, J., Zhu, X., Xu, G., Luo, C., Zhang, Z., Meng, F., Li, Y., & Du, M. (2014). Timing and duration of phenological sequences of alpine plants along an elevation gradient on the Tibetan plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189-190, 220-228. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.01.021>

Ward, J. H. (1963). Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, 58(301), 236-244. <https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>

Wielgolaski, F. E. (1999). Starting dates and basic temperatures in phenological observations of plants. *International Journal of Biometeorology*, 42(3), 158-168. <https://doi.org/10.1007/s004840050100>

Wilczek, A. M., Burghardt, L. T., Cobb, A. R., Cooper, M. D., Welch, S. M., & Schmitt, J. (2010). Genetic and physiological bases for phenological responses to current and predicted climates. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365, 3129-3147. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0128>

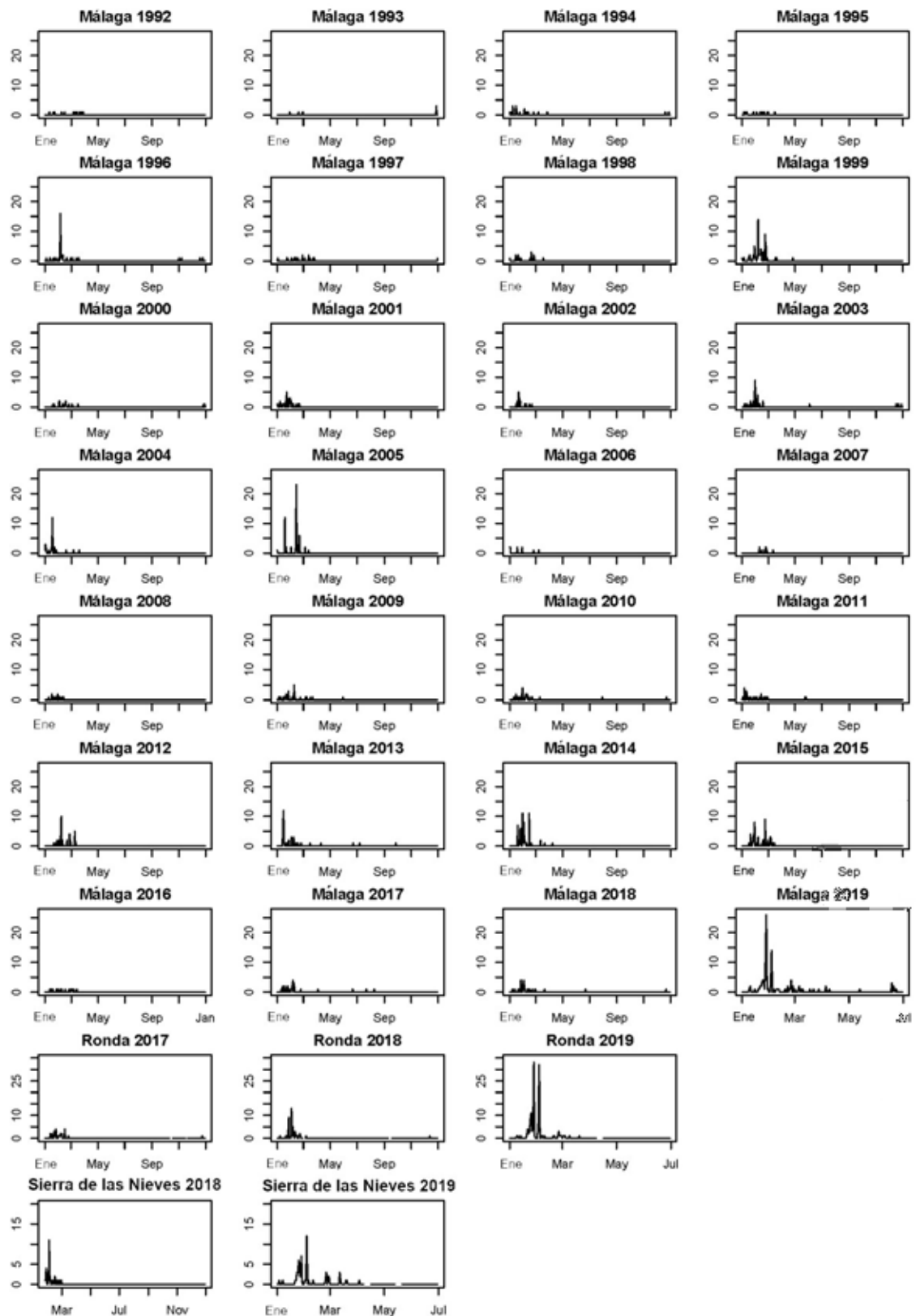
Zhang, Z., Gale, S. W., Li, J. H., Fischer, G. A., Ren, M. X., & Song, X. Q. (2019). Pollen-mediated gene flow ensures connectivity among spatially discrete sub-

populations of *Phalaenopsis pulcherrima*, a tropical food-deceptive orchid. *BMC Plant Biology*, 19(1), 1-16. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-2179-y>

Ziska, L. H., Makra, L., Harry, S. K., Bruffaerts, N., Hendrickx, M., Coates, F., Saarto, A., Thibaudon, M., Oliver, G., Damialis, A., Charalampopoulos, A., Vokou, D., Heiðmarsson, S., Guðjohnsen, E., Bonini, M., Oh, J. W., Sullivan, K., Ford, L., Brooks, G. D., ... Crimmins, A. R. (2019). Temperature-related changes in airborne allergenic pollen abundance and seasonality across the northern hemisphere: a retrospective data analysis. *The Lancet Planetary Health*, 3, 124-131. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(19\)30015-4](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(19)30015-4)

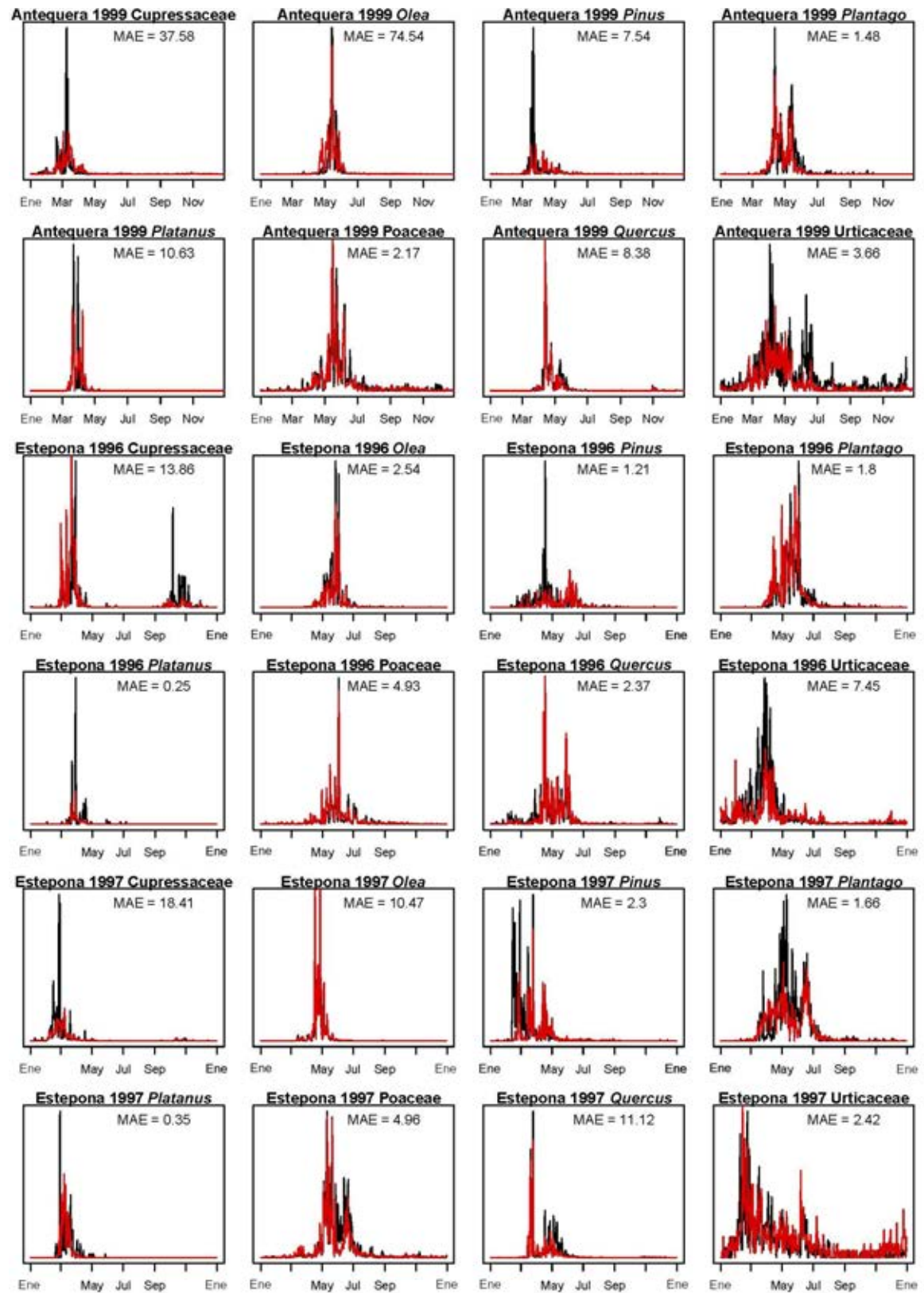
8. Anexos

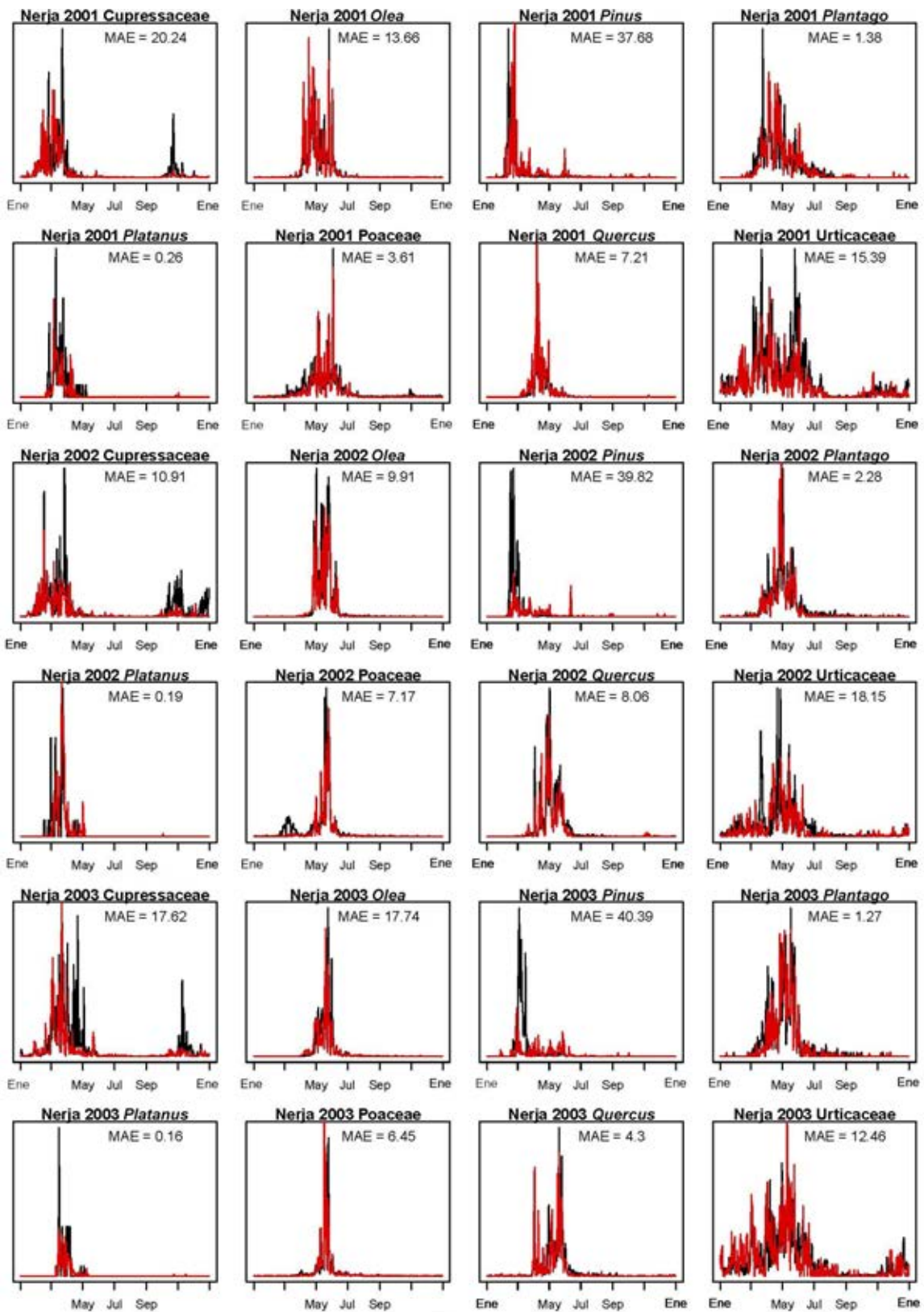
8.1. Anexo A. Concentraciones de polen de *Alnus* en la provincia de Málaga (1992-2019)

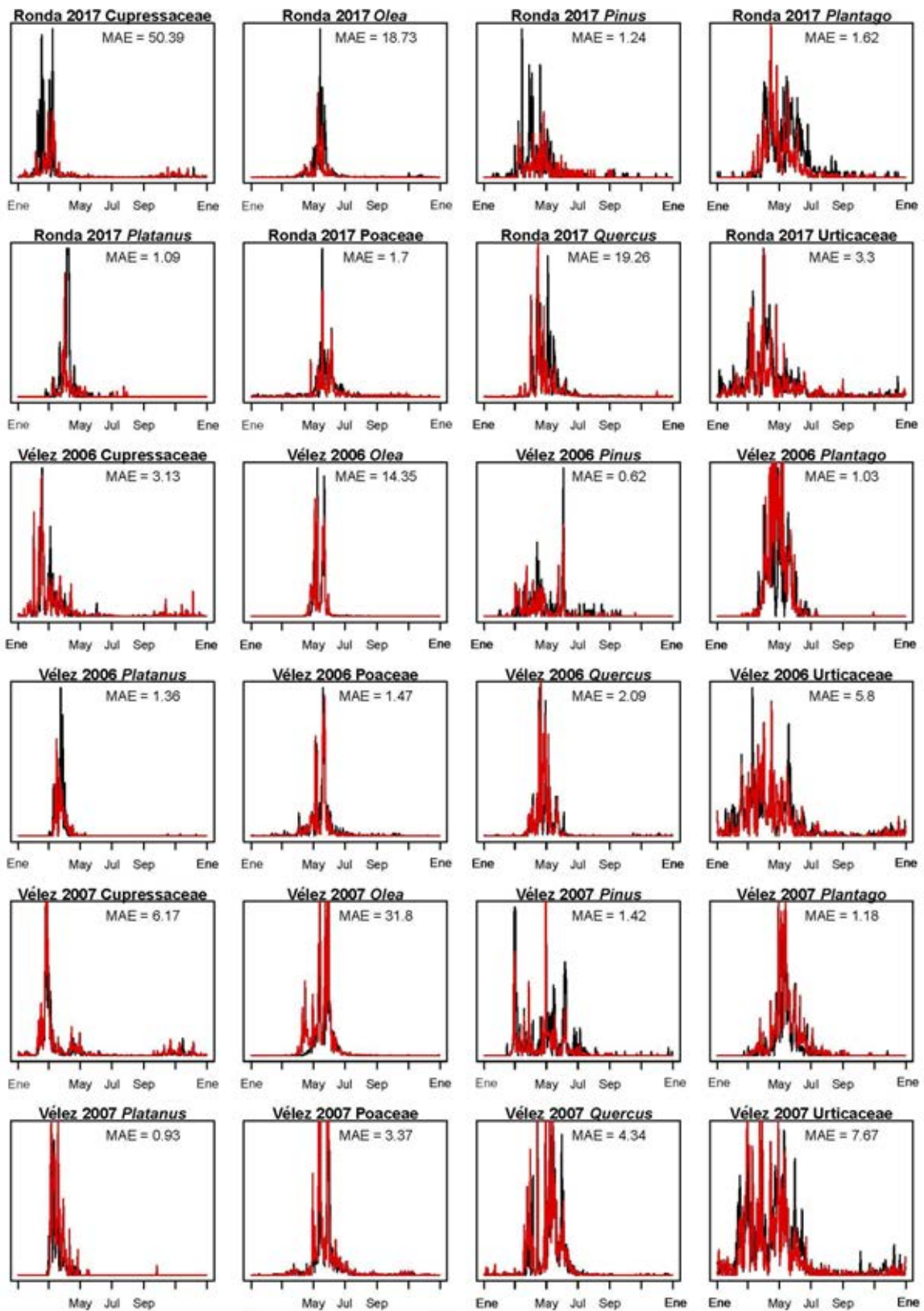


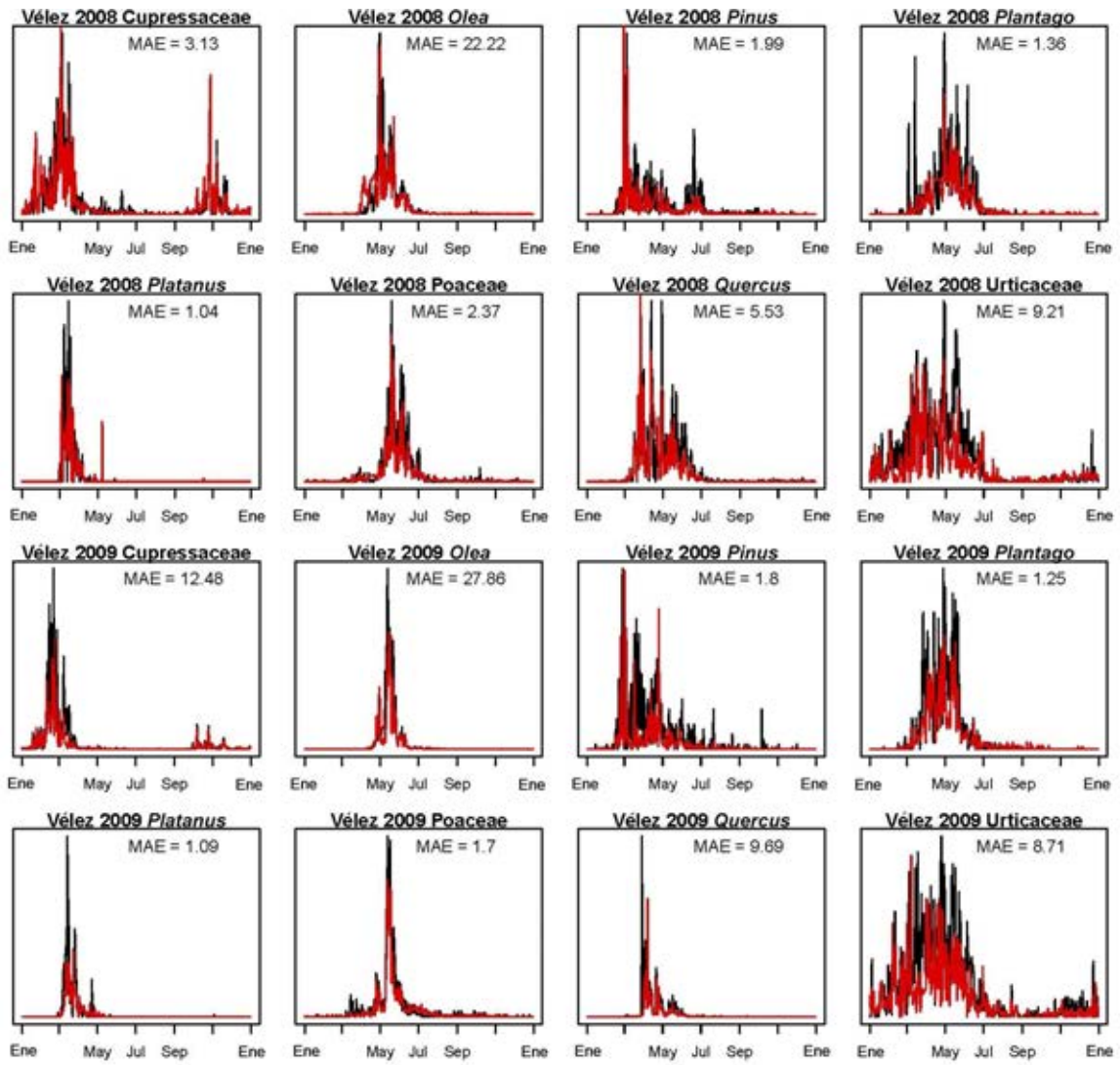
Concentraciones de polen medias diarias expresadas en granos de polen/m³.

8.2. Anexo B. Resultados de la validación interna de los modelos inter-localidades









MAE: Error medio absoluto (*Mean Absolute Error*).

9. PUBLICACIONES CIENTÍFICAS



Medium- and long-range transport events of *Alnus* pollen in western Mediterranean

Antonio Picornell¹ · Marta Recio¹ · Rocío Ruiz-Mata¹ · Jose García-Sánchez² · Baltasar Cabezudo¹ · María del Mar Trigo¹

Received: 12 March 2020 / Revised: 13 May 2020 / Accepted: 26 May 2020
© ISB 2020

Abstract

Alnus pollen has been frequently detected in the atmosphere of different airborne sampling sites of Southern Spain. However, *Alnus* sp. populations are very scarce and fragmented in the area, being restricted to a few river valleys in the southwest, and other further away regions of the Iberian Peninsula. This leads to think that the airborne pollen detected could be mainly the result of a medium- or long-distant transport. So, the aim of this study was to characterize the annual patterns of airborne *Alnus* pollen detected at three different locations of Malaga province, as well as to determine its possible origin, the pollen dispersion potential of these *Alnus* isolated populations, and their possible reproductive connectivity. Pollen sampling was conducted by means of three Hirst-type volumetric pollen traps. Samples were mounted and counted following the recommendations of the Spanish Aerobiology Network and the European Aeroallergen Society. The possible pollen sources were detected by means of a combination of meteorological information and backward air trajectories analysis. A high inter-annual variability in the annual pollen integrals was found in all the stations, favouring certain meteorological conditions a long-range transport and, therefore, causing the high concentrations detected in some specific days. *Alnus* pollen seems to have a heterogeneous origin with prevalence of the long-distant transport, which would suggest a possible reproductive connection among distant populations.

Keywords Aerobiology · Alder · HYSPLIT · Protected area · Long-term transport · Airborne pollen

Introduction

Alnus Mill. pollen type has been reported to be one of the main causes of pollinosis in central and northern Europe. It also constitutes a health risk for allergic people living in the north-west part of the Iberian Peninsula, where these trees are very common (Iglesias et al. 2003; Smith et al. 2007; D'Amato et al. 2007; Gehrig et al. 2015; Ghasemifard et al. 2020). Due to its early pollination period and its cross-reactivity with the pollen of other species of Fagales (such as *Betula* L. or

Quercus L.), *Alnus* pollen can set the start of the allergic sensitization in sensible population, increasing the immunological response to pollen of other spring flowering Fagales (Smith et al. 2007; Emberlin et al. 2007; Hauser et al. 2011; Gehrig et al. 2015; Skjøth et al. 2015; Kasprzyk and Borycka 2019).

The genus *Alnus* is represented by three species in the Iberian Peninsula: *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., *Alnus cordata* (Loisel.) Duby, and *Alnus lusitanica* Vít, Douda & Mandák, according to recent molecular studies (Castroviejo et al. 1990; López González 2001; Vít et al. 2017). In the Iberian Peninsula, all these species are riverside trees that prefer siliceous soils and abundant water availability, being mainly distributed in the north, central, and western areas (Castroviejo et al. 1990; Anthos 2011; Vít et al. 2017; GBIF.org. 2019). Their soil and water requirements make them not suitable for being used as ornamental trees in the area. Nevertheless, there are some disperse natural populations distributed in the south (Pérez Latorre and Cabezudo 2006; Blanca et al. 2011; GBIF.org. 2019). Beside this, other previous aerobiology studies detected *Alnus* pollen in the atmosphere of some

Electronic supplementary material The online version of this article (<https://doi.org/10.1007/s00484-020-01944-7>) contains supplementary material, which is available to authorized users.

✉ Antonio Picornell
picornell@uma.es

¹ Department of Botany and Plant Physiology, University of Malaga, Campus de Teatinos s/n, E-29071 Malaga, Spain

² Central Services of Support to Investigation (SCAI), University of Malaga, Campus de Teatinos s/n, E-29071 Malaga, Spain



Increasing resolution of airborne pollen forecasting at a discrete sampled area in the southwest Mediterranean Basin

A. Picornell ^a, J. Oteros ^b, M.M. Trigo ^a, D. Gharbi ^a, S. Docampo Fernández ^a, M. Melgar Caballero ^a, F.J. Toro ^a, J. García-Sánchez ^c, R. Ruiz-Mata ^a, B. Cabezudo ^a, M. Recio ^{a,*}

^a Department of Plant Biology, University of Malaga, Campus de Teatinos s/n, Malaga, E-29071, Spain

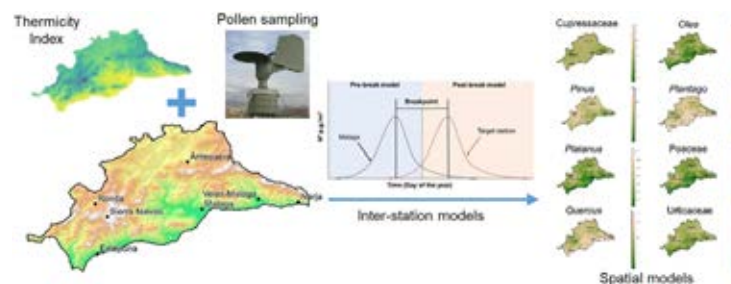
^b Center of Allergy & Environment (ZAUM), Member of the German Center for Lung Research (DZL), Technische Universität München/Helmholtz Center, Munich, Germany

^c Central Services of Support to Investigation (SCAI), University of Malaga, Campus de Teatinos s/n, Malaga, E-29071, Spain

HIGHLIGHTS

- Airborne pollen levels can be estimated at unsampled locations.
- Databases of sampling stations can be completed with data from neighbour stations.
- The Compensated Thermicity Index can be used to elaborate atmospheric pollen maps.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Received 25 February 2019

Received in revised form

27 May 2019

Accepted 2 June 2019

Available online 5 June 2019

Handling Editor: Dr. R Ebinghaus

Keywords:

Aerobiology
Kriging techniques
Pollen maps
Modelling
Spatial interpolation
Phenology

ABSTRACT

Daily fluctuations of the airborne pollen concentrations produce variations on symptomatology in allergic population. Such fluctuations are influenced by local vegetal coverage, flowering phenology, geography and climatology. Since 1991, airborne pollen of Malaga province (southern Spain) has been monitored in 7 different locations. Malaga station has been kept operational uninterruptedly throughout the studied period, while the rest of the stations only worked in periods of 2–4 years. Weekly, its pollen information is updated online to inform the population in order to prevent allergic diseases. Increasing the spatial resolution of pollen information would be very useful for allergic population living at unsampled locations. Due to the impossibility of keeping operational a high number of pollen stations covering the whole province of Malaga, the aim of this study is to create spatial models to extrapolate and forecast the pollen concentrations to Malaga province by using the concentrations registered at the capital as unique input. To do so, the relationships obtained between the airborne pollen concentrations detected at Malaga city and those detected at the other stations have been used to elaborate models for the main pollen types registered at the province. These models were spatially interpolated all over the province by using co-kriging techniques and the Compensated Thermicity Index as covariable. As result of this work, pollen distribution of the 8 most prevalent taxa has been depicted all over the whole Malaga province and an allergy alert system has been set up to extrapolate pollen information from Malaga to the whole province.

© 2019 Elsevier Ltd. All rights reserved.

* Corresponding author. Departamento de Biología Vegetal, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos s/n, Málaga, E-29071, Spain.

E-mail address: martarc@uma.es (M. Recio).



Preliminary study of the atmospheric pollen in Sierra de las Nieves Natural Park (Southern Spain)

Antonio Picornell · Marta Recio · M^a del Mar Trigo · Baltasar Cabezudo

Received: 13 December 2018 / Accepted: 7 May 2019
© Springer Nature B.V. 2019

Abstract Sierra de las Nieves is a Natural Park and a Biosphere Reserve located in Southern Spain. This protected area has a high diversity of ecosystems with abundant endangered species which has led to be proposed as a National Park. In January 2018, a pollen trap was installed inside this Natural Park in order to determine the atmospheric pollen behaviour of the main taxa registered during a whole year. Additionally, the results were compared with those registered in the urban and rural stations of Malaga and Ronda, respectively, during the same period. The samplings were made by means of a Hirst-type volumetric pollen trap, and the samples obtained were mounted and counted according to the methodology proposed by the Spanish Aerobiology Network. The highest amount and diversity of atmospheric pollen in the Natural Park was detected during the spring months. Statistical significant differences were found, regarding daily total pollen concentrations, between Sierra de las Nieves (Natural Park) and Malaga (urban city), and between Ronda (rural city) and Malaga. These differences were particularly detected for some pollen types such as *Quercus*. In general, the start of the main pollen season and the maximum concentration peak of the major pollen types occurred later in Sierra de las

Nieves than in Ronda and Malaga. The qualitative and quantitative differences between Sierra de las Nieves and the others nearby locations can be explained by the differences in land use, altitude, climatic characteristics, as well as the distance between the aerobiological stations and the pollen emission sources.

Keywords Protected area · Diversity · Phenology

1 Introduction

Sierra de las Nieves is a Natural Park and a Biosphere Reserve located in Southern Spain. This protected area has a high diversity of ecosystems with abundant endangered species (Cabezudo et al. 1998, 2005) which has led to be proposed as National Park. Two of the most emblematic species, *Abies pinsapo* Boiss. and *Quercus alpestris* Boiss., present anemophilous pollination strategies. Since 1991, the Aerobiology research team of the University of Malaga has been sampling and studying airborne pollen in different cities of the Malaga province. Nevertheless, a pollen trap has never been installed inside this Natural Park for a continuous sampling process. In order to complete this missing information, a pollen trap was installed in Sierra de las Nieves Natural Park on 24th January 2018. The objectives of this study were to determine the atmospheric pollen behaviour of the

A. Picornell · M. Recio (✉) · M. d. M. Trigo · B. Cabezudo
Department of Plant Biology, Faculty of Sciences,
University of Malaga, 29071 Malaga, Spain
e-mail: martarc@uma.es



APPLICATION

AeRobiology: The computational tool for biological data in the air

Jesús Rojo^{1,2}  | Antonio Picornell³ | Jose Oteros²

¹Institute of Environmental Sciences (Botany), University of Castilla-La Mancha, Toledo, Spain

²Center of Allergy & Environment (ZAUM), Member of the German Center for Lung Research (DZL), Technical University of Munich/Helmholtz Center, Munich, Germany

³Department of Plant Biology, University of Malaga, Malaga, Spain

Correspondence

Jesús Rojo
Email: jesus.rojo.ubeda@gmail.com

Funding information

University of Castilla-La Mancha [UCLM]; University of Malaga [UMA]; Zentrum Allergie und Umwelt [ZAUM]; Ministry of Education, Culture and Sport of Spain, Grant/Award Number: FPU15/01668; Helmholtz Zentrum Munich of Germany, Grant/Award Number: PFP II 2018-2020

Handling Editor: Samantha Price

Abstract

1. Aerobiological databases are constantly increasing. Many of them contain long and extensive time series of data which are very difficult and tedious to manage.
2. The development of new real-time automatic sampling devices also requires new tools to reduce time of calculations and data management. In this sense, the *AeRobiology* R package has been implemented to accelerate and facilitate these tasks.
3. This package was structured in three sections based on (a) the checking of the database, (b) calculation of the main aerobiological indexes and (c) visualization of the results.
4. The *AeRobiology* package contains numerous functions which, in conjunction, solve the main general tasks that scientists must assume for the analysis of the biological data.
5. The package is freely distributed under GNU General Public License and can directly be installed from CRAN (<http://cran.r-project.org/>). The reference manual is available at <https://cran.r-project.org/web/packages/AeRobiology>. Contact: aerobiology.package@gmail.com.

KEYWORDS

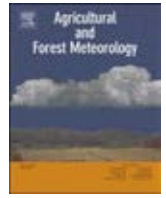
aerobiology, automation, bioaerosols, bioinformatics, computational biology, pollen diversity, R programming

1 | INTRODUCTION

The analysis of the biotic content of the troposphere is very interesting from ecological, agronomic and medical points of view (Oteros et al., 2019; Recio et al., 2018; Romero-Morte, Rojo, Rivero, Fernández-González, & Pérez-Badía, 2018). AeRobiology is the scientific field based on the study of abundance and dynamics of bioaerosols (pollen, spore, bacteria, virus ...) in the air. Different devices have been used all over the world for monitoring airborne biological particles, but during the last decades a standardized methodology has been established in Europe based on the use of Hirst-type volumetric traps (Buters et al., 2018; Galán et al., 2014). The foundation of the aerobiological monitoring networks in Europe and other parts of the world during the recent

decades has increased the amount of scientific publications related to aerobiological topics (Beggs, Šikoparija, & Smith, 2017).

New aerobiological methods with automatic sampling devices have been developed over the last years and new devices are under improvement (Crouzy, Stella, Konzelmann, Calpini, & Clot, 2016; Kawashima et al., 2017; Oteros et al., 2015). Such novel techniques will require new methods for analysing the huge amount of real-time aerobiological data provided (Ghitarrini et al., 2018). In any case, conventional and real-time methods need faster techniques for analysing the aerobiological data. Programming in an environment as R Software (R Core Team, 2018) is an efficient solution to interpret the results from the raw data (e.g., Big Data analysis, generation of reports or developing forecasting models). In addition,



Intensity and temporality of airborne *Quercus* pollen in the southwest Mediterranean area: Correlation with meteorological and phenoclimatic variables, trends and possible adaptation to climate change

M. Recio^{a,*}, A. Picornell^a, M.M. Trigo^a, D. Gharbi^a, J. García-Sánchez^b, B. Cabezudo^a

^a Department of Plant Biology, University of Malaga, Campus de Teatinos, Malaga, E-29071, Spain

^b Central Services of Support to Investigation (SCAI), University of Malaga, Campus de Teatinos, Malaga, E-29071, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:

Aerobiology
Pollen
Quercus
Mediterranean basin
Meteorology
Phenology
Correlations
Trends
Climate change
Adaptation

ABSTRACT

This paper deals with aerobiological analyses realised during last 25 years in the atmosphere of Malaga, a coastal city located in the southwest of the Mediterranean Basin. Air sampling was performed by means of 7-day recording volumetric pollen and spore traps, and pollen grains were counted with the aid of a light microscope, according to the methodology proposed by the Spanish Aerobiology Network. Pollen data were expressed as number of pollen grains per cubic metre of air. A peak in *Quercus* pollen production approximately every four years was detected, coinciding with drought periods. Although the natural vegetation of the studied area has been altered by urban growth and reforestation with pines, it is still represented by a disperse natural population of cork oak, holm oak and kermes oak (predominantly located to the northwest and northeast of the city). In this period the seasonal behaviour of anemophilous pollination of *Quercus* was studied, along with the relation between its intensity (pollen production) or temporality (phenophase of flowering) and meteorological or climatic variables. Also a study of trends in production and phenology of flowering was carried out. The annual intensity of anemophilous pollination of *Quercus* was significantly associated with the meteorological conditions of each spring, with the same parameters involved and in the same way as were seen on the daily and weekly scale (positive correlation with temperature and insolation, and negative with precipitation and relative humidity). The tendency for temperature and atmospheric aridity to increase is probably the cause of the trend observed in the spring *Quercus* pollen production to increase in the western Mediterranean. The temporality of *Quercus* anemophilous pollination (start date, peak date, end date and duration) changes each year and is positively associated with accumulated temperature and sun hours from 1st January until the dates in question. An accumulation of approximately 796 °C above the 9 °C threshold temperature from 1st January is necessary to trigger the start of the flowering period. We conclude that the effect of climatic change is mainly reflected in the pollination intensity of woody anemophilous species, which, in turn, have adapted their flowering time (phenology) to climate change. It is important to remember that climate change is leading to more arid conditions and that Mediterranean plants are adapted to this macrobioclimate (Mediterranean), which is characterized by a long dry period and high temperatures.

1. Introduction

Mediterranean forest and “dehesas” (traditional, semi-natural, man-made systems present in the Iberian Peninsula) (Gómez-Casero et al., 2007) represent the natural and seminatural characteristic vegetation of Andalusia (south of Spain). The dominant tree species of these forests and dehesas mainly belongs to *Quercus* genus. These natural forests are characterized by high biological diversity (flora and fauna) and constitute one of the most diverse ecosystems in Europe, hence the interest in conserving these forests. In addition, the presence of trees of *Quercus*

species in these forests indicate ecological maturity, as they are responsible for maintaining the physical-chemical and microclimatic characteristics of these ecosystems.

The Mediterranean Basin is considered as a hot spot of biodiversity worldwide (Médali and Quézel, 1999). The south of the Iberian Peninsula is characterized by its strategic setting, between two seas and between two continents, with a particular geological and biological history that has decisively influenced the present day diversity observed. The flora and vegetation of this part of the western Mediterranean is a consequence of the adaptation to climatic, geological,

* Corresponding author at: Departamento de Biología Vegetal, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos s/n, Málaga, E-29071, Spain.
E-mail address: martarc@uma.es (M. Recio).

