



**FACULTAD DE FARMACIA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE**

TRABAJO FIN DE GRADO

**ESPORAS FÚNGICAS ALERGÉNICAS EN EL
AMBIENTE EXTERIOR. Evidencias sobre los impactos del
cambio climático en la aeromicroflora atmosférica.**

Autor: Sergio Rodríguez Guerrero
Tutor: Adela Montserrat Gutiérrez Bustillo
Convocatoria: Junio 2018

ÍNDICE

RESUMEN	3
INTRODUCCIÓN	3
OBJETIVOS	5
METODOLOGÍA	5
RESULTADOS	6
1. Diversidad de esporas fúngicas atmosféricas	6
<i>Alternaria</i>	6
<i>Cladosporium</i>	7
2. Niveles atmosféricos	9
3. Estacionalidad	13
4. Factores que influyen en la concentración de esporas en el aire	15
5. Evidencias sobre el impacto del cambio climático en la aeromicoflora	16
CONCLUSIONES	17
BIBLIOGRAFÍA	18

RESUMEN

Las esporas fúngicas son uno de los principales responsables de los trastornos alérgicos ocasionados por inhalación de aeroalérgenos, junto al polen. *Alternaria* y *Cladosporium* son los dos tipos de esporas más importantes desde el punto de vista sanitario y también los que ha recibido más atención y cuentan con mayor número de estudios publicados. Por ellos conocemos los niveles de estas esporas en la atmósfera, que presentan amplias variaciones geográficas y estacionales. Los meses centrales del año son los que presentan una mayor cantidad de esporas en el aire. Los países mediterráneos poseen picos en primavera y otoño, mientras que en zonas menos cálidas se sitúan en verano. La temperatura es el factor que más condiciona la presencia de esporas atmosféricas, seguida de la humedad relativa. El cambio climático puede tener la capacidad de producir alteraciones en la composición de la aeromicoflora, ya que puede afectar tanto al crecimiento del hongo, como a la esporulación y a la dispersión de sus esporas. Las publicaciones al respecto, refiriéndose al futuro, aventuran la posibilidad de que algunos hongos prolonguen la fase de desarrollo vegetativo y acorten la fase de producción de esporas (*Alternaria*, *Aspergillus*). En otros podría ocurrir lo contrario, que aumente la producción de las mismas (*Cladosporium cladosporioides*). También la composición atmosférica de esporas fúngicas puede verse alterada por el arrastre de éstas a otras zonas por los vientos.

INTRODUCCIÓN

El término “Aerobiología” fue utilizado por primera vez por F. C. Meier, para describir esencialmente las bacterias aéreas ¹ y posteriormente se fue ampliando el concepto, así Edmonds & Benninghoff definieron la Aerobiología como la Ecología de la atmósfera ² (1973). Desde entonces se considera la Aerobiología como una ciencia multidisciplinar que comprende el estudio de las partículas biológicas aerovagantes y los procesos de liberación, emisión, dispersión, deposición e incidencia atmosférica de las mismas. En el siglo XXI, la Aerobiología ha ampliado mucho su campo de acción y se han desarrollado nuevas líneas de trabajo como la aeromicología, aerobacteriología, biometeorología, biodeterioro, agronomía, fenología, polen y cambio climático, estudio de aeroalérgenos por inmunoensayo (EIA, ELISA), genómica, metagenómica, etc.

De entre la variedad de partículas biológicas presentes en el aire que respiramos, dos tipos, el polen procedente de las plantas con flores y las esporas generadas por diversos hongos saprófitos (mohos) que degradan la materia orgánica, son los principales responsables de los trastornos alérgicos ocasionados por inhalación de aeroalérgenos. Las dos principales afecciones alérgicas asociadas con la exposición a polen y a las esporas de hongos son la rinitis alérgica y el asma, que suponen un importante problema de salud, con un gran coste económico. En Europa, según el informe ARIA ³, las cifras de prevalencia de la rinitis alérgica oscilan entre el 17% de Italia y el 28,5% de Bélgica, con valores medios aproximados del 25%.

El contenido alérgico de la atmósfera (polen, esporas y sus alérgenos) depende sobre todo de la vegetación (producción y emisión) y del clima (dispersión, sedimentación, resuspensión) y por lo tanto varía con la geografía. En el periodo 1990-2018, se ha producido un gran desarrollo de estudios aerobiológicos sobre aeroalérgenos y de los epidemiológicos y clínicos sobre polinosis y alergia a esporas fúngicas, que han proporcionado abundante información sobre la presencia atmosférica y la prevalencia de los tipos polínicos y las esporas fúngicas más alérgicas, en diversas regiones del mundo, con grandes diferencias biogeográficas.

En primer lugar, hay que destacar que los artículos publicados sobre la aerobiología de las esporas fúngicas son menos numerosos, que los referidos al polen atmosférico, sobre todo por los enormes costes en tiempo de dedicación y dificultad, que el análisis morfológico de esporas aéreas tiene.⁴ Por ejemplo, en España, las partículas atmosféricas prácticamente no se monitorizaron hasta la creación de la Red Española de Aerobiología (REA) en 1992.⁴ Estefanía Reyes y su equipo, en su calendario anual de esporas fúngicas publicado en 2016 centrado en Castilla y León, destacaban que en esta zona no habían existido prácticamente estudios a largo plazo acerca de la concentración atmosférica de esporas fúngicas.⁴ En Europa, siguen siendo escasos los investigadores que apuesten por este tipo de estudio. Cramer et al. (2014) han señalado a los hongos como una fuente de enfermedades respiratorias alérgicas bastante subestimada respecto al polen.⁵ El IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) subraya que no hay prácticamente estudios sobre la interacción del cambio climático con las esporas fúngicas.⁶ Las alteraciones a largo plazo de la producción de esporas y su abundancia atmosférica a su vez han recibido escasa atención. Únicamente unas pocas estaciones aerobiológicas en el mundo han monitorizado la concentración de esporas fúngicas de varios géneros de manera regular durante al menos 15 años. Algunas de ellas se encuentran en Derby (RU), Cracovia

(Polonia), Thessaloniki (Grecia) o Copenhague (Dinamarca). En contraste, esos cambios han sido ampliamente estudiados en el caso del polen, incluyendo el factor del cambio climático.⁶ De nuevo hablando de España, hasta 2016 no se publicó el primer estudio detallado del contenido atmosférico de esporas de *Alternaria* en Extremadura, por Maya-Manzano y su equipo.⁷ Esta escasez generalizada de información acerca de los patrones espaciales y temporales de esporas fúngicas ha causado preocupación desde las perspectivas de la biodiversidad y la salud pública. Es necesaria una evaluación a nivel europeo de las concentraciones de esporas fúngicas y de cómo varían en el tiempo y el espacio. Creo, por ello que queda suficientemente justificada la elección del tema de esta revisión bibliográfica centrada en la aeromicoflora, su diversidad y las variaciones regionales a lo largo del tiempo, en relación con los posibles impactos del cambio climático en su aerobiología.

OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es la revisión bibliográfica de los estudios publicados sobre la aerobiología de las esporas fúngicas, es decir sobre la diversidad, los niveles atmosféricos y la estacionalidad de las esporas presentes en el aire ambiente y también de los estudios sobre la evolución temporal de estos parámetros aerobiológicos, como evidencia de los posibles impactos del cambio climático en la aeromicoflora atmosférica.

METODOLOGÍA

Como en toda revisión bibliográfica lo primero que hicimos fue definir los objetivos, para iniciar la recopilación de la bibliografía en función de los mismos. La búsqueda online de la bibliografía se ha realizado mediante la utilización de palabras clave en inglés y en español, en diversas bases de datos y bibliotecas específicas. Posteriormente realizamos la evaluación y selección de los trabajos por su relevancia para el tema que nos ocupa y su calidad científica, centrándonos sobre todo en los publicados durante los últimos años en las revistas especializadas con mayor índice de impacto en los campos de nuestro interés (Aerobiology, Allergy, Environmental Sciences). A su vez, seleccionamos diversos volúmenes de libros físicos para obtener referencias generales sobre los temas tratados.

Por último, decidimos presentar las referencias bibliográficas según el orden de aparición en el texto con la correspondiente numeración correlativa en números arábigos en superíndices.

RESULTADOS

1. Diversidad de esporas fúngicas atmosféricas

Las esporas fúngicas representan el grupo más numeroso de partículas biológicas presentes en la atmósfera, por delante de los granos de polen.⁸ De entre la gran diversidad de tipos morfológicos de esporas identificados en la atmósfera, los relacionados con procesos alérgicos, por el momento, son: *Alternaria*, *Aspergillus-Penicillium*, *Chaetomium*, *Cladosporium*, *Coprinus*, *Curvularia*, *Epicoccum*, *Fusarium*, *Ganoderma*, *Dreschlera-Helminthosporium*, *Leptosphaeria*, *Nigrospora*, *Stemphylium*, *Torula* y *Ustilago*.⁸ La presencia de esporas en la atmósfera está condicionada por factores biológicos, antrópicos y medioambientales que interaccionan entre ellos, de manera que cada zona tiene su propia micoflora.⁹ Algunas esporas están siempre presentes en la atmósfera de exterior “outdoor spores”, como *Cladosporium* y *Alternaria*, mientras que otras predominan en los ambientes de interior de los edificios “indoor spores”, como *Penicillium* y *Aspergillus*. Los géneros más importantes desde el punto de vista alergológico son *Cladosporium* y *Alternaria*, por su predominio y su alergenicidad. Son los géneros fúngicos sobre los que más estudios aerobiológicos se han llevado a cabo.

Alternaria

El género *Alternaria* incluye unas 300 especies ubiquestas, cosmopolitas, ampliamente distribuidas sobre todo por las regiones templadas. Las más comunes son *A. alternata*, *A. triticina*, *A. brassicae*, *A. cucumerina*, *A. dentritica* y *A. solani*.⁸ *Alternaria* es un hongo filamentoso, saprófito, perteneciente a la división *Ascomycota* y al orden *Pleosporales* cuyas colonias se caracterizan por presentar una coloración oscura, crecen rápidamente y presentan macroscópicamente un aspecto veloso y oscuro, con un borde gris que las rodea.¹⁰

En la fase de reproducción asexual o “anamórfica” se forman los conidióforos simples, tabicados, de forma alargada ovoide, que llevan en su extremo los conidios o esporas

asexuales. A partir de la célula apical del conidióforo, por gemación, se van generando los nuevos conidios que forman largas cadenas. Son estos conidios los que se están presentes en el aire que respiramos y pueden desencadenar la reacción alérgica. Estas esporas, se pueden identificar por su morfología muy característica, son esporas murales (*Dictyosporas*) con tabiques longitudinales y transversales, de color marrón, asimétricas, con una cicatriz como punto de unión con la hifa conidiógena o la anterior espora, y un apéndice posterior o pico. Su tamaño varía de 10 a 50 micras. La superficie puede ser lisa o verrugosa (**Fig. 1**).



Fig. 1. Conidios de *Alternaria* vistos al Microscopio óptico (MO). Disponible en https://www.dinafem.org/uploads/alternaria20copia_blog_full.jpg

Alternaria es un género de hongos saprófitos sobre restos vegetales, papel o tejidos o parásitos de plantas. Algunas especies pueden producir micotoxinas. Necesita una humedad relativa entre 25%-30%. Se encuentra en la atmósfera durante todo el año, con picos en los meses de verano. Las esporas son resistentes a la radiación ultravioleta y a la desecación.^{8, 10}

La inhalación de esporas o fragmentos del micelio conduce a procesos de sensibilización o alergia. Además, actúa sinérgicamente con otros hongos y con el polen de gramíneas, con los que comparte antígenos.^{8, 10}

Cladosporium

Los tipos morfológicos de esporas, *C. herbarum* y *C. cladosporioides*, corresponden a los conidios o esporas asexuales de dos “grupos o complejos de especies” del género

Cladosporium, que como *Alternaria*, también pertenece a la división *Ascomycota* y al orden *Capnodiales*.^{11, 12}

Se trata de un género de “moho” que produce colonias aterciopeladas, pulverulentas o vellosas de color oscuro, constituidas por hifas finas, septadas y ramificadas. Los conidios se forman por gemación sucesiva del conidio anterior, estando el conidio más joven y pequeño al final de la cadena. Tienen forma elipsoidal o cilíndrica, su tamaño varía entre las 8-25 x 4-10µm. La pared es gruesa, con superficie claramente verrugosa o equinulada y son de color amarillo, marrón o pardo, con cicatrices en los extremos y ramificaciones. En *C. herbarum*. En *C. cladosporioides*, las esporas también son elipsoidales o cilíndricas, pero son más agudas en los extremos y de menor tamaño (3-15 x 2-6 µm). La pared es lisa o débilmente verrugosa y son hialinas o de color marrón oliváceo claro (**Fig. 2**).



Fig. 2. Conidióforos y conidios de *Cladosporium herbarum* (A, B) y *C. cladosporioides* vistos al Microscopio óptico (MO). Microfotografías tomadas de ^{11, 12}.

De forma general son hongos saprófitos o parásitos de plantas, que normalmente requieren humedad relativa alta para crecer ^{8, 10}

Está catalogado como productor de asma y alergias al inhalarse sus esporas. Está presente durante todo el año, aunque algo menos en invierno.⁸

2. Niveles atmosféricos

Como se ha dicho anteriormente, la composición de la atmósfera en cuanto a esporas fúngicas es diferente según la zona, ya que sus concentraciones dependen de distintos factores. Por ello, hemos revisado los artículos publicados, en el periodo transcurrido de este siglo que hacen referencia a la presencia atmosférica de las esporas fúngicas en España y que reseñamos en orden cronológico.

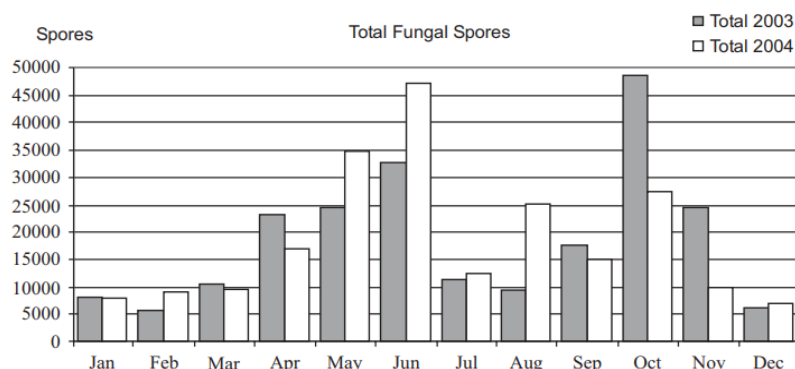


Fig. 3 - Variación anual de la cantidad de esporas fúngicas en Madrid en 2003 y 2004. Tomada de ¹³

Durante 2003 y 2004 se llevó a cabo un estudio de la micoflora aérea de la Ciudad Universitaria de Madrid, con el objetivo de identificar y cuantificar las esporas aéreas, para conocer la diversidad, los niveles atmosféricos y la variación estacional de las mismas.¹³ Un total de 2.2×10^5 esporas fueron registradas cada año. Se contabilizaron hasta 70 tipos distintos de esporas. Las mayores concentraciones se registraron en los meses de Abril a Junio y de Agosto a Noviembre, y las menores en los meses de invierno: Diciembre, Enero y Febrero (**Fig. 3**). Las conidiósporas fueron el grupo más abundante (49,5%), seguido de las teliosporas (18%), basidiosporas (15,5%) y ascosporas (8%), con cierta variabilidad de un año a otro. Del total de esporas recogidas, la más abundante fue

Year	2003				2004			
	Mean annual concentration	Peak counts	Data	Relative frequency %	Mean annual concentration	Peak counts	Data	Relative frequency %
<i>Cl. cladosporioides</i>	167	2908	16/10	27.3	200	2955	11/08	33.1
<i>Ustilago</i>	107	2274	28/04	17.5	112	3972	02/06	18.5
<i>Cl. herbarum</i>	84	875	01/10	13.8	92	897	11/08	15.2
<i>Coprinus</i>	53	1084	18/10	8.7	31	738	01/06	5.1
<i>Aspergillaceae</i>	15	393	10/02	2.5	10	578	27/04	1.7
<i>Leptosphæria</i>	9	157	12/04	1.5	12	249	07/06	2.0
<i>Pleospora</i>	9	385	30/09	1.5	9	416	09/08	1.6
<i>Bovista</i>	8	445	16/10	1.3	10	138	25/10	1.6

Tabla 1 - Esporas más frecuentes en la atmósfera de Madrid. Tomada de ¹³.

Cladosporium cladosporioides, seguida por *Ustilago*, *Cladosporium herbarum* y *Coprinus*.¹³ (Tabla 1)

En 2009 se publicaron los datos de un estudio similar en León Miranda de Ebro y Zamora, referidos al año 2006.⁹ La localidad donde se registró el mayor número de esporas fue Miranda de Ebro con un índice anual de 136.314, seguido de León con 118.977 y Zamora con 107.427. Los meses en los que se contabilizaron las mayores concentraciones atmosféricas de esporas fueron: Octubre, en Miranda de Ebro y León con valores de 62.849 (46,1% del total) y 49.178 (41,3% del total) respectivamente, y Agosto en Zamora con 36.706 (39% del total). Los conidios de *Cladosporium* fueron mayoritarios en la atmósfera de las tres localidades estudiadas con un porcentaje frente al total de esporas contabilizadas superior al 70%. En León y en Miranda de Ebro los días pico se produjeron en septiembre, mientras que en Zamora se alcanzaron a finales de agosto. La concentración de *Alternaria* fue más elevada que en otras ciudades españolas. Se observó que generalmente la temperatura máxima influye positivamente en los tipos fúngicos estudiados, excepto en *Coprinus*, *Fusarium* y *Leptosphaeria* cuya influencia fue negativa. La humedad relativa y la precipitación fueron parámetros que, en la mayoría de los casos, tuvieron una clara influencia negativa en las concentraciones de los tipos fúngicos analizados, excepto para *Coprinus*, *Fusarium* y *Leptosphaeria* que influyeron de forma positiva en la concentración de estas esporas en la atmósfera.⁹

En 2011 se publicó un interesante estudio acerca de las fluctuaciones diarias y semanales de *Cladosporium* y *Alternaria* en Málaga durante dos años seguidos (1996-1997).¹⁴ Los autores concluyeron que ambos tipos de esporas compartían el mismo comportamiento estacional aerobiológico, con dos picos, uno en primavera y otro en verano. Las variaciones diarias y semanales de ambas esporas aumentaron con la temperatura y disminuyeron con la humedad relativa. También comprobaron que afecta a la concentración de esporas la velocidad y la dirección del viento. Vientos provenientes del suroeste y noroeste favorecieron a ambos tipos, mientras que los vientos del sureste produjeron el efecto contrario. A su vez observaron cómo era posible predecir los valores semanales de esporas de *Cladosporium* en función de la concentración de esporas de *Alternaria*, debido al similar comportamiento atmosféricos de las dos.¹⁴

En 2012 se publicó un estudio acerca de los patrones estacionales de *Alternaria* en climas mediterráneos. Se analizaron las concentraciones de esporas en tres ciudades del suroeste de España (Cáceres, Badajoz y Mérida) ¹⁵ durante varios años. La concentración media

de esporas fue de 49,3 esporas/m³, aunque los valores eran muy variables según el lugar y el tiempo. El pico máximo fue registrado en Mérida, el 9 de Octubre de 1997, con un valor de 1380 esporas/m³, ciudad donde se superaron las 100 esporas/m³ en 202 días de los 2 años que se estudiaron, mientras que en sólo 25 días del mismo periodo de tiempo se superaron esos valores en Badajoz. El pico máximo registrado en Cáceres fue de 64 esporas/m³. En cuanto a la variación horaria, en Cáceres las mayores concentraciones ocurrían alrededor del mediodía, en Mérida entre la tarde y en anochecer y en Badajoz de madrugada.¹⁵

Posteriormente, en 2016, se publica un artículo, que analiza los datos aerobiológicos de *Alternaria* durante cinco años (2011 a 2014) para las mismas ciudades que el anterior, que completa y aporta más información para esta región del suroeste de la península ibérica.⁷ Analizaron la distribución diaria y horaria, de las concentraciones atmosféricas de *Alternaria*, así como su correlación con los fenómenos meteorológicos. Obtuvieron una serie de datos, que concuerdan con otros resultados obtenidos para en España (**Tabla 2**).

Year	Average values (spores m ⁻³)			Peak values (spores m ⁻³) and Peak day			Rainfall (mm)			Tmean (°C)		
	PL	DB	ZA	PL	DB	ZA	PL	DB	ZA	DB	PL	ZA
2011	18.0	43.7	32.5	164.7 (25-8)	286.2 (28-5)	333.9 (1-6)	88.7	163.8	119.8	17.8	16.8	16.5
2012	8.8	39.4	10.4	87.3 (9-10)	923.4 (9-10)	111.6 (4-10)	70.1	119.4	78.6	16.9	16.0	15.8
2013	7.4	25.6	9.7	81.0 (16-10)	289.8 (11-10)	112.5 (7-10)	450.1	679.0	476.2	17.1	15.8	15.8
2014	9.4	41.8	16.1	73.8 (6-10)	651.6 (6-10)	153.0 (25-6)	434.8	786.9	563.8	17.4	15.2	15.8
Average	10.9	37.6	17.2									

Tabla 2 - Valores medios anuales de la concentración de *Alternaria*, temperatura del aire y cantidad de lluvia registrada en 2011-2014 en las poblaciones de Plasencia (PL), Don Benito (DB) y Zafra (ZA). Tomada de ⁷.

Otro estudio acerca de la distribución espacial y temporal de *Alternaria* en la península a lo largo de varios años fue publicado en 2013.¹⁶ Las estaciones situadas en ciudades del noroeste de la península obtuvieron valores anuales de menos de 3000 esporas, con algunas excepciones. En el centro de la península los valores fueron más variables, desde 1022 esporas en Alcalá en 2005 a 8471 en Madrid en 2006. Los valores anuales más altos se obtuvieron en 1997 en las ciudades de Mérida (48193 esporas) y Sevilla (42395 esporas). El pico más alto diario fue observado en Mérida, por delante de Sevilla. En cuanto a las zonas costeras, en Cartagena los valores fueron medios-bajos, mientras que en Málaga fueron bastante altos.

Uno de los estudios más interesantes en este ámbito y de mayor escala es el realizado por diversos investigadores de países de toda Europa, publicado en 2016. Se analizaron las variaciones espaciales y temporales de *Alternaria*, a lo largo de toda Europa, con mediciones en 23 lugares distintos y periodos de monitorización de entre 3 y 15 años. Además, estos datos obtenidos fueron relacionados con los fenómenos atmosféricos por todo el continente.¹⁷ Al finalizar la investigación determinaron que las variaciones temporales y espaciales del IES (Índice Estacional de Esporas) y del inicio y pico de las temporadas de las esporas derivan de distintos factores. Las zonas con mayor IES fueron Hungría, Inglaterra y España (**Tabla 3**).

Study site	Year and seasonal fungal spore index (SFI)															Temporal variation (%)
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	
Aix-en-Provence					11,725 ^a	17,741	15,583	18,073	25,637	16,461	14,818	16,969	14,636	14,180	17,580	83
Badajoz										8415	8678	13,696				
Barcelona	8355	10,531	11,637	9139	7014	6112	5589	4458	6401	10,060	9934	10,494	8266	10,130	6740	86
Bordeaux	21,130	18,275	17,105	10,790	10,125 ^a	20,045 ^a	12,540 ^a	4,260 ^a	5,260 ^a	6,300 ^a	8,960 ^a	8,500 ^a	6,880 ^a	6,781 ^a	2,749 ^a	173
Budapest	39,686	15,350	48,442	45,187	44,813	59,414	38,621	42,883	36,461	49,853	59,587	58,723	24,394	25,171	105	
Copenhagen	9184	8488	6341	4039	5086	7327	9703	7032	4748	9460	6841	3641	2282	4792	11,038	131
Derby	30,281	23,580	19,666	26,189	29,450	26,690	20,910									42
Girona	15,714	6104	11,488	11,035	12,261	11,572	5729	11,178	15,907	13,471	12,037	14,563	12,877	13,196	14,330	84
Kraków	2018	12,859	14,684	9664	13,791	9841	9338	18,867	10,856	17,215	8958	14,757	16,545	8358	7735	144
Krasne ^b		7598	26,234								6,629 ^b	7,522 ^b	13,152 ^b			160
Leicester							21,430	17,378	15,147	22,039	16,729	18,756	14,995	15,539	31,996	88
Lleida	17,240	23,190	24,657	26,569	28,605	41,163	27,504	18,155	32,267	36,033	40,197	49,932	53,172	59,875		125
Lyon									27,559 ^a	7,953 ^a	9,207 ^a	17,391	7465	15,109	15,651	140
Nantes			10,823 ^a	10,880 ^a	9,655 ^a	12,221 ^a	17,705 ^a	5,486 ^a				19,238 ^a	6,536 ^a	21,855 ^a	23,219 ^a	129
Paris		12,665 ^c	10,297 ^c	12,376 ^c	15,137 ^c	13,544 ^c	18,242 ^c	11,931 ^c	10,569 ^c	21,645 ^c	32,175 ^c	10,179 ^c	28,353 ^c	37,206 ^c		150
Roquetes-Tortosa							11,130	9066	11,172	11,791	16,260	16,162	11,651	10,772	15,775	57
Rzeszow	8101	10,274	9369							14,424	8807	6333	20,884			130
Szczecin					17,742	26,140	10,651	21,511	11,719	19,876	19,683	11,656	9051	11,549		107
Tarragona	4970	7650	7258	9125	10,668	8005	10,198	12,132	11,556	7848	12,522	12,079	7490	9484	8856	81
Thessaloniki	8787			6005	6049											
Toulouse		16,850 ^c	25,405 ^c	14,896 ^c	10,315 ^c	11,195 ^c	16,780 ^c	11,225 ^c	15,720 ^c	13,565 ^c	11,560 ^c	11,245 ^c	8,040 ^c	8,155 ^c	15,895 ^c	127
Vielha					1221	1476	815	876	2134	2111	1504	3548	2755	1660	2139	149
Worcester							9297	6966	8092	8519	6022					42
Spatial variation (%)	225	218	131	293	304	251	380	287	267	239	332	322	376	375	223	

^a Marks that the data were available from mid-May to end September

^b Marks that the trap was located at ground level for the years 2010–2012 during the period 15 April–15 October

^c Marks that the data were available from mid-February to end September

Tabla 3 – Índice estacional de esporas para cada lugar con variación temporal (filas) y espacial (columnas). Tomada de ¹⁷.

3. Estacionalidad

Las esporas fúngicas alérgicas siguen unos patrones de comportamiento estacional similares, que tienen un carácter anual. Algunos de estos patrones ya los hemos citado. Son numerosos los estudios que han analizado dicha estacionalidad en cada zona. En Madrid se registraron las mayores concentraciones de esporas entre los meses de Abril y Junio y de Agosto a Noviembre.¹³ En Zamora, fue Agosto el mes con más esporas, mientras que en León y Miranda del Ebro fue Octubre.⁹ En Málaga los mayores picos se registraron en primavera (Abril-Mayo) y Otoño (Septiembre Octubre).¹⁴ En Extremadura, el análisis de la distribución anual de *Alternaria* reveló que la primavera era la estación con más esporas, aunque por meses, Octubre obtuvo los valores más altos. Los meses de

invierno registraron los valores más bajos, en concreto los meses de Enero y Febrero, donde en una ocasión no se encontraron esporas. Concluyeron que el motivo por el cual en climas mediterráneos los picos se sitúan en la primavera y el otoño, con una disminución de los valores en verano es porque en los meses más cálidos son críticos para el crecimiento de *Alternaria*, con su correspondiente disminución de la producción de esporas.

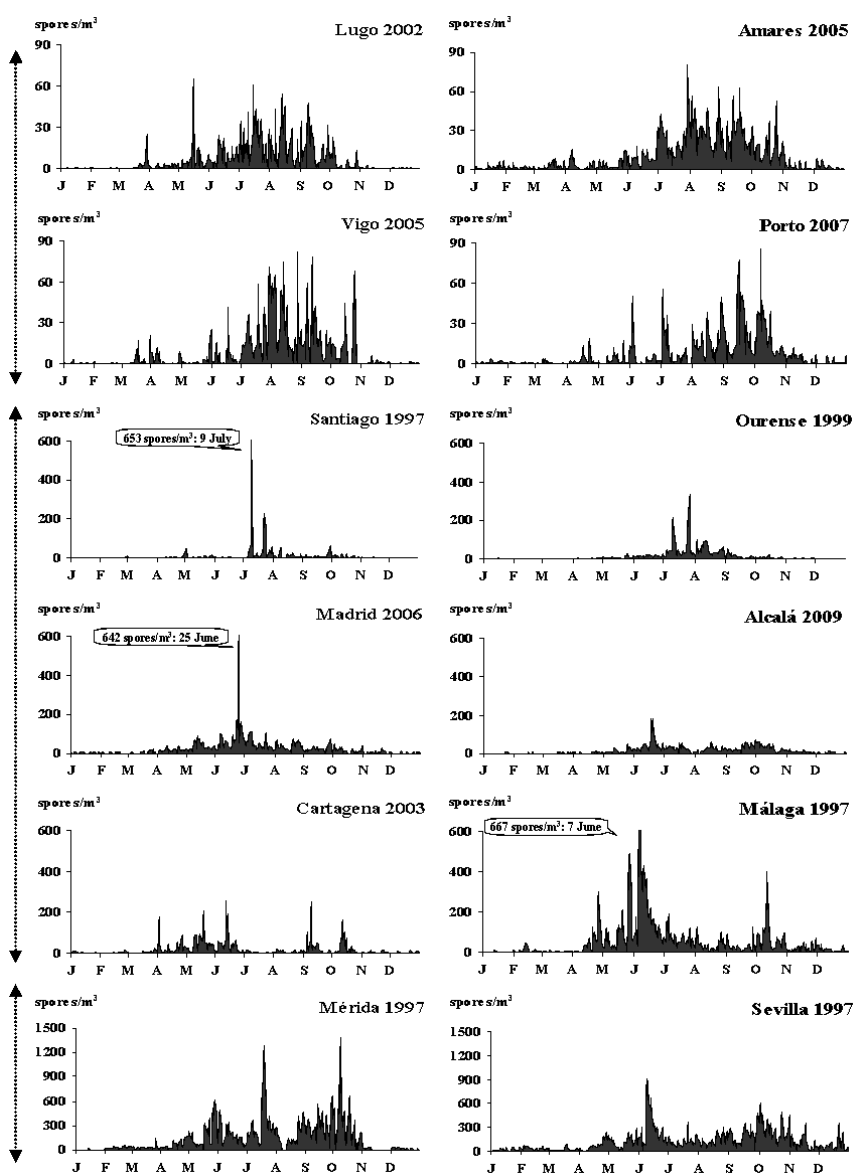


Fig. 4 – Niveles atmosféricos de esporas de *Alternaria* en distintos puntos de la península a lo largo del año. Tomada de ¹⁶.

Un estudio a nivel nacional publicado en 2013¹⁶ que analizaba los patrones temporales y espaciales en diversos puntos de la península determinó que, en general, las concentraciones de esporas tienden a ser más bajas en los primeros y últimos meses del año, coincidiendo con el invierno y los picos en los meses de mayor calor. (Fig. 4). Se concluyó que existía un patrón estacional de conidios de *Alternaria* con la latitud, con concentraciones máximas alcanzadas en verano en el norte y en otoño o primavera en el sur de la península. Los meses de invierno registraron los valores más bajos, en concreto los meses de Enero y Febrero, donde en una ocasión no se encontraron esporas. Concluyeron que el motivo por el cual en climas mediterráneos los picos se sitúan en la primavera y el otoño, con una disminución de los valores en verano es porque en los meses más cálidos son críticos para el crecimiento de *Alternaria*, con su correspondiente disminución de la producción de esporas.¹⁶

En 2016 se publicó el primer calendario de esporas fúngicas de la península ibérica para Valladolid (Fig. 5).⁴ Un calendario de esporas es una gráfica que resume la información relativa a la época de presencia atmosférica y niveles atmosféricos, de los principales tipos de esporas presentes en una localidad. Se necesitan datos de un número mínimo de años, en este caso 2005 y 2006. *Cladosporium* fue el tipo de spora más abundante. La mayor diversidad de esporas se dio en Abril, en contraste con Febrero. *Cladosporium* obtuvo sus valores más altos en el último tercio de Junio, al igual que *Alternaria*.

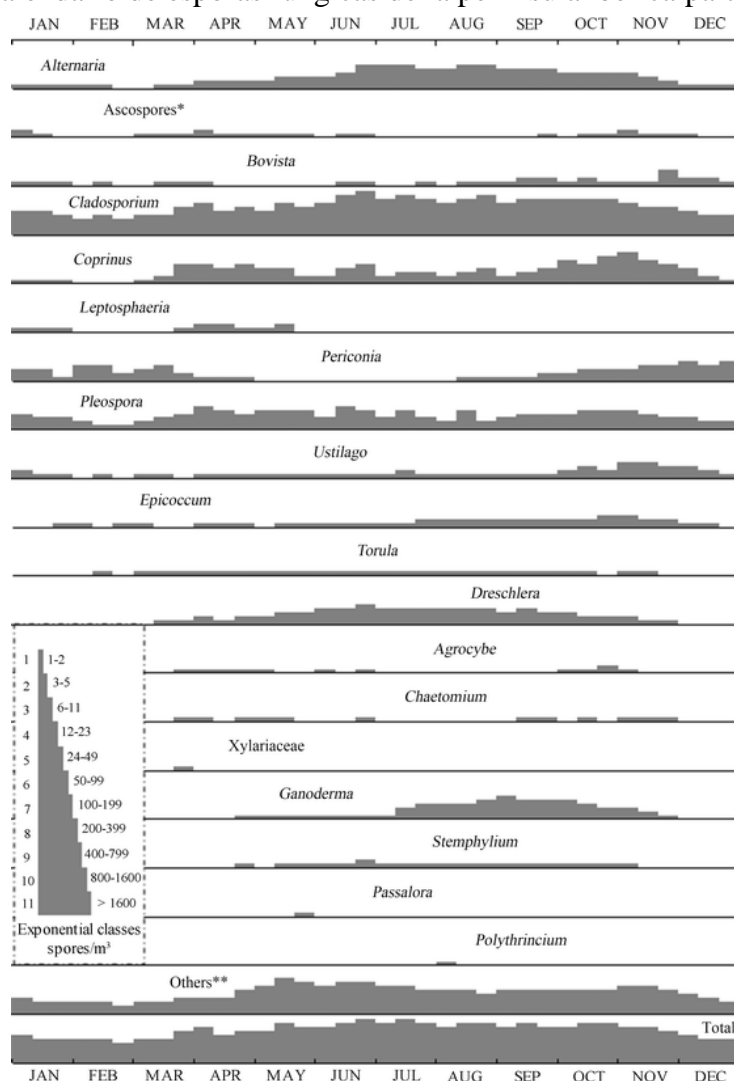


Fig. 5 – Calendario anual de esporas fúngicas en Valladolid. Tomada de 4.

Coprinus en cambio los obtuvo a principios de noviembre. En conclusión, la mayor captura de esporas tuvo lugar durante los meses de verano y de otoño, debido principalmente a la abundancia de *Cladosporium*. Al contrario, los meses invernales obtuvieron los valores más bajos.⁴

A nivel europeo, se han estudiado las concentraciones de *Alternaria* en función de la zona y de la época del año. El comienzo de la temporada de esporulación varía en varios meses a lo largo de Europa, pero el pico de la estación está relativamente sincronizado en el norte y centro de Europa, situado en mitad del verano. Las zonas más al sur en general tienen los picos antes o después que en norte y centro-Europa. Concluyeron que *Alternaria* presenta una mayor variabilidad espacial que estacional.¹⁷

4. Factores que influyen en la concentración de esporas en el aire

Está ampliamente descrita en bibliografía la manera en la que varían las concentraciones atmosféricas de esporas en función de los fenómenos atmosféricos. La temperatura ambiental es un factor muy importante a la hora de analizar la presencia de esporas en la atmósfera. De manera general, existe una correlación positiva entre la temperatura y la concentración ambiental de esporas, observada en numerosos estudios.^{4, 6, 7, 8, 14, 15, 16, 17, 18} A mayor temperatura, mayor cantidad de esporas. *Cladosporium* y *Alternaria* siguen al pie de la letra esta regla. En cambio, para otras especies como *Coprinus*, *Pericornia* y *Pleospora* se ha observado en algunos estudios correlación negativa entre la temperatura y producción de esporas.⁴ Otro factor fundamental en la presencia de esporas fúngicas en la atmósfera es la humedad relativa. En este caso no siempre coinciden los estudios, que pueden diferir según el lugar o la estación del año en que se hayan realizado. Así *Cladosporium* y *Alternaria* presentan una correlación negativa con la humedad relativa.^{4, 7, 14, 15, 16, 18} Las esporas de *Pleospora*, al contrario, aumentan con la humedad relativa.⁴ Existen más factores ambientales que influyen en la cantidad de esporas atmosféricas. Las precipitaciones presentan correlación negativa con *Cladosporium* y *Alternaria*^{4, 7, 16}, al contrario que *Coprinus* y *Pleospora*.⁴ Incluso la dirección del viento influye en la esporulación. Se ha observado que los vientos provenientes del sur tenían efecto negativo sobre la cantidad de esporas de *Alternaria*, mientras que los del norte presentan el efecto contrario.⁴ En el caso de *Cladosporium* existe correlación positiva con los vientos del suroeste y noreste y negativa con los del sureste.¹⁴ También existe correlación positiva

con la velocidad del viento en *Cladosporium*.¹⁴ Se cree que la relación entre los vientos y la cantidad de esporas registrada puede deberse al arrastre de esporas provenientes de zonas donde la temperatura es mayor (mayor cantidad de esporas).⁴ A su vez se han establecido relaciones entre las concentraciones de esporas y la disponibilidad de nutrientes ^{6, 17}, la presencia de otras esporas ⁶ o el paisaje y la actividad humana de su entorno.¹⁷

5. Evidencias sobre el impacto del cambio climático en la aeromicroflora

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en su artículo 1, define el cambio climático como “cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. La CMNUCC diferencia, pues, entre el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad climática atribuible a causas naturales. En cuanto a los aeroalérgenos, se han observado en numerosas ocasiones las alteraciones en los niveles de los mismos debido al calentamiento global, y las predicciones para el futuro son alarmantes, hablando desde el punto de vista de la salud pública. El cambio climático puede influir en la cantidad y distribución espacio-temporal de las esporas fúngicas, interviniendo tanto en el crecimiento del hongo como en la esporulación y la dispersión de las esporas.¹⁹ Un estudio realizado en la península ibérica, publicado en 2016 predijo un aumento en las concentraciones atmosféricas de esporas de *Alternaria* en la zona mediterránea, basado en la previsión del clima en futuras décadas.⁷

En 2014 se publicó un análisis de cómo iba a afectar el cambio climático a los hongos en el futuro.⁶ En él se propone una estrategia que podrían desarrollar al ser sometidos a cambios en su ambiente. Es posible que aumente su crecimiento, con la consecuente disminución de la producción de esporas. Algunas especies de hongos prolongan su fase de crecimiento y retrasan la de esporulación cuando se modifica su entorno, aprovechando así mejor los nutrientes disponibles. Este estudio concluye que es posible que algunas especies de hongos cuyas esporas poseen capacidad alérgica van a ver disminuida su esporulación, y por lo tanto la concentración de estas esporas en la atmósfera (*Alternaria*, *Aspergillus*), pero a su vez otras esperan que aumenten su producción de esporas, como

Cladosporium cladosporioides.⁶ Como hemos visto anteriormente, los vientos afectan a la concentración de esporas en una determinada zona. Se sabe que las esporas pueden ser arrastradas largas distancias por las corrientes de aire. Esto implica que en una zona pueden concentrarse esporas que han sido producidas en otro sitio²⁰, provocando alergias. El cambio climático puede favorecer tanto las alergias como las infecciones fúngicas, también indirectamente. El clima se vuelve más impredecible y las catástrofes naturales ocurren con mayor frecuencia. Después del huracán Katrina de 2005, se detectaron altas tasas de crecimiento de hongos tanto en interiores como en exteriores, así como mayor concentración de esporas en áreas inundadas. Mayor humedad, junto con altas temperaturas y niveles de CO₂ estimulan el crecimiento fúngico.²¹

En 1997 se publicó un estudio que analizaba la relación entre el clima, la cantidad de esporas fúngicas atmosféricas, el polen y el máximo flujo de espiración en asmáticos. El estudio reveló una asociación entre los días con altos niveles de basidiosporas en el aire y el desvelamiento nocturno y el uso de medicación para el asma.²²

CONCLUSIONES

Las esporas fúngicas alergénicas son un problema de salud pública subestimado. Existe un número significativamente menor de estudios acerca de ellas en comparación al polen a pesar de que su presencia atmosférica es mucho mayor.

De los diversos tipos de esporas alergénicas, *Alternaria* es el más importante desde el punto de vista sanitario y por tanto el que cuenta con más información aerobiológica publicada. El siguiente es *Cladosporium*, por ser también alergénico y el más abundante en la atmósfera.

Cada zona posee una composición atmosférica diferente en cuanto a esporas fúngicas, puesto que la presencia de éstas está determinada por las principales características biogeográficas de la misma.

La estacionalidad también varía según la zona. En general, las concentraciones más altas de estas esporas se dan en los meses centrales del año (Junio, Julio), al ser los más cálidos. En los países mediterráneos los picos suelen suceder en primavera y en otoño, puesto que las altas temperaturas del verano suponen un factor crítico en el crecimiento del hongo, con su correspondiente disminución en la producción de esporas. Los meses invernales

(Diciembre, Enero y Febrero) son los que menor cantidad de esporas fúngicas presentan en la atmósfera.

El factor más importante que determina la presencia de esporas en la atmósfera (*Cladosporium* y *Alternaria*) es la temperatura, con una correlación positiva. La humedad relativa también influye en la concentración atmosférica de las mismas (*Cladosporium* y *Alternaria*), pero con una correlación negativa. Existen otros factores como la velocidad y dirección del viento, la disponibilidad de nutrientes o la presencia de otras esporas.

Los aeroalérgenos en general se han visto influidos por el calentamiento global. En el caso de los hongos, puede alterar la distribución geográfica y estacionalidad de las esporas. Afecta tanto al crecimiento del hongo como a la esporulación y dispersión de las esporas. Existe la hipótesis de que el cambio climático podría hacer que, en el futuro, algunas especies de hongos prolongasen su fase de desarrollo vegetativo, disminuyendo así la producción de esporas (*Alternaria*, *Aspergillus*). En otras podría ocurrir lo contrario, que aumente la producción de las mismas (*Cladosporium cladosporioides*). También la composición atmosférica de esporas fúngicas puede verse alterada por el arrastre de éstas a otras zonas por los vientos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Gregory, P. The microbiology of the atmosphere. Aylesbury, Bucks.: Leonard Hill; 1973.
2. Edmonds, R., Benninghoff, W. Aerobiology and its modern applications. A discipline of investigations of aerial transport of biological materials important to human health and welfare. U.S. Component of the International Biological Program, Aerobiology Program; 1973. Report nº 3: 1-18.
3. Bousquet, J. et al. Allergic Rhinitis and its Impact on Asthma (ARIA) 2008. Allergy. 2008;63:8-160.
4. Reyes, E., de la Cruz, D., Sánchez, J. First fungal spore calendar of the middle-west of the Iberian Peninsula. Aerobiologia. 2016;32(3):529-539.
5. Crameri, R., Garbani, M., Rhyner, C., Huitema, C. Fungi: the neglected allergenic sources. Allergy. 2013;69(2):176-185.

6. Damialis, A., Mohammad, A., Halley, J., Gange, A. Fungi in a changing world: growth rates will be elevated, but spore production may decrease in future climates. *International Journal of Biometeorology*. 2014;59(9):1157-1167.
7. Maya-Manzano, J., Muñoz-Triviño, M., Fernández-Rodríguez, S., Silva-Palacios, I., Gonzalo-Garijo, A., Tormo-Molina, R. Airborne *Alternaria conidia* in Mediterranean rural environments in SW of Iberian Peninsula and weather parameters that influence their seasonality in relation to climate change. *Aerobiologia*. 2016;32(1):95-108.
8. Sáenz, C., Gutiérrez, A. Esporas atmosféricas en la Comunidad de Madrid. Documentos Técnicos de Salud Pública, Vol. 83. Madrid: Instituto de Salud Pública; 2003.
9. González, Z., Fuertes-Rodríguez, C. R., De Castro, S., Vega, A. M., Fernández, D., Valencia, R. M. Análisis de esporas fúngicas alergénicas en la atmósfera de León, Miranda de Ebro y Zamora (España). *Polen*. 2009;19:31-47.
10. Mirón, A., Culver, M. O., Lagoma, L., Asensio, L. DATABIO: Fichas de agentes biológicos. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT); 2015.
11. Schubert, K., Groenewald, J., Braun, U., Dijksterhuis, J., Starink, M., Hill, C. et al. Biodiversity in the *Cladosporium herbarum* complex (Davidiellaceae, Capnodiales), with standardisation of methods for *Cladosporium* taxonomy and diagnostics. *Studies in Mycology*. 2007;58:105-156.
12. Bensch, K., Groenewald, J., Dijksterhuis, J., Starink-Willemse, M., Andersen, B., Summerell, B. et al. Species and ecological diversity within the *Cladosporium cladosporioides* complex (Davidiellaceae, Capnodiales). *Studies in Mycology*. 2010;67:1-94.
13. Sabariego, S., Díez Herrero, A., Gutiérrez, A. Monitoring of airborne fungi in Madrid (Spain). *Acta Bot. Croat*. 2007;66(2):117-126.
14. Recio, M., del Mar Trigo, M., Docampo, S., Melgar, M., García-Sánchez, J., Bootello, L. et al. Analysis of the predicting variables for daily and weekly fluctuations of two airborne fungal spores: *Alternaria* and *Cladosporium*. *International Journal of Biometeorology*. 2011;56(6):983-991.
15. Maya, J., Fernández, S., Hernández, F., Díaz, G., Gonzalo, Á., Silva, I. et al. Seasonal Mediterranean pattern for airborne spores of *Alternaria*. *Aerobiologia*. 2012;28(4):515-525.

16. Aira, M. J., Rodríguez, F. J., Fernández, M., Seijo, M. C., Elvira, B., Abreu, I., Gutiérrez, M., Pérez, E., Oliveira, M., Recio, M., Tormo, R., Morales, J. Spatial and temporal distribution of *Alternaria* spores in the Iberian Peninsula atmosphere, and meteorological relationships: 1993–2009. *Int. J. Biometeorol.* 2013;57(2):265-274.
17. Skjøth, C., Damialis, A., Belmonte, J., De Linares, C., Fernández, S., Grinn, A. et al. *Alternaria* spores in the air across Europe: abundance, seasonality and relationships with climate, meteorology and local environment. *Aerobiologia.* 2016;32(1):3-22.
18. Aira, M. J., Jato, V, Iglesias I. *Calidad del aire.* Santiago de Compostela: Xunta de Galicia. Consellería de Medio Ambiente. 2005.
19. María-Tomé, B., Pérez, S. *¿Cómo afecta el cambio climático a la salud humana? Guía orientativa de los efectos del cambio climático sobre la salud pública y la salud en el trabajo.* Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud (ISTAS). 2016.
20. Reid, C., Gamble, J. *Aeroallergens, Allergic Disease, and Climate Change: Impacts and Adaptation.* *EcoHealth.* 2009;6(3):458-470.
21. Katelaris, C., Beggs, P. *Climate change: allergens and allergic diseases.* *Internal Medicine Journal.* 2018;48(2):129-134.
22. Epton, M. J., Martin, I. R., Graham, P. et al. *Climate and aeroallergen levels in asthma: a 12 month prospective study.* *Thorax.* 1997;52(6):528-534.