

Deterioro de material celulósico de interés patrimonial por la actividad de hongos ambientales: estado del arte.

Andrea C. Mallo ^{*1, 5}, Daniela S. Nitiu^{1, 6}, Lorena A. Elíades^{2, 6}, Mario C. N. Saparrat^{2, 3, 4, 6}.

¹Cátedra de Palinología, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP La Plata, Argentina. ²Instituto de Botánica Carlos Spegazzini, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP. La Plata, Argentina. ³Instituto de Fisiología Vegetal, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP. La Plata, Buenos Aires, Argentina. ⁴Cátedra de Microbiología Agrícola, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP. La Plata, Argentina. ⁵Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, (CIC, PBA) Argentina. ⁶Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

*Autor correspondiente: email malloa2001@yahoo.com.ar.

Palabras clave: biodeterioro de papel, degradación de celulosa, mecanismos fúngicos, foxing, spots.

RESUMEN

Una gran parte del patrimonio cultural de la humanidad está constituido por papel y se halla preservado en museos, archivos y bibliotecas. Este soporte ha sido utilizado desde los principios de la civilización hasta la actualidad, tratándose de un material susceptible al biodeterioro por acción de distintos microorganismos. El componente principal del papel es la celulosa, aunque otros materiales pueden estar presentes. Por lo tanto, el papel es susceptible a un amplio rango de agentes biológicos, entre ellos y principalmente los hongos, dado que poseen una notable capacidad para degradar la celulosa. Los hongos son responsables del biodeterioro del papel a través de dos mecanismos principales: la degradación de la celulosa y la síntesis de metabolitos secundarios. El objetivo de este trabajo es proporcionar una aproximación acerca del conocimiento actual sobre el proceso de transformación de diferentes soportes celulósicos de importancia patrimonial por acción de los hongos y los mecanismos involucrados en el biodeterioro y biodegradación del papel. Se presentará información sobre las características de los hongos involucrados en el biodeterioro y su efecto sobre los soportes celulósicos. Se darán a conocer los mecanismos enzimáticos y radicalarios que los hongos ambientales desencadenan en el proceso de despolimerización de sustratos celulósicos. Se presentará una revisión del tema incluyendo

los últimos avances, se analizará el deterioro estético en papel por *foxing* y la contribución de los pigmentos fúngicos en la generación de *spots*. El conocimiento de la biología de los hongos pertenecientes a distintos grupos ecofisiológicos y la comprensión sobre los mecanismos de biodeterioro son claves para garantizar la durabilidad del patrimonio cultural en papel y para el desarrollo de nuevas estrategias sustentables de conservación y restauración.

INTRODUCCIÓN

Desde tiempos remotos, el papel es uno de los materiales más utilizados para documentar el conocimiento humano. A pesar de que en la actualidad el uso de formatos electrónicos está ampliamente difundido [1], el uso de material impreso sigue siendo altamente valorado. En este sentido, la preservación y cuidado de documentación impresa es crucial en la custodia de patrimonio en bibliotecas, archivos y centros de información. Por ello, el proceso de biodeterioro de papel es una preocupación que causa enormes daños en manuscritos y libros antiguos únicos que se conservan en bibliotecas y archivos



Fig. 1. A-C. Efectos de biodeterioro sobre diversos materiales de la biblioteca Pérez Aznar: observación de diversos materiales afectados por la colonización de hongos.

A pesar de que el componente mayoritario del papel es la celulosa, otros constituyentes como almidón u otros compuestos también pueden estar presentes [2]. Por este motivo, el papel es susceptible a la colonización de un amplio rango de agentes biológicos, incluyendo a los hongos, que encuentran en el papel el sustrato adecuado para el crecimiento de estos organismos [3]. Además, de la disponibilidad de los hongos en estos ambientes, las condiciones climáticas influyen en la diversidad y contenido microbiológico asociado [4]. Otro aspecto importante de estos agentes que causan biodeterioro es que pueden provocar alergias y efectos tóxicos en el personal que trabaja en estos ámbitos [5].

El objetivo de este trabajo es proporcionar una aproximación acerca del conocimiento actual sobre el proceso de transformación de diferentes soportes celulósicos de importancia patrimonial por acción de los hongos y los mecanismos involucrados en el biodeterioro y biodegradación del papel.

Características de los hongos y su efecto sobre el biodeterioro

Los hongos son un distintivo grupo de organismos descomponedores caracterizados por la composición de su pared celular de quitina y sus relaciones filogenéticas [6]. Este grupo, con un total de especies estimado alrededor de 1.5 millones, está subdividido en distintos grupos en base a características filogenéticas, morfológicas, ecológicas y/ o reproductivas [7]. Se trata de organismos ubicuos, capaces de colonizar múltiples sustratos en hábitats terrestres y dulceacuícolas siendo escasos en ambientes marinos. Los hongos actúan como saprótrofos, mutualistas, parásitos y simbioses. Muchos grupos poseen

sistemas enzimáticos extracelulares que despolimerizan los complejos sustratos sobre los que crecen.

No obstante, algunos de ellos, denominados “sacarofílicos” sólo utilizan sustancias solubles simples tales como azúcares y compuestos simples de carbono y presentan un comportamiento ruderal. Por otra parte, miembros de Ascomycota y Basidiomycota, incluyen muchos representantes con notable capacidad para la descomposición de celulosa y lignina respectivamente.

La actividad de los hongos depende de parámetros como la temperatura, humedad, PH, luz y el movimiento del aire que son condicionantes de la colonización, crecimiento y degradación del sustrato. Cuando estos factores no son apropiados, los hongos disminuyen su actividad y pueden iniciar la diferenciación de estructuras de reproducción (esporas) y/o estructuras somáticas de resistencia o incluso morir. No obstante, si las condiciones son favorables, los hongos desarrollarán a partir de esporas existentes, otras estructuras disponibles en el sustrato y/o aportadas por estructuras asexuales. Sin embargo, algunos hongos pueden subsistir en forma vegetativa bajo condiciones de estrés utilizando múltiples mecanismos que permiten su crecimiento bajo dichas condiciones (ej: hongos xerotolerantes). Durante su ciclo de vida, la mayoría de los hongos puede diferenciar estructuras reproductivas de origen sexual (fusión de núcleos y meiosis), o de origen asexual (división mitótica nuclear). El resultado de esta última, es la producción de propágulos típicamente microscópicos, como pequeñas esporas producidas en grandes cantidades, por la vía asexual. La diferenciación de esporas facilita la dispersión y propagación de los hongos y la conquista de nuevos hábitats y sustratos. Las mismas pueden originarse en el interior de estructuras llamadas esporangios que generan esporas endógenas o esporangiosporas o a partir de hifas especializadas que producen esporas exógenas o conidios. La morfología y estructura de las esporas presenta una gran variabilidad, desde uni a multicelulares, ramificadas o no ramificadas, espiraladas, con paredes engrosadas o delgadas, secas o viscosas, lisas u ornamentadas con extensiones mucilaginosas, espinas, pliegues o retículos. (Fig. 2).

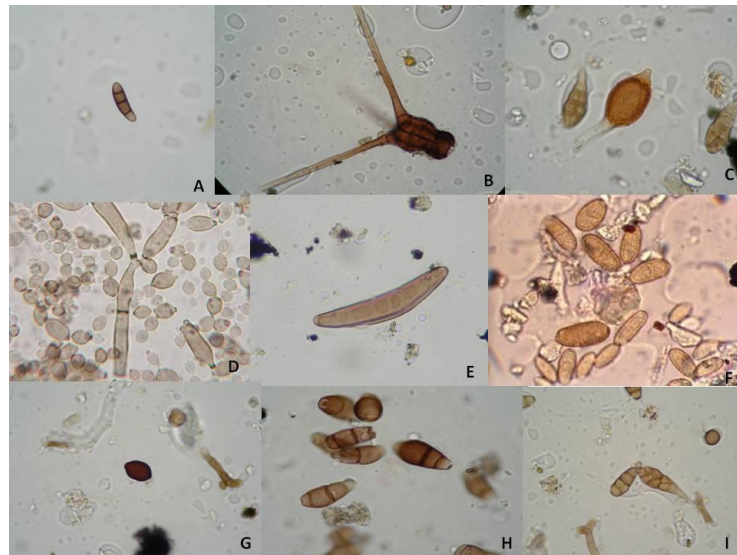


Fig. 2: Tipos de esporas fúngicas encontrados en el aire de ambientes interiores: **A.** Tipo *Lophosphaeria*, **B.** *Tetraploa* sp., **C.** *Puccinia* sp., **D.** *Cladosporium* sp., **E.** Tipo *Drechslera-Bipolaris*, **F.** *Cladosporium herbarum*, **G.** *Chaetomiium globosum*, **H.** *Curvularia* sp., **I.** *Alternaria* sp.

Los hongos pueden ser considerados beneficiosos o perjudiciales para el hombre. En su función como saprófitos, son relevantes en el reciclaje de la materia orgánica a través de la descomposición y transformación en los ecosistemas naturales y modificados por el

hombre [8]. Otros aspectos de interés económico se relacionan con el uso como fuente de alimento para animales y humanos; en la producción industrial y de antibióticos, alcaloides y ácidos orgánicos. Las levaduras se utilizan en la producción de distinto tipo de alimentos (panes, bebidas, quesos). En contraste, los hongos pueden tener efectos negativos, como agentes etiológicos de fitopatologías induciendo enfermedades en humanos y animales y como agentes responsables del biodeterioro. Un aspecto crítico se halla relacionado con la conservación de documentos de interés patrimonial, que son utilizados por los hongos como sustrato y/o como vehículo de dispersión. En este sentido, los hongos afectan notablemente objetos de interés patrimonial en formato papel con efectos severos sobre este material. Estos organismos son capaces de colonizar obras de arte y deteriorar el papel en el que se hallan realizados mediante procesos químicos y mecánicos.

Hongos asociados al biodeterioro de material documental en soporte papel

En numerosas colecciones de patrimonio cultural, bibliotecas y archivos, el papel y sus derivados constituyen el material orgánico dominante. En estos ambientes, los hongos juegan un rol clave en el biodeterioro [9, 10]. Aunque las bacterias también son capaces de deteriorar el papel, los hongos son menos exigentes para desarrollar, requiriendo condiciones de menor disponibilidad de agua (que normalmente existen en bibliotecas, archivos o museos) siendo estos ambientes más favorables para su desarrollo [9].

Los hongos responsables del biodeterioro de papel pueden estar representados en el aire y en el polvillo acumulado, como en el documento o su soporte, tratándose de especies del phylum Ascomycota caracterizados por un crecimiento lento y características xerofílicas pertenecientes a los géneros *Aspergillus*, *Paecilomyces*, *Chrysosporium*, *Penicillium* y *Cladosporium* [11]. La colonización fúngica del papel puede desarrollar a nivel superficial y/o deberse a la penetración en la matriz de microfibrillas [12]. Los mecanismos por los cuales los hongos pueden causar biodeterioro en objetos de papel se deben básicamente a dos procesos: 1- descomposición de la celulosa y/ o 2- producción de metabolitos secundarios. Otro aspecto importante relacionado con la contaminación fúngica en papel se relaciona con el riesgo para la salud humana que implica la manipulación de estos materiales ya que los hongos, aún muertos, pueden tener capacidad antígeno/ toxicogénica [13, 14].

Asimismo, estos organismos son ampliamente reconocidos como promotores de alergias implicados en severas enfermedades respiratorias. Altas concentraciones de esporas fúngicas (i.e. *Cladosporium*) pueden provocar enfermedades respiratorias cuando son inhaladas [15]. La tabla 1 presenta algunas referencias de reciente publicación acerca del estado actual del conocimiento sobre el proceso de transformación de la celulosa por agentes fúngicos asociado a materiales de interés patrimonial en soporte de papel.

Tabla 1: Algunas especies fúngicas reportadas como agentes que deterioran patrimonio cultural en soporte papel., Phylum Ascomycota; ^a, Phylum Basidiomycota; ^b, Subphylum Mucoromycotina ^c.

Fuente de aislamiento de los hongos	Taxones*	Referencias bibliográficas
Postil de profesores de la Facultad de Derecho (siglo XVII) del archivo de la Universidad de Coimbra (Portugal); papel de elaboración manual constituido por fibras de algodón, cáñamo y lino.	<i>Cladosporium cladosporioides</i> ^a como la especie más frecuente y <i>Cladosporium</i> ^a y <i>Penicillium</i> ^a como los géneros más frecuentes.	(Mesquita et al 2009)[16]
Libro de un notario privado del Monasterio de Santa María de Cárquere Rota do Românico (Portugal, siglo XVIII); papel constituido con pulpa de origen leñoso.	<i>Phlebiopsis gigantea</i> ^b .	(Mesquita et al 2009) [16]

Fuente de aislamiento de los hongos	Taxones*	Referencias bibliográficas
Material de la Mapoteca del Archivo Nacional de Cuba.	<i>Aspergillus</i> ssp. ^a y <i>Penicillium</i> ssp. ^a .	(Molina Veloso & Borrego, 2014) [17]
Papel tipo secante, blando (siglo XVII).	<i>Aspergillus sclerotiorum</i> , <i>Cladosporium</i> sp. ^a y <i>Torula</i> sp. ^a .	(Stepanowska & Cavaliere, 2012) [12]
Autorretrato de Leonardo da Vinci (1513) dibujado en papel con tiza roja, disponible en la Biblioteca Real de Turín.	Ascomycota ^a formadores de líquenes y <i>Acremonium</i> sp. ^a como los representantes más dominantes, aunque los resultados son dependiente de la metodología empleada.	(Piñar <i>et al</i> , 2015) [18]
Manchas “foxing” del Autorretrato de Leonardo da Vinci (1513) dibujado en papel con tiza roja, disponible en la Biblioteca Real de Turín.	<i>Eurotium halophilicum</i> ^a .	(Piñar <i>et al</i> , 2015) [18]
Fotografías, libros y mapas del siglo XIX con signos de deterioro. Material deteriorado de un libro del siglo XVI.	<i>Aspergillus versicolor</i> ^a , <i>Aspergillus nidulans</i> ^a , <i>Botryotinia fuckeliana</i> ^a , <i>Cladosporium cladosporioides</i> ^a , <i>Debaryomyces hansenii</i> ^a , <i>Epicoccum nigrum</i> ^a , <i>Penicillium pinophilum</i> ^a , <i>Rhizopus arrhizus</i> ^c .	(Michaelsen <i>et al</i> , 2006) [19]

Tabla 1 cont.

Los hongos y su actividad en el daño estructural del papel

La existencia de diferentes mecanismos celulolíticos en los hongos es responsable de la desintegración del papel debido a que utilizan la celulosa como fuente de carbono y energía. Debido a la estructura química de la celulosa organizada en regiones amorfas y cristalinas, muchos de los hongos que crecen sobre ellas se denominan “celulolíticos”.

El proceso de biodeterioro fúngico involucra mecanismos enzimáticos y no enzimáticos.

La despolimerización de la celulosa ha sido atribuida principalmente a la actividad de tres tipos de hidrolasas extracelulares: 1) endoglucanasas, 2) exoglucanasas y 3) β-glucosidasas. Entre estas, las endoglucanasas son clave en el proceso ya que incrementan el pool de sustratos de las otras enzimas y generan una notoria despolimerización y solubilización del material de partida.

La “amorfogénesis”, un término acuñado por Coughlan en 1985 [20], hace referencia al posible mecanismo por el cual se produce la desorganización o “swelling” de la celulosa, provocando una reducción en la agregación fibrilar y/o cristalinidad, aumentando su susceptibilidad al ataque enzimático [21]. Aun cuando se han obtenido importantes avances en conocimiento de la amorfogénesis, estos mecanismos no han sido completamente dilucidados.

Otros mecanismos pueden actuar también en conjunto con las enzimas. Estos procesos se han relacionado con la actividad de algunos hongos de podredumbre castaña causada por representantes de Basidiomycota. Estos hongos atacan el sustrato a través de reacciones redox. La microbiota celulolítica puede estar acompañada por hongos sin capacidad para la despolimerización. Además de la celulosa, el papel contiene otras fuentes de C como rellenos, tintas, aprestos y polvo que pueden ser ricos en proteínas y azúcares que pueden sustentar la colonización fúngica así como obtener CO₂, nitrógeno, y otras moléculas gaseosas asociadas a la atmósfera. En condiciones de estrés los hongos pueden

nutrirse de estos sustratos alternativos así como utilizar fuentes de C endógeno disponible en las esporas. Esto puede dar lugar al desarrollo de micelio inconspicuo en el papel que puede asociarse a la producción de metabolitos secundarios [22].

Deterioro estético del papel por la actividad fúngica

Foxing

Mientras que algunas modificaciones en la coloración del papel pueden ser el resultado de transformaciones físico-químicas de sus componentes (lignina) las alteraciones colorimétricas, se pueden generar en respuesta a la colonización fúngica del papel. Esta capacidad de provocar cambios en la coloración se considera derivada de la síntesis de metabolitos pigmentados y/o de la reacción de Maillard de productos del metabolismo fúngico como ácidos orgánicos, oligosacáridos y compuestos proteicos que reaccionan químicamente con el material bajo condiciones específicas tales como la baja actividad del agua y altas temperaturas. Este último proceso conduce a la formación de cromóforos en el papel muchas veces considerados como *foxing* [23; 18].

El biodeterioro de papel via *foxing* ha sido registrado en distintos tipos de papel desde el siglo XVI. Aunque los mecanismos involucrados en la formación de estos *spots* (manchas) coloreados han sido estudiados desde 1930 - 1935 [24], los resultados son controversiales y no concluyentes. Una teoría postula que el origen del *foxing* se debe a procesos abióticos, aunque la naturaleza de este proceso se halla aún en discusión. Recientemente, Ardelean y Melniciuc-Puică, (2013) [25] reportan las siguientes posibles causas responsables de la aparición de manchas de *foxing*: 1-La oxidación directa de metales y migración de los productos solubles de degradación. 2-La contaminación por microorganismos posiblemente suspendidos en el aire que producen manchas pardo amarillentas, como responsables del desarrollo y la producción de ácidos derivados de la degradación de la celulosa. 3- la participación de metales en el proceso de oxidación de la celulosa [26]. 4-las reacciones de autooxidación, que muchas veces se aceleran bajo condiciones de alta humedad relativa causando la decoloración en la superficie del papel. Además, la presencia de *foxing* también ha sido relacionada con reacciones de condensación entre productos de oxidación de la celulosa con compuestos nitrogenados [27, 28].

Dado que el proceso de *foxing* puede producirse tanto por la oxidación del hierro como por la influencia de microorganismos, futuros estudios son necesarios para identificar sus causas, los reactivos y mecanismos involucrados en su génesis pues es probable que sea una combinación de procesos bióticos y abióticos.

Pigmentos fúngicos

Muchos hongos son capaces de sintetizar pigmentos de distinta naturaleza química y solubilidad como carotenoides (lipofílicos), antraquinonas (hidrofílicos) y melaninas (solubles en soluciones alcalinas) que causan deterioro estético en el papel. Estos metabolitos secundarios pueden causar severas alteraciones en el color del papel. A nivel biológico, la producción de pigmentos por los hongos se relaciona con el desarrollo de mecanismos de protección contra el stress ambiental. El proceso de producción y acumulación de pigmentos en papel deteriorado, puede restringirse a las estructuras que el hongo diferencia y/ o a la difusión de metabolitos en el soluto.

Los pigmentos pueden encontrarse en las esporas, cuerpos fructíferos y micelio así como en estructuras de resistencia como los esclerocios.

La figura 4 (A – D) muestra un fragmento de papel de abacá biodeteriorado por el hongo *Chaetomium globosum* LPSC 259, se observa la alteración de la organización de la matriz fibrilar del papel y las estructuras reproductivas (peritecio y esporas) diferenciadas por el hongo.

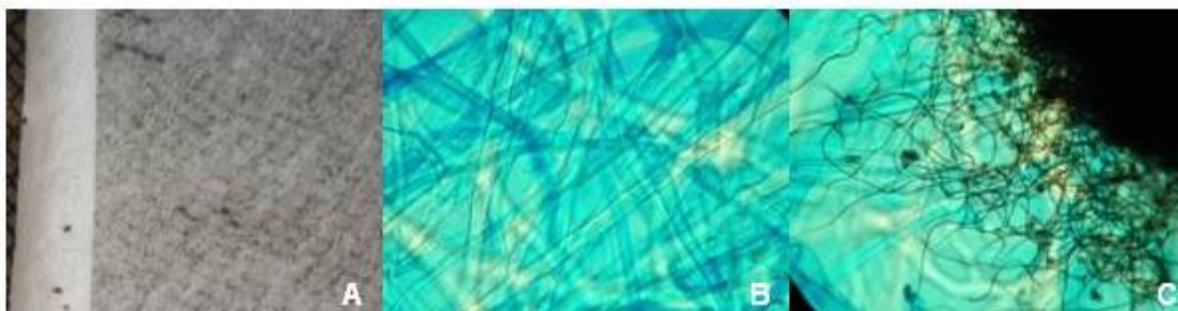


Fig. 4. A-D. Desarrollo in vitro de *Chaetomium globosum* LPSC 259 sobre papel de abaca. A. Vista general del papel mostrando los peritecios desarrollados por el hongo sobre la superficie. B. Matrix fibrilar del papel deteriorado por desarrollo de hifas fúngicas. C. Detalle de un sector del peritecio oscuro asociado con una masa de hifas y ascosporas pigmentadas que se unen al papel deteriorado.

Se han realizado múltiples estudios acerca de la síntesis y difusión de pigmentos en taxa como *Cladosporium*, *Chaetomium*, *Aspergillus* y *Helicosporium* [14; 29; 30, 31].

CONCLUSIONES

La limpieza y el control ambiental de sitios de guarda del patrimonio cultural, así como el monitoreo de la calidad del aire son procedimientos claves para la prevención del biodeterioro. No obstante, las estrategias eficaces de prevención contra el deterioro por hongos deben ser mejoradas y optimizadas a fin de minimizar el ataque y modificación del papel. Como se analizó en esta presentación, la degradación de la celulosa por acción fúngica causa tanto destrucción de los documentos como la producción de sustancias que afectan el material. Asimismo, esto facilita la colonización de otros hongos no celulolíticos que secretan otros metabolitos problemáticos. El conocimiento de la biología de estos organismos, que pertenecen a distintos grupos ecofisiológicos es fundamental para la conservación y restauración de papel biodeteriorado. Hasta el momento no hay datos concluyentes acerca de los mecanismos y factores que inducen el biodeterioro. Por lo tanto, son necesarias más investigaciones para desarrollar procesos efectivos y sustentables para disminuir el impacto del biodeterioro fúngico en el patrimonio cultural.

Agradecimientos:

Este estudio fue realizado con el financiamiento del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) PIP 112-201101-00087, PIP 112-201101- 00391; Agencia Foncyt PICT 2013-0418, y el Proyecto de Incentivos a la Investigación (N11/781) de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo (FCNyM), Argentina.

REFERENCIAS

- [1] Bankole, O. M., (2010). *A review of biological deterioration of library materials and possible control strategies in the tropics*. Library Review 59 (6), pp. 414 -42.
- [2] Barduaj N. & Bhatnagar, I. K.. (2015). *Microbial deterioration of paper paintings*. 2002. In. Shrivastava, R. B., Mathur, G. N. & Argwal Eds. Biodeterioration of material. Vol. 4 (IVC-2015): 42 -46.
- [3] Shrivastava, S. (2015). *Biodeterioration of art objects on paper and their conservation*. Research Journal of Recent Sciences 4 (IVC-2015). pp. 42-46.
- [4] Chadeganipour, M., R. Ojaghi, H. Rafiei, M. Afshar, S. T. Hashemi. (2013). *Biodeterioration of library material: study of fungi threatening printed materials or libraries in Isfahan University of*

Medical Sciences in 2011. Jundishapur Journal of Microbiol 6 (2):, pp. 127 – 131. DOI: 10.5812/jjm.4751.

- [5] Simmon Nobbe B, Denk U, Poö Il V, Rid R, Breitenbach M. (2008). *The spectrum of fungal allergy*. International Archives of Allergy and Immunology 145, pp. 58-86.
- [6] Hibbett, D. S., M. Binder, Bischoff J. F., M. Blackwell, P. F. Cannon, O. E. Eriksson, S. Huhndorf, T. James, P. Kirk, R. Lücking, H. Thorsten Lumbsch, F. Lutzoni, P. B. Matheny, D. J. McLaughlin, M. Powell, S. Redhead, C. Schoch, J. Spatafora, J. A. Stalpersi, R. Vilgalys, M. C. Aime, A. Aptroot, R. Bauer, D. Begerow, G. Benny, L. Castelbury, P. W. Crousi, Y. Dai, W. Gamsi, D. M. Geiser, D. M. Griffith, G.W. Griffith, C. Gueidan, D. L. Hawksworth, G. Hestmark, K. Hosaka, R. Humber, K. D. Hyde, J. E. Ironside, U. Kõljalg, C. P. Kurtzman, K. H. Larsson, R. Lichtward, J. Longcore, J. Miadliskowska, A. Miller, J. M. Moncalvo, S. Mozley-Standrige, F. Oberlinker, E. Parmasto, V. Reeb, J. D. Rogers, C. Roux, L. Ryvarden, J. P. Sampaio, A. Schüßler, J. Sugiyama, R. G. Thorn, L. Tibell, W. A. Untereiner, C. Walker, Z. Wang, A. Weir, M. Weiss, M. White, K. Winka, Y. YAO, N. Zhang. (2007). *A higher-level phylogenetic classification of the Fungi*. Mycological Research 111, pp. 509-547.
- [7] Kirk, P. M., P. F., Cannon, J. C. David, J. A. Eds. Ainsworth & Bisby's Dictionary of the Fungi 9th Edition, (2001). Cabi Publishing, UK.
- [8] Saparrat, M.C.N., A. Bárcena, P. Balatti. 2013. *Microorganismos del suelo y su participación en la formación de la materia orgánica: lignocelulólisis y mecanismos involucrados*. Microbiología Agrícola. Un aporte de la investigación en Argentina 2da Ed. 2013. Capítulo del Eje Temático: Materia Orgánica del Suelo, pp. 65-92. ISBN 978-987-1726-17-2. Universidad Nacional de Santiago del Estero. Magna Publicaciones (Tucumán). doi:10.1128/AEM.02077-08.
- [9] Sequeira, S., E. J. Cabrita, M. F. Macedo. (2012). *Antifungal on paper conservation: An overview*. International Biodeterioration and Biodegradation. 74, pp. 67 - 85.
- [10] Sterflinger, K. & G. Piñar. (2011). *Microbial deterioration of cultural heritage and works of arts - tilting at windmills?* Applied Microbiology Biotechnology 97 (22), pp. 9637- 646.
- [11] Pinzari, F. & M. Montanari. (2011). *Mould growth on library materials stored compactus-type shelving units*. In S. A. Abdul-Wahab (Ed.). Sick building syndrome in public buildings and workplaces, pp. 196-203. Springer. Berlin.
- [12] Szczepanowska, H. & A. R. Cavaliere, A. R. (2012). *Conserving our cultural heritage: The role of fungi in biodeterioration*. E. Johannig, P. R. Morey, P. L. Auger (Eds.). Bioaerosols – Fungi, Bacteria, Mycotoxins in Indoor and Outdoor Environments and Human Health., pp. 293-309. Fungal Research Group Foundation, Inc. Albany, NY. 2012. ISBN 978-0-9709915-0-8.
- [13] Bennett M. J. W. & Klich M. (2003). *Mycotoxins*. Clinical Microbiology Reviews 16 (3), pp. 497-516. doi:10.1128/CMR.16.3.497-516.
- [14] Pinheiro, A. C, M. F. Macedo, V. Jurado, C. Sainz Jimenez, C. Viegas, J. Brandão, L. Rosado. (2011). *Mould and yeast identification in archival settings: Preliminary results on the use of traditional methods and molecular biology options in Portuguese archives*. International Biodeterioration & Biodegradation 65 (4), pp. 619-627.
- [15] Khan, A. H. & S. M. Karuppayil. (2012). *Fungal pollution of indoor environments and its managements*. Saudi Journal of Biological Sciences 19 pp. 405-426.
- [16] Mesquita, N., A. Portugal, S. Videira, S. Rodriguez-Echeverri, A. M. L. Bandeira, M. J. A. Santos, H. Freitas, H. (2009). *Fungal diversity in ancient documents. A case study on the Archive of the University of Coimbra*. International Biodeterioration & Biodegradation 63, pp. 626-629.
- [17] Molina Veloso A. & S. F. Borrego Alonso. (2014). *Caracterización de hongos aislados de mapas conservados en el Archivo Nacional de la República de Cuba*. Ge-conservación 6, pp 35-44. ISSN: 1989-8568 14.
- [18] Piñar, G., H. Tafer, K. Sterflinger, F. Pinzari, F. (2015). *Amid the possible causes of a very famous foxing: molecular and microscopic insight into Leonardo da Vinci's self portrait*. Environmental Microbiology Reports 7(6):849-59. doi: 10.1111/1758-2229.12313
- [19] Michaelsen, A., F. Pinzari, K. Ripka, W. Lubitz, G. Piñar. (2006) *Application of molecular techniques for identification of fungal communities colonizing paper material*. International Biodeterioration & Biodegradation 58, pp. 133-141.
- [20] Coughlan, M. P. (1985). *The properties of fungal and bacterial cellulases with comment on their production and application*. Biotechnology and genetic engineering reviews. Russell GE Ed. Newcastle-upon-Tyne: Interscience 3 1985, 37-109.
- [21] Arantes, V. & J. K. Saddler. (2010). *Access to cellulose limits the efficiency of enzymatic hydrolysis: the role of amorphogenesis*. Biotechnology for Biofuels 3-4.. DOI: 10.1186/1754-6834-3-4

- [22]. Pagano, M. C. & P.P. Dhar. (2015). *Fungal pigments: An overview*. In V. K. Gupta, R. L. Mach S. Sreenivasaprasad. *Fungal Biomolecules: Sources, Applications and Recent Developments*, Chapter 13. First Edition. John Wiley & Sons, Ltd. Ed.
- [23] Gallo, F. (1992). *Il biodeterioramento di Libri e Documenti*. Centro di Studi per la Conservazione della Carta. International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of the Cultural Property, pp. 128
- [24] Prajapati, Ch. (2005). *Conservation of Documents: Problems and Solutions : Policy Perspectives..* Mittal Publication, New Delhi.
- [25] Ardelean, E. & N. Melniciuc-Puică. (2013). *Conservation of paper documents damaged by foxing*. *European Journal of Science and Theology* 9 (2) pp. 117-124.
- [26]. Bicchieri, M., S. Ronconi, F. P. Romano, L. Pappalardo, M. Corsi, G. Cristoforetti, S. Legnaioli, V. Palleschi, A. Salvetti, E. Tognoni. (2002). *Study of foxing stains on paper by chemical methods, infrared spectroscopy, micro-X-ray fluorescence spectrometry and laser induced breakdown spectroscopy*. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 57 (7) pp. 1235-1249.
- [27] Guggenberger, G. (2005). *Humification and Mineralization in Soils*. Chapter 4. A. Varma; F. Buscot. Eds. *Microorganisms in Soils: Roles in Genesis and Functions* Volume 3 of the series *Soil Biology*. pp. 85-106.
- [28] Lavin, P., S. Gómez de Saravia, P. Guiamet. (2016). *Scopulariopsis sp. and Fusarium sp. in the documentary heritage: evaluation of their biodeterioration ability and antifungal effect of two essential oils*. *Microbial Ecology* 71. pp. 628–633 DOI
- [29] Choi, H. J., S. M. Lee, S. H. Kim, D. W. Kim, Y. W. Choi, W. H. Joo. *A novel Helicosporium isolate and its antimicrobial and cytotoxic pigment*. (2012). *Journal Microbioly Biotechnology* 22(9)., pp. 1214-1217
- [30] Keller, S., J. Macheleidt, K. Scherlach, J. Schmalder-Ripcke, I. D. Jacobsen, T. Heinekamp, A. A. Brakhage. (2011). *Pyomelanin Formation in Aspergillus fumigatus Requires HmgX and the Transcriptional Activator HmgR but Is Dispensable for Virulence*. In Chauhan N, Ed. *PLOS ONE*: 6 (10):e 26604. doi:10.1371/journal.pone.0026604.
- [31] Almeida-Paes, R., S. Frases, G. de Sousa Araújo, M. M. Evangelista de Oliveira, G. J. Gerfen, J. D. Nosanchuk, R. M. Zancopé-Oliveira. (2012). *Biosynthesis and functions of a melanoid pigment produced by species of the Sporothrix complex in the presence of L-Tyrosine*. *Applied and Environmental Microbiology* 78., pp. 8623-8630.
- [32] Schmalder-Ripcke, J., V. Sugareva, P. Gebhardt, R. Winkler, O. Kniemeyer, T. Thorsten Heinekamp, A. A. Brakhage. (2009). *Production of Pyomelanin, a Second Type of Melanin, via the Tyrosine Degradation Pathway in Aspergillus fumigatus*. *Applied and Environmental Microbiology* 75 (2). pp. 493-503.