

REVIEW / ARTÍCULO DE REVISIÓN

Bioproductos desarrollados a partir de micelio de hongos: Una nueva cultura material y su impacto en la transición hacia una economía sostenible

Fungal mycelium-bioproducts development: A new material culture and its impact on the transition to a sustainable economy

Kevin Feijóo-Vivas¹, Stalin A. Bermúdez-Puga¹ Hernán-Rebolledo², José Miguel Figueroa², Pablo Zamora^{2,3} & Leopoldo Naranjo-Briceño^{1,2,4}

DOI. 10.21931/RB/2021.06.01.29

Resumen: El biodiseño y biofabricación de biomateriales a partir de residuos vegetales lignocelulósicos y auto-generados por el micelio de hongos es un campo de investigación emergente desde las últimas dos décadas. Surge una nueva cultura material que se basa en los nuevos paradigmas de la fabricación alternativa partiendo de la lógica "de hacer crecer los nuevos materiales en lugar de extraerlos" e integrando los principios básicos de la economía circular y de la Biotecnología Material, asegurando la susceptibilidad de los mismos a ser biodegradados y volver a su estado original en la naturaleza. Su implementación a nivel industrial en distintas áreas de la manufactura comienza a competir con el cuero de origen animal, materiales y productos de origen petroquímico, a la vez que promueve nuevas alternativas de alimentos proteicos sustentables que contribuyan al cambio de los patrones de consumo humano de alto impacto ambiental arraigados a nivel global. La presente revisión, aborda una mirada particular que va desde lo molecular a lo global sobre la nueva cultura micelial, considerando aspectos generales del reino Fungi, la morfogénesis, composición química e integridad celular del micelio, los sistemas multienzimáticos extracelulares de degradación de lignocelulosa que poseen los hongos, pasando por los principales sustratos empleados, los biomateriales desarrollados a partir de micelio a nivel industrial, destacando los biotextiles, materiales y productos para el empaquetamiento y aislamiento, nuevas fuentes alimentarias basadas en el micelio, el arte y el diseño arquitectónico. Finalmente, se presenta el estado del arte actual de las empresas o laboratorios vanguardistas que suscitan una economía circular basada en el micelio de hongos a nivel mundial, al reemplazar recursos y productos de origen fósil por materiales amigables con el entorno, generando alternativas sostenibles y ciclos de producción con una baja demanda de energía y sin repercusiones al medio ambiente, es decir, promoviendo una nueva conciencia material.

1637

Palabras clave: Hongos, micelio, lignocelulosa, biomateriales, biofabricación, materiales compuestos, biotextiles, economía circular.

Abstract: The biodesign and biofabrication of self-generated biomaterials based on lignocellulosic plant residues and by fungal mycelium is an emerging field of research for the last two decades. A new material culture emerges based on the new paradigms of alternative manufacturing founded on the logic "of growing new materials instead of extracting them" that integrates the basic principles of the circular economy and Material Biotechnology, ensuring susceptibility of them to be biodegraded and returned to their original state in nature. Its implementation at an industrial level in different manufacturing areas begins to compete with animal origin-leather, materials, and petrochemical products while promoting new alternatives of sustainable protein foods that contribute to changing high human consumption patterns globally entrenched environmental impact. This review addresses a detailed overview from the molecular to the global of the new mycelial culture, considering general features about Fungi kingdom, the morphogenesis, chemical composition, and cellular integrity of the mycelium, the extracellular multi-enzymatic systems for the lignocellulose degradation, passing through the primary substrates used, the biomaterials developed from fungal mycelium at the industrial level; highlighting biotextiles, materials and products for packaging and insulation, new mycelium-based food sources, art, and architectural design. Finally, a current state-of-the-art of frontlines companies or laboratories promoting a circular economy based on fungal mycelium is addressed by replacing resources and fossil origin products with environmentally friendly materials, generating sustainable alternatives and production cycles with low energy demand and without environmental repercussions, that is to say, promoting a new material consciousness.

Key words: Fungi, mycelium, lignocellulose, biomaterials, biofabrication, composite materials, biotextiles, circular economy.

Introducción

Los materiales han estado presentes en cada paso de la historia de la humanidad, desde la utilización de materiales de origen natural en la Edad de Piedra, como la madera, lana, cuero y algodón, hasta el desarrollo de plásticos y otros polímeros sintéticos de origen petroquímico que marcaron tendencia durante el siglo XX. Sin embargo, aunado al crecimiento de la población mundial, la producción masiva de dichos materiales

muchas veces está asociado a impactos ambientales negativos, tanto a nivel local como global, ya que frecuentemente implican la generación de desechos tóxicos y contaminantes, un alto consumo de energía durante su producción, una liberación constante de gases de efecto invernadero a lo largo de toda su cadena de valor, el incremento de la temperatura atmosférica y concomitante cambio global¹. Bajo este contexto,

¹ Facultad de Ciencias de la Vida, Ingeniería en Biotecnología, Universidad Regional Amazónica Ikiám, Tena, Ecuador.

² Spora Biotech, Fundo Santa Paulina, Rosario, Rengo, Chile.

³ Vincula S&C, Las Condes, Región Metropolitana, Chile.

⁴ Grupo de Microbiología Aplicada, Universidad Regional Amazónica Ikiám, vía Muyuna, Tena, Ecuador.

algunos de los mayores desafíos de nuestra sociedad actual son la búsqueda de nuevas tecnologías verdes que promuevan la innovación y transición hacia una economía sostenible donde el empleo de los recursos naturales renovables y no renovables sea más responsable con el medio ambiente en procesos productivos de alta huella ecológica². En este sentido, el reino Fungi extiende su micelio para interconectarse al pensamiento crítico y lógico de empresas de base biotecnológica que reinventan sus paradigmas industriales en nuevas formas de economía circular basados en la Biotecnología Fúngica y Material.

Un sin número de productos con alto valor biotecnológico han surgido de la exploración del metabolismo de los hongos como es la obtención de aditivos alimentarios, compuestos bioactivos e interés farmacológico, pigmentos, biocombustibles, enzimas, vitaminas, aminoácidos, entre otros^{3,4}. La tendencia en la última década, aparte del desarrollo de cuerpos fructíferos o la producción de moléculas bioactivas con fines medicinales, es centrarse en el estudio del micelio de los hongos ya que ofrecen un tejido de nuevos enfoques de producción con alternativas sostenibles con impacto negativo en el ambiente⁵. Ahora, basados en los nuevos paradigmas de fabricación alternativa, que se siembran en "el crecimiento de materiales en lugar de extraerlos", el micelio fúngico propone a la economía una nueva generación de biomateriales sostenibles a partir de biomasa fúngica o de materiales compuestos por desechos orgánicos y micelio⁶. Las áreas de investigación y aplicación tecnológica de productos a base de micelio se mantienen en constante crecimiento y desarrollo obteniendo resultados eficientes, rentables y competitivos frente a materiales imperecederos de origen petroquímico, cueros de origen animal en la industria textil y como nuevas fuentes de alimento fomentando en este sentido a la economía circular⁷. En la actualidad, los productos a base de micelio están revolucionando las industrias del embalaje, textil, del cuero, de materiales de construcción para viviendas, muebles orgánicos y la automatización^{2,8}. Además, existe un especial interés en emplearlos para el aislamiento térmico y acústico, la protección contra incendios y nuevas fuentes de alimento con alto contenido en aminoácidos esenciales y proteínas^{9,10}. Sin embargo, la información disponible en la literatura aún es sesgada e incompleta y las empresas dedicadas a la nueva cultura micelial mantienen encriptadas las metodologías desarrolladas para la obtención de biomateriales de origen fúngico. Es por ello, que el presente artículo de revisión tiene como finalidad contribuir a revelar la simbiosis del reino Fungi asociada a la autogeneración de biomateriales a partir de residuos lignocelulósicos partiendo del micelio, como objeto y origen del todo, su morfogénesis, composición química e integridad celular y los sistemas multienzimáticos extracelulares de degradación de lignocelulosa. Además, aborda los principales biomateriales compuestos de micelio de hongos colocados en el mercado internacional y las empresas progresistas que los producen; así como la distribución de la propiedad intelectual asociada al desarrollo de biomateriales basados en el micelio de hongos.

Aspectos generales del reino Fungi

Los hongos son un grupo diverso y extendido de organismos eucariotas y ubicuos que agrupa a grandes rasgos a las levaduras, mohos y setas¹¹. Los hongos evolucionaron a partir del súper grupo Opisthokonta, un clado de organismos eucariotas y heterótrofos en el que coexisten los hongos verdaderos, animales vertebrados y protistas unicelulares flagelados. Opisthokonta alude a la presencia de células flageladas, ocupando el flagelo una posición posterior¹². Debido a la presencia

de un flagelo unicelular en las zoosporas y gametos de hongos de la división Chytridiomycota, así como en los espermatozoides de animales, Fungi se convierte en un reino evolutivamente más cercano al reino Animalia que al Plantae¹³.

En base a descubrimientos fósiles, los hongos terrestres más antiguos datan de aproximadamente 1080-890 millones de años. En mayo de 2019, microfósiles de un hongo microscópico del género *Ouraspahira* fueron hallados en lutitas de la formación Grassy Bay, en el Ártico canadiense, pertenecientes a la era geológica Mesoproterozoico (1200-1600 M.a.). Anterior a este descubrimiento, los fósiles más antiguos se conocían del periodo Silúrico y Devónico (420-350 M.a.) pertenecientes al género *Prototaxites* hallados en América del Norte, Norte de Europa (Reino Unido y Alemania), África del Norte y Asia Occidental (Arabia Saudita y Australia). Sus cuerpos fructíferos fueron los organismos terrestres más altos de ese tiempo, llegando a medir hasta alrededor de 1 metro de diámetro y 8.8 metros de altura^{14,15}.

Hasta la actualidad, sistemáticamente 144.000 especies fúngicas han sido nombradas y clasificadas. Sin embargo, se estima que el 93% de las especies son actualmente desconocidas para la ciencia. El número total de especies en la Tierra puede llegar a ser entre 2.2 y 2.8 millones según estimaciones basadas en estudios de ADN ambiental (eDNA), y el número aumenta si se ahonda en la diversidad de OTUs (por sus siglas en inglés, Operational Taxonomic Unit), el modelamiento de nichos ecológicos y en interpolaciones basadas en la riqueza global de especies¹⁶. Sin embargo, se estima que puede haber 5 millones de especies de hongos en todo el planeta.

Los hongos tienen ciclos de vida diversos y complejos, pueden reproducirse a partir de la producción de esporas (sexuales o asexuales) y/o la fragmentación de hifas. Durante el ciclo de vida sus células pueden ser haploides, diploides, dicarióticas o multicarióticas¹⁷. Además, muchos poseen un crecimiento indeterminado e indefinido, como es el caso de *Armillaria bulbosa*, un Basidiomiceto del género Agaricales, que por propagación asexual ha colonizado de micelio al menos 15 hectáreas de suelo forestal del bosque de frondosas del norte de Michigan, Estados Unidos. Pesa más de 10.000 kg y se ha mantenido genéticamente estable durante más de 1.500 años convirtiéndose en el organismo vivo más extenso y antiguo del planeta Tierra¹⁸.

El subreino Dikarya o hongos superiores alberga la división Ascomycota y Basidiomycota, sus taxones son homólogos por poseer células dicarióticas; resultantes de la fusión citoplasmática de células para la distribución de dos núcleos monocarióticos a células hijas resultantes de la mitosis. Es decir, albergan especies con células de más de dos núcleos¹⁹. En la presente revisión, solamente se hará referencia a los hongos superiores que son las más empleados en la fabricación de biomateriales basados en micelio de hongos.

Fisiología y diversidad de hongos superiores

Micelio, morfogénesis e integridad celular

El micelio es una red fibrosa de filamentos microscópicos interconectados y dinámicos bien desarrollado y perenne constituido por la extensión apical y fusión de hifas o anastomosis, filamentos tubulares y alargados que muestran una considerable plasticidad y versatilidad de desarrollo (Figura 1.b)²⁰. El micelio es el esqueleto del organismo ya que se encarga de conectar y trasladar rápidamente agua, azúcares y minerales formando un sistema cerrado en respuesta a estímulos o cambios en la composición del medio externo²¹. Dis-

tintas regiones interconectadas del micelio pueden mostrar actividades fisiológicas y bioquímicas diferentes simultáneamente o en distintos momentos, su respuesta variará según la especie y las condiciones nutricionales como micro ambientales locales^{20,22,23}. Cuando crecen en un sustrato heterogéneo, el desarrollo del micelio permanece difuso y se diferencian estructuras largas paralelas o rizomorfos²⁴. Mientras, en un entorno donde los nutrientes se distribuyen homogéneamente y en abundancia, el micelio puede llegar a presentar pigmentación, un crecimiento rítmico e incluso exhibir sectores morfológicos delgados como densos y producir estructuras aéreas⁹.

Según su función y estado del desarrollo, se reconocen dos tipos de micelio, el micelio vegetativo y aéreo. El micelio vegetativo usualmente habita el suelo, coloniza y se nutre de materia orgánica vegetal y animal viva (Ej. Hongos parasíticos), en descomposición (Ej. Hongos saprófitos) o tienen la capacidad de asociarse de manera mutualista (hongos endófitos y los formadores de micorrizas) (Figura 1.c)²⁵. Mientras que el micelio aéreo, a partir del sustrato colonizado por el micelio vegetativo, se proyecta hacia la superficie por la extensión apical y propagación ramificada de hifas aéreas, formando en sus puntas estructuras terciarias productoras de esporas asexuales y/o sexuales²⁶. El micelio aéreo también se reconoce como un estado reproductivo del hongo ya que asegura su supervivencia y la trascendencia de genes a nuevos hábitats (Figura 1.d)^{27,28}.

El micelio posee una gran resistencia mecánica e hidrofobicidad atribuida a una estructura celular circundante a la membrana plasmática, su pared celular^{21,31}. La pared celular fúngica cumple un rol fisiológico en la morfogénesis y en la

protección de la integridad del micelio^{13,32}. Durante el crecimiento celular del hongo, la célula contiene una mayor concentración de sales y azúcares generando un diferencial osmótico en relación al medio exterior e impulsando la entrada neta de agua a través de la membrana plasmática provocando su expansión celular³³. La membrana plasmática se presiona contra la superficie interna de la pared, lo que resulta en el desarrollo de presión hidrostática o turgencia³⁴. El aumento de la presión interna permite que la célula se acerque a una condición de homeostasis en la que la afluencia de agua coincide con el aumento del volumen celular que se produce durante su crecimiento. Es decir, la pared celular es una estructura muy dinámica y en constante crecimiento, que resiste la expansión en gran parte de su superficie. Además, se extiende en regiones específicas incluidas las puntas de las hifas (Figura 1.a)¹³.

Desde el punto de vista estructural, la pared de la célula fúngica es un compuesto macromolecular entrelazado y poroso ensamblado en la superficie de la membrana plasmática^{17,35}. De manera general, la pared celular se compone de polisacáridos, microfibrillas de quitina unidas covalentemente a polímeros lineales de glucanos y una variedad de glicoproteínas y lípidos. Junto a pequeñas cantidades de polifosfatos e iones inorgánicos, conforman la matriz extracelular (Figura 2)³⁶. La síntesis del polímero de quitina es catalizada por la quitina sintasa a partir de monómeros β -1,4-N-acetil-D-glucosamina. Entre moléculas de quitina adyacentes se ensamblan en matrices antiparalelas unidas por hidrógeno volviéndolas extremadamente insolubles, con una gran resistencia a la tracción, soportan el estrés y eliminan el agua de su estructura³⁷. Cuando la quitina se rompe, la célula pierde su estabilidad osmótica

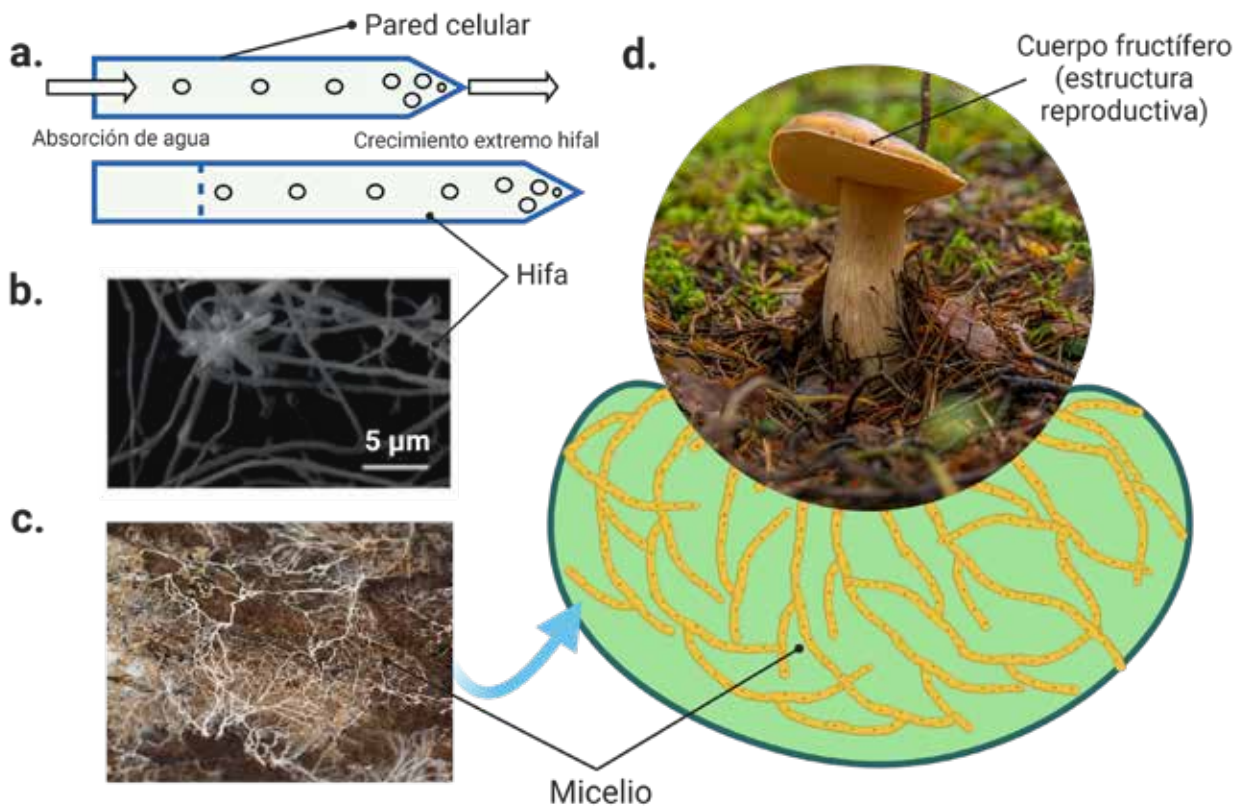


Figura 1. Biología y estructura de hongos superiores a. El crecimiento apical de hifas generado por la presión de turgencia inducida por un gradiente osmótico en el sitio de absorción de agua y la secreción de materiales extracelulares mediado por vacuolas²⁹. b. Micrografía SEM de *Ganoderma lucidum* sobre sustrato de celulosa a los 10 días de crecimiento a 30°C. c. Colonización micelial de un hongo de podredumbre blanca sobre sustrato de naturaleza lignocelulósica. "Mycelium" by Bushman. K is licensed under CC BY-NC 2.0 d. Esquema de la estructura reproductiva fúngica desarrollada a partir de la red micelial vegetativa. Diagrama creado por BioRender.com

y puede romperse. El β -1,3-glucano es a menudo el polímero de la pared celular más abundante. El enlace β -1,3-glicosídico en los glucanos retuerce el polímero y tres cadenas de glucano forman una triple hélice que se mantiene unida por enlaces de hidrógeno. Los β -1,3-glucanos están conectados con β -1,6-glucanos en la estructura de la pared madura para producir una red elástica de polímeros altamente ramificada³⁷.

Las proteínas estructurales en la pared celular son glicoproteínas con carbohidratos ligados a N y O. Estos incluyen a manoproteínas, que están glicosiladas con cadenas ricas en manosa, y otras glicoproteínas con manosa y residuos de galactosa. Las glicoproteínas de la pared celular están conectadas a la membrana plasmática mediante un anclaje de glucosilfosfatidilinositol (GPI) y se reticulan con las microfibrillas de quitina y glucanos y cumplen funciones de señalización y transporte, participan en la fusión con otras células y funcionan en la adhesión a superficies, formación de biopelículas y patogénesis. También median la absorción de compuestos del entorno circundante y protege la célula de sustancias nocivas^{13,32}.

Análisis químicos de la composición de la pared celular han revelado que las proporciones relativas de quitina, glucanos y glicoproteínas varían según las características fisiológicas intrínsecas de la especie^{24,39}. La hidrólisis, generalmente ácida, de las paredes celulares de hongos que representan distintos taxones ha revelado que los azúcares más abundantes son las hexosas, en el siguiente orden de abundancia y distribución (Tabla 1): glucosa > glucosamina (producto hidrolítico

de la quitina y quitosano) > manosa > galactosa > galactosamina. También se han encontrado ácidos urónicos, principalmente ácido glucorónico, pentosas (arabinosa y ribosa) y desoxihexosas (principalmente fucosas)³². Así mismo, factores exógenos influyen en las concentraciones relativas de los componentes de la pared celular; como la edad del cultivo, las condiciones ambientales de crecimiento, el uso de medios sólidos y líquidos, las fuentes de nitrógeno y carbono, la concentración de iones, la temperatura, el pH, la iluminación, la adición de diferentes componentes, etc^{21,35}. Haneef y colaboradores, a través del cultivo de dos hongos Basidiomicetos de podredumbre blanca y productores del mismo tipo de enzimas, *Ganoderma lucidum* y *Pleurotus ostreatus*, fueron inoculados en sustratos de polisacáridos de celulosa pura y PDB (Potato Dextrose Broth) demostrando que las películas fibrosas de micelio presentan propiedades mecánicas y estructurales sintonizables y muy bien controladas dependiendo de los nutrientes del sustrato. El micelio se volvió más fibroso y rígido cuando se cultivó en celulosa pura. La celulosa pura es más compleja y difícil de digerir en comparación a la celulosa de PDB debido a la presencia de azúcares simples. La rigidez del micelio fue atribuida a una mayor síntesis de quitina para la penetración y degradación de la celulosa. Además de demostrar que pueden ser producidas en grandes cantidades y sobre amplias superficies³⁰.

Sistema multi-enzimático extracelular saprófito degradador de biomasa lignocelulósica

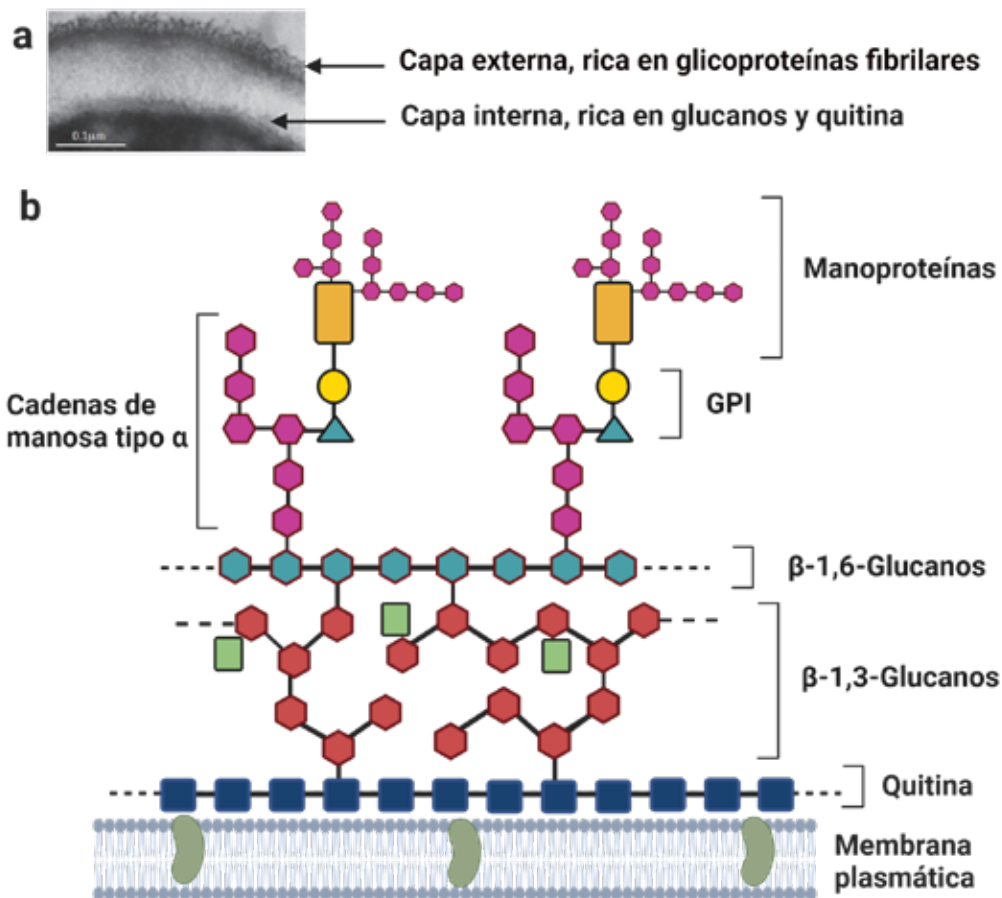


Figura 2. Composición química de la pared celular fúngica. a. Una sección de la pared celular de células de *Candida albicans* fijadas químicamente y capturadas por microscopía electrónica de transmisión (MEB). b. Vista esquemática de la organización modular general de la pared celular. Modificado de: Cassone, A., 2013. Development of vaccines for *Candida albicans*: fighting a skilled transformer. Nature Rev. Microbiol. 11, 884–891 38. Diagrama creado por BioRender.com

Grupo Taxonómico	Glc	Gal	GlcN	Mann	GalN	Glucur	Rham	Fuc	Xyl	Ara
Chitridiomycota	++	+	+++	tr	tr	0	tr	+/-	+/-	+/-
Zygomycota	+	+	+++	+	0	++	tr	+	0	0
Hemiascomycota	+++	+	+	+++	0	0	0	0	0	0
Euascomycota	+++	++	++	+	+	+	+/-	0	tr	tr
Heterobasidiomycota	+++	tr	+	++	0	+	0	tr	tr	tr
Homobasidiomycota	+++	+	++	+	tr	0	+	+	+	+

Tabla 1. Principales carbohidratos identificados en hidrolizados de paredes celulares de hongos.

Fuente: Ruiz-Herrera, J., 2012. *Fungal cell wall: structure, synthesis, and assembly*, Boca Raton, FL: CRC Press. Nota: tr = trazas; +/- = menos de 1%; + = 1.1-5%; ++ = 6-20%; +++ = más de 21% de azúcares totales presentes en la pared celular. Glc = glucosa; Gal = galactosa; GlcN = glucosamina (un producto de polisacáridos que contienen glucosamina o N-acetilglucosamina); Mann = manosa; GalN = galactosamina (un producto de polisacáridos que contienen galactosamina o N-acetilgalactosamina); Glucur = ácido glucurónico; Rham = ramnosa; Fuc = fucosa; Xyl = xilosa; Ara = arabinosa

Los hongos y bacterias son organismos saprófitos y los principales recicladores de la biomasa orgánica y elementos inorgánicos de la biósfera manteniendo continuos los ciclos biogeoquímicos de Carbono, Nitrógeno, Fósforo y Azufre. Un saprófito es un organismo heterótrofo y quimiorganotrofo que obtiene energía química y carbono de la degradación de moléculas orgánicas complejas preexistentes. La energía y fuentes de carbono requeridas son obtenidas por medio de procesos metabólicos multi-enzimáticos de polisacáridos, lípidos y proteínas insolubles^{39,40}. Las enzimas catalizan la despolimerización de macromoléculas y se pueden clasificar de acuerdo a su localización como intra y extra-celulares y respecto a su función como hidrolasas y oxidorreductasas. La secreción de un coctel de enzimas oxidativas actúa de forma cooperativa y sinérgica convirtiendo residuos orgánicos ricos en polímeros recalcitrantes e insolubles provenientes de organismos muertos en monómeros de fácil absorción y transporte^{21,41}. Específicamente, los hongos saprófitos degradadores de biomasa vegetal como materiales leñosos ricos en fuentes lignocelulósicas son los partícipes centrales en el ciclo del Carbono global por el secuestro de CO₂ y la mineralización de carbono^{40,42}.

La composición química de la biomasa vegetal es variable lo que permite disponer de estructuras flexibles como materiales herbáceos o estructuras más resistentes como de troncos y ramas de árboles⁴³. Los materiales lignocelulósicos suelen ser un sistema recalcitrante debido a la integración fuerte de tres constituyentes poliméricos de proporciones variables de: i) celulosa, ii) hemicelulosa (en conjunto se denomina holocelulosa) y, iii) lignina que sirven de soporte estructural y confieren resistencia a la pared celular de células vegetales⁴⁰. Los polímeros lignocelulósicos son ampliamente utilizados en una serie de procesos industriales como la producción de alimentos, papel/pulpa, textiles, biocombustibles, detergentes, compuestos poliméricos, etc. Sin embargo, la velocidad y grado de degradación de la lignocelulosa depende de enzimas ligninolíticas como herramientas biológicas^{43,44}.

La celulosa es una de las moléculas orgánicas más abundantes sobre la Tierra y constituye aproximadamente el 45% del peso seco de la madera. Es un homopolímero lineal de unidades D-glucopiranosas unido por enlaces β-1,4 glicosídicos. Cada cadena de celulosa está ligada a otras cadenas mediante enlaces de hidrógeno y fuerzas de van der Waals que aportan rigidez⁴⁵. De acuerdo al número de enlaces de hidrógeno, si son pocos la celulosa se considera amorfa; mientras que si

son abundantes generan diferentes formas cristalinas denominadas celulosa I, II y IV. La celulosa I se encuentra normalmente en la pared celular⁴⁶. Las hemicelulosas, al igual que la celulosa, se han perfilado como fuentes de carbohidratos. La hemicelulosa suele ser un polímero de menor masa molar que la celulosa y más fácilmente hidrolizable debido a su estructura predominantemente amorfa. Los polímeros de hemicelulosa forman una estructura polimérica compleja, ramificada y tienen una mayor diversidad estructural que consiste en la unión de diferentes unidades de azúcares que incluyen xilano, xiloglucano, manano, glucomanano, galactoglucomanano y calosa⁴⁷. Las ramificaciones están conformadas de D-xilosa, F-galactosa, L-arabinosa y ácido D-glucurónico.

La lignina, es el polímero aromático más abundante sobre la biósfera. Es un polímero ramificado, amorfo y heterogéneo constituido por unidades de fenilpropano (p-curamil, coniferil y alcohol sinapílico) unido por diferentes clases de enlaces^{39,48}. En el ámbito estructural, la lignina mantiene unida la celulosa y la hemicelulosa entre sí rellenando, pegando y reforzando toda la estructura. De esta manera, las fibrillas elementales de celulosa 3-5 nm de diámetro se unen para formar microfibrillas de hasta 20 nm de diámetro^{21,25}.

En los ecosistemas, son reconocidos tres grupos de hongos superiores descomponedores de biomasa vegetal lignocelulósica: i) los hongos saprófitos de podredumbre blanca, ii) parda y, iii) de pudrición blanda⁴⁹. Cada categoría se clasifica de acuerdo a la capacidad degradativa enzimática de biomasa lignocelulósica. Las interacciones de descomposición son asociadas a una variedad de enzimas extracelulares ligninolíticas que exponen los polisacáridos de la pared celular de células vegetales para su posterior digestión. El sistema multienzimático extracelular de los hongos saprófitos es producido en el retículo endoplasmático rugoso de las hifas^{39,50} y exudadas hacia el medio circundante a través de vesículas^{11,21}. De acuerdo a la composición química del material a degradar, el hongo desarrolla una estrategia encargada por un arsenal de enzimas hidrolíticas y oxidorreductasas⁵¹. Estas enzimas se conocen como enzimas activas en carbohidratos (CAZymes, por sus siglas en inglés Carbohydrate-Active enZymes) y se clasifican en numerosas familias de glucósido hidrolasas (GHs), glicosiltransferasas (GTs), polisacáridos liasas (PLs), carbohidratos esterasas (CEs) y actividades auxiliares (AAs), las últimas de las cuales incluyen enzimas oxidativas, como la celobiosa deshidrogenasa (CDH) capaz de degradar y modificar la celulosa,

hemicelulosa y lignina al producir radicales hidroxilo libres, y el polisacárido monooxigenasa lítica (LPMO)^{9,39}.

La degradación de la biomasa lignocelulósica se lleva a cabo por la mezcla de enzimas que agrupan las celulasas, hemicelulasas, pectinasas y enzimas oxidativas extracelulares que actúan de manera cooperativa y sinérgica. En la Tabla 2, se resume la actividad enzimática de algunos hongos de podredumbre blanca en sustratos de fermentación en estado sólido durante 14 días.

Las celulasas catalizan la hidrólisis de enlaces glicosídicos β -1,4 que mantienen unidas las cadenas de celulosa y, según su actividad, se clasifican en endoglucanasas (EC 3.2.1.4), exoglucanasas (EC 3.2.1.74) y β -glucosidasas (EC 3.2.1.8)⁵¹. Las hemicelulasas son enzimas específicas que despolimerizan las hemicelulasas, entre las enzimas más estudiadas y abundantes destacan las xilanasas que catalizan la hidrólisis del esqueleto de xilano. Entre las xilanasas, las β -1,4-endoxilanasas (EC 3.2.1.8) hidrolizan enlaces β -1,4 que unen las xilasas, y las β -xilosidasas (EC 3.2.1.37) hidrolizan xilooligosacáridos formados por las endoxilanasas. Las ramificaciones presentes en el xilano son hidrolizadas por la catálisis de α -L-arabonofuranosidasas, α -glucuronidasas, acetilxilano esterasas y feruloil esterasas. Las pectinasas son un complejo de enzimas que degradan la pectina, polisacáridos ramificados presentes en la pared celular vegetal. Su esqueleto principal es de ácido D-galacturónico y las cadenas laterales son generalmente de xilosa, galactosa o arabinosa. Mientras que, por su resistencia química y complejidad estructural, la despolimerización de la lignina es catalizada por enzimas inespecíficas extracelulares de alto poder oxidativo. Las mismas agrupan las enzimas lacasas (Lac) y enzimas peroxidadas como lignina peroxidasa (LiP; EC 1.11.1.14), manganeso peroxidasa (MnP; EC 1.11.1.13) y enzimas híbridas conocidas como peroxidadas versátiles (VP EC

1.11.1.16), entre otras^{43,53-55}.

El grupo de hongos de pudrición blanca se destaca por su alta capacidad de degradación de lignina, así como también de polisacáridos de celulosa y hemicelulosa por poseer un sistema enzimático extracelular de degradación de lignina altamente activo^{53,54,56,57}. El potencial ligninolítico de hongos de pudrición blanca para degradar y digerir la pared celular vegetal lo ha convertido en uno de los principales microorganismos considerados para la obtención de biomateriales basados en micelio (Tablas 2 y 3). Al inocular el micelio de hongos de podredumbre blanca en sustratos orgánicos sólidos de naturaleza lignocelulósica, se obtiene un compuesto ligero que consiste en una red microscópica entrelazada tridimensionalmente de fibras de refuerzo naturales presentes en la materia prima y células miceliales filamentosas⁵⁸⁻⁶³. El material orgánico suele ser degradado y reemplazado por biomasa fúngica creando una capa esponjosa o compacta que entreteje al sustrato, moldeado o adherido a soportes naturales y sintéticos, tales como papel, yute, algodón fieltro, fibras de vidrio, metal y carbono en la obtención de productos para empaquetado y aislamiento, biotextiles, materiales para construcción para viviendas, entre otros usos^{44,46,62,63}. Es de esperarse que mientras mayor sea el potencial ligninolítico de las cepas fúngicas empleadas mayor sea su capacidad de colonizar el sustrato lignocelulósico empleado.

Biomateriales a base de micelio fúngico

Los nuevos vientos de cambio conllevan a replantear con premura arquetipos fósiles del pensamiento y patrones morales y bioéticos que contradicen el derecho a la vida. El despertar inminente de una nueva cultura material que integra los principios de la economía sostenible exige indudablemente estar al nivel de los nuevos desafíos tanto de rasgos bioéticos

Especie	Sustrato	Actividad enzimática U/mgP					Ref.
		MnP	LiP	Lacasa	Celulosa	Hemicelulosa	
<i>Ganoderma applanatum</i>	Paja de trigo	90.363	0.000	46.682	--	76.692*	52
<i>Trametes versicolor</i>	Paja de trigo	66.69	0.000	17.339	--	27.675*	32
	Aserrín y astillas de álamo	73 ± 7	0.33 ± 0.04	7.0 ± 0.5	1.15 ± 0.2	2.2 ± 0.2	44
<i>Ganoderma lucidum</i>	Aserrín y astillas de álamo	7.7 ± 0.6	1.50 ± 0.04	5.0 ± 0.8	0.75 ± 0.2	2.0 ± 0.2	44
<i>Polyporus fomentarius</i>	Aserrín y astillas de álamo	7.8 ± 0.8	0.46 ± 0.03	7.4 ± 0.9	1.25 ± 0.2	1.3 ± 0.2	44
<i>Perenniporia fraxinea</i>	Aserrín y astillas de álamo	13 ± 1	0.22 ± 0.022	2.2 ± 0.7	0.8 ± 0.3	1.8 ± 0.3	44

*Sólo Xilosa

Tabla 2. Actividad enzimática de hongos de podredumbre blanca desarrollados por fermentación en sustrato sólido durante 14 días.

como tecnológicos. Entre los últimos, se encuentra el hecho de reconocer el surgimiento espontáneo de la "Biotecnología Material" que, bajo un enfoque multi, inter y transdisciplinario, se concibe desde sus inicios con una clara cohesión "Sofista" del Arte y la Ciencia unidos. En este sentido, la Biotecnología Material pudiera definirse como "el uso racional de la biodiversidad para darle valor añadido a materiales naturales, compuestos o desechos orgánicos y convertirlos en productos biodegradables útiles para la sociedad, el arte y la cultura, en reemplazo de otros que pudieran ser perjudiciales para el ambiente o perniciosos para la vida, en sí mismos, o en su proceso de producción".

En principio, un biomaterial se puede definir como "un material funcional que ha sido diseñado y construido a partir de una materia prima biológica, tales como plantas, algas, bacterias, hongos, asociaciones simbióticas mutualistas de microorganismos o biopolímeros microbianos". Dichos biomateriales, vistos como producto final, pueden o no estar mezclados con materiales naturales, compuestos y/o desechos orgánicos. Son materiales autogenerados por algún tipo de organismo vivo y son basados en los nuevos paradigmas de la fabricación alternativa ya que parten de la lógica "de hacer crecer los nuevos materiales en lugar de extraerlos", integrando, de esta manera, los principios de la economía circular y de la Biotecnología Material, asegurando la susceptibilidad de los mismos a ser degradados y volver a su estado original en la naturaleza. Así mismo, se debe garantizar que los procesos productivos de los biomateriales, en todas sus escalas y en toda su cadena de valor, no deben comprometer o perjudicar al medio ambiente.

Según expresan lógicamente fundadores de Radial Biomateriales (@radial.bio), lo ideal sería comprender dos grandes clasificaciones de los biomateriales. Por un lado, i) los bio-basados, que son aquellos que tienen un porcentaje de composición biológica en su estructura y, por otro, ii) los bio-fabricados, que son aquellos que emplean un microorganismo vivo ya sea como materia prima o durante su proceso de fabricación. A pesar que el último tipo de biomaterial también pudiera ser reconocido como bio-basado, éste se distingue por "crecer, adherirse y moldearse a una superficie a expensas de algún tipo de organismo vivo". Finalmente, un biomaterial debe cumplir con ciertos criterios tales como poseer una densidad y peso adecuados, deben ser inertes, es necesario que disponga

de una resistencia mecánica apropiada, ser fácil de fabricar y de producirse a gran escala^{60,62}.

En el caso de los biomateriales a base de micelio fúngico, nos referimos a aquellos que son auto-generados por la estructura micelial de hongos, por lo tanto, se comprenden como bio-fabricados (Figura 3). Los sustratos lignocelulósicos son ideales para el desarrollo de biomateriales a base de micelio fúngico^{64,65}. Los materiales compuestos a base de micelio resultan del crecimiento micelial vegetativo y/o aéreo en materiales orgánicos como desechos agrícolas⁶⁶. Entre los sustratos más empleados resultan los residuos agroindustriales, forestales y la biomasa residual de bosques primarios y secundarios (Tabla 3).

El tipo de biomaterial a obtener subyace en la naturaleza y procesamiento del sustrato a emplear, los parámetros de crecimiento, los requerimientos nutricionales y las características genéticas del hongo a emplear. Estos parámetros, a pesar que en algunos trabajos de investigación no son detallados, son críticos en el nivel de colonización y el grosor del micelio para la determinación de la rigidez, flexibilidad, resistencia a la tracción, hidrofobicidad, entre otras⁶⁶.

El acondicionamiento físico del sustrato es clave en el rendimiento y de sus propiedades estructurales del desarrollo micelial del biomaterial que se espera obtener. Las condiciones físicas necesarias a controlar para los materiales a base de micelio son los niveles de O₂, CO₂, humedad relativa, exposición a la luz, flujo de aire y la temperatura. En función al desarrollo micelial, su clasificación se proyecta en materiales bio-fabricados a partir del micelio vegetativo o micelio aéreo, tal como se explica a continuación^{1,58}.

Biomateriales desarrollados a partir de corrientes lignocelulósicas y micelio vegetativo

En la literatura se reconocen dos categorías de diseño para los biomateriales obtenidos a partir del desarrollo micelial vegetativo sobre sustratos lignocelulósicos: i) tipo espuma y ii) tipo sándwich³⁶. Ambos biomateriales se muestran en la Figura 4.

Espumas a base de micelio o MBFs

Las espumas a base de micelio o MBFs (por sus siglas en inglés, mycelium-based foams) son biomateriales de baja



Figura 3. Materiales compuestos de micelio fúngico implementados en la industria.

Especie	Sustrato	Esterilización/ Pasteurización	Inoculación	Moide	Incubación	Secado	Producto	Ref.
<i>T. versicolor</i> <i>P. ostreatus</i>	Cáñamo Viruta de madera	Hervir agua 100 °C o H ₂ O ₂ 0,3%	10-20 % de SFS (centeno)	Moldes plásticos	Oscuridad total 90-100 % HR. Temperatura ambiente 30 días	Horno 125 °C 2 horas	Espumas	⁹⁹
<i>G. lucidum</i> <i>P. ostreatus</i>	Celulosa Celulosa-PDB	Autoclave 120 °C x 15 min	Placas de Agar	N/A	25-30 °C 70-80 % HR 20 días	Horno 60 °C 2 horas	Capas fibrosas	¹⁰⁰
<i>Irpex lacteus</i>	Aserrín de abedul ≤ 5 mm, grano de mijo salvado de trigo, fibras naturales y CaSO ₄	Pasteurización	Placas de agar	Moldes cilindricos	14-42 días	Horno 60 °C 24 horas Antes de desmoldar	Espumas	¹⁰⁰
<i>T. versicolor</i>	Lino Polvo de lino Fibras de lino tratadas Fibras de lino sin tratar Desechos de lino Polvo de paja de trigo Paja de trigo	Autoclave 121 °C 20 min	70% sustrato seco 20 % agua autoclavada desmineralizada 10 % SFS (mezcla de granos)	Moldes PVC	28 °C 8 días en el molde 8 días fuera del molde	70 °C 5-10 horas	Aislamiento térmico	⁶⁶
<i>G. lucidum</i>	Regolita Granos de café Astillas de madera Mezcla de granos Cereal de quinua	Autoclave	Inóculo en PDYA	Bolsas plásticas y moldes	23-30 °C 14 días	Horno 120 °C	Arquitectura aeroespacial	¹⁰¹
<i>T. versicolor</i> <i>Neurospora crassa</i>	Matriz de yute, PDB	Autoclave 30 min	Inóculo en PDA	Recipientes de plástico	25 °C Cada 2-3 días humedecer la matriz con PDB 30 días	Glicerina 15 h Recubrimiento de proteína de soja, agua destilada (10% p/p) y NaOH 2,5 M pH 10 Baño maría 80 °C 30 min Secar al ambiente 15 horas	Micotextiles	¹⁰²
<i>P. ostreatus</i> <i>T. multicolor</i>	Fibra de algodón no tejida (HR 55%) Aserrín de haysa, paja de colza 1-3 cm y salvado (HR 65-70%)	Autoclave	SFS	Moldes de plástico (34x34x4 cm, PET-G). Lo moldes son cubiertos con láminas de celofán (0,35µm)	25 °C 14 días en el molde 10 días fuera del molde Oscuridad	Presión F=30 kN caliente 150 °C o frío 20°C 20 min *Los materiales expuestos a la presión en frío fueron secadas 24-48 h a temperatura ambiente	Espumas	⁷⁷
---	Jute biotex Biotex flax Celulosa BioMid	Autoclave	Núcleo: SFS Kenaf y cáñamo (1:1) 120 g Láminas Dos capas de fibra natural por lado	Moldes de plástico (20,3x6,35 x2,54 cm)	Dentro de fundas de polipropileno 24 °C 5 días HR 98%	Horno 82 °C 12 horas Prensado térmico 250 °C 20 min Recubrimiento con resina	Estructuras tipo Sandwich	¹⁰³
<i>Pycnoporus sanguineus</i> <i>P. albidus</i> <i>Lentinus velutinus</i>	Aserrín <i>Pinus sp.</i> 94%, salvado de trigo molido 5% y 1% carbonato de calcio (CaCO ₃)	Autoclave 180 min 1 atm	SFS granos de trigo, 1% CaCO ₃ y 66% de humedad	Moldes de plástico 10x6 cm 5% SFS	24 ±2 °C	Horno 80 °C 24 horas	Espumas	¹⁰⁴

Tabla 3. Publicaciones relacionadas a métodos de producción y procesamiento de materiales compuestos de micelio en el periodo 2015-2020.

*Modificado de Elsacker *et al.*, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138431>⁶⁷

densidad, porosos y altamente anisotrópicos, es decir, sus propiedades mecánicas son asimétricas en diferentes direcciones. A excepción de ladrillos y paneles de micelio, no necesitan de un prensado (calor o frío). Los principales sustratos mencionados en la literatura son fibras, cáscaras o pulpas de madera con partículas de 5-25 mm de diámetro. Su incubación se realiza en un microambiente relativamente húmedo 70-78%, temperatura 24-28 °C y sin necesidad de luz, riego o insumos químicos^{31,60,66}. Una vez que el micelio coloniza el sustrato es sometido a calor y prensado hasta un punto crítico para inactivar el micelio y reducir la humedad relativa hasta 10-15%, dando como resultado materiales con propiedades similares a las espumas de poliestireno expandido u otras espumas para embalaje, el aislamiento térmico o acústico y/o materiales de construcción^{67,68}. Appels *et al.*, 2019, presentó un diseño experimental con especies de *Pleurotus ostreatus* y *Trametes*

versicolor inoculados en sustratos de paja, aserrín y algodón obteniendo diferencias significativas en el rendimiento mecánico de materiales compuestos según el sustrato y el proceso de fabricación, específicamente el prensado. Los materiales a base de algodón fueron menos rígidos y más resistentes a la humedad que compuestos a base de paja. Mientras que, respecto al proceso de fabricación, el prensado con calor aumentó la densidad tres veces más ((0.35 - 0.39 g/cm³) que materiales sin prensado, mejorando la homogeneidad, la resistencia a la tracción (0.15 - 0.24 MPa) y la rigidez de los materiales indistintamente del sustrato y la cepa utilizada. Además, presentó una gran similitud con la densidad y módulo de elasticidad longitudinal o Módulo de Young (35 - 97 MPa) a espumas de poliestireno, corcho y madera ⁶⁶. Los biomateriales auto-generados por la cepa súper productora de la casa *Pycnoporus cinnabarinus* también presentaron una buena

elasticidad y capacidad de amortiguación adecuado como material de embalaje. Entre las ventajas de fabricación destacan su baja densidad, resistencia competitiva, propiedades mecánicas de tracción e impacto y estabilidad a altas temperaturas y a la radiación ultravioleta, volviéndolos competitivos entre materiales sintéticos (espumas de poliestireno), biológicos y nanoestructurados^{30,36,59,65}.

Compuestos tipo sándwich o MBSCs

Los compuestos tipo sándwich a base de micelio o MBSCs (por sus siglas en inglés mycelium-based sandwich composites) consisten generalmente de un núcleo de composición recubierto por dos o más capas secas, esterilizadas y pre impregnadas; compuestas de fibras lignocelulósicas o textiles naturales (lino, yute o celulosa) con la forma deseada del producto a obtener³⁶. Posteriormente, se inactiva el micelio por presando térmico y es curado con resina natural. El sistema de fabricación es detallado en siete pasos por Jiang *et al.* (2016)⁷⁰. La acción cohesiva natural del micelio actúa como un pegamento natural y auto ensamblable dando como resultado un solo bloque. El uso de láminas de lino reporta una colonización más eficiente y de mayor producción de biomasa. En general, los MBSCs presentan un factor adicional de heterogeneidad entre las capas laminadas y el núcleo que, desde un punto de vista mecánico, son estructuras más fuertes y rígidas mostrando un módulo de elasticidad y resistencia a la tracción mayores a los MBFs. Esta categoría de manufactura es empleada para la fabricación de biotextiles. En condiciones controladas, las propiedades físicas, mecánicas y termodinámicas, tales como la morfología, densidad, textura, apariencia, cinética de crecimiento, resistencia a la tracción y flexión, termogravimetría, absorción de agua y humedad son factores cualitativos y cuantitativos deben ser evaluados^{36,67,71-73}. Juntos, alcanzan diferencias significativas en el rendimiento y factibilidad de los biomateriales⁹.

Según Appels *et al.* 2019, el prensado con calor mejora la homogeneidad, la resistencia y rigidez (densidad y módulo de elasticidad) de los materiales cambiando su comportamiento similar a espumas, corchos o madera. En términos generales, demuestra que este tipo de modificaciones generan diferencias significativas en el rendimiento de los biomateriales. Específicamente, los materiales renovables basados en micelio desarrollados en paja son más rígidos y menos resistentes a la humedad que los compuestos a base de algodón⁷⁴. Actualmente, Ecovative Designs LLC fabrica una madera micelial denominada comercialmente MycoBoard™ que posee una densidad (0.685 g/cm³) mucha más baja que los paneles de vidrio y el poliéster (1.522 g/cm³). Los paneles de micelio son más fuertes, mecanizables, personalizables y resistentes al fuego Clase B¹⁰. Cabe destacar que la NASA (por sus siglas en inglés, National Aeronautics and Space Administration) tiene sus ojos puestos en la micotectura, proponiendo nuevos conceptos de diseño arquitectónico aeroespacial basados en compuestos de micelio fúngico vegetativo. La idea es utilizar los residuos orgánicos generados por la tripulación, agua, regolito (materiales rocosos sueltos y provenientes de la meteorización del suelo) y planchas de micelio inactivas para fabricar materiales fibrosos y ligeros autoajustable con buenas propiedades mecánicas. Entre sus usos, se ha considerado la fabricación de paneles, protección contra la radiación, sellos de vapor, armazón de vehículos y muebles, retardantes de fuego, entre otros. Así mismo, la NASA propone que los materiales fúngicos sean complementados con bacterias como *Bacillus subtilis* para generar una relación mutualista permitiendo la integridad estructural

mediante la mineralización, producción de polímeros y formación de filamentos. Por último, además de proponer acelerar el crecimiento mediante la secreción de metabolitos en el micelio, visualizan emplear a los hongos como biosensores para la detección de presión y fallas en la integridad estructural de las naves espaciales midiendo la tensión mecánica a través del cambio de color o fluorescencia⁷⁵.

Biomateriales desarrollados a partir de corrientes lignocelulósicas y micelio aéreo

Desde la época antes de Cristo (a. C.), específicamente entre los años 3350 y 3100 a.C. ya se registra el uso de piezas de cuerpo fructíferos de especies como *Piptoporus betulinus* y *Fomes fomentarius* como material de yesca y con fines espirituales⁷⁶. Al pasar los años, las aplicaciones con el cuerpo fructífero de algunos hongos como *F. fomentarius* han ido variando. Una de estas, es la elaboración de biotextiles siendo los principales productos obtenidos a partir de este cuero fúngico sombreros, cinturones, bolsos, cuadros, paño de limpieza para gafas, entre otros. Estos hongos son cosechados y cortados en franjas siguiendo el crecimiento radial del cuerpo fructífero y posteriormente almacenados en cajas de madera por 2 semanas para mantenerlos lisos antes de su uso⁷⁷. Los hongos en el aire desarrollan su cuerpo fructífero a partir del micelio aéreo para su reproducción y dispersión de esporas. Para ello, sus hifas contienen proteínas morfogénicas que responden al ambiente aéreo colonizando la superficie del sustrato creando una capa esponjosa o compacta. La capa de micelio también se conoce como "fungal skin"⁶⁶, considerada una alternativa al cuero animal por sus propiedades de maleabilidad, inducción de crecimiento aéreo homogéneo, sin procesos de curtido o reactivos contaminantes, y sobre todo es biodegradable y libres de la crueldad animal⁷⁸.

El interés comercial y científico en el micelio aéreo por producir materiales similares al cuero ha despertado el interés de varias empresas de base Biotecnológica en el mundo. MycoWorks Inc., Bolth Threads y Mycotech Lab son pioneros en la generación de alternativas para la industria textil, específicamente el cuero⁷⁹⁻⁸¹. En comparación a los textiles obtenidos de cueros de bovinos y sintéticos, el cuero micelial tiene la apariencia y propiedades similares⁸², inclusive, MycoWorks Inc. comenta que pueden lograr obtener cuero micelial con propiedades superiores al cuero animal. Para ello, la modulación de crecimiento de micelio aéreo con características estéticas y/o de un espesor de calidad se pueden lograr a partir del crecimiento vegetativo, la selección del organismo modulador y de su distribución homogénea sobre el sustrato⁸³. MycoWorks Inc. desarrolló un cuero de micelio fino comercializado como Reishi™ a partir de *Ganoderma lucidum* y algodón. En el camino de MycoWorks Inc. por la estandarización y optimización de las técnicas y procesos de producción, se propusieron estrategias para aumentar la resistencia y flexibilidad mediante la implementación de Cross-linkers para la formación de enlaces moleculares entre fibras de quitosano. Entre las propuestas de cross-linkers se mencionan a nanocompuestos de quitina y ácido subérico, o-quinona a través de la catálisis de sustratos fenólicos vía tirosinasa y genipina. Además, la aplicación de recubrimientos naturales que actúan como una barrera de humedad, como la aplicación de capas de zeína de maíz con PEG, han mostrado una resistencia a la tensión de 6 MPa e insolubilidad en agua⁷³. MycoWorks Inc. ha logrado obtener en sus materiales finos de micelio características superficiales aterciopeladas y esponjosas y, además, que se pueden cortar, procesar y mecanizar con más materiales para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas.

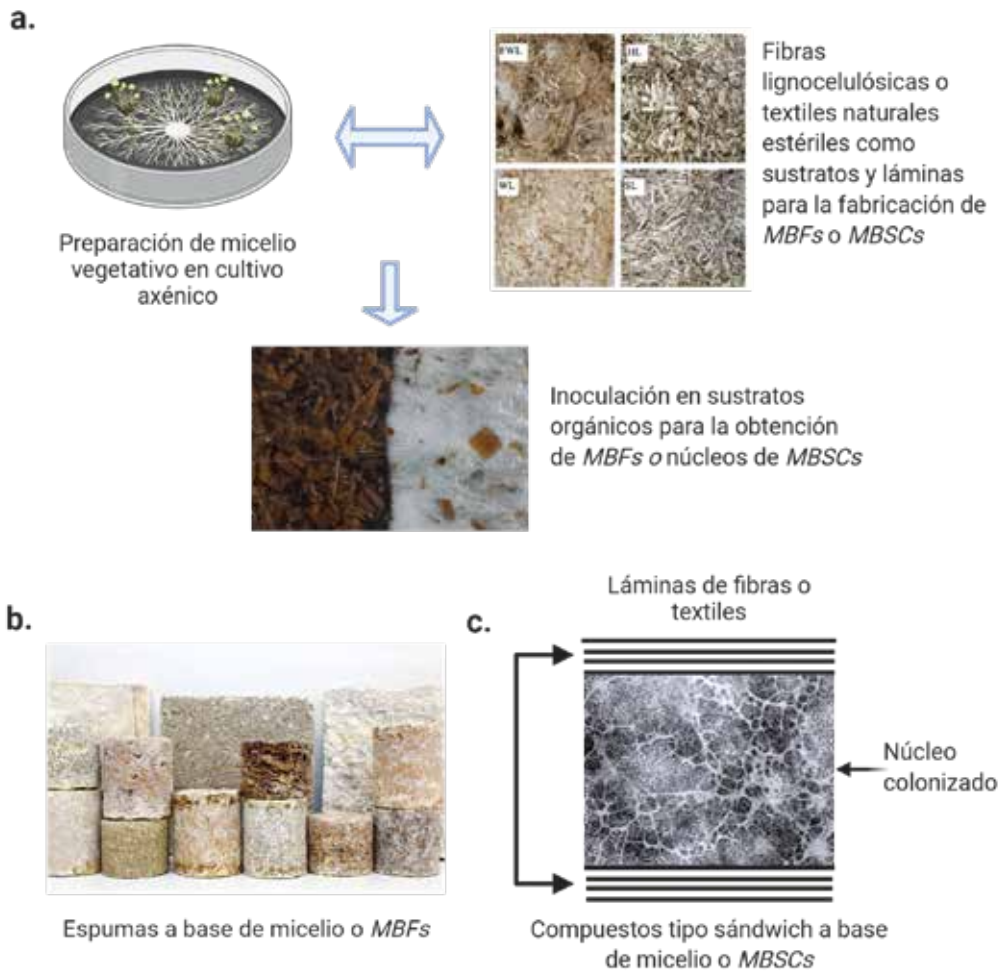


Figura 4. Biomateriales desarrollados a partir de corrientes lignocelulósicas y micelio vegetativo a. Preparación y elaboración de MBFs y núcleos para MBSCs⁶⁵. "Mycelium front" by harrington_alison is licensed under CC BY-SA 2.0. b. Productos diseñados a partir de MBFs para aislamiento y empaquetamiento. Obtenido de Building On Mycelium: <https://www.materialincubator.com/building-on-mycelium>. c. Diseño y fabricación de MBSCs. Una vez miceliado el núcleo se agregan capas de fibras vegetales o textiles para reforzar su resistencia. Modificado de: "Mycelium" by Bushman.K is licensed under CC BY-NC 2.0. Diagrama creado con BioRender.com.

Por otro lado, Mycotech ha lanzado al mercado una gama de productos que incluyen zapatos, carteras y correas de reloj fabricados con su sustituto del cuero derivado del micelio Mylea™. Su cuero biodegradable tiene dos presentaciones, uno de color marrón natural y cuero negro teñido naturalmente. Ambos presentan propiedades mecánicas similares; resistencia a la tracción 8 -11 MPa, Elongación 22-35 % y resistencia al desgarro 24 N⁶⁴. Mientras que, Bolt Threads, ofrece su producto de micelio llamado Mylo™ que consiste completamente en capas naturales de fibra de micelio adherida directamente y compactada creando una unión sólida y fuerte. A pesar de todo, la información disponible para la comunidad científica necesaria para la replicación de cuero micelial es aún limitada. El proyecto BioFab con un propósito mayor por la democratización del conocimiento sobre los biomateriales, divulgó la guía práctica para el desarrollo de textiles conformados por micelio y fibras naturales. El micotextil se elaboró a partir del desarrollo de micelio más o menos homogéneo de *Trametes versicolor* y *Neurospora crassa* sobre una matriz de fibra vegetal (yute) y sumergido en un medio de cultivo líquido PDB. Un punto a considerar es que el cultivo requiere el suministro del medio líquido cada 2-3 días para mantener el micelio humectado⁶⁵.

Muy recientemente, aparte de emplearse el micelio aéreo con fines biotextiles, también se utiliza como micoproteína,

una fuente de alimento nutritiva, de alto contenido en aminoácidos y fibra, así como de bajo contenido de grasas saturadas, colesterol, sodio y azúcar⁶⁶. Dichas propiedades, hacen del micelio aéreo un alimento saludable y de buena palatabilidad, de estructura y textura similar a la de la carne por su similitud al tamaño de la fibra. Entre los productos con oferta para el consumidor destaca Atlast™ desarrollado por Ecovative Design LLC., se basa en la premisa de que los hongos pueden cultivarse para imitar el tocino, los filetes, las pechugas de pollo y otros cortes enteros de origen animal. El micelio forma estructuras a nivel de micras con extrema precisión pareciéndose a la carne^{10,26,58}. Otra gama de productos reconocidos en 17 países del mundo son Quorn™. Su proceso de fabricación de micelio inicia en fermentadores de aire de 40 metros, alimentado continuamente con agua, sales y glucosa obtenida de la digestión enzimática de almidón de trigo o maíz⁶⁷. Una vez crecido el micelio, el caldo nutritivo es calentado y recolectado por centrifugación para obtener una pasta de micelio^{66,68}.

Propiedad intelectual, producción de biomateriales compuestos de micelio y empresas a nivel mundial

Las empresas pioneras en la producción masiva de materiales compuestos de micelio de hongos mantienen encriptados los detalles técnicos, así como la caracterización física

y mecánica de los biomateriales. En general, las tecnologías de producción de estos biomateriales son incipientes y aún en estado de desarrollo, siendo la primera referencia del año 2017. Hasta la fecha, se han registrado 48 patentes o solicitudes de patente en relación al uso de materiales fúngicos en diversas áreas¹. En la tabla 4, se presenta a las empresas del mundo que emplean micelio de hongos en productos de diseño comercial. La industria de la biofabricación de biomateriales de micelio de hongos está liderada por los siguientes actores: Ecovative Design LLC (USA) con el 45 % de todas las patentes seguido por Ford Global Tech (USA) con 19 %, Shenzhen Tech (China) con 17 %, MycoWorks Inc. (USA) con 6 % y Spora Biotech (Chile) con 0,48 %. Estas patentes se encuentran distribuidas principalmente en Estados Unidos (60 %) y China (30 %).

De los actores mencionados anteriormente, y en particular a los relacionados a la industria de los biotextiles, MycoWorks Inc. y Ecovative Design LLC, han propuesto y desarrollado un biomaterial denominado "cuero de hongos". MycoWorks Inc. fue la primera Start-Up en introducir este biomaterial textil en el 2017. Posteriormente, Ecovative Design LLC desarrolló su propio cuero de hongos y le vendieron la licencia a "Bolt Threads", una Start-Up ubicada en San Francisco, California (USA), que desarrolla textiles sustentables. Bolt Threads realizó un Kickstarter a finales del 2018 de una cartera hecha con su cuero de hongos que denominaron "Mylo", donde algunas de las carteras fueron entregadas a principios del 2020, y otras unidades aún continúan en producción. Hoy en día, Bolt Threads proyectó a "Mylo™" como su biomaterial textil con mayor escalamiento y anunciaron que su planta piloto tendrá una capacidad productiva de 1.000.000 pies cuadrados (ft²)/año, los cuales ellos mismos han indicado que ya están todos comprometidos⁹⁸.

Por otro lado, MycoWorks Inc., generó una nueva empresa para hacer el lanzamiento de su nuevo producto "Made with Reishi" con la cual hicieron un relanzamiento del material en la "New York Fashion Week 2020" (enero, 2020). Este material lo denominaron "Reishi™" y a la tecnología "Fine Mycelium". Posteriormente, cerraron una ronda de inversión por USD \$17.5 millones. La nueva financiación permitirá a MycoWorks Inc. continuar ampliando sus operaciones de fabricación para satisfacer la enorme demanda existente y cada vez más creciente en el mercado por su material Reishi™. Actualmente, la compañía opera dos instalaciones de producción y está a punto de abrir una tercera planta comercial con una capacidad de producción de 80.000 ft² de material por año para apoyar el lanzamiento de productos que han sido prototipados y probados con los principales clientes de lujo durante más de 18 meses. Otro actor, pero que no está registrado dentro del capital intelectual internacional, es Mycotech, están ubicados en Indonesia y su cuero de hongos lo denominaron Mylea™.

La nueva cultura micelial no solo ocurre en países potencia, sino también está sucediendo en Latinoamérica (Figura 5), donde Start-Ups emergen y empresas empiezan a consolidarse. Tal es el caso de Le Qara, una empresa peruana que produce un biotextil fabricado de asociaciones simbióticas de microorganismos y Spora Biotech en Chile (www.sporabiotech.com) que se consolida rápidamente en el desarrollo de cuero de micelio de hongos bajo la marca comercial Sporatex^{92,93}. Así mismo, Mycomaker de Ecuador, Hypha de Chile y Radial Biomaterials de México se enfocan en la generación de productos para el empaquetamiento, aislamiento, o kits de micotectura, asesoramiento para la fabricación de biomateriales a partir de micelio, así como a la promoción de programas educativos en la nueva cultura material^{90,95,96}.

Rol de los hongos en la economía circular

Los hongos son descomponedores por excelencia ya que utilizan su maquinaria enzimática para degradar desechos orgánicos convirtiéndolos en ácidos orgánicos, compuestos farmacéuticos, pigmentos, enzimas, productos alimenticios, biocombustibles, vitaminas, aminoácidos e incluso materiales para la construcción, empaquetamiento y cueros veganos^{3,4}.

Una bioeconomía tiene como objetivo reemplazar los recursos y procesos de origen fósil y perjudiciales con el medio ambiente por alternativas sostenibles que aprovechan la biomasa renovable para la generación de productos utilizados en la vida diaria¹. En este sentido, la nueva generación de biomateriales funcionales a base de micelio se encuentra alineada a los principios básicos de la economía circular ya que promueve que la producción agrícola y forestal sean más sostenibles y eficientes al emplear sus desechos orgánicos lignocelulósicos para la auto-generación de nuevos materiales útiles para la sociedad, la cultura y el arte⁵⁸. Además, los materiales a base de micelio se basan en compuestos poliméricos naturales (quitina, celulosa, proteínas, etc.) que requieren un mínimo de energía para su producción, ya que son auto-generados (auto-cultivo), y sus características se pueden ajustar modificando la composición de sus sustratos nutritivos. Posterior a su tiempo de vida útil, estos productos a base de micelio se convierten en fuente de alimento para compostaje y fertilizantes para las plantas, como sustrato para otros hongos, para pienso animal de alto valor nutricional o para la obtención de nuevos biomateriales de alto valor nano-biotecnológico con diversas aplicaciones en la industria. Esta gama de reutilización vuelve su producción más sostenible y eficiente⁷.

Conclusiones

Los hongos datan de aproximadamente 1200-1600 millones de años y evolucionaron a partir del súper grupo Opisthokonta por lo que son evolutivamente más cercanos a los animales que a las plantas. Pudiendo llegar a ser 5 millones de especies en el planeta, las cualidades excepcionales que poseen los hongos los han convertido en uno de los principales microorganismos considerados para la obtención de biomateriales bio-basados en micelio. Entre ellos, sus diversos ciclos de vida, su capacidad de sobrevivir a ambientes extremos, de nutrirse de polímeros lignocelulósicos complejos, su capacidad de reproducirse sexual o asexualmente, su poderosa maquinaria multienzimática extracelular para degradar y digerir la pared celular de las plantas, y la composición e integridad de su pared celular rica en quitina, glucanos y glicoproteínas, entre otros.

El micelio, como epicentro y origen de la nueva cultura micelial que se ramifica cada vez más colonizando espacios insospechados a nivel global, posee una gran resistencia mecánica, plasticidad e hidrofobicidad atribuidas a su pared celular. Siendo una red microscópica de filamentos tubulares fibrosos y alargados, interconectados entre sí y de crecimiento apical, el micelio funciona como una armadura del organismo ya que se encarga de conectar y trasladar ligeramente agua, azúcares y minerales formando un sistema cerrado en respuesta a estímulos o cambios en la composición del medio externo.

Partiendo de la lógica de hacer crecer los nuevos materiales en lugar de extraerlos, los biomateriales auto-generados por el micelio de hongos a partir de residuos poseen diferentes aplicaciones industriales, que van desde los materiales y productos para el empaquetamiento y aislamiento, los biotextiles, nuevas fuentes alimentarias basadas en el micelio, el arte y

Empresa	Ubicación	Especificaciones del material	Ref.
ALIMENTARIA			
Ecovative Design LLC	New Jersey, Estados Unidos	➤ Micelio comestible vegano de alto contenido en aminoácidos esenciales y nutrientes; mimetizando la forma y textura de tocino Atlast™	10
AISLAMIENTO Y EMPAQUETAMIENTO			
Ecovative Design LLC	New Jersey, Estados Unidos	➤ Espumas para empaquetamiento MycoComposite™ ➤ Espumas de micelio puro Mycoflex™ para la fabricación de chaquetas aislantes, forros térmicos, calzado y más.	10
Mogu	Inarzo, Italia	➤ Paneles modulares acústicos Mogu™	88
Ford Global Technologies LLC	Michigan, Estados Unidos	➤ Piezas moldeadas de espuma de micelio para el equipamiento de interiores de vehículos.	89
Radial Biomateriales	Jalisco, México	➤ Materiales diseñados a la medida para paquetería y embalaje	90
Loop Biotech	JD Delft, Países Bajos	➤ Ataúdes Loop Cocoon™ . Sus paredes son fabricadas de micelio y residuos orgánicos, mientras que en su interior contiene musgo	91
BIOTEXTILES			
MycoWorks Inc.	California, Estados Unidos	➤ Sustitutos de cuero fino a base de micelio Reishi™	78
Bolt Threads	California, Estados Unidos	➤ Alternativa sostenible al cuero animal Mylo™	79
Mycotech Lab	Bandung, Indonesia	➤ Cuero de micelio Mylea™	80
Le Qara	Perú	➤ Cuero microbiano biodegradable Le Qara	92
Spora Biotech	Chile	➤ Cuero de micelio sustentable Sporatex™	93
Mycel Project	República de Korea	➤ En colaboración con la industria Hyundai Motor, desarrollo de materiales de micelio que reemplazan el cuero y el de películas	94

Tabla 4. Empresas que emplean micelio de hongos en productos de diseño comercial.

ARQUITECTURA Y ARTE			
Ecovative Design LLC	New Jersey, Estados Unidos	➤ Paneles de construcción MycoBoard™ para diseños arquitectónicos ➤ Kits y manual para la producción de biomateriales a base de micelio	10
Mycomaker	Quito, Ecuador	➤ Kits de micotectura, asesoría para la producción de biomateriales a base de micelio, programas educativos de nueva cultura material	95
Radial Biomateriales	Jalisco, México	➤ Productos de diseño industrial o interiorismo	90
Mycel Project	República de Corea	➤ Diseño y producción de materiales (ej. lámparas) y módulos (ej. decoración) para interiores	94
Hypha	Chile	➤ Prototipado de formulados orgánicos y aislamiento de microorganismos	96

Tabla 4. Empresas que emplean micelio de hongos en productos de diseño comercial.



Figura 5. Industrias y laboratorios en el mundo que emplean el micelio de hongos en la manufactura alimentaria, biotextiles, aislamiento y empaquetamiento, arte y arquitectura. Diagrama creado con BioRender.com

el diseño arquitectónico, entre otras. La auto-generación de dichos biomateriales inicia al inocular el micelio de hongos de podredumbre blanca en sustratos orgánicos sólidos de naturaleza lignocelulósica. Al transcurrir el tiempo, y bajo condiciones controladas de crecimiento, el material orgánico suele ser degradado y reemplazado por la biomasa fúngica creando una capa esponjosa o compacta que entreteteje al sustrato, moldeado o adherido a soportes naturales y sintéticos. Al final, se obtiene un compuesto ligero que consiste en una red entrela-

zada tridimensionalmente de fibras de naturales presentes en la materia prima y células miceliales filamentosas que, como un pegamento natural, le otorgan una alta resistencia mecánica y flexibilidad estructural.

Los biomateriales basados en micelio de hongos representan una alternativa sostenible, de bajo costo y nulo impacto ambiental, en los que su proceso de fabricación rompe los paradigmas del concepto clásico de "la materia". Sin embargo, el desarrollo de las tecnologías orientadas a la producción de

estos biomateriales compuestos de micelio de hongos aún es incipiente y los que existen se mantienen encriptados.

El despertar inminente de una nueva conciencia material que integra los principios de la economía sostenible exige indudablemente estar al nivel de los nuevos desafíos, tanto bioéticos como tecnológicos, sobre todo en Latinoamérica, donde han esporulado y extendido una gran cantidad de proyectos y emprendimientos basados en el crecimiento de nuevos biomateriales a partir de micelio de hongos.

Agradecimientos

Agradecemos a Spora Biotech por el apoyo irrestricto y financiamiento en el desarrollo de las Tesis de Grado de la carrera de Ingeniería en Biotecnología de la Universidad Regional Amazónica Ikiam tituladas: "Biodiversidad y caracterización de biomateriales promisorios a partir del micelio de hongos Polyporales aislados de un bosque piemontano amazónico (Napo, Ecuador)", desarrollada por KF, y "Estandarización de técnicas para el desarrollo de micelio aéreo de *Ganoderma lucidum* con fines de producción de micotextiles", desarrollada por SB.

Referencias bibliográficas

1. Cerimi, K., Akkaya, K. C., Pohl, C., Schmidt, B. & Neubauer, P. Fungi as source for new bio-based materials: A patent review. *Fungal Biol. Biotechnol.* 6, 1–10 (2019).
2. Appels, F. V. W. et al. Fabrication factors in influencing mechanical, moisture and water-related properties of mycelium-based composites. *Mater. Des.* 161, 64–71 (2019).
3. Meyer, V. et al. Growing a circular economy with fungal biotechnology: a white paper. *Fungal Biol. Biotechnol.* 7:5, 1–23 (2020).
4. Astudillo-Echeverría, A., Pazmiño-Centeno, D. & Naranjo-Briceño, L. Uso de CRISPR/Cas9 como herramienta de edición de genomas en hongos filamentosos: una revisión del estado actual y últimas tendencias. *Genética médica y genómica O*, (2020).
5. Jones, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A. & John, S. Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review. *Mater. Des.* 187, 108397 (2020).
6. Elsacker, E., Vandeloock, S., Brancart, J., Peeters, E. & De Laet, L. Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. *PLoS One* 14, 1–20 (2019).
7. Stahel, W. R. The circular economy. *Nature* 531, 435–438 (2016).
8. Fletcher, I., Freer, A., Ahmed, A. & Fitzgerald, P. Effect of Temperature and Growth Media on Mycelium Growth of *Pleurotus Ostreatus* and *Ganoderma Lucidum* Strains. *Cohesive J. Microbiol. Infect. Dis.* 2, (2019).
9. Jones, M., Huynh, T., Dekiwadia, C., Daver, F. & John, S. Mycelium composites: A review of engineering characteristics and growth kinetics. *J. Bionanoscience* 11, 241–257 (2017).
10. Ecovative. We Grow Materials. Ecovative Design LLC <https://ecovatedesign.com/> (2020).
11. Kavanagh, K. *Fungi: Biology and applications*. (Wiley Blackwell, 2017).
12. Torruella, G. et al. Phylogenomics Reveals Convergent Evolution of Lifestyles in Close Relatives of Animals and Fungi. *Curr. Biol.* 25, 2404–2410 (2015).
13. Watkinson, S., Boddy, L. & Money, N. *The fungi*. Elsevier (Elsevier Ltd., 2016). doi:10.1016/b978-0-323-04475-2.50007-8.
14. Honegger, R., Edwards, D., Axe, L. & Strullu-Derrien, C. Fertile Protaxites taiti: A basal ascomycete with inoperculate, polysporous asci lacking croziers. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 373, (2018).
15. Watkinson, S., Boddy, L. & Money, N. *The Fungi*. Academic Press (2016). doi:10.2307/2421601.
16. Hawksworth, D. L. & Lücking, R. Fungal Diversity Revisited: 2.2 to 3.8 Million Species. *Microbiol. Spectr.* 5, 79–95 (2017).
17. Willis, K. J. State of the World's Fungi. (2018).
18. Smith, M., Bruhn, J. & Anderson, J. The fungus *Armillaria bulbosa* is among the largest and oldest living organisms. *Lett. to Nat.* 356, 428–431 (1992).
19. Hibbett, D. et al. Phylogenetic taxon definitions for Fungi, Dikarya, Ascomycota and Basidiomycota. *Int. Mycol. Assoc.* 9, 291–298 (2018).
20. Voisey, C. R. Intercalary growth in hyphae of filamentous fungi. *Fungal Biol. Rev.* 24, 123–131 (2010).
21. Jennings, D. *The physiology of fungal nutrition*. (Cambridge University Press, 1995).
22. Heaton, L. et al. Analysis of fungal networks. *Fungal Biol. Rev.* 26, 12–29 (2012).
23. Kuës, U. & Liu, Y. Fruiting body production in basidiomycetes. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 54, 141–152 (2000).
24. Hyde, K. D. et al. Fungal diversity notes 603–708: taxonomic and phylogenetic notes on genera and species. *Fungal Divers.* 87, 1–235 (2017).
25. Bennett, J. W., Lemke, P. A. & Howard, D. H. *The Fungal Community Its Organization and Role in the Ecosystem*. (2017).
26. Talbot, N. J. *Fungal biology: Growing into the air*. *Curr. Biol.* 7, 78–81 (1997).
27. Robledo, G. *Manual para el estudio de taxonomía, diversidad y ecología de Políporos*.
28. Gottlieb, D. *The Physiology of spore germination in fungi*. *Bot. Rev.* 16, 229–257 (1950).
29. Lew, R. R. Mass flow and pressure-driven hyphal extension in *Neurospora crassa*. *Microbiology* 151, 2685–2692 (2005).
30. Haneef, M. et al. Advanced Materials from Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties. *Sci. Rep.* 7, 1–11 (2017).
31. Winiski, J. Method for stimulating the expression of specific tissue morphologies in filamentous fungi. (2018).
32. Ruiz-Herrera, J. Fungal cell wall: structure, synthesis, and assembly. *Mycology Series xv*, 183 p. (2012).
33. Bartnicki-Garcia, S. Cell wall Chemistry, Morphogenesis, and Taxonomy of Fungi. *Annu. Rev. Microbiol.* 22, 87–108 (1968).
34. Bartnicki-Garcia, S. Cell wall chemistry, morphogenesis, and Taxonomy of fungi. *Annu. Rev. Furth.* 88–105 (1968).
35. Bowman, S. M. & Free, S. J. The structure and synthesis of the fungal cell wall. *Wiley Intersci.* 28, 799–808 (2006).
36. Girometta, C. et al. Physico-mechanical and thermodynamic properties of mycelium-based biocomposites: A review. *Sustain.* 11, (2019).
37. Ruiz-Herrera, J. & Ortiz-Castellanos, L. Cell wall glucans of fungi. A review. *Cell Surf.* 5, 100022 (2019).
38. Cassone, A. Development of vaccines for *Candida albicans*: Fighting a skilled transformer. *Nat. Rev. Microbiol.* 11, 884–891 (2013).
39. Zhao, Z., Liu, H., Wang, C. & Xu, J. R. Correction to Comparative analysis of fungal genomes reveals different plant cell wall degrading capacity in fungi [BMC Genomics 14(2013) 274]. *BMC Genomics* 15, (2014).
40. Várnai, A. et al. Carbohydrate-Binding Modules of Fungal Cellulases. Occurrence in Nature, Function, and Relevance in Industrial Biomass Conversion. *Advances in Applied Microbiology* vol. 88 103–165 (2014).
41. Tchotot Tchoumi, J. M., Coetzee, M. P. A., Rajchenberg, M. & Roux, J. Taxonomy and species diversity of *Ganoderma* species in the Garden Route National Park of South Africa inferred from morphology and multilocus phylogenies. *Mycologia* 111, 730–747 (2019).
42. John, D. *Fungi in Ecosystem Processes*. *Fungi Ecosyst. Process.* Second Ed. 31, i–xxvi (2016).
43. Dashtban, M., Schraft, H. & Qin, W. Fungal Bioconversion of Lignocellulosic Residues; Opportunities & Perspectives. *Int. J. Biol. Sci.* 5, 578–595 (2009).
44. Doria, E. et al. International Biodeterioration & Biodegradation Evaluation of lignocellulolytic activities of ten fungal species able to degrade poplar wood. *Int. Biodeterior. Biodegradation* 94, 160–166 (2014).
45. Pretratamientos De La Celulosa Y Biomasa Para La Sacarificación. *Sci. Tech.* XV, 284–289 (2009).

46. Baldrian, P. & Val, V. Degradation of cellulose by basidiomycetous fungi. *Fed. Eur. Microbiol. Soc.* 32, 501–521 (2008).
47. M., D., H., S. & W., Q. Fungal bioconversion of lignocellulosic residues; opportunities & perspectives. *Int. J. Biol. Sci.* 5, 578 (2009).
48. Thakur, V. K., Thakur, M. K., Raghavan, P. & Kessler, M. R. Progress in Green Polymer Composites from Lignin for Multifunctional Applications: A Review. *Sustainable Chem. Eng.* 2, 1072–1092 (2014).
49. Álvarez, C., Reyes-Sosa, F. M. & Díez, B. Enzymatic hydrolysis of biomass from wood. *Microb. Biotechnol.* 9, 149–156 (2016).
50. Montoya, S., Sanchez, O. & Levin, L. Pudrición Blanca Evaluation of Endoglucanase, Exoglucanase, Laccase, and Lignin Peroxidase Activities on Ten White-Rot Fungi. *Avaliação De Atividades. Biotechnol. en el Sect. Agropecu. y Agroind.* 12, 115–124 (2014).
51. Lechner, B. E. & Papinutti, V. L. Production of lignocellulosic enzymes during growth and fruiting of the edible fungus *Lentinus tigrinus* on wheat straw. *Process Biochem.* 41, 594–598 (2006).
52. Dinis, M. J. et al. Bioresource Technology Modification of wheat straw lignin by solid state fermentation with white-rot fungi. *Bioresour. Technol.* 100, 4829–4835 (2009).
53. Naranjo-briceño, L. et al. Potential Role of Extremophilic Hydrocarbonoclastic Fungi for Extra Heavy Crude Oil Bioconversion and the Sustainable Development of the Petroleum Industry. *Fungi in Extreme Environments: Ecological Role and Biotechnological Significance* (Springer Nature Publishers, 2019). doi:10.1007/978-3-030-19030-9.
54. Naranjo-Briceño, L. et al. Potential role of oxidative exoenzymes of the extremophilic fungus *Pestalotiopsis palmarum* BM-04 in biotransformation of extra-heavy crude oil. *Microb. Biotechnol.* 6, 720–730 (2013).
55. Naranjo Briceño, L., Urbina, H., De Sisto, A. & Leon, V. Isolation of autochthonous non-white rot fungi with potential for enzymatic upgrading of Venezuelan extra-heavy crude oil. *Biocatal. Biotransformation* 25, 341–349 (2007).
56. Nguyen, K. A., Wikee, S. & Lumyong, S. Brief review: Lignocellulosic enzymes from polypores for efficient utilization of biomass. *Mycosphere* 9, 1073–1088 (2018).
57. Naranjo, L., Urbina, H., De Sisto, A. & Leon, V. Isolation of autochthonous non-white rot fungi with potential for enzymatic upgrading of Venezuelan extra-heavy crude oil. *Biocatal. Biotransformation* 25, 341–349 (2007).
58. Grimm, D. & Wösten, A. B. Mushroom cultivation in the circular economy. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 7795–7803 (2018) doi:https://doi.org/10.1007/s00253-018-9226-8.
59. Peter, M., Winiski, J. & O'Brien, M. Process and apparatus for producing mycelium biomaterial. (2019).
60. McIntyre, G., Eben, B. & Palazzolo, A. Mycological biomaterial. vol. 1 (2018).
61. Holt, G. A. et al. Fungal mycelium and cotton plant materials in the manufacture of biodegradable molded packaging material: Evaluation study of select blends of cotton byproducts. *J. Biobased Mater. Bioenergy* 6, 431–439 (2012).
62. Zeller, P. & Zocher, D. Ecovative's Breakthrough Biomaterials. *Fungal Mag.* 5(1), 51–56 (2012).
63. Leonowicz, A. et al. Biodegradation of Lignin by White Rot Fungi. *Fungal Genet. Biol.* 27, 175–185 (1999).
64. Montoya, S., Sánchez, Ó. & Levin, L. Evaluación de actividades endoglucanasa, exoglucanasa, lacasa y lignina peroxidasa en diez hongos de pudrición blanca. *Biotechnol. en el Sect. Agropecu. y Agroindustrial* 12, 115–124 (2014).
65. Elsacker, E., Vandeloek, S., Brancart, J., Peeters, E. & Laet, L. De. Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. *PLoS One* 1–20 (2019) doi:https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213954.
66. Appels, F. V. W. et al. Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. *Mater. Des.* 161, 64–71 (2019).
67. Elsacker, E., Vandeloek, S., Van Wylick, A., Ruytinx, J., De Laet, L., & Peeters, E. (2020). A comprehensive framework for the production of mycelium-based lignocellulosic composites. *Science of the Total Environment*, 725, 138431. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138431>
68. Ross, P., Nicholas, W. & Caitlin, M. Method of producing fungal materials and objects made therefrom. vol. 1 40 (2018).
69. Stamets, P. E. Living systems from cardboard packaging materials. vol. 1 (2008).
70. Jiang, L., Walczyk, D., McIntyre, G. & Kin, W. Cost modeling and optimization of a manufacturing system for mycelium-based bio-composite parts. *J. Manuf. Syst.* 41, 8–20 (2016).
71. Lukacs, M. & Bhadra, D. Greener Solutions: Improvements of mycelium-based leather. *Final Rep. to Mycoworks* 54 (2017) doi:10.1002/ejoc.201200111.
72. Benson, K. F. et al. The mycelium of the *Trametes versicolor* (Turkey tail) mushroom and its fermented substrate each show potent and complementary immune activating properties in vitro. *BMC Complement. Altern. Med.* 19, 1–14 (2019).
73. Deeg, K., Gima, Z., Smith, A., Stoica, O. & Tran, K. Greener Solutions: Improving performance of mycelium-based leather. *Final Report to MycoWorks.* (2017).
74. Appels, F. et al. Fabrication factors in influencing mechanical, moisture and water-related properties of mycelium-based composites. *Mater. Des.* 161, 64–71 (2019).
75. Rothschild, L. J. et al. Myco-architecture off planet: growing surface structures at destination NIAC 2018 Phase I Final Report. 1–58 (2019).
76. Peintner, U., Pöder, R. & Pümpel, T. The Iceman's fungi. *Mycol. Res.* 102, 1153–1162 (1998).
77. Papp, N., Rudolf, K., Bencsik, T. & Czégényi, D. Ethnomycological use of *Fomes fomentarius* (L.) Fr. and *Piptoporus betulinus* (Bull.) P. Karst. in Transylvania, Romania. *Genet. Resour. Crop Evol.* 64, 101–111 (2017).
78. Jones, M., Gandia, A., John, S. & Bismarck, A. Leather-like material biofabrication using fungi. *Nature Sustainability* (2020) doi:10.1038/s41893-020-00606-1.
79. Mycoworks. Home - MycoWorks. Made with Reishi Fine mycelium <https://www.mycoworks.com/> (2020).
80. Bolt-Threads. Mylo Unleather. Mylo <https://www.mylo-unleather.com/> (2020).
81. MYCL. Mycotech Lab - Mycotech. Mylea <https://mycl.bio/> (2020).
82. Kaplan-Bie, J. Solution Based Post - Processing Methods For Mycological Biopolymer Material And Mycological Product Made Thereby. vol. 1 1–10 (2018).
83. Chase, J., Wenner, N., Ross, P. & Todd, M. deacetylation and crosslinking of chitin and chitosan in fungal materials and their composites for tunable properties. (2019).
84. Mylea. Technical data sheet Mylea™, The Mycelium Leather. (2019).
85. Dinis, M. J. et al. Bioresource Technology Modification of wheat straw lignin by solid state fermentation with white-rot fungi. *Bioresour. Technol.* 100, 4829–4835 (2009).
86. Finnigan, T. J. A. et al. Mycoprotein: The Future of Nutritious Non-meat Protein, a Symposium Review. in *Current Developments in Nutrition* vol. 3 (2019).
87. Cerimi, K., Akkaya, K. C., Pohl, C., Schmidt, B. & Neubauer, P. Fungi as source for new bio-based materials: A patent review. *Fungal Biol. Biotechnol.* 6, 1–10 (2019).
88. Nutrition, Q. What is Quorn's unique ingredient, mycoprotein, made of?
89. Mogu. Mogu Radical by Nature. Mogu acoustics <https://mogu.bio/> (2020).
90. Kalisz, R. E. & Rocco, C. A. Foamend Mycelium Structure and Method. vol. 1 1–32 (2011).
91. Radial. RADIAL – BIOMATERIALES. Tecnología <https://radialbio.com/> (2020).
92. Loop_Biotech. Loop Cocoon. World's first living coffin <https://www.loop-of-life.com/product> (2020).
93. Le Qara. Made by Le Qara Microorganisms <https://leqara.com/> (2020).
94. Sporatex, un biotextil creado a base de micelio de hongos. www.sporabiotech.com (2021).
95. Mycel Project - FROMHENCE DESIGN. Mycel Project [1651](http://from-</p></div><div data-bbox=)

hence.design/portfolio/mycel-project/ (2019).

96. Mycomaker. Somos - Mycomaker. Servicios <https://mycomaker.club/servicios/> (2020).
97. HYPHA. Lo que hacemos <https://hypha.cl/lo-que-hacemos/#serviciosdis> (2020).
98. Business of Fashion. Are The Best Days of Our Planet Ahead of Us? | Dan Widmaier | #BoFVOICES 2019. (2019).
99. Letivelt, R., Lindner, G., Teuffel, P. & Lamers, H. The production process and compressive strength of Mycelium-based materials. First Int. Conf. Bio-based Build. Mater. 1–6 (2020).
100. Yang, Z., Zhang, F., Still, B., White, M. & Amstislavski, P. Physical and Mechanical Properties of Fungal Mycelium-Based Biofoam. *J. Mater. Civ. Engineering* (2017) doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001866.
101. Rothschild, L. J. et al. Myco-architecture off planet: growing surface structures at destination NIAC 2018 Phase I Final Report. (2018) doi:Call: NNH17ZOA001N-18NIAC_A1.
102. Rodríguez, S. & De Pablo, C. Micotextil - Textiles de Hongos y Equipo Científico de Libre Acceso. 1–66 (2020).
103. Jiang, L., Walczyk, D., McIntyre, G. & Bucinell, R. A New Approach to Manufacturing Biocomposite Sandwich Structures: Mycelium-Based Cores. *Int. Manuf. Science Eng. Conf.* 1–11 (2016) doi:10.1115/msec2016-8864.
104. Bruscato, C., Malvessi, E. & Brandalise, R. High performance of macrofungi in the production of mycelium-based biofoams using sawdust - Sustainable technology for waste reduction. *J. Clean. Prod.* 234, 225–232 (2019).

Received: 20 noviembre 2020

Accepted: 15 enero 2021