

Los hongos comestibles, funcionales y medicinales: alternativa biotecnológica ante la problemática social, económica y ecológica del sargazo en el Caribe Mexicano

Daniel Martínez-Carrera¹, Alfonso Larqué-Saavedra², Mario Rebolledo Vieyra¹, Porfirio Morales¹, Ivan Castillo¹, Myrna Bonilla¹, Beatriz Petlascalco¹, Wilfrido Martínez¹, Gilmar Rendón¹, Vladimir Mitz¹, Alfredo Morales¹, Víctor Macuil¹, Joan Olvera¹, Luis Pérez¹, Mercedes Sobal¹, María Maimone-Celorio³ y Hugo Martínez¹

¹ Colegio de Postgraduados (CP), Campus Puebla, Centro de Biotecnología de Hongos Comestibles, Funcionales y Medicinales (CB-HCFM), Boulevard Forjadores de Puebla no. 205, Puebla 72760, Puebla, México. Correo electrónico: dcarrera@colpos.mx

² Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. (CICY), Calle 43 no. 130, Colonia Chuburná de Hidalgo, Mérida 97200, Yucatán, México. Correo electrónico: larque@cicy.mx

³ Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP), Facultad Biotecnoambiental, Barrio de Santiago, Puebla 72410, Puebla, México.

I. Introducción

El cambio climático avanza inexorablemente, generando retos enormes para las sociedades humanas y fuertes presiones de selección para los agroecosistemas y los ecosistemas naturales. La producción de alimentos es una actividad particularmente vulnerable y requiere especial atención. Además de promover y fortalecer la producción de alimentos básicos en un ambiente cambiante, disminuyendo su huella ecológica, es fundamental diversificar nuestras fuentes de alimentación incorporando cada vez más un mayor número de reinos y especies de la naturaleza (Martínez-Carrera & Larqué-Saavedra, 2019). Esto es factible en países como México, donde existe una gran riqueza cultural, biológica y ambiental. Un ejemplo en este sentido, lo constituye la degradación de la materia orgánica a través del eficiente sistema multienzimático del Reino *Fungi*, la cual permite no sólo su bioreciclaje acelerado en los ecosistemas, sino también la posibilidad de producir alimentos en cortos períodos de tiempo, tales como diversos hongos comestibles (Martínez-Carrera *et al.*, 2016).

Las algas son organismos importantes de los ecosistemas acuáticos de nuestro planeta. Algunas especies, tales como *Sargassum muticum*, se han reportado como alimento tradicional en Corea o como medicina tradicional en China (Milledge *et al.*, 2016). Por su parte, el sargazo pelágico (*Sargassum*) es una macroalga parda (Phaeophyceae) cosmopolita que flota libremente en mares y océanos, conformando un hábitat natural que beneficia a un gran número de especies. En el Caribe Mexicano, los expertos han identificado dos especies que arriban anualmente, correspondientes a *S. natans* y *S. fluitans* (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2016), de las cuales existen pocos estudios sobre su biología, distribución, usos, y potencial de aprovechamiento. Recientemente, se ha observado y documentado la afluencia masiva de sargazo pelágico en las costas del Caribe Mexicano. El fenómeno es creciente, como lo son sus implicaciones sociales, económicas y ecológicas

adversas al turismo, considerando que tan sólo en el Estado de Quintana Roo, se recibieron 16.9 millones de visitantes en 2017, cuya derrama económica superó los 8,810 millones de dólares americanos (SEDETUR, 2018).

En este trabajo se propone utilizar la biotecnología de producción de hongos comestibles, funcionales y medicinales, como una alternativa para aprovechar el sargazo que se acumula anualmente en las costas del Caribe Mexicano, como sustrato de cultivo, biodegradándolo, y promoviendo su reciclaje acelerado en la naturaleza. Los hongos comestibles contienen diversos compuestos bioactivos con propiedades benéficas para la salud (anticancerígenas, antibióticas, antioxidantes, antiinflamatorias, reductoras del nivel de colesterol y la hipertensión, antitrombóticas, antidiabéticas; Chang & Miles, 2004), y son culturalmente aceptados por gran parte de la población y el turismo internacional.

II. La problemática

La proliferación y afluencia masiva de algas en las costas de muchos países es un fenómeno cada vez más frecuente y de mayor impacto. Aunque se desconocen las causas específicas que le dan origen, las evidencias indican que el fenómeno está relacionado con la eutrofización del mar (Smetacek & Zingone, 2013) y posiblemente con el incremento de la temperatura oceánica derivada del cambio climático, lo cual modifica los patrones de vientos y las corrientes oceánicas. Las imágenes satelitales muestran que el sargazo que impacta el Caribe Mexicano proviene de la parte centro oriente del océano Atlántico (USF-NASA, 2018).

En el Caribe Mexicano, la llegada repentina de sargazo pelágico en las costas, principalmente del Estado de Quintana Roo, se caracterizó en sus inicios por eventos aislados, con pequeñas cantidades en algunos meses. Sin embargo, durante el período 2011-2018, la proliferación y afluencia masiva de sargazo pelágico se incrementó de manera alarmante (Schell *et al.*, 2015). En 2018, se observó la mayor acumulación de sargazo en las playas, como puede apreciarse en la **Figura 1**, y su presencia duró prácticamente todo el año. Al llegar a la costa, las grandes cantidades relativamente homogéneas de biomasa del sargazo, se vuelven por completo heterogéneas en pocas horas o días. Su acumulación diaria genera pilas de sargazo y encharcamientos que promueven procesos fermentativos con olores desagradables e inician la degradación de la materia orgánica (**Figura 2**). La marea y el oleaje arrojan parte del sargazo fermentado de nuevo al mar, contaminándolo y mezclándolo cíclicamente con el sargazo fresco. Las propiedades ópticas del agua cambian al incorporar masas de sargazo en el mar, formándose una capa de hasta 20 cm de grosor, la cual bloquea la luz solar y rompe el equilibrio energético en los productores primarios del sistema arrecifal, como son las praderas de pastos marinos. También se rompe el delicado equilibrio trófico de un sistema eminentemente oligotrófico, el cual, en circunstancias normales, carece de material particulado en suspensión. Con el tiempo, las pilas heterogéneas y deshidratadas de sargazo, parcialmente degradado o aprovechado por una gran variedad de organismos, son arrastradas de manera gradual por el viento e integradas a las dunas costeras, promoviendo la formación de cobertura vegetal y reduciendo la erosión ocasionada por vientos y mareas (**Figura 3**). Durante su largo trayecto del mar a las dunas, el sargazo a menudo se mezcla con arena y diversos residuos de las actividades

humanas, principalmente plásticos. Esta considerable heterogeneidad del sargazo acumulado en las costas dificulta en gran medida su posible utilización, ya que la mayoría de los procesos industriales requieren justamente lo opuesto, materia prima homogénea.

La afluencia masiva, acumulación y lento reciclaje natural del sargazo tiene enormes implicaciones sociales negativas en las costas del Caribe Mexicano, principalmente del Estado de Quintana Roo, ya que las principales actividades económicas dependen del turismo, sobre todo el internacional. La presencia de sargazo deteriora el paisaje, y el mar contaminado puede generar irritaciones o enfermedades (GCFI, 2018). El sargazo, por haber recorrido grandes distancias en el mar hasta llegar a la costa, también puede acarrear especies invasoras que tengan impacto ecológico negativo a nivel local. Remover el sargazo pelágico del mar o las pilas heterogéneas de sargazo de la costa es difícil de manejar, manualmente o mecánicamente, ya que son enormes cantidades y los procesos tienen costos económicos. La maquinaria disponible en el mercado es cara, bastante rudimentaria y está diseñada para pequeñas cantidades, por lo que su uso debe ser limitado y con operadores capacitados. La disposición del sargazo también puede tener serias implicaciones ecológicas, tales como la erosión manual o mecánica de arena y nutrientes; la compactación de arena; la modificación geomorfológica de playas; el daño al sistema de dunas; el incremento de la erosión eólica; el impacto negativo en zonas arrecifales, praderas marinas y comunidades coralinas; la afectación del desove y los nidos de las tortugas marinas, así como del regreso al mar de las recién nacidas; la remoción de vegetación costera; el impacto negativo en el suelo y el agua subterránea derivado del confinamiento en sitios autorizados y supervisados.

En 2019, se espera que la afluencia masiva de sargazo pelágico sea equivalente a la observada en 2018, o incluso mayor debido a la previsión del fenómeno de El Niño con temperaturas oceánicas más elevadas, lo que intensificará los patrones de vientos y corrientes oceánicas. A futuro, desafortunadamente, existen altas probabilidades de que el problema del sargazo continúe incrementándose de manera incontrolable, razón por la cual México debe invertir ahora en el desarrollo de investigaciones científicas básicas, aplicadas y socioeconómicas para manejar o revertir sus efectos adversos. Esto permitirá cubrir los vacíos de conocimiento existentes frente a una problemática que tomó completamente desprevenidos a todos los niveles de gobierno. Existe no sólo lentitud de reacción, sino también confusión organizacional sobre los niveles de responsabilidad y cómo debe abordarse la problemática, lo cual ha generado dispendio de recursos. Tan sólo en 2018, se estimó una inversión superior a los 240 millones de pesos en el Estado de Quintana Roo, para experimentar con una barrera de contención y recolectar manualmente más de 250,000 m³ de sargazo en las playas (Rebolledo-Vieyra, 2018).

III. Bioconversión del sargazo en compuestos bioactivos relevantes para la salud humana, a través de los hongos comestibles, funcionales y medicinales

Los hongos comestibles, funcionales y medicinales conforman la cadena agroalimentaria microbiana emergente más importante de México. Su producción actual representa un proceso biotecnológico microbiano, rentable, controlado, intensivo, eficiente en la utilización de agua, adaptable al cambio climático y desarrollado a pequeña (rústico) y gran

escala (alta tecnología), con importantes repercusiones sociales, ecológicas y económicas en el país (Martínez-Carrera *et al.*, 2016). La vinculación academia-industria ha permitido el desarrollo de investigaciones socioeconómicas para conocer su estructura, variables, sistema de mercado, relaciones con otros sectores, patrones de desarrollo, y su relevancia para la sociedad (Martínez-Carrera & Ramírez Juárez, 2016). Asimismo, los hongos comestibles ya constituyen una de las experiencias más avanzadas del país en la producción de alimentos bajo condiciones controladas en cortos periodos de tiempo. Se estima que la producción nacional fue alrededor de 63,374 toneladas de hongos frescos en 2014, llevada a cabo por pequeños productores, emprendedores y empresas privadas. Su valor económico supera los 200 millones de dólares anuales, permitiendo la generación de más de 25,000 empleos directos e indirectos. Las especies que se producen a gran escala son los champiñones blancos, cafés (*i.e.*, “portobello”, “portobellini”, “cremini”, “portabela”), y orgánicos [*Agaricus bisporus* (J. E. Lange) Pilát], así como las setas (blanca, gris, café; *Pleurotus* spp.), las cuales también se cultivan a pequeña escala. El huitlacoche [*Ustilago maydis* (De Candolle) Corda], y el *shiitake* [*Lentinula edodes* (Berk.) Pegler] también se producen a pequeña escala. Por su parte, el *reishi* [*Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst.], el *maitake* [*Grifola frondosa* (Dicks.) Gray] y la melena de león [*Hericium erinaceus* (Bull.) Pers.], incluyendo sus productos funcionales, se manejan a nivel de pruebas a escala experimental o pre-comercial. La mayor proporción de la producción nacional de hongos comestibles, funcionales y medicinales corresponde a los champiñones (93.7 %), seguidos de las setas (4.76 %), el huitlacoche (1.5 %), y el *shiitake* (0.04%). Durante el periodo 1991-2014, se observó una notable expansión y diversificación del sistema de producción y comercialización de los hongos comestibles, funcionales y medicinales, registrándose un incremento del 600% en la producción nacional. Esta plataforma de producción está concentrada territorialmente en la región central de México, principalmente en 15 Estados de la república, a saber: Baja California, Coahuila, Chiapas, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, México, Michoacán, Morelos, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Tlaxcala, y Veracruz (Martínez-Carrera *et al.*, 2010, 2016).

En el proceso de producción de los hongos comestibles, funcionales y medicinales, se emplean aproximadamente 500,000 toneladas de subproductos agrícolas, agroindustriales y forestales como sustrato de cultivo. Las pajas (trigo, cebada, centeno), los rastrojos (maíz, frijol, haba), las pulpas (café), los bagazos (algodón, caña de azúcar, tequila), los aserrines (pino, encino, maderas blandas), y prácticamente cualquier subproducto orgánico, se pueden reciclar aceleradamente utilizando la capacidad natural de los hongos comestibles para degradar la materia orgánica, su principal función ecológica. Sus hifas (fase vegetativa) microscópicas poseen una extraordinaria maquinaria metabólica capaz de liberar diversas enzimas extracelulares en el sustrato donde crecen (*e.g.*, lacasas, manganeso-peroxidases, celulasas, xilanasas, proteasas, fosfatasas, lisozimas, laminarinasas, lipasas), para degradar eficientemente sustancias complejas y convertirlas en componentes más simples, los cuales son absorbidos y utilizados para su desarrollo (Carlile & Watkinson, 1994). Las hifas entran en contacto directo con las paredes celulares de los subproductos vegetales, las cuales están compuestas principalmente por complejos conformados por lignina, celulosa, y hemicelulosa, iniciando el proceso de biodegradación. El crecimiento radial de las hifas sobre el sustrato conforma una masa blanquecina

algodonosa denominada micelio, a partir del cual se producen estructuras macroscópicas denominadas esporocarpos, comúnmente referidos como hongos comestibles o cuerpos fructíferos (*i.e.*, basidiocarpos, ascocarpos, basidiomas, ascomas, esporóforos). Los esporocarpos son las estructuras de la fase reproductora de los hongos comestibles, funcionales y medicinales encargadas de la producción y diseminación de esporas, los cuales emergen del micelio a través de un complejo proceso de diferenciación en el que participan diversos factores ambientales, tales como la temperatura, la concentración de O₂ y CO₂, la luz y la humedad relativa. Estos esporocarpos o cuerpos fructíferos, así como las agallas en el caso del huitlacoche, son las estructuras reproductoras de los hongos comestibles, funcionales y medicinales que se cosechan y venden en los distintos puntos de venta de México (tianguis, mercados públicos, supermercados, tiendas de conveniencia, taquerías, restaurantes), a las cuales se asignan nombres comunes o comerciales dependiendo de la especie (Martínez-Carrera *et al.*, 2016).

Con base en los principios descritos y considerando la gravedad del problema, los autores plantearon la hipótesis de utilizar el sargazo que llega en grandes cantidades a las costas del Caribe Mexicano, como sustrato no convencional para el cultivo de hongos comestibles, funcionales y medicinales (Martínez-Carrera & Larqué-Saavedra, 2019). La recolección manual de diferentes muestras de sargazo para el desarrollo de las investigaciones biotecnológicas en el Centro de Biotecnología de Hongos Comestibles, Funcionales y Medicinales (CB-HCFM) del *Campus* Puebla del Colegio de Postgraduados (CP), y el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), se realizó en Puerto Morelos, Quintana Roo, México (**Figura 4**). Las muestras obtenidas se caracterizaron y estudiaron en el CB-HCFM. Posteriormente, se prepararon para el proceso biotecnológico a través de la pasteurización, el enfriamiento, la inoculación del sargazo con la semilla previamente preparada en el laboratorio. Las unidades de producción se incubaron para favorecer el desarrollo micelial y la fructificación en un módulo de producción. Los resultados demostraron que el sargazo constituye un sustrato no convencional que puede ser utilizado a pequeña y gran escala para la producción de hongos comestibles (*Pleurotus*) y sus compuestos bioactivos relevantes en la alimentación, la nutrición y la salud humana, como puede apreciarse en la **Figura 5**. Los resultados muestran que pueden obtenerse hasta 114 kg de setas frescas, nombre comercial de los basidiocarpos de *P. ostreatus*, por tonelada de sargazo húmedo. Esto implica que pueden cosecharse hasta 883.7 kg de setas frescas por tonelada de sargazo en peso seco, dado su alto contenido de humedad (87%).

Las investigaciones demostraron que los hongos comestibles del género *Pleurotus* pueden inocularse, crecer, desarrollarse y reproducirse sobre el sargazo utilizado como sustrato no convencional de cultivo. Esto significa que sus hifas son capaces absorber los nutrientes necesarios para su desarrollo a partir de las paredes celulares del sargazo, las cuales están compuestas principalmente por polisacáridos sulfatados complejos que contienen fucosa (homofucanos, heterofucanos), celulosa, hemicelulosas, β -1,3-glucanos, alginatos, fenoles, proteínas, y yoduro, de acuerdo con los modelos estudiados (Deniaud-Bouët *et al.*, 2014). Este tipo de pared celular es único, ya que conjunta componentes propios de las plantas (celulosa), los animales (polisacáridos sulfatados que contienen fucosa), y las bacterias (alginatos). Diversos factores determinan la composición química de la pared celular, tales como la parte del talo, la etapa de desarrollo, la estación del año, el

hábitat, y la especie, lo cual podría influir en la producción de los hongos comestibles, funcionales y medicinales generando rendimientos variables.

Un aspecto relevante de la producción de hongos comestibles es que los basidiocarpos tienen un alto contenido de compuestos bioactivos. Incluyen lectinas, proteínas específicas, polisacáridos con diferente composición de azúcares, y compuestos de alto peso molecular, tales como α -glucanos; β -D-glucanos; heteroglicanos; glicopéptidos; polisacaropéptidos; heteroglicanopéptidos; proteoglicanos; glicoproteínas; terpenoides; diterpenos tricíclicos; triterpenos; ergosterol; proteínas antihipertensivas e inmunomoduladoras (Zhang *et al.*, 2007). Esta diversidad de compuestos constituye la base de sus propiedades funcionales y medicinales demostradas científicamente, las cuales pueden ser anticancerígenas, inmunomoduladoras, antibióticas, antiparasitarias, antioxidantes, antihipercolesterolémicas, antihipertensivas, antiinflamatorias, antitrombóticas, antidiabéticas, y hepatoprotectoras (Chang & Miles, 2004; Lindequist *et al.*, 2005). Estas propiedades han dado lugar a una creciente industria que comercializa una gran variedad de productos de hongos (suplementos dietéticos, extractos, cápsulas, tabletas, bebidas) para la industria alimentaria y farmacéutica a nivel mundial, con propósitos terapéuticos y de prevención de enfermedades.

Debe mencionarse que una vez cosechados los basidiocarpos de *Pleurotus*, se genera una menor cantidad de sargazo degradado (ca. 76% del sustrato inicial) como subproducto del proceso biotecnológico, el cual puede tener diversas aplicaciones. Este subproducto constituye una verdadera matriz orgánica compuesta por: 1) Sargazo parcialmente degradado; 2) Biomasa micelial que penetra y recubre el sargazo; 3) Exoenzimas fúngicas (*e.g.*, lacasas, manganeso-peroxidasas, celulasas); 4) El resto del secretoma micelial (proteínas secretadas por las hifas); y 5) Microbiota asociada (*e.g.*, bacterias, actinomicetes). Estas singulares características muestran que la producción comercial de hongos comestibles es también, al mismo tiempo, un proceso de producción de enzimas extracelulares a gran escala. Una característica sobresaliente de las potentes exoenzimas producidas por los hongos comestibles, es su baja especificidad que les permite, además de utilizar los complejos sustratos donde crecen, biodegradar incluso otro tipo de compuestos, tales como los hidrocarburos aromáticos policíclicos, bifenilos policlorados, pentaclorofenoles, colorantes de la industria textil, y pesticidas organoclorados, los cuales generan serios problemas de contaminación ambiental (Leonardi *et al.*, 2007). Por lo tanto, considerando los grandes volúmenes que serían producidos y por su composición, pueden identificarse cuando menos tres aplicaciones potenciales del sargazo degradado por los hongos comestibles, a saber: 1) Abono orgánico, 2) Regenerador y estabilizador de dunas costeras, y 3) Biorremediación *in situ*.

En síntesis, la **Figura 6** muestra, de manera general, el proceso biotecnológico desarrollado para aprovechar las grandes cantidades de sargazo que llegan anualmente al Caribe Mexicano. La recolección puede realizarse manualmente, lo que permite un impacto ambiental ínfimo. El proceso consiste en preparar el sargazo recolectado para convertirlo en un sustrato de cultivo adecuado para la producción y el consumo humano directo de hongos comestibles. En este caso, se tiene la ventaja de que ya existe un mercado de consumo de hongos comestibles en las zonas turísticas del Caribe Mexicano. El turismo, sobre todo el internacional, demanda los hongos comestibles para su alimentación. En la

Tabla 1, puede observarse que el precio de las setas (*Pleurotus*) al consumidor varía de MN \$80.95-\$616.25 pesos (USD \$3.97-30.26 dólares) por kilogramo de producto fresco, dependiendo de la especie, mientras que los champiñones (*Agaricus*) oscilan entre MN \$75.24-\$92.38 pesos (USD \$3.69-4.53 dólares) por kg según la presentación, y el *shiitake* (*Lentinula*) tiene un costo de MN \$223.13 pesos (USD \$10.95 dólares). El mercado regional de hongos comestibles, funcionales y medicinales puede desarrollarse más ampliamente con estrategias adecuadas de promoción del consumo, en virtud de que son alimentos fácilmente adaptables a la gastronomía local. Los basidiocarpos producidos a pequeña y gran escala, también pueden utilizarse para la extracción y purificación de compuestos bioactivos con propiedades funcionales y medicinales, generando productos de alto valor agregado (Meneses *et al.*, 2016; Adebayo *et al.*, 2018). Esta perspectiva abre incluso la posibilidad de obtener nuevos fármacos por biotransformación fúngica, a partir del proceso biotecnológico desarrollado. Después del cultivo, el sargazo parcialmente degradado por las enzimas fúngicas, con o sin compostaje, puede reciclarse como abono orgánico de buena calidad para los sistemas agroforestales, particularmente en la producción de plantas y árboles en vivero, las actividades agrícolas y hortícolas, así como la floricultura. También puede utilizarse para establecer un sistema de regeneración y estabilización de dunas costeras, lo cual es importante por los efectos negativos que periódicamente generan los huracanes en las playas del Caribe Mexicano. Otra aplicación potencial del sargazo degradado es su uso para la biorremediación *in situ* de zonas con diferentes niveles de contaminación por hidrocarburos, no sólo a través de su degradación directa por enzimas fúngicas, sino también mediante procesos de bioaumentación y la bioestimulación. Por su parte, el agua residual derivada de la pasteurización del sustrato, una vez enfriada, puede reciclarse en los procesos de compostaje, de regeneración y estabilización de dunas costeras, o en suelos agrícolas y forestales para fortalecer la actividad microbiana.

Aunque será necesario realizar investigaciones básicas, aplicadas y socioeconómicas para resolver problemas específicos que se vayan presentando, el presente trabajo establece bases sólidas para el desarrollo de las biotecnologías e innovaciones con enfoque multidisciplinario, las cuales permitirán el aprovechamiento del sargazo con impacto en la alimentación, la nutrición y la salud humana, así como su bioreciclaje en los ecosistemas costeros, a través del eficiente sistema multienzimático de los hongos comestibles, funcionales y medicinales.

Agradecimientos

Las Figuras 1 y 2 fueron amablemente proporcionadas por Paulina Montero de Puerto Morelos, Quintana Roo.

Referencias

Adebayo, E. A., D. Martínez-Carrera, P. Morales, M. Sobal, H. Escudero, M. E. Meneses, A. Avila-Nava, I. Castillo & M. Bonilla. 2018. Comparative study of antioxidant and antibacterial properties of the edible mushrooms *Pleurotus levis*, *P. ostreatus*, *P. pulmonarius*, and *P. tuber-regium*. *International Journal of Food Science and Technology* 53(5): 1316-1330. DOI: 10.1111/ijfs.13712.

- Carlile, M. J. & S. C. Watkinson. 1994. *The Fungi*. Academic Press, Londres. 482 pp.
- Chang, S. T. & P. G. Miles. 2004. *Mushrooms: Cultivation, Nutritional Value, Medicinal Effect, Environmental Impact*. CRC Press, Boca Raton. 451 pp.
- Deniaud-Bouët, E., N. Kervarec, G. Michel, T. Tonon, B. Kloareg & C. Hervé. 2014. Chemical and enzymatic fractionation of cell walls from Fucales: insights into the structure of the extracellular matrix of brown algae. *Annals of Botany* 114: 1203-1216.
- GCFI. 2018. Sargassum influx. Gulf and Caribbean Fisheries Institute, consultado el 3 de enero. <https://www.gcfi.org/sargassum-influx/>
- Leonardi, V., V. Sasek, M. Petruccioli, A. D'Annibale, P. Erbanová & T. Cajthaml. 2007. Bioavailability modification and fungal biodegradation of PAHs in aged industrial soils. *International Biodeterioration and Biodegradation* 60: 165-170.
- Lindequist, U., T. H. J. Niedermeyer & W.-D. Jülich. 2005. The pharmacological potential of mushrooms. *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine* (Oxford) 2: 285-299.
- Martínez-Carrera, D. & J. Ramírez Juárez (Eds.). 2016. *Ciencia, Tecnología e Innovación en el Sistema Agroalimentario de México*. Editorial del Colegio de Postgraduados-AMC-CONACYT-UPAEP-IMINAP, San Luis Huexotla, Texcoco, México. 856 pp.
- Martínez-Carrera, D. & A. Larqué-Saavedra. 2019. Retos de la producción de alimentos en México: Diversificar reinos y especies, disminuir la huella ecológica y establecer acciones para reducir los efectos del cambio climático. Periódico La Crónica, enero 2, Ciudad de México. www.cronica.com.mx
- Martínez-Carrera, D., A. Larqué-Saavedra, A. Tovar Palacio, N. Torres, M. E. Meneses, M. Sobal Cruz, P. Morales Almora, M. Bonilla Quintero, H. Escudero Uribe, I. Tello-Salgado, T. Bernabé-González, W. Martínez Sánchez & Y. Mayett. 2016. Contribución de los hongos comestibles, funcionales y medicinales a la construcción de un paradigma sobre la producción, la dieta, la salud y la cultura en el sistema agroalimentario de México. Capítulo 30, pp. 581-640. *En: Ciencia, Tecnología e Innovación en el Sistema Agroalimentario de México*. Eds. D. Martínez-Carrera & J. Ramírez Juárez. Editorial del Colegio de Postgraduados-AMC-CONACYT-UPAEP-IMINAP, San Luis Huexotla, Texcoco, México.
- Martínez-Carrera, D., N. Curvetto, M. Sobal, P. Morales & V. M. Mora (Eds.). 2010. Hacia un Desarrollo Sostenible del Sistema de Producción-Consumo de los Hongos Comestibles y Medicinales en Latinoamérica: Avances y Perspectivas en el Siglo XXI. Red Latinoamericana de Hongos Comestibles y Medicinales-COLPOS-UNSCONACYT-AMC-UAEM-UPAEP-IMINAP, Puebla. 648 pp.
- Meneses, M. E., D. Martínez-Carrera, N. Torres, M. Sánchez-Tapia, M. Aguilar-López, P. Morales, M. Sobal, T. Bernabé, H. Escudero, O. Granados-Portillo & A. R. Tovar. 2016. Hypcholesterolemic properties and prebiotic effects of Mexican *Ganoderma lucidum* in C57BL/6 mice. *PLoS ONE* 11(7): e0159631. doi:10.1371/journal.pone.0159631.
- Milledge, J. J., B. V. Nielsen & D. Bailey. 2016. High-value products from macroalgae: the potential uses of the invasive brown seaweed, *Sargassum muticum*. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* 15: 67-88.
- Rebolledo-Vieyra, M. 2018. Impacto del sargazo (*Sargassum natans* y *Sargassum fluitans*) en el Caribe Mexicano. Informe técnico. Colegio de Postgraduados, Campus Puebla.
- Rodríguez-Martínez, R. E., B. van Tussenbroek & E. Jordán-Dahlgren. 2016. Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa del Caribe Mexicano (2014-2015). Pp. 352-365. *En: Florecimientos Algales Nocivos en México*. Eds. E. García-Mendoza, S. I. Quijano-Scheggia, A. Olivos-Ortiz & E. J. Núñez-Vázquez. CICESE, Ensenada.

- Schell, J. M., D. S. Goodwin & A. N. S. Siuda. 2015. Recent *Sargassum* inundation events in the Caribbean: shipboard observations reveal dominance of a previously rare form. *Oceanography* 28(3): 8-10.
- SEDETUR. 2018. Reporte anual de Turismo Quintana Roo 2017. Gobierno del Estado, Secretaría de Turismo, Chetumal. 35 pp.
- Smetacek, V. & A. Zingone. 2013. Green and Golden seaweed tides on the rise. *Nature* 504: 84-88.
- USF-NASA. 2018. Outlook of 2018 *Sargassum* blooms in the Caribbean Sea. University of South Florida-NASA. Noviembre 30.
- Zhang, M., S. W. Cui, P. C. K. Cheung & Q. Wang. 2007. Antitumor polysaccharides from mushrooms: a review on their isolation process, structural characteristics and antitumor activity. *Trends in Food Science and Technology* 18: 4-19.

Tabla 1. Precio promedio al consumidor de los hongos comestibles frescos en diferentes puntos de venta de la ciudad de Cancún, Quintana Roo, México. El estudio exploratorio registró hongos comestibles (*Agaricus*, *Pleurotus*, *Lentinula*) comercializados en seis supermercados diferentes (Comercial Mexicana, Chedraui, Costco, Sam's Club, Soriana, Superama), durante la segunda semana de diciembre del 2018. Tipo de cambio: USD \$1.00 dólar americano = MN \$20.36 pesos mexicanos.

Nombre comercial	Especie	Precio corriente promedio al consumidor	
		Pesos (MN)	Dólares (USD)
Champiñón blanco	<i>Agaricus bisporus</i> (blanco)	\$75.24	\$3.69
Champiñón entero	<i>A. bisporus</i> (blanco)	\$90.33	\$4.43
Champiñón rebanado	<i>A. bisporus</i> (blanco)	\$83.14	\$4.08
Champiñón portobello	<i>A. bisporus</i> (café, etapa de desarrollo 3)	\$86.72	\$4.25
Champiñón portobellini	<i>A. bisporus</i> (café, etapa de desarrollo 2)	\$88.44	\$4.34
Champiñón cremini	<i>A. bisporus</i> (café, etapa de desarrollo 1)	\$92.38	\$4.53
Champiñón cremini orgánico	<i>A. bisporus</i> (café, etapa de desarrollo 1)	\$88.44	\$4.34
Setas	<i>Pleurotus ostreatus</i>	\$80.95	\$3.97
	<i>P. eryngii</i>	\$616.25	\$30.26
<i>Shiitake</i>	<i>Lentinula edodes</i>	\$223.13	\$10.95

A



B



C



Figura 1. Impacto del sargazo pelágico en las costas de Quintana Roo, México. A: Playa típica sin afectación, con arena blanca y agua color azul turquesa. B: Afluencia masiva de sargazo llegando a la playa. C: Acumulación masiva de sargazo con efectos negativos en la orilla del mar y las dunas costeras.



Figura 2. Acumulación de sargazo pelágico en las costas de Quintana Roo, México. Nótese el sargazo recién depositado por el oleaje en la playa (derecha), aquel acumulado previamente en diferentes etapas de degradación y deshidratación (izquierda), así como los charcos de agua estancada que promueven procesos fermentativos.



Figura 3. Integración a largo plazo de parte del sargazo degradado en las dunas costeras de Quintana Roo, México, promoviendo el desarrollo de diversas especies vegetales.



Figura 4. Recolección de muestras de sargazo para el desarrollo de las investigaciones en el Centro de Biotecnología de Hongos Comestibles, Funcionales y Medicinales del *Campus* Puebla, Colegio de Postgraduados (CP), y el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), llevada a cabo en Puerto Morelos, Quintana Roo, México. Aparecen (izquierda a derecha): Mario Rebolledo Vieyra, Hugo Martínez Carrera, Daniel Martínez Carrera, Ivan Castillo Sebastian, Porfirio Morales Almora, y Alfonso Larqué Saavedra.



Figura 5. Producción de basidiocarpos frescos de *Pleurotus ostreatus* (cepa CP-753), denominados comercialmente como setas en el mercado nacional, cultivados sobre sargazo fresco recolectado en las costas de Puerto Morelos, Quintana Roo, México. Nótese la colonización del sargazo por el micelio de *P. ostreatus*.

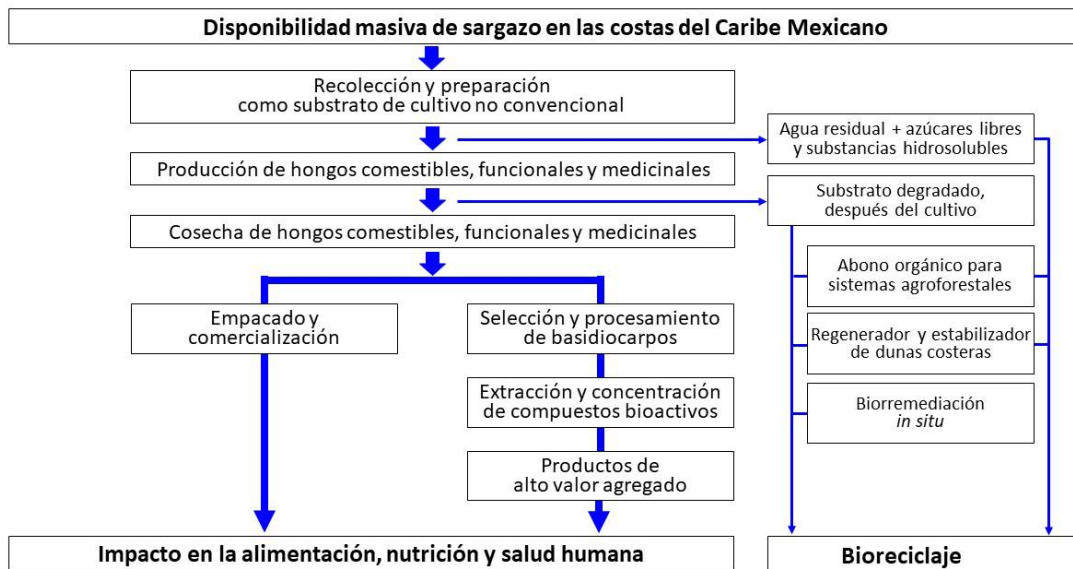


Figura 6. Proceso biotecnológico para aprovechar el sargazo como sustrato de cultivo para la producción y el consumo de hongos comestibles, funcionales y medicinales, así como para la extracción de compuestos bioactivos que generen productos de alto valor agregado. Después del cultivo, el sargazo parcialmente degradado por las enzimas fúngicas puede reciclarse como abono orgánico (con o sin compostaje), regenerador y estabilizador de dunas costeras, e incluso para la biorremediación *in situ*. El agua residual rica en azúcares libres y sustancias hidrosolubles se recicla agregándola a los procesos de compostaje, de regeneración y estabilización de dunas costeras, o a suelos agrícolas y forestales para fortalecer la actividad microbiana.