ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.50-58

Estudio de esfuerzo a compresión para compuestos a base de micelio reforzados con partículas de cáscara de aguacate

Gerardo Alexander Castro Armendáriz[1]; Alejandro Meza-de Luna[1]*
[1]Tecnológico Nacional de México/IT de Aguascalientes
Autor de correspondencia: alejandro.meza@mail.ita.mx

Resumen

Los compuestos a base de micelio (CBM) son materiales orgánicos que podrían reemplazar al poliestireno expandido (EPS) en diversas aplicaciones. Aunado a esto, la producción de estos materiales depende de la reutilización de desechos orgánicos de otras industrias. Particularmente en México, la creciente demanda extranjera de aguacate ha cimentado cambios significativos para la producción desmedida. Este artículo presenta las bases para la producción de CBM a partir de desechos orgánicos específicamente, partículas de cáscara de aguacate. La investigación evalúa las propiedades comparativas de resistencia a compresión de CBM al utilizar micelio fúngico de una especie disponible localmente: Ganoderma lucidum, además de sustratos orgánicos como aserrín y paja. Los hallazgos indican que el 80% de las muestras de MBC analizadas exhibieron una disminución en la resistencia a la compresión y todas las muestras de MBC demostraron un módulo elástico menor, manteniendo una densidad similar a las muestras de comparación.

Palabras clave: Caracterización mecánica, compresión, micelio, compuestos biodegradables, sustentabilidad.

Abstract

Mycelium-based composites (MBCs) are organic materials that could replace expanded polystyrene (EPS) in various applications. Furthermore, the production of these materials depends on the reuse of organic waste from other industries. Particularly in Mexico, the growing foreign demand for avocado has cemented significant shifts from excessive production. This article presents the foundation for the production of MBCs from organic waste, specifically avocado peel particles. The research evaluates the comparative compressive strength of MBCs prepared with fungal mycelium from a locally available species, Ganoderma lucidum, and organic substrates such as sawdust and straw. The findings indicate that 80% of the MBC samples analyzed exhibited a decrease in compressive strength, and all MBC samples demonstrated a lower elastic modulus, while maintaining a density similar to the comparison samples.

Keywords: Mechanical characterization, compressive load, mycelium, biodegradable compounds, sustainable construction materials.

Recibido: 22 de marzo de 2026. Aceptado: 30 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.51-58

Introducción

La modernización del sector de la construcción desempeña un papel importante en la reducción de las emisiones urbanas. La mayoría de los materiales de construcción actuales están hechos de cemento, yeso, metales, productos de madera y productos poliméricos. Estos materiales son costosos, consumen energía, no son amigables con el medio ambiente y no son reciclables. Un estudio reciente muestra que alrededor de 8,7 gigatoneladas provienen del sector de la construcción (Dougound, 2018), lo que representa alrededor del 10% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono (United Nations environment programme, 2021). Para minimizar el efecto medioambiental causado por el sector de la construcción, las opciones clave se reducen a las aplicaciones de materiales innovadores (edificios con bajas o nulas emisiones de carbono) (Riffat, et al., 2016). En comparación con otros materiales, el cemento es uno más utilizados en todo el mundo (Panchal, et al, 2017; Siddique, 2016; Yang et al, 2017). Los materiales a base de cemento son hidrófobos, de alta resistencia y duraderos (Yang et al, 2017). Sin embargo, no están sujetos a descomposición, generan contaminación ambiental, son susceptibles a agrietarse y, por lo general, requieren de varios procesos con altos costos para poder reciclarse o reutilizarse. De la producción de cemento, se emiten entre el 8 y el 10% del total mundial de emisiones de dióxido de carbono en el mundo (Italia et al, 2016). Aunado a esto, existen varios compuestos no cementosos que cuentan con un refuerzo natural, sin embargo, la matriz suele estar basada en petroquímicos (Faruk, et al. 2012) (Koronis, Silva y Fontul 2013) (La Mantia y Morreale 2011). Para mantener el sector de la construcción limpio y sostenible, es necesario mejorar las estrategias de construcción y los materiales con los que construimos (Navarro et al., 2012).

La práctica habitual común en el sector de la construcción no crea un medio ambiente sostenible ni una economía circular. El avance de la tecnología en materiales de construcción se ha convertido en uno de los temas más importantes en el campo de los estudios de investigación en biotecnología e ingeniería civil. Actualmente existe la posibilidad de fabricar materiales de construcción sostenible a partir de un compuesto de micelio de hongos y sustratos orgánicos (Ghazvinian et al, 2019; Maximino et al, 2020). El micelio es la parte vegetativa de los hongos, la cual tiene una estructura larga, ramificada y filamentosa llamada hifa, actuando como adhesivo natural capaz de crear una red de fibras extremadamente densas, adheridas al sustrato orgánico (aserrín, paja, posos de café, salvado de trigo y bagazo) (Heisel et al, 2017; Elkhateeb etal, 2019). La materia orgánica se une a esta estructura hifal y forma la piel del hongo. Cuando este proceso se detiene mediante secado o calentamiento, el proceso incompleto de reproducción del hongo da como resultado un compuesto a base de micelio. Este nuevo material

Recibido: 22 de marzo de 2026. Aceptado: 30 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.52-58

fúngico, además de aplicarse en la producción de biocompuestos, tiene un sinfín de aplicaciones en otras tecnologías ambientales (Alemu et al, 2021). La variedad de sustratos disponibles ofrece un sinfín de oportunidades para la optimización del desempeño mecánico de MCB. Dentro de estas alternativas, se encuentra el aguacate de variedad Hass, conocido por su exquisito sabor y versatilidad culinaria, ha ganado una prominente posición en la demanda global de alimentos en los últimos años. Este es originario de uno de los primeros árboles plantados y cultivados dentro del patio trasero del hogar de Rudolph Hass, un cartero estadounidense de origen alemán, en el estado de California en 1926 (Cucinare, 2020). Esta variedad que se ha convertido en una de las más populares en el mundo del aguacate, y gracias a los numerosos injertos obtenidos de esta planta madre, se ha propagado ampliamente y se cultiva en diversos países de Latinoamérica, incluyendo México, donde las condiciones climáticas generalmente son propicias, se ha experimentado un aumento significativo en la producción y en los volúmenes de comercialización del aguacate de tipo Hass, donde la actividad agrícola ha adquirido un papel destacado.

Actualmente el aguacate, en conjunto a otros productos como el maíz y el chile, la 3 convierten en un producto culinario que está dotado de historias y costumbres que tienen base desde siglos anterior y han llegado a extenderse mucho más allá del factor tradicional y nutricional, sin embargo su producción desmedida ha generado nuevos y abundantes desperdicios en la agroindustria. Investigaciones recientes evalúaron metodologías para la reducción y control eficaz de desperdicios de estos productos (Atehortúa Ruiz & Villa Ruiz, 2020), sin embargo la mayoría de las acciones evaluadas han sido con relación al hueso del aguacate y no a la cascara.

Las investigaciones existentes muestran que los compuestos a base de micelio se utilizan en una variedad de aplicaciones, como materiales de embalaje, aislamientos, tabiques, utensilios, muebles y diferentes diseños en arquitectura (Alemu et al, 2022). Puede reducir significativamente la dependencia de los combustibles fósiles y la energía incorporada necesaria para la construcción (Ghazvinian et al, 2022). Debido a que es completamente biodegradable, no produce desechos cuando se desecha adecuadamente y produce una huella de carbono más baja en comparación con los materiales de construcción fabricados convencionalmente (Ghazvinian et al, 2022), la calidad del producto se puede mejorar mediante diversificaciones metodológicas como tipos de sustrato, tipos de cepa, duración del tiempo de cultivo, tipo de moldeo y temperatura de moldeo (Alemu et al, 2022). Los géneros pertenecientes a Pleurotus son ampliamente utilizados y estudiados por diferentes estudiosos (J.L. Teixeira et al., 2018, Sun et al., 2019, Ghazvinian et al., 2019, Etinosa et al., 2019, Silverman et al., 2020, Colmo et al., 2020, (Rigobello & Ayres, 2022, Vašatko et al., 2022, Alemu, Tafesse, &

Recibido: 22 de marzo de 2026. Aceptado: 30 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.53-58

Gudetta Deressa, 2022, Soh & Le Ferrand, 2023, Peng et al., 2023) para la aplicación de compuestos a base de micelio, seguidos por los géneros Trametes (Vidholdova et al., 2019, Elsacker et al., 2019, Zimele et al., 2020, Attias et al., 2020, Elsacker et al., 2022, Sun et al., 2022, Nussbaumer et al., 2023) y Ganoderma (Silverman et al., 2020, Liu X et al., 2020, Chan et al., 2021, Rigobello & Ayres, 2022, Özdemir et al., 2022, Vašatko et al., 2022, Gauvin et al., 2022) debido a su resistencia a la contaminación y crecimiento más rápido que otros géneros de hongos (Vasatko et al, 2022).

Estudios pasados no presentan una clara tendencia de fabricación de compuestos a base de micelio (MBC). Distintas técnicas y métodos experimentales son adecuados a las condiciones propias del lugar donde se realizó el estudio. La implementación de nuevos materiales base como sustratos o fibras de refuerzo locales genera un interés propio en la producción a gran escala, principalmente la industria mexicana de la construcción, donde se podría adaptar como aligerante en sistemas de losas prefabricadas. En este contexto, el presente estudio se centra en la producción de biomateriales no cementosos a partir de desechos orgánicos para sustituir potencialmente materiales utilizados comúnmente en la industria de la construcción, mediante el uso de micelio de hongos como adhesivo natural. De forma específica, el estudio identifica la fuerza comparativa de diferentes combinaciones entre un mismo sustrato base (Aserrín), 2 especies de micelio comerciales localmente (Pleurotus ostreatus, Ganoderma lucidum) y 2 tamaños de partícula de cáscara de aguacate (PCA). Finalmente, este estudio analiza el comportamiento mecánico con una caracterización compresiva completa de las muestras mediante trabajabilidad, resistencia última a la compresión, módulo de elasticidad, modo de falla y análisis complementarios de absorción de agua y microscopía de macroporo.

Fundamentos teóricos

Actualmente no existe una normativa concreta que defina los parámetros de estudio en la fabricación de CBM. Distintas investigaciones han tenido que adaptar e integrar procedimientos para obtener resultados óptimos localmente.

Entre los parámetros de estudio destacan fundamentalmente el tipo de sustrato, el tiempo de cultivo y la especie de micelio utilizada. Estos parámetros responden a otras condicionantes de igual relevancia, como lo son la temperatura y el tamaño del compuesto a fabricar (Elsacker et al., 2021). La norma ASTM D1037 aparece como la más adaptable y utilizada para estudios de compresión en MCB por diferentes autores.

Materiales y métodos

Los tres sustratos utilizados en este estudio se obtuvieron de proveedores locales dentro de la región de Aguascalientes y Bajío en México. La selección se realizó debido a su abundancia y disponibilidad local. El primer sustrato es el aserrín de pino (A), que se obtuvo de Maderería Jesús María en Aguascalientes, México. El

Recibido: 22 de marzo de 2026. Aceptado: 30 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.54-58

aserrín es el desperdicio del proceso de aserrado. la madera. Se diferencia de las virutas de madera en que, a diferencia de estas, el aserrín tiene forma Redondeada y no laminar. Por sus altas cantidades de producción, este material ya ha sido implementado en distintas industrias durante varias décadas. Otros estudios respaldan el uso de este sustrato como alimento de micelios para la producción de MBC (Appels, 2020; Elsacker et al., 2021; Ghazvinian et al., 2019), pero la selección del residuo o la madera de procedencia siempre ha sido considerada en favor del tipo o especie de micelio. Poco se ha estudiado sobre las propiedades mecánicas del MCB con residuos de aserrín de pino, altamente disponibles de manera local y de bajo costo, siendo la madera la más utilizada en el sector de la construcción en México. El segundo sustrato es la fibra de coco (FC), que se obtiene de Sustratos CM; es un subproducto para la agricultura derivado del procesamiento de la fibra de la cáscara del coco, capa intermedia de la fruta del cocotero (Cocos nucifera) (Fibra de coco | AEFA - Asociación Española de Fabricantes de Agronutrientes, s/f). Una vez procesada, se obtienen fibras de coco de estructura fina con buena absorción de agua y propiedades de aireación. Estas propiedades lo hacen un material orgánico ideal para el cultivo de micelio a gran escala. El tercer sustrato estudiado es la paja (PP), que se obtuvo de Funsetmx en Jalisco, México. Es el tallo seco de ciertas gramíneas, especialmente los cereales llamados comúnmente de “caña” (trigo, avena, centeno, cebada, arroz, etcétera), una vez cortado y desechado, después de haber separado el grano o semilla. La paja se comercializa generalmente en pacas o en rollos, y su valor puede verse afectado por lo limpia y pura que ésta se considere. El uso de la paja como sustrato en la fabricación de MBC ya ha sido estudiado por otros autores con resultados favorables (Appels et al., 2019; Islam et al., 2018). Su consideración y selección para este estudio recae en su alta disponibilidad local y como control de las muestras a fabricarse durante este estudio.

El tamaño promedio del sustrato se obtuvo homogeneizándolo manualmente con una tijera por debajo de 2 cm (Getachew et al., 2019; Sánchez et al., 2016) y otros materiales no deseados como plásticos, metales y piedras se limpiaron manualmente de cada sustrato.

La selección de las especies de micelio estudiadas consideró principalmente la disponibilidad local, así como el potencial de uso en conjunto con sustratos locales. La especie Pleurotus ostreatus (PO) es una de las más estudiadas por otros autores, seguida por la especie Ganoderma lucidum. Su interés recae principalmente en su agresividad para colonizar, su bajo índice de contaminación, así como en propiedades físicas similares a las de compuestos plásticos como el poliestireno expandido (EPS) en su etapa final de fabricación. A pesar de las investigaciones realizadas, aún existe mucho por revelar respecto a las propiedades físicas integrales de estos compuestos en combinación con distintos

Recibido: 22 de marzo de 2026. Aceptado: 30 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.55-58

sustratos locales. Además de estas especies, esta investigación también considera el uso de una especie sin precedentes de estudio, Pleurotus djamour, la cual también está disponible localmente y cuyo micelio se caracteriza por tener propiedades físicas y comportamientos similares a los del género Pleurotus ostreatus, pero con un menor grado de popularidad comercial, debido a su color rojizo.

La obtención de inóculos de micelio en grano de sorgo para las cepas de *Pleurotus ostreatus* (PO) y *Pleurotus djamor* (PD) se realizó con el proveedor Fungilab en Nuevo León, México. Para la cepa de *Ganoderma lucidum* (G. lucidum) con el proveedor ACCbiolab de Jalisco, México. La selección de los micelios G2 con mejores características fue determinada por 3 variables: la velocidad de crecimiento en semilla, inspección visual y olor.

El diseño experimental se determinó mediante un método factorial 3 x 3 utilizando tres sustratos, tres especies de hongos y un período de cultivo. Cada prueba se triplicó y el resultado se tomó de la media (Alemu et al., 2022). La tabla 1 muestra los 4 lotes fabricados con las distintas combinaciones propuestas, dando un total de 24 muestras, de las cuales 16 se ensayaron a esfuerzo a compresión y el resto se utilizó como respaldo en caso de contaminación y para pruebas de absorción de agua.

Tabla 1. Combinaciones propuestas para la fabricación de CBM y protocolo base de fabricación. (Elaboración propia).

Lote	Especie	Sustrato	Tamaño de partícula de cáscara de aguacate (mm)	Muestras fabricadas
GA1	G. lucidum	aserrín	.05-1.00	6
GP1	G. lucidum	paja	.05-1.00	6
GA2	G. lucidum	aserrín	1.00-10.00	6
GP2	G. lucidum	paja	1.00-10.00	6

Resultados

Tres de los cuatro lotes no presentaron contaminación alguna durante el desarrollo de las muestras, sin embargo, el cuarto lote de sustrato de aserrín y 1.00-10.00 mm de TMA se contaminó completamente por lo que solo se realizaron pruebas mecánicas a los primeros tres lotes. Aunado a esto, en todos los lotes, durante el desarrollo de las muestras se pudo observar una notoria tendencia al crecimiento acelerado durante la primera semana, seguido de un desarrollo de menor intensidad en las semanas posteriores.

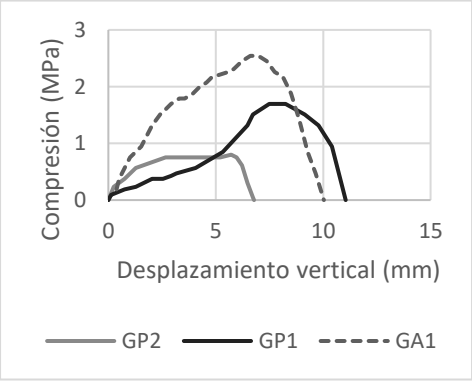


Figura 1. Diagrama esfuerzo-deformación a compresión de las muestras fabricadas con CBM reforzados con cáscara de aguacate en distintas dosis.

Recibido: 22 de marzo de 2026. Aceptado: 30 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.56-58

La figura 1 representa los resultados mecánicos a compresión para los 3 lotes correspondientes donde se observan valores entre los 100 y 200 kPa. Las muestras con mejores resultados fueron las de aserrín con 0.05-1.00 mm de partículas de cáscara de aguacate, mientras que las muestras fabricadas con aserrín y partículas de cáscara de aguacate de 1.00-10.00 mm obtuvieron los peores resultados. Estos resultados indican que la capacidad de compresión mecánica y el correcto desarrollo de las muestras están directamente relacionados con la adición de la partícula de cáscara de aguacate, como se observa en las muestras de aserrín colonizadas con distintos tamaños de partícula.

Conclusiones

De estos resultados, se infiere que la adición de aguacate a las muestras aumenta la velocidad de colonización, pero también potencializa la proliferación de agentes contaminantes como Trichoderma dentro de las muestras. Por lo tanto, no se recomienda su implementación en grandes cantidades dentro de la fórmula base de un compuesto a base de micelio. Asimismo, entre más pequeña sea la partícula de refuerzo, mayor será su afectación a la fórmula del sustrato, permitiendo una mejor digestión para el micelio y, por lo tanto, una rápida colonización. Se concluye que la adición de partículas de aguacate a sustratos en la elaboración de materiales compuestos a base de micelio es favorable cuando se adiciona en dosis pequeñas y con un tamaño de partícula menor a 1,00 mm.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico Nacional de México, al Instituto Tecnológico de Aguascalientes y a la SECIHTI por hacer posible esta investigación y brindar acceso a pruebas de laboratorio de materiales compuestos de ingeniería mecánica y de materiales. Asimismo, se agradece a la estudiante de maestría en Ingeniería Química, Daenery Sánchez Pérez, por su participación en este estudio.

Referencias bibliográficas

1. Andreola, F., Lancellotti, I., Manfredini, T., & Barbieri, L. (2020). The circular economy of agro and post-consumer residues as raw materials for sustainable ceramics. International Journal of Applied Ceramic Technology, 17(1), 22–31

2. Liu, G., Xu, K., Zhang, X., & Zhang, G. (2014). Factors influencing the service lifespan of buildings: An improved hedonic model. Habitat International, 43, 274–282. https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2014.04.009

3. Wuyts, W., Miatto, A., Sedlitzky, R., & Tanikawa, H. (2019). Extending or ending the life of residential buildings in Japan: A social circular economy approach to the problem of short-lived constructions. Journal of Cleaner Production, 231, 660–670. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.258

4. Brito Garcia, G. A., & Atalaya Bazan, P. E. (2023). Estimación del tiempo de vida residual

de dos edificaciones con sistema dual aplicando la norma ISO 15686. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC). https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/669876

5. Programme, U. N. E., & Construction, G. A. for B. and. (2020). 2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emissions, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector - Executive Summary. https://wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/34572

6. Sartori, I., & Hestnes, A. G. (2007). Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. Energy and Buildings, 39(3), 249-257. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.00

7. Chen, T. Y., Burnett, J., & Chau, C. K. (2001). Analysis of embodied energy use in the residential building of Hong Kong. Energy, 26(4), 323-340. https://doi.org/10.1016/S0360-5442(01)00006-8

8. Mithraratne, N., & Vale, B. (2004). Life cycle analysis model for New Zealand houses. Building and Environment, 39(4), 483-492. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2003.09.008

9. Enshassi, A., Kochendoerfer, B., & Rizq, E. (2014). An evaluation of environmental impacts of construction projects. Revista ingeniería de construcción, 29(3), 234-254. https://doi.org/10.4067/S0718-50732014000300002

10. Muhwezi L., Kiberu F., Kyakula M. and Batambuze A. (2012), An assessment of the impact of construction activities on the environment in Uganda: A case study of Iganga municipality. Journal of construction Engineering and Project Management, 2(4): 20-24.

11. Zolfagharian S., Nourbakhsh M., Irizarry J., Ressang A. and Gheisari M. (2012), Environmental impacts assessment on construction sites. Construction Research Congress 2012: 1750-1759.

12. Li X., Zhu Y. and Zhang Z. (2010), An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes. Building and Environment, 45(3):766-775.

13. Pittet D. and Kotak T. (2009), Environmental impact of building technologies, a comparative study in Kutch District, Gujarat State, India. Paper presented at the Ecomaterials 4, Paths towards Sustainability conference, November 2009, Bayamo, Cuba.

14. Chang Y., Ries R.J. and Wang Y. (2011), The quantification of the embodied impacts of construction projects on energy, environment, and society based on I- O LCA. Energy Policy, 39(10), 6321-6330.

15. Kaur M. and Arora S. (2012), Environment impact assessment and environment management studies for an upcoming multiplex-a Case Study. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSRJMCE), 1(4): 22-30.

16. Eras J. J. C., Gutiérrez A. S., Capote D. H., Hens L. and Vandecasteele C. (2013),

Improving the environmental performance of an earthwork project using cleaner production strategies. Journal of Cleaner Production. 47: 368-376.

17. Gangolells M., Casals M., Gasso´ S., Forcada N., Roca X. and Fuertes A. (2009), A methodology for predicting the severity of environmental impacts related to the construction process of residential buildings. Building and Environment, 44:558–571.

18. Gangolells M., Casals M., Gassó S., Forcada N., Roca X. and Fuertes A. (2011), Assessing concerns of interested parties when predicting the significance of environmental impacts related to the construction process of residential buildings. Building and Environment, 46(5):10231037.

19. Ijigah E. A., Jimoh R. A., Aruleba B. O., and Ade A. B. (2013), An assessment of environmental impacts of building construction projects. Civil and Environmental Research, 3(1): 93-105.

20. Heisel, F., Lee, J., Schlesier, K., Rippmann, M., Saeidi, N., Javadian, A., Nugroho, A. R., Mele, T. V., Block, P., & Hebel, D. E. (2017). Design, Cultivation and Application of Load-Bearing Mycelium Components: The MycoTree at the 2017 Seoul Biennale of Architecture and Urbanism. International Journal of Sustainable Energy Development, 6(1), 296–303. https://doi.org/10.20533/ijsed.2046.3707.2017.0039

21. Escóbar Llanos, J. (2002). La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar. CEPAL, División de Recursos Naturales e Infraestructura.

22. Bhuvaneshwari, S., Hettiarachchi, H., & Meegoda, J. N. (2019). Crop Residue Burning in India: Policy Challenges and Potential Solutions. International Journal of Environmental Research and Public Health,