

# Wood plastic composite: una alternativa de economía circular

CAMILA RAIMONDA, DANIEL MOSCA,  
PABLO RAIMONDA Y MARCELA IBÁÑEZ<sup>1</sup>

## PALABRAS CLAVE

WPC; MADERA PLÁSTICA; ECONOMÍA CIRCULAR; RECICLADO

## Resumen

El presente trabajo expone las ventajas ambientales del *Wood Plastic Composite* [WPC], una mezcla de madera y un plástico con la que se pueden fabricar variados productos de aplicación arquitectónica. En comparación con la madera tradicional «tratada» a utilizarse con igual destino, no solo representa una superación por lo que respecta al uso de productos químicos, sino también por el hecho de que, al formularse a partir de plásticos reciclados posconsumo y de desechos de aserraderos, evita el enterramiento o quema de dichas materias primas, colaborando así en el cumplimiento de las metas ambientales establecidas por el país.

## Introducción

El cambio climático, la degradación de la tierra, la escasez de agua y el uso de energía intensiva en carbono son solo algunos de los desafíos socioambientales que enfrenta el mundo en la actualidad. Hoy en día, lograr políticas amigables desde el punto de vista climático, energético, social y ambiental es una prioridad a nivel mundial.

La investigación actual en biomasa de residuos de madera se enfoca en minimizar la quema y maximizar su transformación en productos de valor agregado. Estos residuos, que incluyen aserrín, corteza, astillas, virutas y polvo de lijado de madera, son descartes en la silvicultura y el procesamiento de la madera, pero

**Pablo Raimonda:** Ingeniero químico. Profesor Adjunto del Instituto de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería (Udelar) y responsable del Laboratorio de Polímeros de dicho instituto. Cuenta con más de veinticinco años de experiencia en la enseñanza del tema polímeros, tanto en cursos de grado como de posgrado, además de experiencia industrial. Es integrante del Comité Internacional de la Polymer Proceedings Society, de los consejos directivos del Centro Tecnológico del Plástico y del Organismo Uruguayo de Acreditación, participando también en comités de Normalización, su especialidad, y en comités de evaluación de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación.

**1.** Los tres primeros autores forman parte del equipo del Laboratorio de Polímeros (Instituto de Ensayo de Materiales [IEM] de la Facultad de Ingeniería de la Udelar) que viene desarrollando, desde hace veinte años, una línea de trabajo sobre un tipo particular de mezcla de productos naturales —considerados desechos— y polímeros, conocido como *compounding*, con el objetivo...

también resultan una valiosa materia prima en nuestro país. Es importante recordar que, en el mejor de los casos, solo se aprovecha el 40% del árbol (Quirós et al., 2005; Pérez Flores, 2018).

Por otra parte, el Ministerio de Ambiente uruguayo publicó, en el año 2021, el Plan Nacional de Gestión de Residuos 2022-2032, en el que fueron establecidas metas de recuperación de distintos materiales —entre ellos, los plásticos— que las empresas productoras o importadoras deben cumplir.

Los compuestos de madera y plástico WPC, que pertenecen a una generación joven de —semi— biocompuestos, han concitado un creciente interés investigativo tanto en áreas científicas como industriales a lo largo de las últimas décadas (Spear et al., 2015; Pickering et al., 2016). El uso de WPC está creciendo rápidamente en todo el mundo. En particular, en la industria del automóvil y en la industria y la ingeniería de la construcción, para la producción de bienes de consumo, domésticos, y de materiales técnicos, entre otros. Este tipo de material compuesto combina las ventajas de los polímeros sintéticos y los rellenos lignocelulósicos en un todo. El bajo costo de procesamiento de los polímeros y su flexibilidad y facilidad de moldeo permiten su aplicación como una matriz polimérica en WPC. Las poliolefinas —como el polietileno o el polipropileno, por ejemplo—, el ácido poliláctico o el PVC, con altos índices de fluidez —es decir, bajos puntos de fusión y bajas temperaturas de ablandamiento—, son los polímeros de referencia para mezclar con materiales lignocelulósicos en la producción de WPC (Jian et al., 2022; Martins et al., 2017).

La producción de WPC es bastante sencilla. El aserrín o biomasa leñosa es mezclada con un polímero, generalmente polietileno o polipropileno, en una extrusora. Luego, el producto se extrude en gránulos —*pellets*—, para su almacenamiento y reprocesamiento, o se extruye directamente en formas complejas de productos de WPC, para aplicaciones finales.

## Un poco de historia

Los primeros desarrollos del WPC se remontan a los años setenta, con el Gruppo Ovattifici Riuniti, que fabricó un producto denominado «Woodstock» para Fiat en 1972. En 1973, Sonesson AB produjo un compuesto de PVC-aserrín para ser usado en baldosas para pisos (Schwarzkopf y Burnard, 2016). Si bien el concepto de WPC es bastante sencillo, la investigación ha continuado desde la década de 1970 hasta la actualidad, centrándose en mejorar la compatibilidad de sus dos componentes: madera y plástico.

El desarrollo de los WPC también ha coincidido con el desarrollo de los biopolímeros, lo que ha dado lugar a un considerable cruce entre dos disciplinas: teoría del mezclado y síntesis de biopolímeros, y ha llevado al desarrollo de productos 100% bioderivados y biodegradables. Sin embargo, dichos productos de WPC de base biológica tendrían un costo elevado, y normalmente solo ocupan nichos de mercado muy específicos (Spear et al., 2015; Zierdt et al., 2015).

## Los componentes

La matriz, como se mencionó anteriormente, generalmente se fabrica a partir de termoplásticos. Los termoplásticos son polímeros que tienen la particularidad de poder ser calentados, moldeados, enfriados y endurecidos para luego ser recalentados y reformados sin perder sus propiedades. Esto permite que el WPC sea moldeable para aplicaciones de formas complejas. El uso de termoplásticos también permite que el reciclaje de los materiales compuestos se realice con relativa facilidad. Cuando se procesan termoplásticos, no se depende de la reticulación para desarrollar la matriz sólida, sino más bien de las propiedades intrínsecas de los monómeros, los grandes pesos moleculares y el entrelazamiento de polímeros (Hull y Clyne, 1996). Cuando se calientan, las cadenas de los polímeros se desenredan y permiten el reprocesamiento del compuesto.

En la fabricación de WPC se utilizan muchos termoplásticos; sin embargo, el mayor porcentaje del mercado corresponde a tres polímeros principales: el polietileno [PE], polipropileno [PP] y cloruro de polivinilo [PVC]. Los polietilenos —ambos de baja y alta densidad— se utilizan en todo el mercado europeo, mientras que los compuestos de madera de PVC han encontrado en EEUU un mercado para marcos de ventanas. Otros polímeros están empezando a llegar al mercado; por ejemplo, Evonik ha lanzado recientemente un compuesto a base de polietilmetacrilato [PMMA]. El compuesto «Mydeck» requiere un proceso de extrusión único y crea un producto que —según se dice— parece madera barnizada (Spear et al., 2015).

También se usan resinas termoestables para la fabricación de *composites* madera-polímero. Se trata de resinas que curan de estado líquido a sólido mediante un proceso no reversible denominado «reacción de reticulación». Las resinas a base de formaldehído son muy comunes en toda la industria de paneles de madera, y se han utilizado junto con poliamidas y epoxis para la fabricación de WPC duraderos. Curiosamente, el primer WPC fue hecho a base de baquelita y madera, producido por la empresa Rolls Royce en 1916 (Clemons, 2002).

Para aumentar la resistencia mecánica del WPC, sobre todo en el caso de los confeccionados con termofijos, se emplean refuerzos continuos de fibra de vidrio impregnados mediante el uso de resinas epoxi como agentes adhesivos en las superficies externas o como mantas incrustadas e impregnadas en el interior de la sección transversal del perfil de WPC (Zolfaghari et al., 2013).

Se han utilizado experimentalmente varios biopolímeros en la producción de WPC; sin embargo, los polímeros más adecuados para la industria son el ácido poliláctico [PLA] y polihidroxialcanoatos [PHA] y sus derivados. Estos biopolímeros se consideran adecuados debido a su disponibilidad y sus puntos de fusión. Por otra parte, aunque los WPC biodegradables se han investigado y producido para períodos de vida cortos y aplicaciones a mediano plazo, no son aplicables a la industria de la construcción y, por tanto, no han sido considerados en este artículo.

## Fibras de madera y cargas

El uso de cargas en la industria de los polímeros no es nada nuevo. Minerales, como talco o carbonato de calcio, y materiales sintéticos, como vidrio o compuestos de residuos plásticos mixtos reciclados y reforzados con fibra de vidrio, pueden reemplazar la madera tratada químicamente en aplicaciones exteriores a gran escala con grandes ventajas desde el punto de vista ambiental. Se las puede emplear como travasas en puentes de ferrocarril, o para la fabricación de escaleras, *decks*, entre otros productos. Sin embargo, su comportamiento mecánico a altas temperaturas y su resistencia a los rayos UV requieren un estudio más detenido (Bajracharya et al., 2014).

El aserrín, madera obtenida mediante la tecnología de molienda, se clasifica (Klyosov, 2007) en cuatro fracciones por tamaño (50–150  $\mu\text{m}$ , 100–200  $\mu\text{m}$ , 200–450  $\mu\text{m}$  y 250–700  $\mu\text{m}$ ), aunque en la práctica se lo obtiene en una distribución muy amplia por tamaño de partícula, de 20  $\mu\text{m}$  a 5000  $\mu\text{m}$ , como subproducto del corte de madera con sierra (Dieste, 2014).

El tamaño de las partículas y la geometría de estas pueden tener una gran influencia en las propiedades del compuesto. Generalmente, cuando la madera se tritura en una industria, la distribución del tamaño de partículas es amplia. Stark y Rowlands (2003), Hernández-Jiménez et al. (2015), entre otros, evaluaron los efectos del tamaño de partícula en las propiedades finales del compuesto. La conclusión general a la que llegaron estos estudios es que, cuanto más fino es el polvo usado, los compuestos sometidos a carga de impacto exhiben menores concentraciones de tensión. Sin embargo, también debe tenerse en cuenta que la relación de forma de la partícula —o fibra— tendrá un efecto sobre las propiedades del compuesto. Así, una relación de forma más grande conduce a una mejor transferencia de tensión entre la matriz y la fibra (Schwarzkopf y Muszynski, 2015).

La elección del tipo de madera utilizada en la fabricación de WPC generalmente se basa en factores como la ubicación geográfica, su disponibilidad y su costo. Sin embargo, esta elección tiene un impacto significativo en el producto final, ya que influye en la composición química, la compatibilidad de las fibras con el polímero y las propiedades mecánicas del producto terminado.

Berger y Stark (1997) evaluaron varias especies por su compatibilidad con los polímeros y descubrieron que la fibra de las maderas duras daba compuestos con mejores propiedades de flexión y deflexión térmica.

Si bien se han realizado algunas investigaciones sobre el uso de residuos de madera posindustriales y posconsumo en la fabricación de WPC (Chaharmahali et al., 2010; Nourbakhsh et al., 2010), muchas se han centrado en el uso de residuos de madera limpios —aserrín y residuos planos— como fuente de fibra. Spear et al. (2015) señalaron que los datos mecánicos encontrados para el aserrín WPC posconsumo por Chaharmahali et al. (2010) son comparables con las cifras. Sin embargo, se ha observado que la investigación sobre el uso de residuos de madera ha sido eclipsada por la investigación sobre el uso de

plásticos posconsumo y reciclados, lo que abre un gran campo de aplicación en nuestra región, teniendo en cuenta que disponemos de ambos materiales en abundancia.

En nuestro país, desde el Laboratorio de Polímeros del Instituto de Ensayo de Materiales venimos investigando la aplicación de maderas nacionales —pino y eucalipto— sobre polímeros vírgenes y reciclados, con el objetivo de saber el potencial de estos materiales en el ámbito local.

## Breve introducción a los métodos de procesamiento

### COMPOUNDING

La combinación del polímero y la fibra de madera es un paso crítico en la fabricación de WPC. Es fundamental que las partículas se distribuyan uniformemente por toda la matriz polimérica para dar al producto final propiedades uniformes. La dispersión de las fibras se vuelve cada vez más importante con el aumento del contenido que está en el compuesto. Si los componentes del WPC se combinan correctamente, permitirán que la fibra se «humedezca» en el polímero, lo que conducirá a una mejor transferencia de carga en el producto final.

La extrusión es el proceso de formación más común en la fabricación de WPC. El polímero compuesto se vuelve a fundir y luego se alimenta a través de una matriz en la extrusora, para formar el perfil que se necesita para obtener el producto deseado. El material extruido luego se introduce en un baño de enfriamiento antes de cortarlo a la longitud deseada. Se puede utilizar una extrusora de doble tornillo, y agregar aditivos a los *pellets* antes de la extrusión, como compatibilizantes o protectores UV, mejorando con ello las propiedades del material compuesto.



FIGURA 1. WPC FABRICADO EN URUGUAY. FUENTE: FOTOGRAFÍA DE CLAUDIA BORDÓN

### EL PROCESO DE EXTRUSIÓN

Se produce un producto lineal con un perfil 2D. Hay dos tipos principales de perfiles extruidos de WPC: perfiles huecos y perfiles macizos [ver Fig 1.].

Esto hace que los productos extruidos sean fácilmente intercambiables con productos de madera moldeada, como tarimas para terrazas, revestimientos, fachadas, cercas, tablonos y aplicaciones de embalaje. La ventaja de la extrusión, con respecto a otras técnicas de moldeo, es que es un proceso continuo, además de que la fabricación del producto es económica tanto en lo que refiere a tiempo como a mano de obra. Schut (2007) realizó hace dieciséis años, por primera vez, la extrusión directa de un perfil de ventana hueco de WPC de pared delgada, y desarrollos recientes —año 2015— de la empresa austríaca Zitta utilizan una matriz plástica de PVC con aditivos del 50% en peso y una fracción fina de harina de madera (< 50  $\mu\text{m}$  aproximadamente 50% en peso).

### MOLDEO POR INYECCIÓN

Aunque la extrusión suele ser la técnica de moldeo más común para WPC, el moldeo por inyección se puede utilizar para modelar estructuras tridimensionales de formas complejas. Como en la extrusión, en el moldeo por inyección los *pellets* de polímero-madera también se vuelven a fundir, solo que después son introducidos en un molde y no a través de una matriz. Este molde entonces se enfría y el componente se expulsa. Por la propia naturaleza de la producción, el ciclo de fabricación de componentes moldeados por inyección es un proceso por lotes, por lo tanto, es necesario hacer una gran inversión en herramientas para la fabricación, lo que encarece el proceso. El moldeo por inyección se utiliza para artículos como macetas, caja de altavoces y rejillas de radiador.

### WPC en la industria de la construcción

En la industria de la construcción de otros países, los WPC son ampliamente utilizados. De acuerdo con un estudio de Osburg et al. (2016), por su linealidad y belleza, los productos de WPC se presentan como buenos sustitutos de aquellos que se fabrican a partir de madera maciza y polímeros puros. Por otra parte, tanto la preocupación medioambiental como la innovación de los consumidores hacia los nuevos materiales hacen que el WPC sea muy aceptado.

El aumento de la credibilidad sobre las posibles áreas de aplicación del WPC en el sector de la construcción —es decir, para su uso en materiales de revestimiento y fachada— lleva necesariamente al desarrollo de nuevas investigaciones para mejorar su resistencia a la flexión y al fuego, a la descomposición frente a hongos y a la degradación por rayos UV (Naumann et al., 2012; Friedrich et al., 2016).

El producto de WPC más común en el entorno construido es la tarima para terrazas o *deck*. Como sustituto de los que se fabrican en madera maciza, presenta dos ventajas: un menor costo de mantenimiento, pues no requiere ser retirado, y

un menor impacto ambiental, ya que con su uso se evitan los químicos potencialmente peligrosos involucrados en el proceso de «curado» de la madera. Pero este no es el único elemento de WPC pensado para la industria de la construcción, en el mercado ya se ven otros, como barandillas, escaleras, ventanas, puertas, pisos, revestimientos de cercas y molduras interiores (Clemons, 2002; Klyosov, 2007; Schwarzkopf y Burnard, 2016). Por último, es preciso recordar que las propiedades de inflamabilidad de los WPC deben mejorarse con retardantes de llama para ampliar su uso en el sector de la construcción (Kim y Pal, 2011).

### Performance de los WPC

A nivel microestructural, las propiedades de resistencia de los productos de WPC están determinadas por la unión interfacial entre la fibra de madera y el polímero. Habitualmente se utilizan compatibilizadores para mejorar dicha adhesión entre las fibras de madera hidrofílicas y la matriz de polímero hidrofóbico (Olakanmi y Strydom, 2016). Las propiedades intrínsecas del WPC se pueden mejorar mediante el uso de fibras de madera, debido a que estas tienen una mayor relación de aspecto del refuerzo en comparación con la presentada por las partículas de aserrín de madera (Stark y Rowlands, 2003). Sin embargo, existe un problema tecnológico con la alimentación de fibras de madera discretas en el proceso de extrusión o moldeo por inyección para mantener la longitud de la fibra y evitar la degradación por calor y, a su vez, asegurar la orientación y dispersión del aserrín en el acabado final del producto. A nivel macroscópico, el diseño de la sección transversal del perfil es lo más importante para la obtención de buenas propiedades de resistencia (Ballerini et al., 2008; Schut, 2007).

El rendimiento del WPC en condiciones exteriores hace referencia a la resistencia a los hongos y a la decoloración. También a las propiedades de inflamabilidad, que pueden ser mejoradas por medio de aditivos retardantes de llama (Kim y Pal, 2011), como el polifosfato de amonio y el pentaeritritol. Sin embargo, es preciso advertir que estos agregados, si bien disminuyen el efecto inicial —temperatura de degradación térmica y promoción de la formación de carbón—, reducen también la resistencia al impacto Izod o la resistencia a la tracción del WPC (Li y He, 2004). El límite del reciclaje mecánico del WPC se reconoce debido a la degradación de la matriz de polímero en los repetidos ciclos de calentamiento (Najafi, 2013) y la reducción de propiedades mecánicas del compuesto debido a la reducción del tamaño de las fibras de madera (Olakanmi y Strydom, 2016).

Las soluciones de compuestos 100% biodegradables reforzados con fibras naturales y biopolímeros de biomasa —proteínas, lípidos y polisacáridos—, ácido poliláctido y mezclas de PLA y PHA son un punto de gran interés en el futuro cercano, pero su mezcla y procesamiento necesitan mejoras, y el costo debe reducirse para hacerlos compatibles con la poliolefina, compuestos basados en matrices de derivados del petróleo (Bugnicourt et al., 2014; Sherman, 2008).



FIGURA 2. FOTO DEL WPC OBTENIDO EN EL LABORATORIO DE POLÍMEROS. A LA IZQUIERDA, EUCALIPTO, Y A LA DERECHA, PINO. FUENTE: FOTOGRAFÍA DE CLAUDIA BORDÓN

## Consideraciones finales y conclusiones

Como se destacó en este artículo, el WPC es un material con un gran potencial de mercado para usos arquitectónicos, que además compite en duración y costos con la madera natural, con ventajas desde el punto de vista ambiental, ya que permite reciclar dos residuos que se están generando en nuestro país en grandes volúmenes: el aserrín, que se genera en grandes volúmenes durante el procesamiento de la madera para uso estructural, y los termoplásticos, que con los objetivos del plan de residuos sólidos van a comenzar a acumularse.

Por otra parte, es de destacar que en Uruguay ya hay una industria instalada que produce *decks* inyectados a partir de insumos nacionales —aserrín y polietileno reciclado—.

A su vez, en el Instituto de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería estamos realizando una serie de experimentos para evaluar las propiedades mecánicas de los WPC obtenidos a partir de aserrín de eucalipto y pino, las dos especies maderables más comunes en nuestro país.

## Referencias bibliográficas

Bajracharya, R.M., Manalo, A.C., Karunasena, W. y Lau, K. (2014). An overview of mechanical properties and durability of glass-fibre reinforced recycled mixed plastic waste composites [Una descripción general de las propiedades mecánicas y la durabilidad de los compuestos de residuos plásticos mixtos reciclados reforzados con fibra de vidrio]. *Materials & Design*, 62, 98-112.

- Ballerini, A.A., Bustos, X.A., Nunez, M.A. y Wechsler, A. (2008, noviembre). Innovation in window and door profile designs using a wood-plastic composite [Innovación en el diseño de perfiles de puertas y ventanas mediante un compuesto de madera y plástico]. [Presentación de artículo]. 51ª Convención Internacional de la Sociedad de Ciencia y Tecnología de la Madera, 10 al 12 de noviembre de 2008, Concepción, Chile. Recuperado de [https://www.academia.edu/3192946/Innovation\\_in\\_window\\_and\\_door\\_profile\\_designs\\_using\\_a\\_wood\\_plastic\\_composite](https://www.academia.edu/3192946/Innovation_in_window_and_door_profile_designs_using_a_wood_plastic_composite)
- Berger, M.J. y Stark, N.M. (1997, diciembre). Effect of species and particle size on properties of woodflourreinforced polypropylene composites [Efecto de las especies y el tamaño de las partículas sobre las propiedades de los compuestos de polipropileno reforzados con harina de madera.]. [Presentación del artículo]. IV Congreso Internacional sobre Compuestos de Fibra de Madera y Plástico, 8 al 10 de diciembre de 1997, Le Meridien en Coronado, San Diego, California, EEUU.
- Bugnicourt, E., Cinelli, P., Lazzeri, A. y Alvarez, V. (2014). Polyhydroxyalkanoate (PHA): review of synthesis, characteristics, processing and potential applications in packaging [Polihidroxicanoato (PHA): revisión de síntesis, características, procesamiento y potenciales aplicaciones en *packaging*]. *Express Polymer Letters*, 8(11), 791-808. DOI <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2014.82>
- Chaharmahali, M., Mirbagheri, J., Tajvidi, M., Najafi, S.K. y Mirbagheri, Y. (2010). Mechanical and physical properties of wood plastic composite panels [Propiedades mecánicas y físicas de los paneles compuestos de madera y plástico.]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(2), 310-319. DOI:10.1177/0731684408093877
- Clemons, C. (2002). Wood-plastic composites in the United States: the interfacing of two industries [Compuestos de madera y plástico en los Estados Unidos: la interfaz de dos industrias]. *Forest Products Journal*, 52(6), 10-18.
- Dieste, A. (2014). Plan de inversiones en maquinaria y equipos (Informe de asesoramiento n° 3). <https://silo.tips/download/plan-de-inversiones-en-maquinaria-y>
- Friedrich, D. y Luible, A. (2016). Investigations on ageing of wood-plastic composites for outdoor applications: A meta-analysis using empiric data derived from diverse weathering trials [Investigaciones sobre el envejecimiento de compuestos de madera y plástico para aplicaciones en exteriores: un metanálisis que utiliza datos empíricos derivados de diversos ensayos de intemperismo]. *Construction and Building Materials*, 124, 1142-1152.
- Hughes, M. (2015). Plywood and other veneer-based products [Madera contrachapada y otros productos a base de chapas]. En M. P. Ansell (Ed.), *Wood Composites* (pp. 69-89). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Hull, D. y Clyne, T.W. (1996). *An Introduction to Composite Materials [Introducción a los materiales compuestos]*. (2ª ed.). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139170130>
- Jian, B., Mohrmann, S., Li, H., Li, Y., Ashraf, M., Zhou, J. y Zheng, X. (2022). A review on flexural Properties of Wood-Plastic Composites [Una revisión sobre las propiedades de flexión de los compuestos de madera y plástico.]. *Polymers*, 14(19), 3942. <https://doi.org/10.3390/polym14193942>

- Kim, J.K. y Pal, K. (2011). *Recent Advances in the Processing of Wood-Plastic Composites* [Avances recientes en el procesamiento de compuestos de madera y plástico]. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-14877-4>
- Klyosov, A. A. (2007). *Wood-plastic composites* [Compuestos de madera plástica]. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Naumann, A., Seefeldt, H., Stephan, I., Braun, U. y Noll, M. (2012). Material resistance of flame retarded wood-plastic composites against fire and fungal decay [Resistencia del material de compuestos de madera y plástico retardantes de llama contra el fuego y la descomposición por hongos]. *Polymer Degradation*
- Nourbakhsh, A., Ashori, A., Tabari, Z. y Rezaei, H. (2010). Mechanical and thermo-chemical properties of wood-flour/polypropylene blends [Propiedades mecánicas y termoquímicas de mezclas de madera, harina y polipropileno.]. *Polymer Bulletin*, 65(7), 691-700.
- Martins G., Antunes F., Mateus A. y Malça, C. (2017). Optimization of a wood plastic composite for architectural applications [Optimización de un compuesto de madera y plástico para aplicaciones arquitectónicas]. *Procedia Manufacturing*, 12, 203-220. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.08.025>
- Ministerio de Ambiente. (2021). *Uruguay + Circular: Plan Nacional de Gestión de Residuos*. Recuperado de <https://www.ambiente.gub.uy/oan/documentos/PNGR-general.pdf>
- Olakanmi, E.O. y Strydom, M.J. (2016). Critical materials and processing challenges affecting the interface and functional performance of wood polymer composites (WPCs) [Materiales críticos y desafíos de procesamiento que afectan la interfaz y el rendimiento funcional de los compuestos de polímeros de madera (WPC)]. *Materials Chemistry and Physics*, 171(2), 290-302. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2016.01.020>
- Osburg, V., Starck, M. y Toporowski, W. (2016). Consumer acceptance of wood-polymer composites: a conjoint analytical approach with a focus on innovative and environmentally concerned consumers [Aceptación por parte de los consumidores de los compuestos de madera y polímero: un enfoque analítico conjunto centrado en los consumidores innovadores y preocupados por el medio ambiente]. *Journal of Cleaner Production*, 110, 180-190.
- Pérez Flores, D. A. (2018). *Caracterización y rendimiento en la transformación de madera en rollo a madera aserrada de la especie de pino (Pinus oocarpa Schiede) en seis aserraderos en Nueva Segovia y Estelí*. (Tesis de maestría, Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente, Universidad Nacional Agraria, Managua, Nicaragua). Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria: <https://repositorio.una.edu.ni/3720/>
- Pickering, K.L., Aruan Efendy, M.G. y Le, T.M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance [Una revisión de los desarrollos recientes en compuestos de fibras naturales y su desempeño mecánico.]. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 83, 98-112. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>
- Quirós, R., Chinchilla, O. y Gómez, M. (2005). Rendimiento en aserrío y procesamiento primario de madera proveniente de plantaciones forestales. *Agronomía Costarricense*, 29(2), 7-15.
- Schut, J.H. (2007). First extrusion of complex WPC window profiles [Primera extrusión directa de perfiles complejos de ventanas de WPC]. *Plast. Technol.* <https://www.ptonline.com/articles/first-direct-extrusion-of-complex-wpc-window-profiles>
- Schwarzkopf, M.J. y Muszynski, L. (2015). Strain distribution and load transfer in the polymer wood particle bond in wood plastic composites [Distribución de deformaciones y transferencia de carga en la unión de partículas de madera polimérica en compuestos plásticos de madera]. *Holzforshung*, 69(1), 53-60. <https://doi.org/10.1515/hf-2013-0243>
- Schwarzkopf, M.J. y Burnard, M.D. (2016). Wood-plastic composites—performance and environmental impacts [Compuestos de madera y plástico: rendimiento e impactos ambientales]. En A. Kutnar y S.S. Muthu (Eds.), *Environmental Impacts of Traditional and Innovative Forest-Based Bioproducts* (pp. 19-43). Singapur: Springer. DOI:10.1007/978-981-10-0655-5\_2
- Sherman, L.M. (2008, 7 de enero). Enhancing biopolymers: additives are needed for toughness, heat resistance & processability [Polímeros mejorados: se necesitan aditivos para aumentar la dureza, la resistencia al calor y la procesabilidad]. *Plastics Technology*. <http://www.ptonline.com/articles/enhancing-biopolymers-additives-are-needed-for-toughness-heat-resistance-processability>
- Spear, M.J.; Eder, A. y Carus, M. (2015). Wood polymer composites [Compuestos de madera y polímero]. En M.P. Ansell (Ed.), *Wood Composites* (pp. 195–249). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Stark, N.M. y Rowlands, R.E. (2003). Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites [Efectos de las características de la fibra de madera sobre las propiedades mecánicas de los compuestos de madera/polipropileno]. *Wood and Fiber Science*, 35(2), 167-174.
- Zierdt, P., Theumer, T., Kulkarni, G., Däumlich, V., Klehna, J., Hirsch, U. y Weber, A. (2015). Sustainable wood-plastic composites from bio-based polyamide 11 and chemically modified beech fibers composites [Compuestos sostenibles de madera y plástico a partir de poliamida 11 de origen biológico y compuestos de fibras de haya modificadas químicamente]. *Sustainable Materials and Technologies*, 6, 6-14. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.10.001>
- Zolfaghari, A., Behraves, A.H. y Adli, A. (2013). Continuous glass fiber reinforced wood plastic composite in extrusion process: mechanical properties [Compuesto plástico de madera reforzado con fibra de vidrio continua en proceso de extrusión: propiedades mecánicas]. *Materials & Design*, 51, 701-708. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.082>