

Caracterización Mecánica de Compósitos de Polipropileno, Reforzados con Polvo de Bambú y Nanoarcillas, Obtenidos Mediante Extrusión e Inyección

Pilaguano Jonathan¹, Vizueta Pedro¹, Campaña Kléber, Ing.¹ y Guerrero Víctor, PhD.¹
¹Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, jonathan.pilaguano@epn.edu.ec, pedro.vizueta@epn.edu.ec, kleber.campana@epn.edu.ec, victor.guerrero@epn.edu.ec

Resumen– En este trabajo se estudió la variación de las propiedades mecánicas y térmicas debido a la incorporación de polvo de bambú y nanoarcillas en una matriz de polipropileno homopolímero PH1310. Las variables manejadas fueron el tamaño de partícula y contenido en peso de bambú, también contenido en peso de nanoarcillas. Los tamaños de partícula y contenidos de bambú fueron 149, 250, 595 μm y 5, 10, 15 wt%, respectivamente. Los contenidos de nanoarcillas fueron 0, 2.5 y 5 wt%. Como compatibilizante se usó polipropileno maleizado en 3 wt%. Los compuestos fueron obtenidos mediante extrusión e inyección. Se realizaron ensayos de tracción, flexión, impacto, dureza y los resultados fueron analizados estadísticamente para determinar las variables influyentes. La caracterización térmica incluyó ensayos de calorimetría diferencial de barrido, análisis termogravimétrico y termomecánico. La adición de polvo de bambú y nanoarcillas afectaron las propiedades mecánicas mejorando el módulo de elasticidad y de flexión, con efectos negativos en la resistencia al impacto y tracción. Los ensayos térmicos indicaron reducción de cristalinidad con la agregación de bambú y nanoarcillas, pero mejor estabilidad térmica gracias a estas últimas. El compuesto con 15 wt% y tamaño de partícula 250 μm de bambú, y 2.5 wt% de nanoarcillas resultó con mejores propiedades con aumentos de 85, 21, 59, 11 y 6% en módulo de elasticidad, resistencia a la flexión, módulo de flexión, dureza y densidad y disminuciones del 76 y 14% en resistencia al impacto y resistencia tracción respecto al polipropileno. Finalmente se comparó estos resultados con estudios similares confirmando las tendencias observadas.

Keywords: *compuestos, bambú, nanoarcillas, obtención, polipropileno*

I. INTRODUCCIÓN

Los compuestos lignocelulósicos o WPC (Wood Plastic Composites por sus siglas en inglés) son definidos como aquellos que poseen madera (en diferentes formas como polvo o fibra, fibras de kenaf, cáñamo, abacá, etc.) y termoplásticos (los más comunes son polipropileno, polietileno, PVC, etc.) [1]. Estos compuestos se han venido desarrollando durante los últimos 40 años principalmente por motivos de buen desempeño mecánico, bajo costo e impacto ambiental muy reducido respecto a otros materiales. El desarrollo de nuevos materiales es un tema de investigación de alto interés para el sector educativo e industrial ya que las crecientes demandas de la población hacen necesario que se produzcan nuevos

materiales que reemplacen a los actuales, igualando o mejorando sus propiedades, además que sean amigables con el medio ambiente. Los WPC son materiales compuestos que van ganando más espacio dentro de la industria; ya que combinan la durabilidad de los termoplásticos con características de las fibras naturales como baja densidad, alta disponibilidad, buenas propiedades específicas, procesamiento no abrasivo para las máquinas, bajo costo respecto a compuestos minerales y lo más importante biodegradabilidad [2]. Esto se debe a que la madera es un recurso renovable, reciclable y biodegradable cuyas características son bien apreciadas por los ambientalistas. Dentro de sus aplicaciones más comunes se encuentran pisos, revestimientos, marcos de ventanas, muebles, cercas para jardines, revestimientos para interiores de autos (expuestos a temperaturas menores a 110 °C) y componentes estructurales. Sin embargo, la escasez cada vez más grande de recursos madereros debido a problemas como deforestación y el costo de la materia prima ha hecho que se comprometan las fuentes de refuerzos para WPC y por lo tanto su producción y uso.

El bambú es un material lignocelulósico ampliamente disponible en muchos países del mundo. Se estima que existen alrededor de 22 millones de hectáreas sembradas de bambú en el mundo y su disponibilidad bordea la cifra de 30 millones de toneladas por año, además de tener un ciclo de renovabilidad de 3 a 4 años [3]. El uso de bambú en los WPC puede ayudar a reducir la demanda de fibras de madera tradicional y el impacto ambiental asociado a su cosecha. Ecuador es un país con buenas reservas de bambú a nivel mundial y de los pocos que dan importancia a este material, además de Brasil y Colombia, a nivel de Suramérica [4], [5]. Su uso en WPC puede dar un impulso para la producción de estos compuestos.

Por otro lado, el desarrollo de la nanotecnología ha abierto nuevas posibilidades para el desarrollo y mejora de nuevos materiales. Las nanoarcillas son nanopartículas de minerales de silicato con alta relación de aspecto. Además, son muy usadas en la industria por las mejoras que producen en las propiedades mecánicas de compuestos de matriz polimérica usando pequeñas cantidades, comúnmente entre 1 al 5 wt% [6]. Las arcillas del tipo montmorillonita son las más usadas debido a los buenos resultados que han presentado en las propiedades mecánicas y térmicas en compuestos con matriz de polipropileno [7].

Existen trabajos realizados por otros autores en los que se han investigado algunas variables en WPC. Uno de estos, investigaron la influencia del compatibilizante, polipropileno injertado anhídrido maleico o MAPP (maleic anhydride grafted polypropylene por sus siglas en inglés), en las propiedades mecánicas y térmicas de los WPC [2]. Utilizaron polvo de madera reciclada y polipropileno (PP). Se realizaron ensayos mecánicos y térmicos para evaluar las propiedades de estos compuestos. Los resultados del ensayo de calorimetría diferencial de barrido o DSC (differential scanning calorimetry por sus siglas en inglés) mostraron mejoras en el porcentaje de cristalización (X_c), entalpía de cristalización (h_c), temperatura de cristalización (T_c), temperatura de fusión (T_m), entalpía de fusión (h_m) respecto al PP. Las propiedades a tracción y flexión se vieron mejoradas con el aumento de polvo de madera, además la inclusión del MAPP indicó una drástica mejora en las propiedades. La tenacidad disminuyó notablemente lo cual es lo esperado en este tipo de compuestos. Esto, atribuyen a que la presencia de madera genera imperfecciones en la adhesión de la interfaz creando concentraciones de esfuerzo.

Por otra parte, en el estudio de Gozdecki et al., (2011) tuvieron como objetivo investigar la influencia del tamaño de partícula en WPC usando partículas fabricadas [8]. Esto debido a que en WPC es común usar polvo de madera de diferentes tamaños, y según los autores no existen hasta ahora trabajos concluyentes evaluando este aspecto. Para esto usaron polietileno de baja densidad de índice de fluidez de 2 g/10 min. El polvo de madera fue de partículas de madera industrial usadas para la fabricación de tableros en 3 capas con tamaños de: 0,5, 1, 2, y 4 mm. En sus resultados, reportan incrementos del módulo de tracción (E_t) y flexión (E_f) del 27 y 25% mientras que la resistencia a la tracción (σ_t) y flexión (σ_f) aumentos del 14 y 15% en tamaños de 2 y 4 mm respecto a las pequeñas. Esto se debe a que los tamaños más grandes tienden a comportarse como fibras y transfieren mejor las cargas. Finalmente, la resistencia al impacto mejora aumentando el tamaño en promedios del 25% respecto a tamaños pequeños.

En tanto, en el estudio de Bhadari et al., (2012) el objetivo fue utilizar bambú como refuerzo de WPC [10]. Esto debido a la alta disponibilidad de bambú en el país natal de los autores, Nepal. Usaron 2 tipos de refuerzo, bambú natural y bambú tratado químicamente ambos en malla de 350. El bambú tratado fue sometido a tratamiento químico para eliminar la lignina y hemicelulosa. La matriz usada fue PP isostático con índice de fluidez de 11 g/10 min. Usaron MAPP con contenido de 5% en peso como compatibilizante con proporciones de 80:20 y 60:40 de PP y bambú. Sus resultados indicaron que a mayor cantidad de bambú la resistencia a la tracción disminuye mientras el compuesto se vuelve menos dúctil.

Finalmente, para compuestos WPC, en la investigación de Lee et al., (2009) tuvieron como objetivo ver el efecto al usar bambú en una matriz de PP sobre las propiedades mecánicas, térmicas y de microestructura del compuesto [11]. Se realizaron ensayos de tracción, impacto, fatiga y absorción de

agua, además DSC y análisis termogravimétrico o TGA (thermogravimetric analysis por sus siglas en inglés) en los térmicos. Dentro de los resultados, en el TGA a mayor contenido de bambú hay mayor degradación, especialmente en el rango de 200 a 400 °C. Esto se aduce a la descomposición inicial de la celulosa y hemicelulosa. Respecto al DSC el aumento de bambú hace que la temperatura de fusión disminuya respecto al PP cerca del 3%. Los autores señalan que esto es debido a las temperaturas de fusión menores del MAPP y del bambú ya que al haber mayor contenido de estos se necesita menos energía para fundir el PP restante, también implica una pobre compatibilidad de los componentes. En la otra mano, a medida que se aumenta el bambú, la temperatura de cristalización es mayor, esto se debe a que el bambú actúa como bloqueante al momento de la cristalización causando un efecto de inhibición en la formación de cristales del polímero. En tanto, en las propiedades a tracción e impacto el módulo crece a medida que se aumenta el contenido de bambú y se vuelven más rígidos y frágiles. Aumentando bambú de 10 a 50 wt% se incrementó el módulo en 105 a 197 % respecto al PP. La resistencia a la tracción disminuyó al aumentar bambú porque se empeora la adhesión del compuesto al aumentar la cantidad de un refuerzo hidrofílico no compatible con el PP. Finalmente, la resistencia al impacto no se vio afectada por el aumento de bambú.

Por otro lado, en las investigaciones concernientes a compuestos híbridos, es decir los WPC reforzados con nanoarcillas, Ashori & Nourbakhsh (2011) midieron los efectos de usar diferentes cantidades de MAPP y nanoarcillas en compuestos WPC [6]. El polvo de madera usado fue álamo, en peso en 30 wt%. El MAPP fue variado en porcentajes de 0, 2,5, 5 y 7 wt%. Las nanoarcillas usadas fueron tipo montmorillonita Cloisita 20A variada en 0, 3 y 6 wt%. Las propiedades mecánicas evaluadas fueron las resistencias a la tracción y flexión. Referente a tracción a mayor contenido de MAPP lograron las mejores propiedades combinaciones con 3 wt% de nanoarcillas ya que tienen un aumento del 20 % respecto al WPC puro. Mientras que en flexión el comportamiento fue el mismo, es decir se tuvieron mejores resultados en el mismo contenido, haciendo hincapié que la variación de nanoarcillas es más influyente en esta propiedad ya que los cambios fueron más considerables.

Mientras tanto, Yadav & Yusoh (2015) también investigaron la influencia de nanoarcillas en WPC [12]. Fueron utilizados polvo de madera en una cantidad fija de 20% del peso del compuesto. El MAPP fue fijado en 2,5% del compuesto. Las propiedades analizadas en este estudio fueron tracción, flexión y absorción de agua. Las nanoarcillas fueron variadas en porcentajes de 0 a 5 wt% con saltos de 0,5 wt%. Tanto las propiedades a tracción como a flexión fueron mejoradas con el uso de nanoarcillas, específicamente a 2,5 wt%. Cabe indicar que la resistencia a la tracción se vio muy afectada por la agregación del refuerzo lignocelulósico ya que a dicho porcentaje apenas se logra igualar la resistencia del polipropileno.

Finalmente, la investigación de Lee et al., (2008) tuvieron como objetivo estudiar el efecto de polvo de madera, nanoarcillas y compatibilizante en las propiedades térmicas, mecánicas y morfológicas de compuestos basados en polipropileno [13]. Las proporciones usadas fueron: 10, 20 y 30 wt% de madera, 0, 1, 3 y 5 wt% de nanoarcillas y 3, 6 y 10 wt% de MAPP. Para el tratamiento de datos. En los resultados, el TGA reveló que con pérdida de masa del 50% la temperatura de degradación aumenta cerca de 40 °C para compuestos híbridos respecto al PP. Las nanoarcillas mejoran la temperatura de degradación al 50% en aproximadamente 67 °C. El DSC indicó un aumento de T_m para todos los compuestos respecto al PP, pero solo del 2%. Se indica también que la variación de nanoarcillas o MAPP no afecta esta variable. En cuanto al contenido de madera, indican T_m aumenta en 2,1 °C a medida que se aumenta madera, pero esto solo sucede con 1 wt% de nanoarcillas, para otros porcentajes no hay cambios. En tanto, T_m se incrementó con el aumento de nanoarcillas alrededor del 11%. Por otra parte, las nanoarcillas y el MAPP actúan como agentes nucleantes al aumentar T_c respecto al PP en 4%. La adición de madera reforzó este fenómeno al aumentar T_c en 9%. Pero T_c disminuyó bajo todos los factores ya que estos interfieren en la cristalización. Agregando polvo de madera X_c disminuye. En las propiedades mecánicas, los autores reportaron aumentos de alrededor del 90% en el módulo de elasticidad aumentando madera. En tracción, en contenidos bajos de nanoarcillas aumentando la madera mejora la resistencia, pero a altos contenidos la resistencia disminuye. Se tuvieron mejoras máximas de 9 y 4,2% en 1 y 3 wt% respectivamente mientras en 5 wt% disminuyó respecto a nanocompuestos sin madera.

No hay muchos estudios que indiquen el comportamiento del bambú como refuerzo para WPC y mucho menos se ha realizado estudios en los que se incorporen arcillas en estudios anteriores. Por ello, en el presente trabajo se estudia el efecto de incorporar polvo de bambú en una matriz de polipropileno. Además, también se evalúa la inclusión de nanoarcillas comerciales en la matriz WPC para ver si se logra reducir o mejorar los problemas inherentes de este tipo de compuestos. Se evaluó el efecto de la variación de la carga y tamaño de partícula del bambú. También se evaluó el contenido de arcillas. Todo esto sobre las propiedades mecánicas y térmicas.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materiales

En este estudio se utilizó polipropileno homopolímero PH1310 de marca Petroquim de índice de fluidez de 13 g/10min según su ficha técnica, temperatura de ablandamiento VICAT (1 kg) de 154 °C, temperatura de deformación térmica de 95 °C. Dentro de los refuerzos, se usó polvo de bambú reciclado como refuerzo principal perteneciente a la especie "Dendrocalamus Asper" proveniente de un aserradero que produce tableros y latillas de bambú de densidad 1100 kg/m³. El aserradero es parte de la hacienda San Marcos administrada

por la Prefectura de Pichincha y se encuentra ubicada en el cantón Pedro Vicente Maldonado. Mientras tanto las nanoarcillas comerciales seleccionadas como refuerzo secundario son de tipo Nanomer I.44PS. El compatibilizante usado fue el polipropileno injertado anhídrido maleico (MAPP) con 1.4 wt% de anhídrido maleico, obtenido de Ningbo Wecreat Functional Plastics con índice de fluidez de 80 g/min a 90 g/min a 190 °C, temperatura de fusión de 150 °C. Este fue fijado en una cantidad de 3 wt% del compuesto.

B. Métodos

Se tomaron como factores a evaluar el tamaño de partícula del bambú, contenido de polvo de bambú y de nanoarcillas. La obtención de los tamaños de partícula del polvo de bambú fue realizada en una torre de seis tamices. Para el proceso de agitación de la torre se utilizó una tamizadora marca TYLER, modelo Ro-TAP 20097. Los tamices, de denotación ASTM E-11, usados corresponden a N30, N60 y N100 con tamaños de rejilla de 595, 250 y 149 μm respectivamente. Los porcentajes de polvo de bambú fueron 5, 10 y 15 wt% debido a problemas de procesamiento por extrusión a cantidades mayores. Debido a la naturaleza hidrofílica de éste se realizó un proceso de secado en una estufa a 80 °C por 24 horas, para garantizar que el material tenga una humedad menor a 1 %, [14], [13]. Por otra parte, para las nanoarcillas se usó 0, 2,5 y 5 wt% según [7], [13] y [12] al ser valores en que las propiedades mejoran. El secado de las nanoarcillas fue realizado debido a su naturaleza hidrofílica a una temperatura de 70°C durante 24 horas para tener menos de 0.1% de humedad [7].

Para el secado de las nanoarcillas, polvo de bambú y pellets de las extrusiones se empleó una estufa de marca Venticell 404 y la verificación de su contenido de humedad fue realizada en una termobalanza de marca Ohaus MB45. El procesamiento de los materiales se lo hizo en una extrusora de doble tornillo Coperion ZSK 18 MegaLab. La obtención de pellets fue realizada mediante una pelletizadora de marca K-Tron Colormax. Para el proceso de inyección de las probetas normalizadas para la caracterización mecánica se utilizó una inyectora Milacron MT 55.

La obtención del material híbrido fue dividida en dos procesos de extrusión distintos. El primer proceso realizado fue la extrusión del polipropileno junto con el compatibilizante y como primer refuerzo, las nanoarcillas para la posterior obtención de pellets. En el segundo proceso se realizó la extrusión de los pellets obtenidos en el proceso previo junto con el polvo de bambú como segundo refuerzo [12], [13]. La obtención del compuesto con 0 wt% de nanoarcillas fue idéntica a la primera operación, pero con la diferencia de agregar polvo de bambú en lugar de nanoarcillas.

Los parámetros para el proceso de extrusión empleados fueron: temperatura de tolva principal 180°C, temperatura de tolva secundaria 176°C, temperatura de zona 1, 183°C, temperatura de zona 2, 185°C, temperatura de zona 3, 187°C, temperatura del dado 190°C. La velocidad de tornillo fue de

120 rpm, considerando otros trabajos [7], [15]. Los pellets obtenidos de las extrusiones fueron secados para que su humedad no supere el 0,1% a 70°C durante 12 horas [13]. En los parámetros de inyección se estableció el perfil de temperaturas de la siguiente manera: temperatura de alimentación, zona 1, zona 2, zona 3 y temperatura de boquilla en 56, 185, 187 y 190°C respectivamente. La presión de inyección se varió entre 120 y 150 Bar. El tamaño de disparo se tomó entre valores de 20 y 30 mm y la velocidad de inyección se varió entre 40 a 60 mm/s. Esta velocidad se modificó con el objeto de tener elementos sin rebaba y con buen acabado superficial.

C. Caracterización mecánica

Los ensayos realizados de tracción, flexión e impacto se realizaron bajo especificaciones de las normas correspondientes ASTM D638-10, ASTM D7264 y la ASTM D256 respectivamente. También se realizó mediciones de densidad de las composiciones a obtenerse y ensayos de dureza. Los ensayos de tracción y flexión se realizaron en la máquina universal de ensayos H25KS Tinius Olsen. Los ensayos de impacto fueron realizados en una máquina por péndulo marca Tinius Olsen IT504. El ensayo de dureza se lo hizo con un durómetro Shore D, Pantec-HT.

D. Caracterización térmica

Fueron realizados los siguientes ensayos: DSC, TGA y TMA. Solo se hicieron a las composiciones más representativas y de mayor mejora en propiedades mecánicas.

El DSC se lo realizó con una temperatura inicial de -40°C y temperatura final de 180°C. La velocidad de calentamiento y de enfriamiento fue de 10°C/min. El TGA fue hecho con una temperatura inicial de 25°C y temperatura final de 600°C. La velocidad de calentamiento fue de 10°C/min. Finalmente, para el TMA se estableció una temperatura inicial correspondiente a la ambiental (23°C) y temperatura final de 150°C. La velocidad de calentamiento fue de 10°C/min. Para el DSC se utilizó el equipo DSC Q2000. El TGA fue realizado en el equipo TGA Q500 y el TMA en TMA Q400. Todos los equipos de la marca TA Instruments.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla I se indican los resultados de los ensayos mecánicos correspondientes a tracción, flexión, impacto, dureza y densidad. La denominación de las composiciones es: polipropileno (PP), contenido de polvo de bambú (B), tamaños de partícula de 595, 250 y 149 μm y nanoarcillas (N). Por ejemplo, la composición PP-B15-149-N5 indicaría un compuesto con 15 wt% de bambú con tamaño de partícula de 149 y 5 wt% de nanoarcillas y polipropileno. Todos los valores obtenidos tienen un coeficiente de variación menor al 15% por lo que se garantiza confiabilidad de los resultados.

TABLA I
PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS COMPUESTOS CARACTERIZADOS EN EL ESTUDIO.

Material	σ_t	E_t	$\epsilon@ \sigma_t$	$\epsilon@ \text{rotura}$	σ_r	E_r	$\epsilon@ \sigma_r$	Resistencia al impacto kJ/m ²
	MPa	MPa	%	%	MPa	MPa	%	
PP	28	2907	5	37	32	1076	6	69
PP-B5-149-N0	30	4248	3	7	33	1178	7	36
PP-B5-149-N2,5	27	4334	3	7	39	1414	6	24
PP-B5-149-N5	27	4540	3	6	40	1667	6	23
PP-B5-250-N0	28	4097	3	8	39	1145	6	27
PP-B5-250-N2,5	28	4216	3	6	41	1389	6	24
PP-B5-250-N5	28	5064	3	5	41	1840	6	20
PP-B5-595-N0	28	4575	4	6	39	1379	6	24
PP-B5-595-N2,5	28	4696	3	6	41	1511	6	21
PP-B5-595-N5	29	5061	3	5	43	1790	6	20
PP-B10-149-N0	28	4333	3	6	35	1300	6	26
PP-B10-149-N2,5	25	5032	2	5	38	1630	6	19
PP-B10-149-N5	26	4966	2	4	40	1833	6	21
PP-B10-250-N0	28	5151	3	6	38	1393	6	22
PP-B10-250-N2,5	25	4911	2	5	40	1662	6	19
PP-B10-250-N5	26	5176	2	4	38	1923	6	18
PP-B10-595-N0	27	4824	3	5	38	1383	6	21
PP-B10-595-N2,5	27	5211	2	4	40	1670	6	19
PP-B10-595-N5	26	5146	2	4	40	1903	6	16
PP-B15-149-N0	28	5412	2	4	41	1574	6	23
PP-B15-149-N2,5	23	5531	2	4	35	1739	5	16
PP-B15-149-N5	23	5462	2	4	37	1850	6	15
PP-B15-250-N0	28	5263	3	4	42	1397	6	20
PP-B15-250-N2,5	24	5385	2	4	39	1711	5	16
PP-B15-250-N5	24	5611	2	3	37	2026	5	16
PP-B15-595-N0	27	4859	3	5	39	1466	6	18
PP-B15-595-N2,5	27	5325	2	4	39	1780	6	18
PP-B15-595-N5	25	6088	2	3	38	1993	5	14

Los resultados obtenidos de los ensayos fueron evaluados mediante métodos estadísticos. La Tabla II muestra cuales son las propiedades más influyentes según el análisis mencionado.

TABLA II
INFLUENCIA DE LAS PROPIEDADES SEGÚN ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

Propiedad	Tamaño de partícula	Contenido de polvo de bambú	Contenido de nanoarcillas
σ_t	o	o	o
$E_{t,tan}$	x	x	x
$\epsilon@_{\sigma_t}$	x	o	o
$\epsilon@_{rotura}$	o	o	o
σ_f	x	o	o
$E_{f,tan}$	o	o	x
$\epsilon@_{\sigma_f}$	x	o	x
o: La variable es estadísticamente significativa			
x: La variable no es estadísticamente significativa			

Como se ve en la tabla el contenido de bambú y nanoarcillas son las variables más influyentes en las propiedades. Por lo tanto, se hará el análisis en base a estas variables. Las propiedades de impacto serán descritas en su sección.

A. Ensayos de tracción

En la Fig. 1 se presentan las gráficas de los ensayos de tracción. Se eligieron probetas con valores cercanos a la media. A excepción del PP, todas llegaron a la rotura.

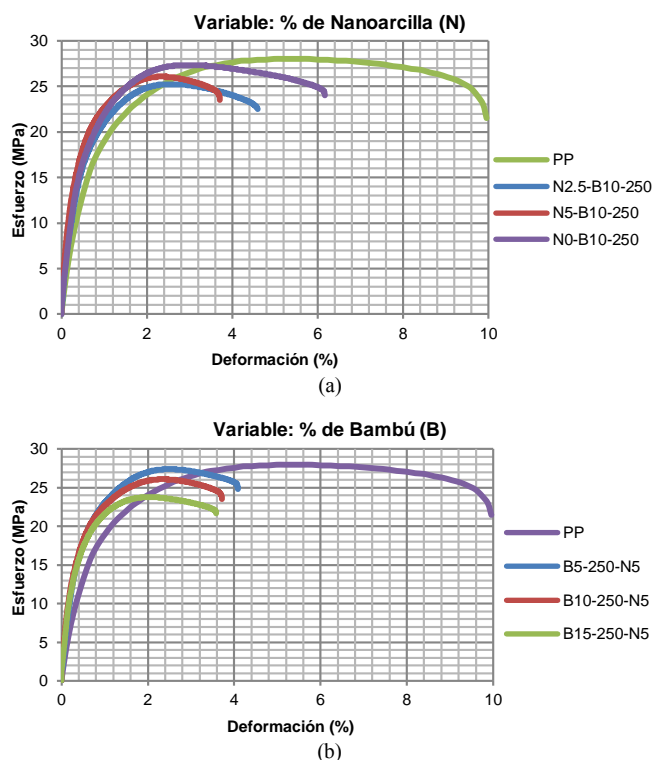


Fig. 1 Curvas esfuerzo vs. deformación porcentual según el contenido de: (a) Nanoarcillas y (b) Bambú.

La Fig. 1(a) indica que la adición de nanoarcillas disminuye la ductilidad respecto al PP. El aumento de estas reduce la resistencia en casi todos los casos por la formación de agregados y mala adhesión. La Fig. 1(b) muestra que aumentando polvo de bambú se reduce la ductilidad y la resistencia. Además se empeora la adhesión de las fases del compuesto ya que las nanoarcillas interactúan con el PP y MAPP en la primera etapa, y cuando el bambú es incluido en la segunda no logra introducirse eficazmente en la interfaz durante su obtención [16]. Las mejores propiedades a tracción se encuentran con tamaños de partícula de 250 μm por buena procesabilidad, las nanoarcillas dependerán del análisis posterior y el contenido de bambú se establecerá en 10 y 15 wt% por cuestiones ambientales y de durabilidad [17].

B. Ensayos de flexión

Las Fig. 2 muestra las curvas de los ensayos de flexión correspondientes al contenido de bambú y nanoarcillas. Ninguna probeta llegó a la fractura.

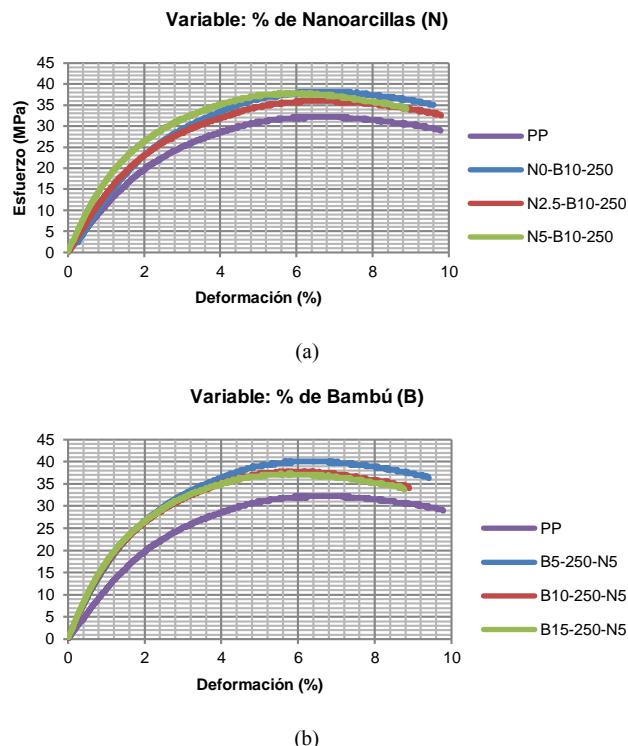


Fig. 2 Curvas esfuerzos vs. deformación porcentual según el contenido de: (a) Nanoarcillas y (b) Bambú.

La Fig. 2 indica que aumentando polvo de bambú y nanoarcillas para todas las composiciones se supera la resistencia respecto al PP. Esto se debe a que el bambú es por naturaleza resistente a la flexión como cualquier otro material lignocelulósico, además las nanoarcillas por su gran relación de aspecto refuerzan este efecto. El módulo de flexión es incrementado considerablemente aumentando cualquiera de

estas 2 variables mientras la resistencia permanece casi igual pero siempre superior al PP.

C. Ensayos de Impacto y Dureza

En la Fig. 3 se ve como varían los resultados en impacto. La gráfica es correspondiente a 2.5 wt% de nanoarcillas.

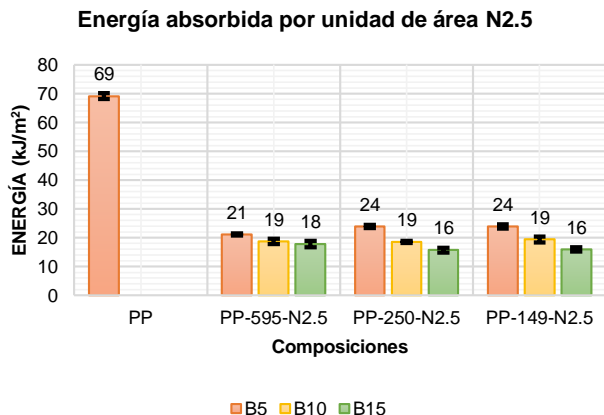


Fig. 3 Resultados de ensayos de impacto para 2,5 wt% de nanoarcillas.

Como se ve en la Fig. 3 todas las composiciones son inferiores al PP. Sucede lo mismo en 0 y 5 wt% de nanoarcillas. Aumentando la cantidad de bambú las composiciones se vuelven frágiles. Sin embargo, a menor tamaño de partícula aumenta la resistencia, aunque no en gran magnitud. Los resultados de los ensayos de dureza concuerdan con los de impacto como se ve en la Tabla I.

D. Calorimetría Diferencial de Barrido

Los resultados de este ensayo se presentan en la Tabla III. Se presentan los datos según el contenido de nanoarcillas y bambú.

TABLA III. RESULTADOS DEL DSC SEGÚN COMPOSICIONES.

Material	T_f	h_f	T_c	h_c	X_c
	°C	J/g	°C	J/g	%
PP-B15-250-N0	166,56	72,82	122,4	82,09	43
PP-B15-250-N2,5	162,8	71,41	123,71	78,91	42
PP-B15-250-N5	165,38	63,64	123,88	75,04	37
PP-B5-250-N5	166,54	71,67	122,46	85,92	42
PP-B10-250-N5	165,28	69,11	123,24	80,09	41
PP-B15-250-N5	165,38	63,64	123,88	75,04	37

La Fig. 4 muestra un termograma representativo. Para este caso en función del contenido de nanoarcillas.

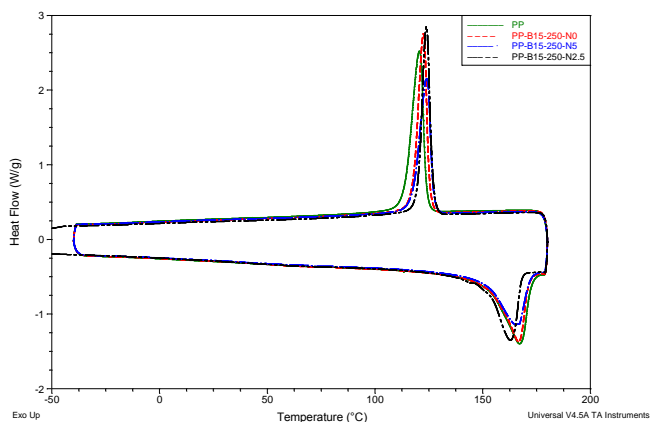


Fig. 4 Termograma de los compuestos según el contenido de nanoarcillas.

La combinación de nanoarcillas y bambú disminuyen las propiedades térmicas, aunque no significativamente. El uso de 2.5 y 5 wt% de nanoarcillas causa descensos del 1, 2, 4% y 14, 12, 9% en h_m , X_c y h_c respectivamente frente al PP. Con 5 wt% los descensos son más considerables, la disminución en la cristalinidad refleja el descenso de la resistencia a la tracción.

E. Análisis Termogravimétrico

En la Fig. 5 se presentan las curvas de degradación. Las variables contenido de polvo de bambú y nanoarcillas.

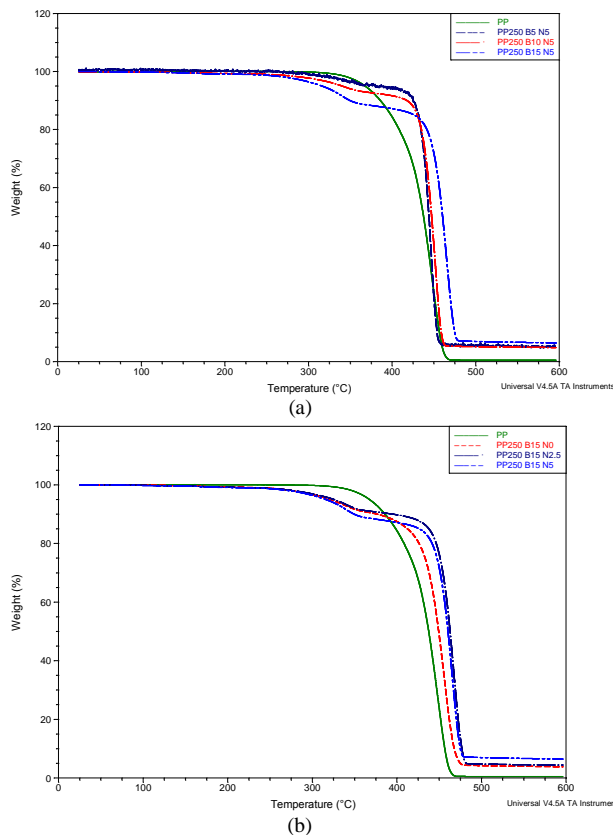


Fig. 5 Curvas de degradación según el contenido de: (a) Nanoarcillas y (b) Bambú.

Según la Fig. 5 (a) todos los compuestos se degradan antes que el PP. Las temperaturas de degradación inicial son de 301, 186, 175 y 162°C para el PP y contenidos de bambú en 5, 10, 15 wt% respectivamente. Esta temperatura disminuye debido al aumento de bambú ya que se incrementa la cantidad de celulosa y hemicelulosa [11]. La Fig. 5 (b) muestra que para contenidos de 2,5 wt% de nanoarcillas la temperatura de degradación es más alta seguida por 0 y 5 wt%, con 166, 158 y 160°C. Altos contenidos de bambú causan mayor degradación, pero agregación de nanoarcillas a 2,5 wt% disminuye este efecto ya que estas actúan como una barrera y evitan la difusión del bambú [13].

E. Análisis Termomecánico

Con estos ensayos se obtuvieron los coeficientes de expansión térmica en las mismas composiciones anteriores. El análisis se lo realizó en un rango de temperaturas desde 25 a 46.5 °C, esto debido a que los compuestos presentaron mejoras en sus propiedades a flexión su aplicación esta en pisos, mesas, sillas etc. Se tomó como referencia una temperatura de 36.5 °C como máxima absoluta registrada en el último boletín del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) [18]. A esta temperatura se le agregó un incremento de 10 °C ya que comúnmente en una tarde de verano la temperatura de la superficie del material compuesto es mayor que la temperatura del aire [19]. Los resultados fueron: 87,02, 130,6 y 11,4 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$ -1 para 5, 10 y 15 wt% de bambú. Y 159,1, 92,75 y 111,4 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$ -1 para 0, 2,5 y 5 wt% de nanoarcillas. El PP tuvo 82,77 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{°C}$ -1. Todas las composiciones tuvieron un coeficiente de expansión térmico mayor al PP. El efecto de la cantidad de polvo de bambú y nanoarcillas no es apreciable, es decir no se tuvo una tendencia definida. Esto se debe a que cuando se varía la cantidad de un mismo refuerzo en un WPC, se observa una relación lineal entre la cantidad de refuerzo y el coeficiente de expansión térmico del compuesto, sin embargo cuando se emplea dos refuerzos diferentes una tendencia fija es generalmente impredecible [19]. El compuesto PP-B15-250-N2,5 presentó un incremento del 12% en el coeficiente de expansión térmica respecto al PP siendo este el que más se destaca por su bajo coeficiente de expansión térmica y sus buenas propiedades mecánicas.

D. Comparación de propiedades obtenidas

En la Fig. 6 se muestra el gráfico radial de las propiedades analizadas anteriormente. Tracción, flexión, impacto, dureza y densidad de las mejores composiciones obtenidas son representadas.

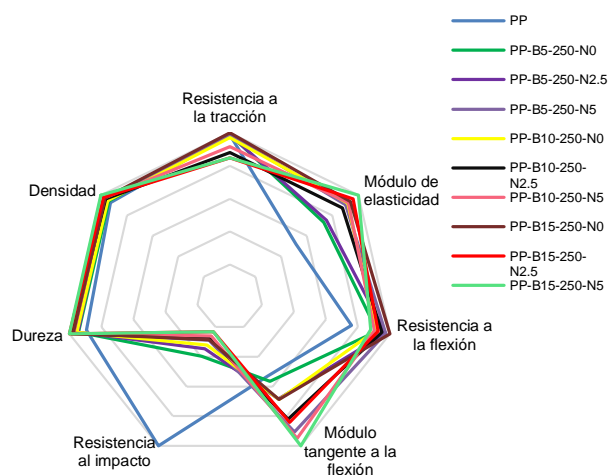


Fig. 6 Comparación de propiedades de las mejores composiciones.

No fueron incluidas las demás composiciones descartadas por el análisis estadístico realizado. Se puede observar que el PP es ampliamente superior en propiedades de impacto mientras que en módulo de tracción y flexión es superado por todas las composiciones. Los compuestos PP-B5-250-N5, PP-B10-250-N0, PP-B15-250-N2,5 pueden ser considerados las mejores composiciones por tener buenas propiedades en la mayoría de los casos. El compuesto PP-B5-250-N5 tiene propiedades similares a los otros mencionados, pero tiene el problema de usar mucho contenido de nanoarcillas afecta las propiedades térmicas y mecánicas del compuesto, además usa poca cantidad de bambú y eso a la larga afectaría su durabilidad. Por lo tanto, los compuestos PP-B10-250-N0 y PP-B15-250-N2,5 son los mejores obtenidos del estudio. El primer compuesto presentó aumentos en 0, 65, 18, 25, 6 y 2% en resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, resistencia a la flexión, módulo de flexión, dureza y densidad y descenso de 68% en resistencia al impacto respectivamente. Mientras el segundo compuesto tuvo incrementos de 85, 21, 59, 11 y 6% en módulo de elasticidad, resistencia a la flexión, módulo de flexión, dureza y densidad y disminuciones del 76 y 14% en resistencia al impacto y resistencia a tracción respecto al polipropileno. El primero tiene mayor resistencia a la tracción, es menos frágil y menos pesado pero el segundo supera en gran medida a este en el módulo de flexión. Además la segunda composición usa más contenido de bambú por lo que se reduce el uso de plástico, haciéndolo más amigable con el medio ambiente, y esto garantiza mayor durabilidad dentro de sus aplicaciones para exteriores [17]. También al tener 2,5 wt% de nanoarcillas tienen mayor temperatura de degradación y se mejora su estabilidad térmica. Además, para fines estéticos se desea que los materiales no se expandan o contraigan demasiado, caso de los pisos de madera, el compuesto aumenta en 46% el coeficiente de expansión

respecto al PP y es un valor intermedio respecto a los restantes.

De los mismos compuestos seleccionados en la Fig. 7 se muestran las gráficas de las propiedades específicas de tracción y flexión. La Fig. 7(a) muestra que los compuestos sin nanoarcillas tienen mejores propiedades mecánicas específicas a tracción que los de 2,5 y 5 wt%. Todos los compuestos tuvieron mejores módulos específicos respecto al PP destacando los que tienen mayor cantidad de bambú y en resistencia a tracción específica los compuestos con menor cantidad de polvo de bambú. En la Fig. 7(b) se muestra que todos los compuestos tienen mejores resistencias y módulos específicos que la del PP. Los compuestos que destacan son aquellos sin contenido de nanoarcillas por sus resistencias específicas y los compuestos con 5 wt% de nanoarcillas por los altos módulos específicos.

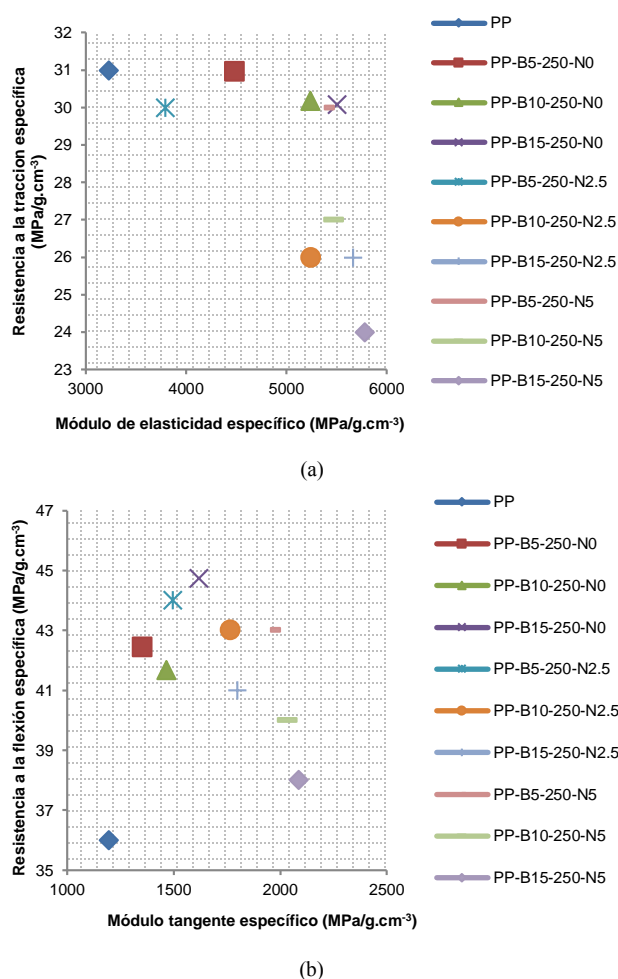
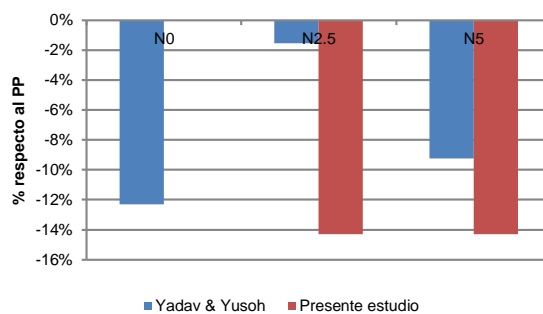


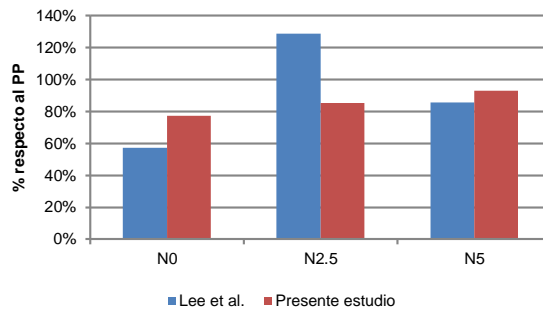
Fig. 7 Comparación de propiedades específicas: (a) Tracción y (b) Flexión.

F. Comparación con otros autores

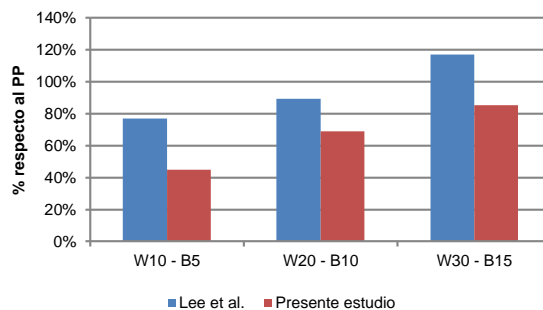
Se realiza esta comparación para evaluar tendencias. En la Fig. 8 se muestran la comparación con otros estudios.



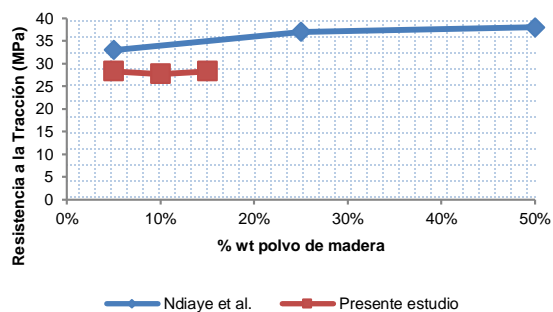
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 8 Comparación de las propiedades a tracción de los compuestos de este estudio con otros autores: (a) Variación del contenido de nanoarcillas en la resistencia a tracción, (b) Variación del contenido de nanoarcillas en el módulo de tracción, (c) Variación del contenido de polvo de madera en el módulo de tracción y (d) Variación del contenido de polvo de madera en la resistencia a la tracción sin nanoarcillas.

La Fig. 8(a) compara la influencia del contenido de nanoarcillas en tracción. Se tiene que entre los dos estudios se puede apreciar que la resistencia a la tracción en ambos casos no superó la del polipropileno empleado en cada estudio, sino que hubo una disminución de esta propiedad. La Fig. 8(b) muestra, en el presente estudio, el efecto de las nanoarcillas aumenta el módulo de elasticidad de los compuestos, a diferencia del estudio de Yadav y Yusoh que la inclusión de nanoarcillas hace que el módulo de elasticidad aumente hasta el contenido de 2,5 wt% de nanoarcilla y luego sufra una disminución de esta propiedad con contenidos mayores. El módulo de elasticidad en estos estudios es mayor a la de su respectivo PP. Observando la Figura 8(c) compara la influencia del contenido de polvo de madera en el módulo de elasticidad. Se tuvo que el estudio de Lee et al, cuando se tiene mayor cantidad de polvo de madera aumenta el módulo de elasticidad, la misma tendencia se observa en el presente estudio ya que a medida que se agregó más contenido de bambú el modulo se incrementó. La Figura 8(d) se observa la tendencia que hay en la resistencia a la tracción al agregar polvo de madera, en ambos estudios se observa que se mantiene casi constante con muy poca variación.

El análisis de flexión es similar al anterior, se comparó incrementos y tendencias de las propiedades con otros trabajos. Para la resistencia a la flexión Ashori y Nourbakhsh (2011) investigaron el efecto de incluir nanoarcillas en compuestos WPC. Ya que no se dispone de tablas donde indiquen exactamente el valor de cada propiedad la comparación será aproximada al ser los valores tomados directamente de la gráfica. Por otro lado, en el trabajo de Yadav y Yusoh (2013) investigaron el mismo efecto, pero con menor cantidad de polvo de madera. Cabe indicar que se tuvo una dificultad similar con los datos tal como se explicó. Estas comparaciones pueden verse resumidas en la Fig. 9. Las composiciones usadas para la comparación corresponden al grupo de mejores composiciones con 15% wt de bambú.

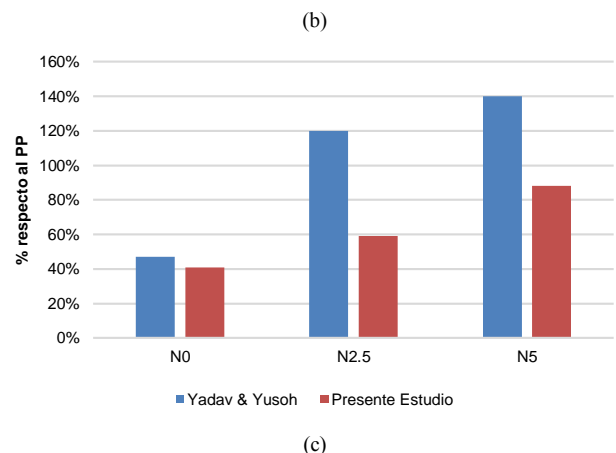
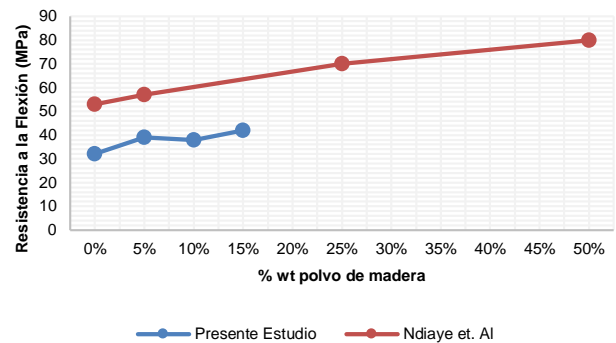
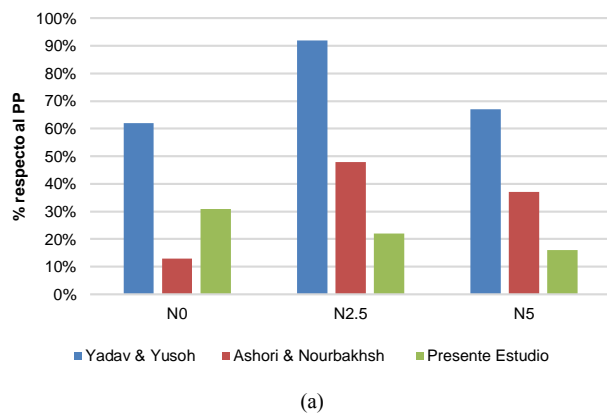


Fig. 9. Comparación de la resistencia a la flexión de los compuestos de este estudio con otros autores: (a) Variación del contenido de nanoarcillas, (b) Variación del contenido de polvo de madera y (c) Variación del contenido de nanoarcillas para el módulo de flexión.

La Fig. 9(a) muestra que en los otros estudios existe una tendencia que al llegar a 2,5 wt% se logra el mejor valor en resistencia para luego comenzar a decaer. Esto difiere del presente estudio en el que a medida que se agregan nanoarcillas la resistencia disminuye. Los aumentos en resistencia respecto al PP también son mejores en los otros trabajos, con la excepción a 0 wt% de nanoarcillas frente al estudio de Ashori y Nourbakhsh. Esto puede deberse a las diferentes características de los polipropilenos que para cada estudio tuvieron una resistencia de 40, 38,5 y 32 MPa respectivamente. La cantidad usada de polvo de madera puede ser otra variable influyente ya que se usaron en cantidades de 20, 30 y 15% wt. Ciertamente mayor contenido de nanoarcillas puede formar aglomerados los cuales pueden terminar formando concentraciones de esfuerzo que hacen disminuir la resistencia por lo que pocas cantidades ayudan a aumentar el área efectiva pero este efecto con el uso de bambú no se cumple por los resultados indicados. Finalmente, el MAPP es otro parámetro que pudo afectar a este comportamiento ya que fueron usados en cantidades de 2, 7,5 y 3% wt respectivamente. Respecto a la variación de la cantidad de polvo de madera se dispone solo del estudio de Ndiaye et al., indica la influencia de la cantidad de polvo de madera en varias propiedades y para este caso en la resistencia

a la flexión como puede verse en la Fig. 9(b). Se consideraron las composiciones con 0 wt% de nanoarcillas debido a que el trabajo comparado no incluye más refuerzos a excepción del polvo de madera y el MAPP. Se puede ver que a mayores cantidades de polvo de madera la resistencia a la flexión aumenta, la diferencia existente entre los estudios analizados parte del polipropileno usado, ya que como se aprecia en la figura tienen resistencias diferentes. Además, el MAPP usado por Ndiaye es de 5 wt% por lo que presumiblemente se tiene una mejora en la adhesión de los componentes del compuesto. En el módulo a la flexión se considerará nuevamente el estudio de Yadav y Yusoh considerando lo mencionado anteriormente para la resistencia. Este comportamiento se indica en la Fig. 9(c) y se ve que a mayores contenidos de nanoarcillas el módulo aumenta siendo la misma tendencia que del estudio comparativo. Para todos los casos se mejora el módulo respecto al PP. A pesar de usar distintos materiales la tendencia es la misma al aumentar nanoarcillas.

IV. CONCLUSIONES

Se caracterizaron materiales compuestos reforzados con polvo de bambú y nanoarcillas tomando en cuenta variables como porcentajes en peso y tamaños de partícula, para el caso del bambú, con una cantidad fija de compatibilizante para todas las composiciones.

Se determinó que las propiedades de los compuestos están influenciadas por la cantidad de bambú y nanoarcillas mientras el tamaño de partícula está más ligado a la procesabilidad. La incorporación de bambú y nanoarcillas como refuerzos hace que los módulos a tracción, resistencia a la flexión y módulo tangente a la flexión aumenten significativamente, pero a su vez hay una disminución en la resistencia a la tracción y resistencia al impacto. Las composiciones con mejor procesabilidad fueron las de tamaño de partícula de 250 µm por su facilidad de obtención y procesamiento ya que algunas propiedades son estadísticamente iguales a 595 µm y superiores a 149 µm.

Cuando se aumenta la cantidad de bambú disminuye la temperatura de degradación inicial, y se degrada más lentamente pero además al aumentar la cantidad de nanoarcillas se disminuye este efecto.

La composición PP-B15-250-N2,5 resultó con mejores propiedades. Éste presentó incrementos en 85, 21, 59, 11 y 6% en módulo a la tracción, resistencia a la flexión, módulo a la flexión, dureza y densidad y descensos de 76 y 14% en resistencia al impacto y resistencia a tracción respecto al polipropileno. Tiene buena procesabilidad por su tamaño de 250 µm, además presentó un bajo coeficiente de expansión térmico con un aumento de 12% respecto al PP.

Cuando se aumenta la cantidad de bambú en los compuestos sin nanoarcillas todas sus propiedades mecánicas se mantienen respecto al PP. Pero el aumento de contenido de bambú en compuestos con nanoarcillas muestra una tendencia inversa debido a la disminución de la compatibilidad en la

interfaz del compuesto. Esto es resultado de la metodología para el procesamiento.

Se recomienda un nuevo método de procesamiento en la obtención del material híbrido para evaluar el comportamiento de las nanoarcillas y lograr mejoras a las propiedades del compuesto con refuerzo de bambú.

REFERENCIAS

- [1] B. Kord and S. Kiakojouri, "Effect of nanoclay dispersion on physical and mechanical properties of wood flour/polypropylene/glass fibre hybrid composites," *BioResources*, vol. 6, no. 2, pp. 1741–1751, 2011.
- [2] D. Ndiaye, B. Diop, C. Thiandoume, P. A. Fall, A. K. Farota, and A. Tidjani, "Morphology and Thermo Mechanical Properties of Wood / Polypropylene Composites," *Polypropylene*, pp. 415–428, 2012.
- [3] G. Han, Y. Lei, Q. Wu, Y. Kojima, and S. Suzuki, "Bamboo-fiber filled high density polyethylene composites: Effect of coupling treatment and nanoclay," *J. Polym. Environ.*, vol. 16, no. 2, pp. 123–130, 2008.
- [4] X. Londoño, "Evaluation of bamboo resources in latin america," *Int. Networt Bamboo Ratt. INBAR*, vol. 35, no. 96, p. 30, 2001.
- [5] M. Lobovikov, S. Paudel, M. Piazza, H. Ren, and J. Wu, "World bamboo resources: A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources, assessment 2005," *FAO Tech. Pap.*, pp. 1–74, 2007.
- [6] A. Ashori and A. Nourbakhsh, "Preparation and characterization of polypropylene/wood flour/nanoclay composites," *Eur. J. Wood Wood Prod.*, vol. 69, no. 4, pp. 663–666, 2011.
- [7] J. Castro, C. Fajardo, S. Galeas, and V. H. Guerrero, "Obtención y Caracterización De Compuestos De Polipropileno Reforzado Con Nanoarcillas Mediante Extrusión E Inyección," *Rev. Politécnica*, vol. 35, no. 3, pp. 43–52, 2015.
- [8] C. Gozdecki, M. Kociszewski, and J. Mirowski, "Effect of wood particle size on mechanical properties of industrial wood particle-polyethylene composites," no. 5, pp. 1–6, 2011.
- [9] N. M. Stark and R. E. Rowlands, "Effects of Wood Fiber Characteristics on Mechanical Properties of Wood/Polypropylene Composites," *Wood Fibre Sci.*, vol. 35, no. 2, pp. 167–174, 2003.
- [10] N. L. Bhandari, S. Thomas, C. K. Das, and R. Adhikari, "Analysis of Morphological and Mechanical Behaviors of Bamboo Flour Reinforced Polypropylene Composites," vol. 13, no. 1, pp. 95–100, 2012.
- [11] S.-Y. Lee, I. -a. Kang, B.-S. Park, G.-H. Doh, and B.-D. Park, "Effects of Filler and Coupling Agent on the Properties of Bamboo Fiber-Reinforced Polypropylene Composites," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 28, no. 21, pp. 2589–2604, 2009.
- [12] S. M. Yadav and K. Bin Yusoh, "Mechanical and Physical Properties of Wood-Plastic Composites made of Polypropylene, wood flour and nanoclay," *IAU Symp.*, vol. 144, no. 1, p. 67, 2015.
- [13] S. Y. Lee *et al.*, "Thermal, mechanical and morphological properties of polypropylene/clay/wood flour nanocomposites," *Express Polym. Lett.*, vol. 2, no. 2, pp. 78–87, 2008.
- [14] D. E. Villamar, S. Galeas, and V. H. Guerrero, "Caracterización De Materiales Compuestos Lignocelulósicos Obtenidos Mediante Extrusión," *Rev. Politécnica*, vol. 32, no. 2, p. 23.31, 2013.
- [15] M. Flores-Hernandez *et al.*, "Physical and mechanical properties of wood plastic composites polystyrene-white oak wood flour," *J. Compos. Mater.*, vol. 48, no. 2, pp. 209–217, 2013.
- [16] H. Ziaei-Tabari and H. Khademisalam, "A Study on Nanocomposite Properties Made of Polypropylene / Nanoclay and Wood Flour," *World Appl. Sci. J.*, vol. 16, no. 2, pp. 275–279, 2012.
- [17] X. Zhou, S. -s. Huang, Y. Yu, J. -q. Li, and L. -h. Chen, "Outdoor natural weathering of bamboo flour/polypropylene foamed composites," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 33, no. 19, pp. 1835–1846, 2014.
- [18] P. Bracero, L. Dirección De Gestión, and M. E. Técnico, "Boletín Climatológico Inhami 2016," pp. 17–16, 2016.
- [19] A. A. Klyosoc, Wood plastic composite. 2011.