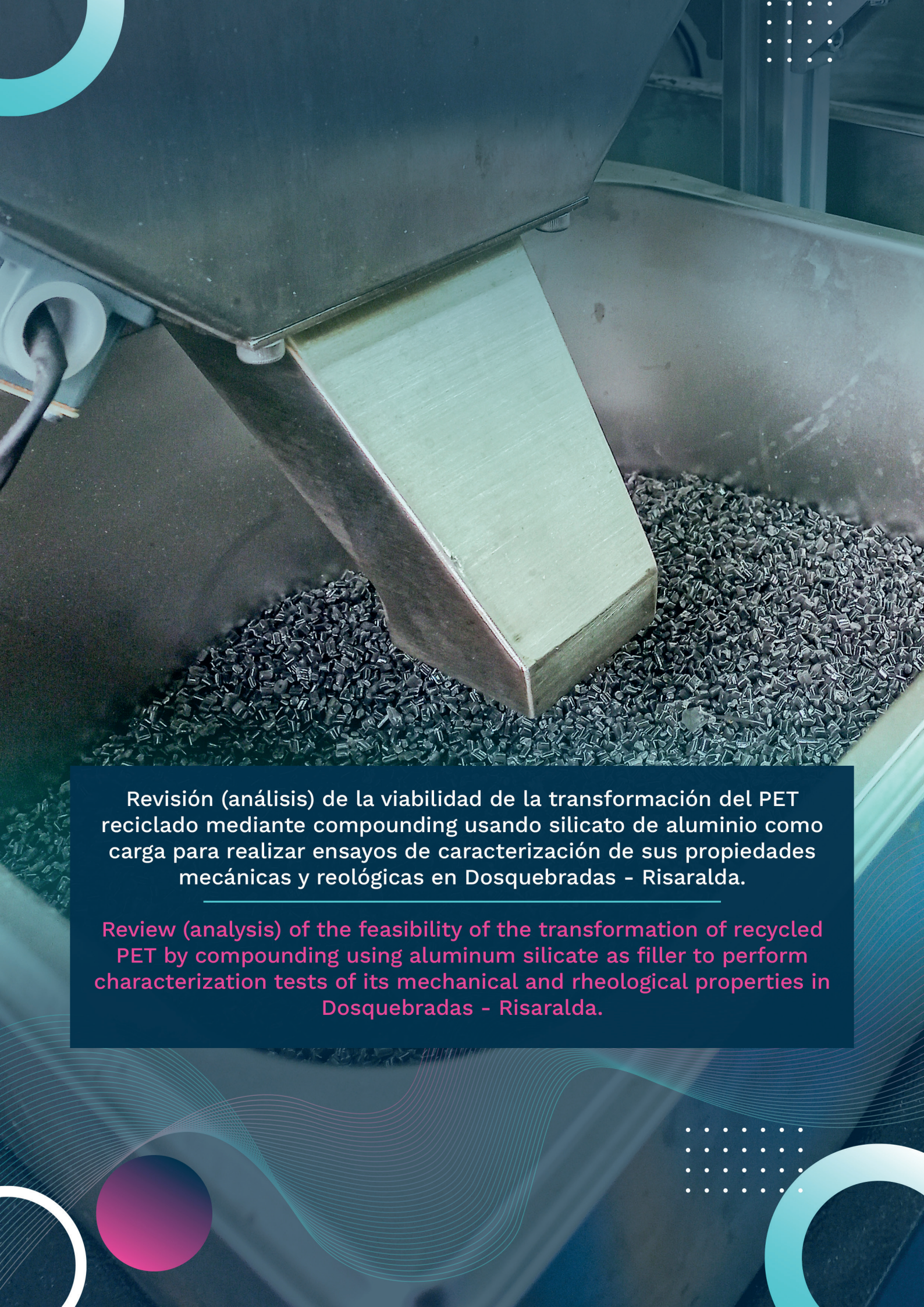




Revisión (análisis) de la viabilidad de la transformación del PET reciclado mediante compounding usando silicato de aluminio como carga para realizar ensayos de caracterización de sus propiedades mecánicas y reológicas en Dosquebradas - Risaralda.

Review (analysis) of the feasibility of the transformation of recycled PET by compounding using aluminum silicate as filler to perform characterization tests of its mechanical and rheological properties in Dosquebradas - Risaralda.

Luis F. Rincón Amarillo.

Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial, Sena Regional
Risaralda.

flrincona@sena.edu.co.

Gustavo A. Fernández Ordoñez.

Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial, Sena Regional
Risaralda.

gfernandezo@sena.edu.co.

Rodolfo A. Ramírez.

Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial, Sena Regional
Risaralda.

roaramirez@sena.edu.co.

Juan C. García Buitrago,

Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial, Sena Regional
Risaralda.

jcgarcia@sena.edu.co.

Resumen

En la actualidad, la producción y consumo de plásticos, puntualmente los de un solo uso, ha constituido un problema mayormente ambiental debido a la enorme generación de residuos de este tipo y la limitada respuesta en los mecanismos de recolección, almacenamiento, transformación y gestión de los mismos, obligando esto a desarrollar diferentes procesos para lograr retornar la mayor cantidad posible de los residuos plásticos a una economía circular generando nueva materia prima para integrar en nuevos procesos de producción.

El propósito principal del presente artículo es el de realizar una revisión y presentación de los aspectos más relevantes que permiten definir una posible viabilidad para desarrollar estudios, investigaciones, procesos y posteriores ensayos y análisis de resultados, puntualmente en el proceso de transformación de residuos reciclados del termoplástico tereftalato de polietileno (RPET) empleado como matriz estructural polimérica con una adición de silicato de aluminio como carga mediante el proceso conocido como **compounding**.

En primer lugar, se presentan cifras a nivel global y regional de producción y generación de residuos plásticos como problema fundamental, luego se revisa la potencialidad en la gestión y recolección de residuos plásticos en el país y específicamente en las ciudades de Pereira y Dosquebradas

(Risaralda – Col.). Luego, se presentan las características fisicoquímicas y estructurales fundamentales del tereftalato de polietileno recuperado post consumo (RPET) y el silicato de aluminio, y la descripción completa del proceso de **compounding** y generación de composites de matriz polimérica y carga de nanoarcilla modificada y además, se realiza la revisión del estado y resultados de las pruebas y ensayos realizados en los últimos años en materiales compuestos de matriz polimérica y carga de nanoarcillas y su respectiva caracterización principalmente de sus propiedades mecánicas.

Por último, se presenta la materialización del proyecto que actualmente se encuentra en estado de ejecución adelantado en el Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial (CDITI) – SENA como proyecto de investigación del sistema de investigación SENNOVA, en el cual se desarrolla todo el proceso de recuperación y tratamiento mecánico del PET, mismo que es pelletizado como un material de matriz de PET con silicato de aluminio obtenido en el proceso de **compounding**, para posteriormente fabricar probetas para ensayos mecánicos y los resultados de estos serán analizados para caracterizar las propiedades reológicas y mecánicas del nuevo material compuesto o composite.

Abstract

At present, the production and consumption of plastics, specifically those of single use, has been a mostly environmental problem due to the enormous generation of waste of this type and the limited response in the mechanisms of collection, storage, transformation and management of the same, forcing this to develop different processes to return as much plastic waste as possible to a circular economy generating new raw material to integrate into new production processes.

The main purpose of this article is to carry out a review and presentation of the most relevant aspects that allow defining a possible viability

to develop studies, research, processes and subsequent tests and analysis of results, punctually in the process of transformation of recycled waste of thermoplastic polyethylene terephthalate (RPET) used as a polymeric structural matrix with an addition of aluminum silicate as a charge by the compounding process.

First, figures are presented at the global and regional level of production and generation of plastic waste as a fundamental problem, then the potential in the management and collection of plastic waste in the country and specifically in the cities of Pereira and Dosquebradas (Risaralda – Col.) is reviewed. Then, the fundamental physicochemical and structural characteristics of post-consumer recovered polyethylene terephthalate (RPET) and aluminum silicate are presented, and the complete description of the compounding process and generation of polymer matrix composites and modified nanoclay loading and in addition, the status and results of the tests and trials carried out in recent years on composite materials of polymer matrix and nanoclay load and their respective characterization mainly of their mechanical properties is reviewed.

Finally, the materialization of the project that is currently in the state of advanced execution in the Center for Industrial Design and Technological Innovation (CDITI) – SENA is presented as a research project of the SENNOVA research system, in which the entire process of recovery and mechanical treatment of PET is developed, it is pelletized as a PET matrix material with aluminum silicate obtained in the compounding process, to later manufacture specimens for mechanical tests and the results of these will be analyzed to characterize the rheological and mechanical properties of the new composite material.

Palabras clave: PET, plástico, silicato de aluminio, compounding, reciclaje, recuperación, residuos, tratamiento, compuesto, matriz.

Keywords: PET, plastic, aluminum silicate, compounding, recycling, recovery, waste, treatment, compound, matrix.

Introducción

Actualmente, la problemática que se presenta en la producción de plásticos de cualquier composición se hace cada vez más visible a tal punto de alterar un entorno urbano como el propio ecosistema, como por ejemplo, desde bolsas plásticas volando por las calles, pasando por fauna marina atrapada entre los residuos plásticos y ríos taponados por los mismos hasta llegar a la real contaminación por micro plásticos presente en mares profundos, montañas altas, suelos fértiles, reservas de agua, en general, en todos los confines de la Tierra (**Bell & Takada, 2021**) ha obligado a la humanidad a modernizar y refinar técnicas y mecanismos para la recolección, gestión, recuperación y reutilización de estos residuos plásticos para su reintegración en los procesos productivos.

En la etapa de recuperación de residuos plásticos se aplican varios procesos tanto químicos como mecánicos con el fin de lograr modificar sus propiedades, haciéndolos útiles para al fin reintegrarlos al ciclo económico, reutilizándolos o aprovechándolos como materia prima para la elaboración de nuevos productos (**Bolaños, 2019**), y entre los procesos mecánicos de recuperación se encuentra el de la mezcla binaria entre un polímero plástico que comúnmente se conoce como matriz y otro componente compatible con ella para lograr así su miscibilidad, cambiando las propiedades mecánicas y térmicas del polímero posibilitando la mejora en ella, dicho procedimiento se conoce como “compounding” de mezclas binarias (**Borrás Mas, 2021**).

El presente artículo de revisión pretende en primer lugar, presentar la problemática global actual de la generación y acumulación de residuos sólidos plásticos (entre ellos el PET) como un inconveniente ambiental necesario de mitigar mediante mecanismos de recolección y recuperación de los mismos, luego se muestran algunas estrategias de recolección, recuperación y tratamiento de dichos residuos plásticos

aplicadas y aterrizadas al contexto local (Colombia y Risaralda) mencionando a sus actores principales involucrados en estos procesos.

Ya identificada y descrita la dinámica de recolección y recuperación de plásticos presente en el contexto local, se ofrece un panorama general de la técnica y métodos desarrollados en el área del **compounding** de materiales compatibles y miscibles para luego revisar las características más relevantes del PET y el silicato de aluminio mostrando su similitud con la mayoría de los polímeros plásticos y silicatos minerales respectivamente, para luego, mostrar los ensayos y pruebas realizados en materiales producto del **compounding** binario de una matriz polimérica y un silicato mineral esto para sustentar la viabilidad del uso del silicato de aluminio como par binario en el **compounding** del PET como matriz polimérica propuesta en esta revisión.

Por último, se presenta un proyecto de iniciativa local (Dosquebradas – Risaralda) que actualmente se encuentra en la etapa de desarrollo de probetas producto del **compounding** entre silicato de aluminio y PET recuperado para sometimiento a ensayos mecánicos y térmicos para determinar las propiedades mecánicas y reológicas de la mezcla para su posterior comparación con probetas de material no compuesto.

La revisión descriptiva y sistemática presentada en este artículo, en su mayoría obedece a la aplicación dentro de un contexto local (Colombia y Latinoamérica), tomando en cuenta las fuentes de información técnicas y científicas como artículos científicos, tesis de ingenierías y maestrías, informes y manuales de organizaciones de investigación y documentos técnicos de ensayos y procedimientos, que presentan un panorama de los últimos 10 años acerca de la problemática en la gestión de residuos plásticos y la viabilidad de la aplicación del **compounding** entre PET y silicato de aluminio como método de tratamiento para su recuperación; a su vez, estas fuentes de

información presentan procedimientos, ensayos, análisis, pruebas y demás, que emplean técnicas, equipos, ambientes y tecnologías que son reproducibles y aplicables dentro del contexto colombiano.

Problemática De Producción Y Residuos Plásticos

En el mundo se consume una gran cantidad de plásticos para diferentes usos, entre ellos la fabricación de envases de un solo uso, puesto que es un polímero sintético, simple, extremadamente versátil con unas buenas propiedades para la industria que van desde resistencia a la corrosión, peso ligero, transparencia, flexibilidad y por supuesto, durabilidad (**Buteler, 2019**), constituyendo así una problemática de generación de residuos de este material.

Se estima que hasta la fecha se ha producido un aproximado de 8300 millones de toneladas métricas de plásticos vírgenes, producto de ello, por ejemplo, en el 2012 tan solo en Estados Unidos se produjeron 32 millones de toneladas de residuos plásticos y de este total, el 44% pertenece a contenedores y materiales de empaques, el 34% corresponde a empaques de alimentos duraderos y el 22% pertenecen a empaques de alimentos no duraderos como vasos y platos (**Sarria Villa, et al, 2016**).

Dentro de los procesos de producción y residuos generados existen diferentes tipos de plásticos como lo son los termoplásticos, termoestables, poliuretanos (PUR), elastómeros, polietileno de alta y baja densidad (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC), tereftalato de polietileno (PET), poliéster-poliamida y acrílicas (PP&A) entre muchas más (**Geyer, et al, 2017**).

La producción y uso del Tereftalato de Polietileno - PET para envases, es decir, recipientes de un solo uso tiene cifras preocupantes para el

medio ambiente. Desde 1950 cuando se empezó la producción de PET se han alcanzado 8,3 mil millones de toneladas de plásticos, como lo son el polietileno (PE), tereftalato de polietileno (PET) y cloruro de polivinilo (PVC) dentro de muchos tipos de plásticos existentes (**Geyer, et al, 2017; Greenpeace, 2021**), haciendo necesario el mayor porcentaje posible de reciclaje y recuperación de estos dentro de la conocida economía circular.

Puesto que el plástico tarda cientos o hasta miles de años en descomponerse, se ha llegado al problema de que la acumulación de dicho material se hace principalmente en centros urbanos, mares cerrados entre otros, pero también en ambientes naturales como en las costas y el lecho marino (**Barnes, et al, 2009**). A 2015 ya se habían alcanzado los 6300 millones de toneladas de residuos plásticos de los cuales alrededor del 9% fue reciclado, el 12% fue incinerado y el 79% fue acumulado en vertederos o en el medio natural (**Geyer, et al, 2017**).

Debido al casi nulo nivel de compatibilidad entre de los envases y recipientes plásticos y el medio ambiente, las únicas formas de eliminar completamente dichos residuos es un tratamiento térmico destructivo como la combustión o pirólisis, procesos que aun así conllevan a la contaminación del medio ambiente natural (**Geyer, et al, 2017**). Debido al gran inconveniente de contaminación generada en el proceso de desaparición total del plástico post consumo, la mejor apuesta es la recuperación de estos por medio de diferentes procesos que a su vez generen pocos o nulos residuos que impacten negativamente el medio ambiente.

Recolección Y Transformación De Plásticos En Colombia Y Risaralda

En Colombia en el año 2013, el 83% de los residuos domiciliarios se dispusieron en rellenos

sanitarios mientras que tan solo el 17% restante se recuperó por recicladores para la reincorporación al ciclo productivo (**Valderrama, et al, 2018**).

Al verificar la tendencia en Colombia se encuentra que desde el 2018 se presenta una recolección del 10% de residuos generados de la utilización de empaques y envases plásticos y así progresivamente hasta llegar a por lo menos un 30% de recuperación de estos en el 2030 (**Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2018**).

Al igual que en la mayoría del país, en la región de Risaralda actualmente se está realizando una gestión de recolección, almacenamiento y transformación de plásticos de un solo uso, en gran medida del PET para reducir el impacto en la generación de residuos de este tipo y aplazar su disposición final en vertederos y rellenos sanitarios.

Actualmente en Pereira, capital de Risaralda y Dosquebradas, capital industrial de la región, existen principalmente ocho empresas que se encuentran en la actividad de recolección y aprovechamiento de residuos (ASO.VERDE, FUNDAMBIENTA, EMAÚS PEREIRA, INFINITY RECYCLE, REDCICLADORES, VITAPLANET, ATESA DE OCCIDENTE Y EKAPLAS), que, junto con el trabajo de los recuperadores de estas dos ciudades y alrededores, realizan la recolección principal de dicho material. Según lo reportado por el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos de Pereira, en el 2019 se registraron 28730 usuarios colaboradores, quienes lograron una recolección total promedio mensual de 106,77 toneladas de residuos de los cuales 97,60 (91,4%) fueron efectivamente aprovechadas mientras que 9,16 toneladas (8,6%) son rechazadas por diversas razones; del total de residuos ingresados, el 22%, aproximadamente 23,5 toneladas corresponden a plásticos (**Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos de Pereira, 2019**).

Evaluando las dinámicas de recolección, reciclado y recuperación de residuos de la zona,

se evidencia que en las ciudades de Pereira y Dosquebradas se establecieron dinámicas y hábitos de recolección, separación y recuperación de residuos entre ellos el PET que contribuyen positivamente a la rentabilidad, costo beneficio y utilidad obtenido dentro de la economía circular correspondiente a la obtención del PET recuperado.

Pero si se habla de forma general, dentro del país, como se ha evidenciado, se han generado no solo hábitos y buenas prácticas en la gestión y separación de residuos sólidos por parte de la

ciudadanía en general y de colaboradores sino además de que el sector productivo invierte y produce cada vez más en tecnología y maquinaria para la transformación de los residuos recuperados como la variedad de plásticos de un solo uso, que, articulados con las alcaldías y empresas prestadoras del servicio de recolección, han logrado reducir los recursos como tiempos, costo energético y recursos financieros necesarios en toda la cadena de recuperación de materia prima como el PET para su respectiva reincorporación a la economía circular.

Como es de resaltar, la baraja de tecnologías especializadas en el tratamiento, adecuación y recuperación de residuos plásticos y de empresas proveedoras disponible actualmente en el país es muy amplia y diversa y constituye una gama de soluciones dentro de la cadena de obtención de recuperado de plásticos entre ellos el PET (*Directorio Colombiano de Reciclaje de Residuos Plásticos, 2016 – 2017*).

La **tabla 1** muestra el directorio de empresas de reciclaje:

Tabla 1

Empresas en Colombia proveedoras de equipos y maquinaria para la recuperación de PET.

EMPRESA	TIPO DE MAQUINARIA									
	Embaladoras o compactadora	Lavadoras	Secadoras	Molinos	Granuladoras	Separadoras	Pulverizadoras	Extrusoras	Pelétrizadoras	Plantas de recuperación
BIMEK LTDA	*	*						*		
CORFLEX REPRESENTACIONES LTDA		*	*	*	*	*	*	*	*	*
FOMAG S.A.		*	*	*	*	*	*	*	*	*
IMOCOM S.A.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
INECO LTDA	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
INGA REPRESENTACIONES	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
INTEMAQ	*	*	*	*	*	*				*
MAPLAS CALI S.A.S.				*					*	*
MAQTEC LTDA									*	*
MILACRON		*	*							
NOBLE EQUIPMENT AND SERVICES		*	*	*	*			*	*	*
PET Y SOLO PET S.A.S.		*	*	*		*				*
SAM ANDINA S.A.S.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
SKIPLAST	*	*	*	*	*	*		*	*	*
SUMAQ LTDA			*	*	*	*		*	*	*
TEXTILNETS S.A.S.				*	*	*	*	*	*	*

Nota. Adaptado de Acoplásticos. (2016 – 2017). Directorio Colombiano de Reciclaje de Residuos Plásticos 2016 – 2017. Directorio de recopilación de actividad de investigación sobre la valorización de los residuos plásticos. 8. ISSN: 1692-0309

Procesos De Transformación De Plásticos Mediante Compounding

El principal inconveniente que surge en el proceso de recuperación de los plásticos y resinas poliméricas es que la gran mayoría de los monómeros que los componen tienen una base de etileno y propileno, derivados de los hidrocarburos y por consecuente ninguno biodegradable (*Barnes, et al, 2009*). Si, por ejemplo, se toma algún tipo de residuo plástico y se somete al proceso de pirólisis a una temperatura de alrededor de 500°C, se puede obtener hasta un 80% del peso del residuo procesado en aceite (derivado hidrocarburo, no biodegradable) que puede ser usado en aplicaciones de combustión (*Piña Hernández, et al, 2017*), pero ello conlleva a la generación de residuos combustibles que impactan negativamente en el medio ambiente.

Dicho esto, se hace necesario realizar una debida gestión y tratamientos de los residuos plásticos generados a partir de procesos de producción y consumo de estos, para obtener resinas recuperadas (con características físicas y químicas similares o iguales al material nuevo producido) a partir del proceso de reciclaje y recuperación alternativos al de la clásica pirólisis y combustión de los residuos plásticos, para su aprovechamiento e integración a una economía circular.

En los últimos 20 años se están desarrollando, en la comunidad científica y en la industria, nuevos materiales poliméricos, mezclas de varios polímeros, y materiales a veces reciclados; materiales compuestos reforzados con fibras naturales y minerales para obtener mejores propiedades a los tradicionales (**commodities**), para ser aplicados en industrias de la construcción, la aeronáutica, la automotriz, de electrodomésticos, entre otras (**Passatore, et al, 2016**). Pero puntualmente para el caso, debido a la gran demanda de los plásticos a nivel industrial y en lo que respecta la ingeniería de los materiales, dicha se ha encaminado a incorporarle elementos inorgánicos que los lleven a mejorar diversas propiedades tanto mecánicas como químicas sin perder sus bondades transformativas. En este proceso se ha logrado consolidar el uso de varios materiales como vidrios, talco, sílice y arcillas minerales principalmente, para mejorar la resistencia de las cadenas poliméricas que conforman la mayoría de los plásticos dando lugar a los llamados compuestos de matriz polimérica o "**composites**".

El término "**compounding**" se refiere a la adición de agentes químicos en una etapa del proceso de recuperación de un plástico logrando con esto mejorar algunas propiedades físicas y mecánicas del material recuperado para aumentar su valor comercial y su utilidad dentro de un nuevo ciclo productivo.

Esencialmente, con el proceso de **compounding** se busca obtener un compuesto

(**composite**) formado por dos fases (binaria), la primera llamada matriz que conforma la estructura fundamental de soporte da la partícula y la segunda denominada carga o relleno, que busca complementar los intersticios de la estructura molecular del material base reforzando la misma, lo que lleva a obtener un material con mejores prestaciones físicas y mecánicas que el mismo polímero por sí solo.

Uno de los intentos de incursión en los **composites** dados anteriormente fue el estudio y desarrollo de bloques ecológicos fabricados con mezcla entre polietileno reciclado y cemento, realizando pruebas, por ejemplo, variando la concentración de PET dentro del cemento al 5%, 10% y 15% y fabricando probetas que son sometidas a ensayos de compresión simple, erosión, absorción e impacto, determinando así que la mezcla con 15% de PET, aunque no es la más homogénea, es la mezcla más idónea para utilizar como material de construcción debido a su alta resistencia. (**Luis, et al, 2008**).

Un compuesto de madera y plástico, también llamada "madera plástica" o WPC, se refiere a una matriz de polímero reforzada con partículas de madera. La madera plástica es atractiva porque tiene una alta relación resistencia-peso, se integra fácilmente en las líneas de producción de plástico existentes y es un recurso renovable. Estos compuestos pueden ser más amigables con el medio ambiente si la matriz y los rellenos provienen de residuos de reciclaje, como el tereftalato de polietileno (PET) y la harina de madera -partículas finas de madera de las industrias de la madera- (**Pesante, 2020**).

Dado esto, aparecen estudios que se centralizan en el desarrollo de un material composite de madera plástica (WPC), en la cual se ha utilizado una matriz de polietileno cargado con residuos de madera como lo es el residuo de aserríos, el cual es reducido a polvo y mezclado junto con agentes exfoliadores y dispersores de la carga junto con el carbonato de calcio también empleado como relleno; los resultados obtenidos demuestran

que el aporte del carbonato de calcio a la mezcla aumenta el módulo de tensión y el esfuerzo de flexión para el compuesto con relleno de madera, pero como consecuencia se presenta una reducción en la resistencia al impacto. (**Kord, 2011**).

Los bioplásticos tienen una serie de limitaciones en cuanto a sus propiedades funcionales se refiere que son ampliamente conocidas por la comunidad científica y a la que se les viene dando solución en la última década, como, por ejemplo: mejora de propiedades mecánicas, estabilidad química, estabilidad térmica e incremento de propiedades barrera a gases (**García, 2021**), por esto y como ejemplo, también se ha desarrollado una WPC con un composite entre polietileno de alta densidad y base biológica (BioHDPE) como matriz polimérica y fibras orgánicas de cáñamo, lino y yute, sometiendo muestras moldeadas por inyección a ensayos de tracción en una máquina de ensayo universal ELIB 50 de S.A.E. Iberest arrojando como resultado buenas propiedades mecánicas, destacando la rigidez y dureza mejoradas respecto al BioHDPE puro (**Tejada, et al, 2021**).

Los diferentes ensayos referentes al uso de **composites** de matriz polimérica para la obtención de nuevos materiales llegan, por ejemplo, a la síntesis de un concreto polimérico con diferentes propiedades mecánicas a las que presenta el concreto convencional. Los ensayos se realizan a diferentes tipos de concretos poliméricos como lo son el concreto modificado con polímeros (CMP), polímero junto con cemento, concreto impregnado con polímeros (CIP), un monómero o polímero en la red de poros del concreto endurecido y concreto polimérico (CP) y con diferentes muestras a las cuales se les varía sus concentraciones en porcentaje de cemento (10% 50% y 100%) y variación en porcentaje vs. monómero corresponde a las sustancias oleofílicas, realizando las caracterizaciones de ensayos mecánicos mediante maquina universal, donde se obtuvo esfuerzo contra desplazamiento. Se aprecia que la variación de porcentajes de constituyentes produce un cambio de propiedades

en el concreto polimérico ya que muestran un comportamiento plástico o bien, pueden comportarse como un elastómero con diferentes usos potenciales (**Saavedra, et al, 2019**).

Otro caso, por ejemplo, surge del problema de la pequeña filtración de CO₂ y oxígeno en los recipientes PET presente en la industria de envase de cervezas y refrescos, por ello se optó en mejorar la permeabilidad de los envases usando películas de recubrimiento de otros materiales por plasma y deposición de vapor en el material plástico (**Hesam Ghasemi, et al, 2011**).

Los **“nanocomposites”** son materiales compuestos por dos o más componentes de los cuales al que se encuentra en mayor porcentaje se le denomina matriz y al de menor porcentaje carga, la cual debe estar en tamaño nanométrico, típicamente en el rango de 1-20nm (Barber, et al, 2005).

En términos de ingeniería de materiales, también se ha incursionado en la investigación y desarrollo de los nanocompuestos o **nanocomposites**. En este campo, la matriz de polímero contiene el relleno con partículas cuyo tamaño oscila entre 1 y 100 nm, y varía la concentración de la carga en el rango de 3 - 7% en peso. Los nanocompuestos presentan excelentes propiedades mecánicas y una mayor rigidez.

Las propiedades de los nanocompuestos dependen de la forma de las partículas, y entre ellas destacan las partículas esféricas (sílica, metal, y otras partículas orgánicas e inorgánicas), partículas fibrosas (nanofibras y nanotubos) y partículas laminares (carbono grafito, silicatos y aluminosilicatos laminados y otros materiales laminados), el grado de refinamiento, superficie y propiedades de adsorción de la carga, el tipo de la matriz de polímero y la modificación de condiciones de transformación, logrando obtener un sinnúmero de posibilidades de nuevos

materiales compuestos y constituyendo así un creciente interés en este tipo de sistemas (composites orgánico-inorgánico), esto debido al factor de que la ultra fina dispersión o nanodispersión de los rellenos, así como también de las interacciones locales entre el relleno y la matriz, conducen a un más alto nivel de propiedades fisicoquímicas y mecánica en comparación a sus equivalentes micro o macro **composites**, y aun así, con una disminución de la cantidad de relleno, sigue habiendo una mejora en sus comportamientos de retraso al fuego y estabilidad térmica, propiedades de barrera contra transmisión de gas y vapor, así como también de sus propiedades mecánicas principales (incremento en los módulos tensil y Young) (**Banda, 2013**).

Dadas las vastas posibilidades de manipulación de la estructura atómica de los composites, se puede llegar a que las principales mejoras en las propiedades mecánicas de nanocompuestos mejorados en relación con los polímeros sin mejorar son: resistencia a los procesos de envejecimiento, las excelentes propiedades de barrera, alta estabilidad térmica y alta resistencia al impacto.

También se nota que las propiedades mecánicas y el comportamiento a la fractura de una pieza de plástico inyectada, por ejemplo, cambian en función de dos factores principalmente: las propiedades del material y las condiciones de transformación establecidas. En el caso del polietileno como matriz cargada con minerales, sus propiedades mecánicas dependen de una serie de factores como lo son las propiedades intrínsecas de las dos fases, la concentración de las fases, la morfología de las partículas usadas en el **composite** y el nivel de interacción entre la carga y la matriz que condiciona el intercambio de esfuerzos entre las fases. La naturaleza fisicoquímica de la carga mineral tiene un papel importante en el momento en el que ciertas cargas actúan como agentes de

nucleación para el polipropileno. (**Jaramillo, et al, 2014**).

Las investigaciones en este campo para inicios de la última década permiten pensar que las bondades constitutivas de la interfaz ayudan a influir en gran medida en las propiedades del material compuesto. En comparación con los polímeros o compuestos poliméricos rellenos de micropartículas, los nanocompuestos poliméricos exhiben propiedades notablemente mejoradas, que incluyen módulo, resistencia, rendimiento de impacto y resistencia al calor a baja concentración de elementos inorgánicos (1 - 10% en peso). En este contexto, los nanocompuestos son mucho más livianos y más fácil de procesar; en general, las estrategias de fabricación de nanocompuestos poliméricos desarrolladas por los autores se dividen en tres categorías, las cuales son: (i) orientado a la dispersión, (ii) dispersión y relleno / matriz orientada a la interacción, y (iii) dispersión, relleno / relleno interacción y relleno / matriz orientada a la interacción. (**Zhang, et al, 2009**).

Seguido a esto, también se desarrollan **composites** de polímeros con aditivos y modificadores para hacer plásticos comercialmente útiles es un negocio que está cambiando constantemente debido a nuevos materiales, cambios de precios, maquinaria de procesamiento mejorada, cambiando las necesidades de los clientes, las leyes y preocupaciones ambientales, etc. Y para ello, una de las aplicaciones más comunes es el uso de aditivos para la conservación de algunas propiedades del material recuperado con respecto al material original, como lo son la estabilización contra la acción del calor, del oxígeno, de la luz, etc. (**Cortés, et al, 2017**).

Los aditivos abrillantadores ópticos o agentes blanqueadores fluorescentes, por ejemplo, funcionan absorbiendo la luz ultravioleta invisible y reemitiéndola como luz visible en la gama azul del espectro y son particularmente útiles para

enmascarar el color amarillento comúnmente observado en plásticos y fibras después de operaciones de procesamiento y recuperación a alta temperatura (Mayzo, 2017). Entonces el uso de este tipo de aditivo óptico puede ser aplicado por ejemplo para el caso de la recuperación de PET, puesto que, para reincorporarlo en el proceso de envases para productos alimenticios, el producto granulado intermedio (pellets) debe presentar un color blanco específicamente (Cornetero, 2019).

Los aditivos rellenos son sólidos que difieren de las matrices plásticas por su composición y estructura. Logran aumentar la masa molecular del composite resolviendo algunos problemas de procesamiento y reduciendo los costos (aumentando la conductividad térmica mejoran las tasas de producción) y junto con refuerzos activos producen mejoras específicas de ciertas propiedades mecánicas o físicas, incluyendo el módulo de Young, la resistencia a la tracción y al impacto, la estabilidad dimensional, la resistencia al calor y las propiedades eléctricas. Los rellenos y refuerzos adecuados más utilizados para una matriz polimérica termoplástica son: carbonato de cálcico natural y precipitado, talco, mica, sílice y silicatos, polvos metálicos, caolín, negro de carbón, trihidrato de aluminio, asfalto de madera, amianto, esferas de vidrio, fibras de vidrio, y así sucesivamente, junto con las fibras de carbón, el grafito, los bigotes, que también son utilizados (Vasile, et al, 2005).

Cada centro de investigación, instituto tecnológico y/o compañía desarrolla su propia formulación de aditivo para la adición de nanopartículas en la recuperación de diferentes plásticos incluido el PET, dicha formulación producto de constante proceso de investigación y desarrollo. Por ejemplo, el Instituto Tecnológico del Embalaje, Transporte y Logística – ITENE (Valencia, España) se ha desarrollado una arcilla patentada como aditivo al PET consiguiendo reducción en los tiempos de procesado y a su vez un aumento en el rendimiento del proceso de modificación

dentro del **compounding (Canales sectoriales – Interempresas, 2021)**. Del anterior proceso se han logrado nuevos **nanocomposites** que han aplicado a la producción de nuevos envases obteniendo en los mismos un aumento de la resistencia mecánica al a compresión del 20%, reducción a la permeabilidad entre el 15 y 20% tanto al oxígeno como al vapor de agua a 23°C y hasta el 50% de humedad relativa (Instituto Tecnológico del Embalaje, Transporte y Logística, 2021).

Características Del Pet Y El Silicato De Aluminio

El tereftalato de polietileno más conocido en la industria y cadena de producción como PET, es un tipo de termoplástico derivado del hidrocarburo principal que es el petróleo y fue descubierto en 1941 por los científicos británicos Whinfield y Dickson, quienes lo patentaron como una fibra de uso textil en respuesta de la búsqueda de un sustituto del algodón, sin embargo en 1976 surgió la aplicación del PET como un envase rígido, aplicación que significó mayor mercado con el embotellado de bebidas (Paz, 2016). La lista de características y propiedades fisicoquímicas del PET es larga pero las más relevantes son las siguientes:

- Alta resistencia a la tensión, no se deforma y puede formar fibras y textiles fuertes y flexibles.
- Transparencia, admite colorantes y tiene brillo.
- Resistencia química la corrosión, no es afectado por ácidos y gases atmosféricos.
- Baja absorción de agua.
- Resistencia térmica al calor (80° - 120° C).
- Procesable para inyección, extrusión y soplado principalmente.
- Aprobado para contención de productos alimenticios.
- Apto para producir botellas, películas, láminas, entre otros.
- Liviano (1,36 g/cm³).

- 100% reciclable.

El PET es una resina de glicol etilénico y ácido tereftálico con unas características de termoplástico únicas como lo son: liviano e impermeable, resistente a esfuerzos permanentes y al desgaste, alta rigidez y dureza, alta resistencia al ataque químico, gran indeformabilidad al calor, estabilidad a la intemperie, actúa como barrera a los gases como el CO₂ y humedad como el O₂ (**Sánchez Sierra, et al, 2014**).

El PET virgen está considerado como uno de los más importantes polímeros de ingeniería en las últimas décadas debido a un rápido crecimiento en su uso. Es considerado como un excelente material para muchas aplicaciones y es ampliamente utilizado para elaboración de recipientes para líquidos (botellas) por tener excelente resistencia a la tracción y fuerza de impacto, resistencia química, claridad, procesabilidad, capacidad de color y una razonable estabilidad térmica -termoplástico- (Awaja, 2005).

Para el caso, el uso de materiales plásticos como lo es el PET ha significado un enorme avance tecnológico en diferentes campos de aplicación industrial debido a su alto desempeño y relativamente sencilla transformación, adaptabilidad de formas (extrusión y termoformado entre otros.) y buen sustituto de materiales pesados.

Entre las técnicas desarrolladas para la fabricación de envases de PET, son los procesos de moldeo por soplado los que mayormente se aplican en el proceso de producción de envases plásticos y entre ellos se consideran convencionalmente los siguientes métodos: moldeo por extrusión-soplado, moldeo por inyección-soplado y moldeo por estirado-soplado; esta es una tecnología altamente desarrollada para recipientes huecos tales como envases plásticos con espesor de pared uniforme, donde la forma exterior es de consideración importante. El proceso consiste en soplar una preforma o párisson termoplástico caliente y hueco en el interior de

un molde soplado, que le confiere la forma de acuerdo con la cavidad del molde (**Durán, 2010**).

Volviendo a la problemática de la generación de residuos plásticos en especial los generados por envases de un solo uso, ya se han adoptado diversos mecanismos de gestión y transformación de los mismos y para el caso puntual, destaca que principalmente hay tres maneras de reciclar y aprovechar el PET post consumo, las cuales consisten en someterlo a un reciclaje mecánico, un reciclaje químico y un reciclaje energético (empleándolo como fuente energética) (**Tecnología de los plásticos, 2011**) los cuales se describen brevemente a continuación:

Reciclaje mecánico: Es el proceso más utilizado en la industria y consiste principalmente en la separación, limpieza y molido del PET a través de diferentes etapas y cuidadosos procesos para lograr la máxima homogenización del nuevo RPET utilizable para nuevos procesos de producción (**Tecnología de los plásticos, 2011; Reciclamás, 2019**).

Reciclaje químico: En este proceso se busca principalmente la separación química del polímero del PET en sus monómeros más simples y de esta manera simplificar los procesos de obtención de resina RPET semi virgen. Los principales procesos de reciclaje químico son: Pirólisis, hidrogenación, gasificación, chemólisis y metanólisis (**Tecnología de los plásticos, 2011; Reciclamás, 2019**).

Reciclaje energético: En este proceso se busca principalmente la separación de los hidrocarburos que constituyen el PET para su posterior combustión y uso en la generación de electricidad entre otros usos (**Tecnología de los plásticos, 2011; Reciclamás, 2019**).

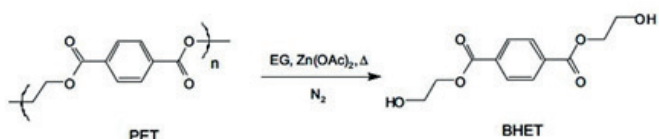
Por ejemplo, a nivel químico, se han realizado diversos estudios y pruebas donde se han desarrollado procesos para lograr modificar la separación de la molécula polímero del PET

a sus moléculas más simples, precisamente para obtener el monómero tereftalato de bis(2-hidroxietileno) o BHET, con alto grado de pureza al variar condiciones de reacción como el tiempo, relación EG (etilenglicol) – PET y porcentaje de catalizador usado (*Elgegren, et al, 2012*).

En la **figura 1** se esquematiza la despolimerización del PET por glicólisis con etilenglicol, donde se observa la degradación de la molécula de PET hacia la molécula BHET, obteniendo así monómeros más simples, para la obtención de nuevas resinas vírgenes RPET de modo que permitan ser integradas a nuevos ciclos productivos.

Figura 1

Despolimerización del PET por glicólisis con etilenglicol



Nota. Adaptado de “Reciclaje químico de desechos plásticos”, por M. Elgegren, G. J. Tiravanti, B. A. Ortiz, M. E. Otero, F. Wagner, D. A. Cerrón y J. Nakamatsu, 2012, Revista de la sociedad química del Perú, 78 (2).

En el sentido de transformación mecánica, con la adición de agentes de relleno para la matriz polimérica del PET, se busca modificar la estructura molecular del RPET adicionando nanopartículas que modifican sus características físicas y mecánicas además de hacerlo un material más rentable.

Anteriormente se ha realizado la modificación de láminas de PET mediante el método de fijación de dióxido de titanio modificado con óxido de cobre TiO₂/CuO para mejorar sus cualidades mecánicas de desgaste y amortiguación (*Quevedo Ramírez, 2019*). La formulación de nanopartículas y PET recuperado (RPET) resulta

más económico en comparación con el PET virgen y adicionalmente con dicha formulación se puede mantener o hasta mejorar las propiedades del RPET en comparación con el material virgen (*Estrada Moreno, et al, 2015*).

Tanto el proceso mecánico como el químico para la obtención de resina RPET para la integración al ciclo productivo, se ha determinado que algunas propiedades fisicoquímicas y mecánicas de la resina RPET con respecto a la resina PET virgen mejoran como se puede observar en la **tabla 2**.

Tabla 2

Comparación de características mecánicas entre el PET virgen y el PET reciclado

Propiedad	PET virgen	RPET
Módulo de Young [MPa]	1890	1630
Resistencia a la rotura [MPa]	47	24
Elongación a la rotura [%]	3,2	110
Resistencia al impacto [J/m]	12	20
IV [dl/g]	0,72 - 0,84	0,46 - 0,76
Temperatura de fusión [°C]	244 - 254	247 - 253
Peso molecular [g/mol]	81600	58400

Nota. Adaptado de “Proceso de reciclaje de PET”, por Tecnología de los Plásticos - blog, 2011, <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/proceso-de-reciclaje-del-pet.html>.

Los mencionados anteriormente son tan solo algunos de los muchos desarrollos en la adición de nanopartículas de diferentes compuestos químicos en el proceso de obtención de RPET de alta calidad, entre ellos han sometidos a pruebas por ejemplo el carbonato de calcio (CaCO₃), la nanoarcilla (C10A) desarrollada por la compañía **Sothorn Clay**, dióxido de silicio (SiO₂), Piroxil PS200 de **Gassven** y óxido de Aluminio (Al₂O₃) Alu C de **Evonik** (*Estrada Moreno, et al, 2015*), logrando resultados positivos como disminución de la viscosidad del material sin aumentar su peso atómico.

De esta manera se puede llegar a dos resultados que son: degradación de RPET en sus moléculas más simples y disminución en la proporción de PET virgen en la obtención de nuevo RPET mediante adición de materiales relleno, esto para poder integrar la resina RPET en un nuevo ciclo productivo.

Los silicatos son el grupo de minerales de mayor abundancia en la corteza terrestres puesto que conforman el 75% de la misma y su composición principal es el silicio y el oxígeno, con fórmula general $[(\text{SiO}_3)_2]_n$ y que además pueden ir acompañados de otros elementos entre ellos principalmente el aluminio, hierro, magnesio y calcio. Las propiedades de los silicatos dependen más de la estructura cristalina en que se disponen sus átomos que de los elementos químicos que constituyen su fórmula, más concretamente, dependen de la forma en que se dispone y enlaza con los iones la unidad fundamental de los silicatos, el tetraedro de $(\text{SiO}_4)_4^-$ (Química.es, n.d.).

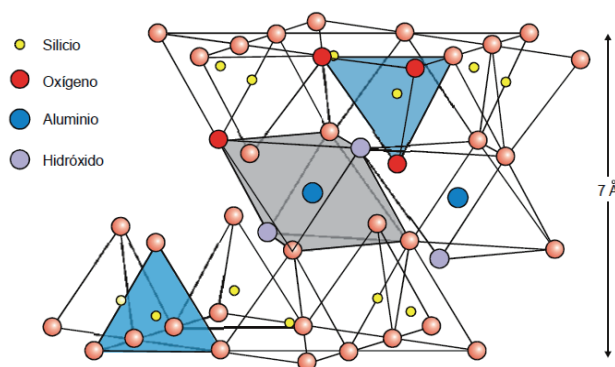
Dependiendo de la forma en que los tetraedros de su estructura atómica se unen, se distinguen diferentes subclases de silicatos entre ellos los filosilicatos que tienen tetraedros unidos por tres vértices a otros, formando una red plana que se extiende en un plano de dimensiones indefinidas. La forma de esta estructura dota a estos silicatos de hábito foliado (muy conveniente para el proceso de compounding) y los principales silicatos utilizados son las cloritas, micas, talcos, pirofilitas, serpentinatas y caolinitas.

El uso de las arcillas en la composición de nuevos materiales resulta viable puesto que son de fácil adquisición por que se encuentran en la naturaleza de forma abundante además de que la estructura atómica de la mayoría de ellas está conformada por aluminosilicatos, con una disposición laminar y en multicapa, las cuales se pueden acomodar de diferentes maneras como en el caso de la smectita por ejemplo, que tiene una relación sílice-alumina de 2:1 y la montmorillonita (MMT) que es la smectita más común. Su

estructura atómica se puede apreciar en la **figura 2**:

Figura 2

Estructura cristalina de la Montmorillonita (MMT)



Nota. Adaptado de “Investigación de la mejora de las propiedades mecánicas y térmicas de polipropileno con nanoarcillas para la fabricación de fibras”, de Pascual Bernabéu, J. J. (2015), Universitat Politècnica de Valencia. Alcoy - España.

Para que la MMT sea miscible con otro tipo de polímeros, es necesario reemplazar los iones alcalinos por surfactantes orgánicos catiónicos como el ion alquilamonio logrando así que la arcilla natural se convierte en organofílica lo cual se le conoce como organoarcilla o “nanoclay”, capaz de formar un **nanocomposite** interaccionando con una matriz orgánica (Pascual, 2015).

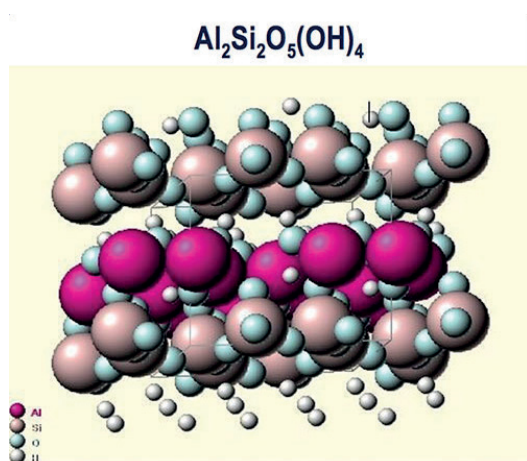
Según el método de obtención de un compuesto basado en silicatos pseudolaminares y su uso como carga para materiales poliméricos, patentado en 2012, la MMT se usa como insumo en éste proceso para como aditivo reológico por su capacidad para modificar el comportamiento reológico o de flujo de distintos sistemas líquidos cuando se añade en pequeñas concentraciones, además suele utilizarse como carga en polímeros para mejorar su resistencia mecánica, su resistencia térmica, aumentar la resistencia a la llama, o reducir la permeabilidad de gases (Santarén, et al, 2012).

El silicato de aluminio es una mezcla de aluminio, sílice y oxígeno que puede ser un mineral o estar combinada con agua para formar arcilla, y en específico, la mezcla de silicato de aluminio viene en tres formas diferentes: cianita, andalucita o sillimanita, todas con fórmula química Al_2SiO_5 , pero con estructuras cristalinas diferentes y

El silicato de aluminio, precisamente el hidratado natural es también conocido como el caolín tiene como fórmula química $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ y su principal presentación es en forma de roca natural con cierta concentración de mica, cuarzo y feldespato. En la **figura 3** se presenta un modelo molecular recreado en 3D de la estructura principal del silicato de aluminio o caolín:

Figura 3

Estructura molecular del silicato de aluminio o también llamado caolín



Nota. Adaptado de “Caolín calcinado/mica”, de Refil – Argentina, 2021, <https://www.refil.com.ar/productos-caolin-calcinado-mica.php>

Este silicato de aluminio es un tipo de mineral estratificado que se compone de una capa de dióxido de silicio tetraédrico unido a través de átomos de silicio a una lámina compuesta de óxido de aluminio octaédrico, es por ello la obtención de partículas laminares o planas después de sometido a procesos de molienda (**Refil – Argentina, 2021**). En un eventual proceso de calcinación del caolín, se produce una eliminación de radicales hidroxilos en forma de vapor de agua incrementando el área superficial de su estructura

cualquiera de ellas puede ser hidratada o tener moléculas de agua asociadas a la misma para formar la arcilla; caolín es el término para un grupo de minerales de arcilla con la fórmula química de $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$, en los cuales se forma una capa de dos cristales alternados, una de silicio-oxígeno y otra de alúmina siendo así la caolinita es el principal constituyente del caolín (**Mejía, 2018**).

laminar haciéndolo más reactivo químicamente hablando, y con dicho cambio, permite la eliminación de materiales iónicos tales como el ion-cloruro presente en la mayoría de los plásticos (**Refil – Argentina, 2021**).

Por ejemplo, el caolín como relleno en plásticos ayuda a obtener un acabado liso tipo película, reduce el agrietamiento, mejora la estabilidad térmica, contribuye a una alta fuerza de impacto y mejora la resistencia al ataque químico (propio de algunos líquidos a almacenar) y al desgaste (**Olvera, et al, 2014**).

Ensayos Y Resultados Obtenidos En Compuestos De Matriz Polimérica Y Silicatos

Actualmente ya se han establecido diferentes procedimientos estandarizados para la transformación, **compounding** y fabricación de probetas de prueba para los composites de matriz polimérica con carga de silicatos.

Para el caso de los plásticos termoestables, los principales ensayos mecánicos y reológicos que se realizan son: de tracción, que es la aplicación de esfuerzo en la misma dirección del eje longitudinal de la probeta en donde es posible extraer datos esfuerzo-deformación (se realiza bajo la norma UNE-EN ISO 527), de compresión,

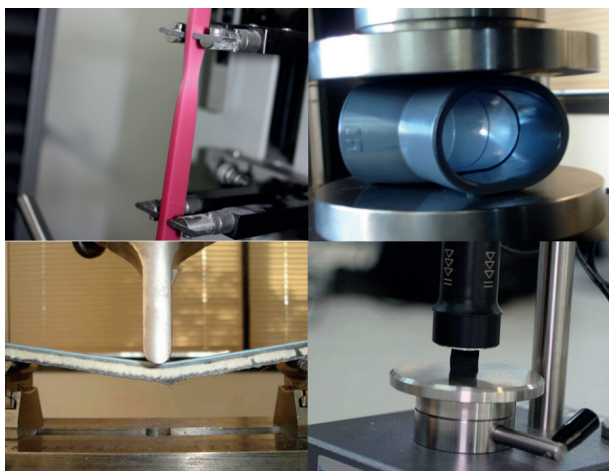
que describe el comportamiento de un material cuando está sometido a una carga de compresión a una velocidad uniforme (se realiza bajo la norma UNE-EN ISO 604), de flexión, que describe el comportamiento del material al soportar fuerzas aplicadas perpendicularmente a su eje longitudinal y en donde se obtienen datos de puntos máximo y de rotura, deformaciones y módulo elástico en función de la separación de los puntos de apoyo de la probeta y espesor de la misma (se realizan bajo las normas UNE-EN ISO 178 para materiales plásticos y la UNE-EN ISO 14125 para

materiales plásticos reforzados), de dureza, que es la resistencia que opone un material a ser rayado o penetrado y proporciona una medida previa a la fractura en función tanto de la rigidez del material como de su módulo de elasticidad (se determinan con las normas de ensayo UNE-EN ISO 868, UNE 53270 y la UNE-EN ISO 2039-1), de desgarrar, coeficiente de fricción estático y dinámico, separación por pelado punción e impacto, todas ellos realizados en la máquina universal de ensayos o MUE (**Aimplas – Instituto Tecnológico del Plástico, n.d.**).

Los ensayos mecánicos que se aplican a los materiales de matriz polimérica se pueden apreciar en la siguiente figura:

Figura 4

Principales ensayos mecánicos realizados a materiales de matriz polimérica. Arriba izquierda: tracción, arriba derecha: compresión, abajo izquierda: flexión, abajo derecha: dureza.



Nota. Adaptado de “Ensayos de propiedades mecánicas en plásticos”, de Aimplas – Instituto Tecnológico del Plástico, Valencia, España. <https://www.aimplas.es/tipos-ensayos/propiedades-mecanicas-de-los-materiales-plasticos/>

Los principales ensayos realizados para determinar las características reológicas para un compuesto de matriz polimérica, principalmente son: índice de fluidez realizado con un medidor de índice de fluidez, viscosidad reducida / intrínseca de PA, PET, realizado con un viscosímetro capilar, viscosidad bajo cizalla de resinas,

pastas, dispersiones y fluidos, realizado con un viscosímetro Brookfield, viscosidad bajo cizalla y propiedades viscoelásticas de polímeros fundidos, pastas y otros fluidos con un reómetro rotacional, viscosidad bajo alta cizalla de polímeros fundidos con un reómetro capilar, fuerza de fundido (Melt Strenght) y ratio de estiramiento (Drawability), con un reómetro extensional y curva de fusión y tiempo hasta degradación con un reómetro de torque o Brabender (**Aimplas – Instituto Tecnológico del Plástico, n.d.**).

Uno de los procesos más comunes para matrices poliméricas de termoplásticos es el proceso de intercalado o mezclado en fundido y consiste en el mezclado físico de la nanopartícula con el polímero fundido. Para la obtención de los nanocompuestos se emplea una extrusora o mezclador interno, capaz de fundir el polímero y dispersar los nanorefuerzos mediante el efecto cizalla de las máquinas. Esta metodología es la empleada para dispersar los modificantes o aditivos tradicionales en el seno de matrices termoplásticas (**Herrero, 2018**).

Empezando con un estudio realizado por el Departamento de ingeniería química y del medio ambiente de la Universidad País Vasco en conjunto con la Escuela universitaria de ingeniería técnica industrial en el cual se han

preparado nano composites de PA6 (nylon) - arcilla organofilizada por el procedimiento de mezclado directo en fundido utilizando una extrusora de doble husillo co-rotatorio Haake y a modo de comparativa también se usó una extrusora mono husillo Standard Davies, en donde al final de procedimiento se han medido las propiedades mecánicas y se ha analizado la morfología de los **nanocomposites** comparándola con composites similares hechos por polimerización "in situ" obteniendo como resultado que las propiedades mecánicas de los **nanocomposites** así preparados mejoran considerablemente, excepto que se observa una disminución en la ductilidad, con respecto a los materiales composites convencionales obtenidos a partir de refuerzos del tipo fibra de vidrio. (**Valea, et al, 2007**).

Desde 2013 por ejemplo, en España se ha patentó diferentes procedimientos de preparación de compuestos polímero-arcilla orgánica y artículos derivados de los mismos, y uno de estos ensayos se realizó en muestras de compuesto de un polímero aleatorio (entre ellos el PET) y arcilla orgánica o "nanoarcilla modificada" que incluye caolinita, dickita, nacrita, halloysita, antigorita, crisotilo, pirofilita, montmorillonita, beidellita, nontronita, saponita, sauconita estevensita, hectorita, mica tetrasilílica, taeniolita sódica, moscovita, margarita, talco, vermiculita, flogopita, xantofilita, clorito, silicatos sintéticos y una combinación que comprende al menos una de las nanoarcillas anteriores, en forma de película moldeada con disolventes, de entre 0,1 y 1000 micrómetros de espesor y 23 mm de longitud por 5 mm de ancho.

Las muestras de ensayo se sometieron a un primer calentamiento desde 0°C a 250°C a un ritmo de calentamiento de 5°C/min y se determinaron los valores del coeficiente de expansión térmico (CET) bajo una fuerza de 0,05 Newtons desde la pendiente del cambio de longitud en el intervalo de temperatura de 30°C a 200°C, y además usando como aditivo nanopartículas de óxidos metálicos como el aluminio(acetilacetato)3 o (Al(acac)3) formando un polímero relleno de nanopartículas de Al2O3

con un CET reducido en más de un 15% en comparación con una muestra de control sin rellenar (**Chan, et al, 2013**).

También en Perú, se han realizado ensayos mecánicos de tracción e impacto según la norma ASTM D638-14 en composites con matriz termoestable de otros polímeros como lo son el Poliláctico (PLA) y el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), (fundamentales para la fabricación de modelos en 3D) y una carga de nanoarcilla Nanomer® I.31PS proporcionadas por Sigma-Aldrich, el cual es una montmorillonita de superficie modificada con 15-35% en peso de octadecilamina y 0.5-5% en peso de aminopropiltrietoxisilano y un tamaño típico de partículas aglomeradas en el rango de 15 a 20 µm, mediante la técnica de modelado por deposición fundida (FDM) y con muestras en forma de filamento y probetas de ensayo (**Molina, 2016**).

Luego, dicha caracterización de las propiedades mecánicas mencionadas se compara con las características de los polímeros sin carga obteniendo como principal resultado que de los ensayos de tracción realizados tanto en el ABS como en el PLA se presentan mejoras y desmejoras en las propiedades mecánicas de ambos composites con respecto a los materiales de matriz pura.

Se evidencia que para el caso del ABS se logró incrementar la resistencia a la tracción al introducir nanoarcillas en el ABS teniendo un mayor incremento de la resistencia a la tracción para un contenido de 2% de nanoarcillas, aumentando la resistencia a la tracción de 32,4 MPa para la matriz pura a 36,96 MPa, pero para éste mismo porcentaje de nanoarcilla el módulo elástico disminuyó respecto a la matriz pura (el mayor valor del módulo elástico se presentó a una concentración de arcilla de 1%).

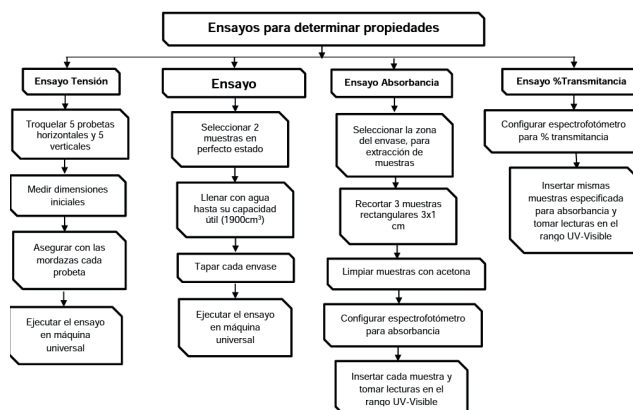
En el caso de las probetas impresas de PLA con nanoarcillas, muestran que tanto la resistencia a la tracción como el módulo de elasticidad disminuyen al introducir las nanoarcillas, llegando a disminuir la resistencia a la tracción de 55,46 MPa para la matriz pura a 51,63 MPa para el PLA con 2% en peso de nanoarcillas, misma concentración en donde se registra el menor valor del módulo elástico. Esta disminución de la resistencia a la tracción al introducir nanoarcillas en una matriz polimérica también ha sido reportada para el HDPE, donde también disminuye la resistencia a la flexión (Sepet, et al, 2015).

De los resultados de los ensayos de impacto, se tiene que la matriz de ABS pura llegó a tener una resistencia al impacto de 3,49 kJ/m² y al introducir una carga de nanoarcilla, la resistencia al impacto disminuye, teniendo el menor valor (1,76 kJ/m²) a una concentración de nanoarcillas de 2%, mientras que para el PLA se logra incrementar de 1,77kJ/m² (para la matriz pura) a 2,15kJ/m² para el PLA con 3% de concentración de nanoarcillas (Molina, 2016).

En la ciudad de Bogotá D.C. en la empresa de termoformados Colfoplast S.A., dedicada a la producción de envases de uso doméstico e industrial mediante el proceso de extrusión y soplado, se realizaron las pruebas diagnósticas de las propiedades mecánicas y ópticas de los envases de medio galón de polietileno de alta densidad (HDPE) primero sin ningún aditivo, y luego con envases fabricados con polietileno de alta densidad post-consumo (R-HDPE) y los aditivos MasterBatch 0905 brillador óptico y MasterBatch 0283 relleno especial transparente, usando probetas de ensayo del material sin aditivos y luego con probetas que contienen aditivos a diferentes porcentajes de concentración siguiendo la metodología de experimentación que se muestra en la siguiente figura 5.

Figura 5

Metodología de ensayos con probetas con y sin aditivos brillador y relleno



Nota. Adaptado de “Evaluación de aditivos en el proceso de extrusión-soplado de polietileno de alta densidad pos-consumo, en la empresa Colfoplas S. A.”, de Cortés Sabala C. y Ramírez Alfonso C. (2017). Fundación Universidad de Américas.

Allí se analizaron diferentes variables respuesta como lo son el módulo de elasticidad en el ensayo de resistencia a la tensión y compresión, esfuerzo máximo en ensayo de resistencia compresión, y promedios absorbancia y transmitancia, logrando para el caso evidenciar resultados como: el aditivo de relleno especial transparente aumentó el módulo de elasticidad en el polietileno translucido post-consumo, lo que se traduce en mejora de su rigidez para soportar cargas externas más elevadas además de aumentar el máximo esfuerzo que puede soportar por apilamiento antes de que se presente la falla permanente en el envase y se mitigar el efecto que proporciona el aditivo brillador óptico que genera opacidad en el polietileno al momento de aumentar la concentración; pero Este aditivo de relleno solamente genera el efecto deseado usándolo en concentraciones iguales o menores al 10% (Cortés Sabala, et al, 2017).

Implementación Del Compounding En Proyecto De Recuperación Dosquebradas - Risaralda

Desde inicios del año 2021, en el SENA – Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial, de Dosquebradas en el departamento de Risaralda, Colombia se está ejecutando un proyecto de producción y tratamiento de pellets de RPET en el Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial (C.D.I.T.I.) – SENA desde el Sistema de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación (SENNOVA) de nombre **“DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE UN COMPUESTO DE PET RECUPERADO Y SILICATO DE ALUMINIO, PARA EL USO INDUSTRIAL COMO APOORTE A LA REUTILIZACIÓN DEL MATERIAL PLÁSTICO EN LA REGIONAL RISARALDA”**, en el cual ya se

encuentra en marcha la producción de escama y pellets (gránulo) de PET recuperado con los equipos y maquinaria adquiridos en el año 2021.

Este proyecto se genera en respuesta de la necesidad de emprender acciones que aumenten el porcentaje de reutilización del PET en sectores industriales de alto consumo de materiales innovadores como son la construcción, automotriz, electrodomésticos, entre otros; es así como se pretende producir un material compuesto de matriz polimérica PET recuperado cargado con silicato de aluminio que como ya se ha evidenciado es una muy buena opción para mejorar las propiedades mecánicas del compuesto y posteriormente establecer sus características reológicas y mecánicas que, comparadas con las de otros materiales plásticos de amplio uso en los procesos de transformación de piezas por inyección y extrusión, logre ser un sustituto de gran demanda.

Actualmente, dentro las fases del proyecto se han adquirido diferentes equipos para el tratamiento y transformación del PET recuperado, entre ellos se obtuvo un molino triturador de envase PET, una extrusora de grandes proporciones y otra extrusora de menores dimensiones para productos derivados de pruebas específicas de composición como se puede observar en la siguiente imagen:

Figura 6

Equipos para producción de pellets de PET, arriba extrusora 130 Se – II de WellTec, abajo izquierda extrusora INGEACOL, abajo derecha trituradora envase PET



Nota. Fuente propia.

En la primera fase del proyecto, se realizó un desarrollo en utilización de los equipos, el tratamiento de los envases PET post consumo en cuanto a selección, lavado y secado manual, luego se someten al primer tratamiento mecánico en la trituradora para obtener las típicas escamas u hojuelas RPET como se puede observar en la **figura 7**.

Figura 7

Escama de PET, diámetros no mayores a 5mm



Nota. Fuente propia.

Estas escamas tienen un tamaño no mayor a 5mm de diámetro, material que sirve como insumo para el siguiente proceso térmico que se realiza en la extrusora.

En la segunda fase del proyecto, la escama RPET obtenida de la fase previa se toma como insumo para las extrusoras de doble husillo co-rotante la cual mediante aumento de temperatura mezcla las hojuelas de PET y el silicato de aluminio bajo la acción de un aglomerante que favorezca la dispersión de la carga. Este composite se convierte en “tallarines” los cuales a su vez son cortados en trozos para la obtención de los pellets regulares (*figura*

Hasta este punto, se ha realizado un tratamiento mecánico convencional del PET posconsumo para convertirlo en nuevo RPET con diferentes concentraciones de matriz polimérica y silicato de aluminio, que varían en composición 65 – 35, 70 – 30, 75 – 25 y 80 - 20 i, con el objetivo principal (proyectado para la fase 3 del proyecto que se estima sea desarrollada en el año 2023) de caracterizar y determinar algunas propiedades físicas y mecánicas definidas de los compuestos descritos como lo son la dureza, resistencia a la tensión, tracción y torsión principalmente, al realizar la inyección de probetas según normas ASTM y variando algunos parámetros de las inyectoras como la temperatura de fusión, presión de llenado y tiempo de enfriamiento, probetas que se utilizarán, unas sometiénolas a un reómetro de torque que determinará el índice de fluidez y la temperatura óptima de fusión de la mezcla; y otras,

8), producto de este tratamiento mecánico convencional.

Figura 8

Pellets de RPET después de que pasan por las extrusoras.



Nota. Fuente propia.

Dichos pellets que tiene un diámetro de 2mm y un largo de 3mm como máximo ya son propiamente material composite de RPET y silicato de aluminio el cual puede ser usado en procesos de termoformado y soplado entre otros para la obtención de envases nuevos y así lograr la integración de dicho material en nuevos procesos productivos dentro de la economía circular.

usadas en una prensa universal para ensayo de tracción con lo que se establecerán los límites de elongación y rotura. Los resultados se compararán con los obtenidos para los materiales poliméricos vírgenes.

Discusión

Esta revisión permite evidenciar que en Latinoamérica y Colombia ya se realizan prácticas de recolección y recuperación de residuos plásticos mostrando que tanto el sector privado como el público realizan métodos de recolección, reciclaje y transformación de residuos plásticos para producir nuevas materias primas para su integración en un nuevo ciclo productivo.

También se tiene certeza de que se implementa varias técnicas de transformación y tratamiento mecánico de dichos residuos integrándolos con otros materiales según sea su fin de aplicabilidad (bloques constructivos, nuevas resinas, maderas plásticas, etc.), pero es el proceso de **compounding** binario de una matriz polimérica y una carga mineral de arcillas permite la transformación de las propiedades mecánicas del nuevo polímero recuperado a tal punto de mejorar algunas de ellas.

Además, al analizar las propiedades del silicato de aluminio, las del PET y las diferentes técnicas y métodos desarrollados para el **compounding** entre una matriz polimérica y un silicato, se hace viable el uso de dicha técnica de tratamiento mecánico en la recuperación del PET para nuevas resinas para su integración en un nuevo ciclo productivo, usando una carga mineral de silicato de aluminio y utilizando tecnología disponible en entorno productivo local, más precisamente en Risaralda (Col.).

Por último, se resalta el desarrollo del proyecto en desarrollo que se lleva en Centro de Diseño e Innovación Tecnológica Industrial del SENA en Dosquebradas – Risaralda que involucra el uso de tecnologías de extrusión del PET con silicato de aluminio para desarrollo de probetas de ensayo para caracterizar las propiedades mecánicas y reológicas del compuesto, como un prospecto

positivo de investigación e innovación en los procedimientos y nuevos materiales producidos mediante el **compounding** entre el PET reciclado y el silicato de aluminio.

Conclusiones

Los datos y números presentados en cuanto a la producción, uso y generación de residuos plásticos a nivel mundial hacen necesario la implementación de métodos, dinámicas y políticas de recolección, reciclaje y transformación de dichos residuos, ya sea de forma mecánica o química, pero que a su vez produzca menos desechos contaminantes que generen impactos negativos al medio ambiente y diferentes ecosistemas, es claro entonces que el método de **compounding** es uno de los procesos en donde se genera menos contaminantes que ocasionan un impacto negativo al medio ambiente.

Existen actualmente diversidad de aditivos y rellenos como lo es el silicato de aluminio, que actúan como carga de una matriz polimérica de las cuales su eficacia e idoneidad para su uso en la recuperación del polímero para su respectiva inclusión en el ciclo productivo dependen de varias variables a lo largo de la línea de transformación, por consiguiente es indispensable establecer protocolos y procedimientos a la hora de hacer la fabricación de las probetas de ensayo y las pruebas reológicas, de torsión y de compresión que aseguren que las condiciones de obtención del composite, concentración de matriz y carga y transformación del mismo sean siempre constantes para poder obtener resultados de propiedades mecánicas consistentes.

Las características estructurales del silicato de aluminio y del PET se asemejan a de forma

general a la mayoría de los polímeros plásticos y silicatos minerales respectivamente, haciéndolos dos compuestos altamente miscibles para poder realizar un **compounding** binario para obtener un compuesto con propiedades mecánicas y reológicas mejoradas para así poder integrar dicho compuesto a un nuevo ciclo productivo.

Los sistemas de polietileno – carga mineral han sido ampliamente estudiados. Inicialmente el objetivo era rebajar el costo del material dado que un plástico con alta fracción de carga mineral permite a la economía depender menos del petróleo; pero rápidamente se logró constatar que la fase mineral permitía igualmente aumentar la productividad, gracias a un aumento de la conductividad térmica del material, asegurar mayor estabilidad dimensional del material al limitar la contracción del polipropileno, lo que permite la reducción del espesor de las piezas. El uso de ciertos tipos de cargas minerales (hidróxidos de magnesio y aluminio) genera propiedades especiales no presentes en los materiales poliméricos como, por ejemplo, la resistencia al juego o la conductividad eléctrica.

La producción de un compuesto de matriz polimérica PET y carga inorgánica o mineral como es el caso del silicato de aluminio, requiere además de agentes dispersantes que distribuyan homogéneamente la carga. El proceso de recuperación del polímero parte con la separación, clasificación, triturado y lavado en donde es fundamental el trabajo organizado que las empresas de la región involucradas junto con la comunidad y colaboradores del sector vienen trabajando en la adecuada gestión de dichos residuos, para así obtener los tamaños adecuados y condiciones óptimas de la mezcla, y que tanto la carga como los dispersantes no encuentren resistencia a sus acciones. Un procedimiento de granulometría permite determinar el efecto previo de pulverización de la carga y definir los micro tamaños apropiados para la compactibilidad que se logra por medio de un proceso de extrusión.

Los hechos, avances, procedimientos establecidos, tecnología disponible y desarrollos actuales permiten evidenciar que es viable el uso de una matriz polimérica plástica como el PET recuperado y una carga aditiva como lo es el silicato de aluminio en el **compounding** binario para obtener una mezcla con nuevas propiedades mecánicas y reológicas que muestran una mejora aprovechable en un nuevo ciclo productivo.

Referencias Bibliográficas

- Bell, L. Takada, H. Bell, L. (2021). Los peligros de la gestión de residuos plásticos. Red Internacional de Eliminación de Contaminantes (IPEN). ISBN: 978-1-955400-12-1.*
- Bolaños, J. J. (2019). Reciclado de plástico PET. Trabajo de Grado Ingeniería Industrial. Universidad Católica San Pablo. Arequipa - Perú.*
- Borrás Mas, J. (2021). Mejora de la tenacidad y estabilidad termomecánica de ácido poliláctico mediante mezclado con plásticos técnicos de policarbonato. Universitat Politècnica de València. <http://hdl.handle.net/10251/173852>.*
- Buteler, M. (2019). ¿Qué es la contaminación por plástico y como nos afecta?. Desde la Patagonia difundiendo saberes. Revista de divulgación científica interdisciplinaria. 16 (28). 56 – 60.*
- Sarria Villa, R. A. y Gallo Corredor, J. A. (2016). La gran problemática ambiental de los residuos plásticos: Microplásticos. Journal de Ciencia e Ingeniería.*

Revista de divulgación científica en ciencias e ingenierías. 8 (1). 21 – 27.

Geyer, R. Jambeck, J.R. y Law, L. K. (2017). *Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances. Revista de acceso abierto en investigación interdisciplinaria. 3(7). <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1700782>*

Greenpeace. (2021). *Datos sobre la producción de plásticos. <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/consumismo/plasticos/datos-sobre-la-produccion-de-plasticos/>*

Barnes, D. K. A. Galgani, F. Thompson, R. C. y Barlaz, M. (2009). *Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. Philosophical Transactions of The Royal Society B. Revista de investigación en ciencia de alta calidad. 364(1526). <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>*

Valderrama Ocoró, M. F. Chavarro Guzmán, L. E. Osorio Gómez, J. C. Peña Montoya, C. C. (2018). *Estudio dinámico del reciclaje de envases PET en el Valle del Cauca. Revista Lasallista de Investigación. Revista en investigación interdisciplinaria. 15(1). 67 – 74. DOI: 10.22507/rli.v15n1a6*

Resolución 1407. *Por la cual se reglamenta la gestión ambiental de los residuos de envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio, metal y se toman otras determinaciones. Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. 26 de julio de 2018.*

Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos de Pereira. (2019). Cifras y Resultados 2019. <https://www.pgirspereira.com/residuos-en-cifras/>.

Acoplásticos. (2016 – 2017). *Directorio Colombiano de Reciclaje de Residuos Plásticos 2016 – 2017. Directorio de recopilación de actividad de investigación sobre la valorización de los residuos plásticos. 8. ISSN: 1692-0309*

Piña Hernández, S. Riesco Ávila, J. M. Barrón Hernández, C. I. Vásquez Hernández, J. B. (2017). *Conversión termoquímica de residuos plásticos en hidrocarburos. Jóvenes en la ciencia. Revista de divulgación tecnológica. 3 (2). 2635 – 2639.*

Passatore, C. R. Leño, A. L. Rosa, D. S. (2016). *Preparación de Compuestos de Polipropileno con Altos Niveles de Fibra Corta de Bonote para uso en Productos por Inyección. Materiales Clave de Ingeniería. Revista de divulgación científica sobre materiales y tecnologías no convencionales. 668. 28 – 38. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.668.28>*

Luis, A. Rendón, N. Korody, M. E. (2008). *Diseños de mezcla de tereftalato de polietileno (PET) – cemento. Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela. Revista de divulgación de resultados de investigación y desarrollo en áreas de Ingeniería y Ciencias Básicas. 23(1). 76 – 86. ISSN 0798-4065*

Pesante Castro, P. A. (2020). *Caracterización de propiedades mecánicas de un material compuesto de harina de madera-PET mediante homogeneización computacional y pruebas experimentales. Trabajo Investigativo. Universidad de Chile. Curicó - Chile.*

Kord, B. (2011). *Effect of Calcium Carbonate as a Mineral Filler on the Physical and Mechanical Properties of Wood Based Composites. World Applied Sciences Journal. Revista mundial de divulgación de ciencias aplicadas. 13. 129 – 132.*

García Quiles, L. (2021). *Desarrollo e implementación de estrategias de mejora de las propiedades estéticas de biopolímeros. Tesis de la universidad. Universidad Zaragoza. ISSN 2254-7606.*

Tejada, R. Terroba, E. Quiles-Carrillo, L. (2021). *Caracterización mecánica de compuestos plásticos de madera (WPC) ecológicos a partir de BioHDPE y fibras naturales cortas. VIII congreso I+D+i campus de Alicoy, Creando Sinergias. Universitat Politècnica de Valencia. Libro de Resúmenes. 69 – 72. ISBN: 978-84-121868-7-1.*

Saavedra Arroyo, Q. E. Villanueva Raya, D.M. Bejár Barrientos, G. E. Muñoz Malpica, C.A. Cabal Velarde, J.G. (2019). *Caracterización de un tipo de concreto polimérico mediante ensayos mecánicos. Memorias del Congreso internacional de Metalurgia y Materiales. Tecnólogo Nacional de México. 371 – 372. ISSN: 2007-9540*

Hesam Ghasemi, P. J. Kamal, M. R. Uribe Calderón, J. (2011). *Preparation*

and Characterization of PET/Clay Nanocomposites by Melt Compounding. Polymer Engineering & Science. Revista científica en el campo de la ciencia y tecnología de polímeros. 51 (6). 1178 – 1187. <https://doi.org/10.1002/pen.21874>

Barber, G. Calhoun, B. Moore, R. (2005). *Poly(ethylene terephthalate) ionomer based clay nanocomposites produced via melt extrusion. Polymer. 46. 6706–6714.*

Banda Cruz, E. E. (2013). *Preparación de Nanocompositor de PET reciclado y Closite 10A mediante extrusión y mezclado. Tesis de grado en Doctorado. Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. México.*

Jaramillo, L. Posada, J. C. García L. (2014). *Evaluación de compuestos de polietileno con cargas de CaCO₃ y SiO₂. Revista Colombiana de Materiales. Revista de divulgación de artículos cortos sobre ingeniería de materiales. 5. 228 – 234.*

Zhang, M. Q. Rong, M. Z. Ruan, W. H. (2009). *Nanoparticles/Polymer Composites: Fabrication and Mechanical Properties. Nano- and Micro -Mechanics of Polymer Blends and Composites. Libro de ciencia de materiales. (págs. 91-140). <https://doi.org/10.3139/9783446430129.003>*

Cortés Sabala, C. G. Ramírez Alfonso, C. A. (2017). *Evaluación de aditivos en el proceso de extrusión-soplado de polietileno de alta densidad pos-consumo, en la empresa Colfoplas S. A. Proyecto de grado ingeniería química. Fundación Universidad de Américas.*

Mayzo. (2017). *Optical Brighteners. Chemical laboratory and production operation for customized packaging and value-added materials processing.* Suwanee, Georgia, USA. <http://www.mayzo.com/optical-brighteners.html>

Cornetero Piscocoya, C. E. (2019). *Estudio de Mercado para la Producción de Resina rPet Grado Alimenticio en la Región Lambayeque.* Trabajo de investigación. Universidad Tecnológica del Perú.

Vasile, C. Pascu, M. (2005). *Practical Guide to Polyethylene. Practical guide begins with general background to the polyethylene family.* Rapra Technology Limited. 93. ISBN: 1-85957-493-9

Canales sectoriales – Interempresas. (2021). *Mejorar las propiedades de poliolefinas recicladas y PET virgen para su aplicación en pallets, envases para mercancías peligrosas y botellas.* <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/355493-Mejorar-propiedades-poliolefinas-recicladas-PET-virgen-aplicacion-pallets-envases.html>

Instituto Tecnológico del Embalaje, Transporte y Logística Valencia – España. (2021). *Mejora de propiedades en poliolefinas recicladas y PET mediante el uso de refuerzos funcionalizados.* <https://www.itene.com/proyectos-de-difusion-abierta/i/15608/56/refuplas>

Paz, M. (2016). *Proyecto integrador: Reciclado de PET a partir de botellas post consumo.* Universidad Nacional de Córdoba.

Sánchez Sierra, M. A. Paredes Quiroga, P. A. (2014). *Estudio de viabilidad técnica de la implementación del polietileno tereftalato como material para la estabilización de taludes.* Trabajo de investigación. Universidad Católica de Colombia.

Awaja, F. Pavel, D. (2005). *Reciclyng of PET.* European Polymer Journal. Revista de publicaciones científicas en el área de sustancias macromoleculares. 41(7). 1453 – 1477. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005

Durán Duarte, J. A. (2010). *Nuevos desarrollos en la modificación y procesamiento del PET con aplicación en envase. Caso de estudio.* Centro de Investigación en Química Aplicada. Coahuila México.

Tecnología de los Plásticos. (30 de mayo de 2011). *Proceso de reciclaje del PET.* <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/proceso-de-reciclaje-del-pet.html>

Reciclamás – España. (23 de julio de 2019). *¿Cómo Se Recicla El PET? Nuevas Vías En Experimentación.* <https://reciclamas.eu/blog/como-se-recicla-el-pet-nuevas-vias-en-experimentacion/>

Elgegren, M. Tiravanti, G. J. Ortíz, B. A. Otero, M. E. Wagner, F. Cerrón, D. A. Nakamatsu, J. (2012). *Reciclaje químico de desechos plásticos.* Revista de la sociedad química del Perú. Publicación de trabajos de carácter científico y tecnológico en el campo de las ciencias químicas. 78 (2). http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2012000200005

Quevedo Ramírez, E. E. (2019). *Evaluación del método de fijación de dióxido de titanio modificado con óxido de cobre (TiO₂/CuO) sobre PET para la remoción de azul de metileno. Proyecto integral de grado. Fundación Universidad América.*

Estrada Moreno, I. A. Mendoza Duarte, M. E. López Martínez E. I. Penott Chang, E. K. Vega Ríos, A. Flores Gallardo, S. G. (2015). *Compuestos de PET reciclado/nanopartículas. Memorias Congreso Internacional de Investigación Científica Multidisciplinaria. Revista publicación de memorias en investigación interdisciplinaria. 1(1). 151 – 158.*

Química.es. (n. d.). *Silicato. Portal líder del sector químico y sus proveedores en Sudamérica, México y España.* <https://www.quimica.es/enciclopedia/Silicato.html>

Pascual Bernabéu, J. J. (2015). *Investigación de la mejora de las propiedades mecánicas y térmicas de polipropileno con nanoarcillas para la fabricación de fibras. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Valencia. Alcoy - España.*

Santarén Romé, J. Aguilar Díez, E. Esteban Cubillo, A. Álvarez Berenguer, A. Benito Cano, E. García García, N. Guzmán Perote, J. Tiemblo Magro, P. (2012). *Método de obtención de un compuesto basado en silicatos pseudolaminares y su uso como carga para materiales poliméricos. Patente. Organización mundial de la Propiedad Intelectual. Número de publicación internacional: WO2012/104460-A1.*

Mejía, N. (2018). *Silicato de Aluminio. Artículo científico. Asociación Latinoamericana de Suscriptores Marítimos – ALSUM.* <https://alsum.co/handbook/silicato-de-aluminio/>.

Refil – Argentina. (2021). *Caolín calcinado/ Mica.* <https://www.refil.com.ar/productos-caolin-calcinado-mica.php>

Olvera Venegas, P. R. Hernández Cruz, L. E. (2014). *El caolín y sus aplicaciones industriales. PÄDI. Boletín científico de ciencias básicas e ingenierías. 1 (2).*

Aimplas – Instituto Tecnológico del Plástico. (n.d.) *Ensayos de propiedades mecánicas en plásticos. Valencia, España.* <https://www.aimplas.es/tipos-ensayos/propiedades-mecanicas-de-los-materiales-plasticos/>

Herrero Villar, M. (2018). *Desarrollo de nanocompuestos de poliamida/sepiolita para aplicaciones industriales. Tesis doctoral en Ingeniería Industrial. Universidad de Valladolid. España.*

Valea, A. Miguez, J. C. Mondragón, I. González, M. L. (2007). *Preparación de nanocomposites de poliamida. Anales de la Mecánica de Fractura. Revista de divulgación tecnológica. 1, 359 – 363.*

Chan, K. P. Odle, R. R. Hall, D. V. Maxam, J. L. Stella, A. S. Genovese, S. E. Mullen, T. J. White, J. M. Hagberg, E. (2013). *Procedimientos de preparación de compuestos polímero-arcilla orgánica y artículos derivados de los mismos. Patente.*

Oficina española de patentes y marcas.
Número de publicación 2 432 760.

Molina Saqui, A. R. (2016). Desarrollo de materiales compuestos de matriz termoplástica reforzados con nanopartículas utilizando la técnica de modelado por deposición fundida empleada en manufactura aditiva. Tesis de grado Magister en Ingeniería y Ciencia de los Materiales. Lima, Perú.

Sepet, H. Tarkcioglu, N. Misra, R. (2015). Investigation of mechanical, thermal and Surface properties of nanoclay/HDPE nanocomposites produced industrially by melt mixing approach. Journal of Composite Materials. 50. 3105-3116. <https://doi.org/10.1177/0021998315615653>

Plastics Technology México. (1 de septiembre de 2021). Problemas decisivos en reciclaje de PET: Degradación. <https://www.pt-mexico.com/articulos/problemas-decisivos-en-reciclado-de-pet-degradacion>