

# Scientia et PRAXIS

Vol.04. No.08. Jul-Dic (2024): 192-230

<https://doi.org/10.55965/setp.4.08.a7>

eISSN: 2954-4041

## **Innovación Sostenible en Elastómeros Poliolefinicos: Modelo Predictivo para Dureza, Índice de Fluidez y Expansión en Espumas Reticuladas**

## **Sustainable Innovation in Polyolefin Elastomers: Predictive Model for Hardness, Melt Flow Index and Expansion in Cross-linked Foams**

**Raúl Javier Orea-Monroy. ORCID [0009-0009-5830-5070](https://orcid.org/0009-0009-5830-5070)**

Posgrado CIATEQ, A.C.

Centro de Tecnología Avanzada AC.

Querétaro, Querétaro, México

e-mail: [roream02@gmail.com](mailto:roream02@gmail.com)

**José Fernando Guillén-Guzmán. ORCID [0000-0002-5353-8838](https://orcid.org/0000-0002-5353-8838)**

Coordinación de Inteligencia Competitiva

Centro de Tecnología Avanzada AC.

Querétaro, Querétaro, México

e-mail: [jose.guillen@ciateq.mx](mailto:jose.guillen@ciateq.mx)

**Palabras Clave:** espumas poliolefinicas reticuladas, elastómeros poliolefinicos, modelo predictivo, relación de expansión, índice de fluidez, innovación sostenible.

**Keywords:** cross-linked polyolefin foams, polyolefin elastomers, predictive model, expansion ratio, melt flow index, sustainable innovation.

**Recibido:** 2-Ago-2024; **Aceptado:** 10-Nov-2024

---

## RESUMEN

**Contexto.** Este estudio responde a la creciente demanda de innovaciones en espumas poliolefinicas reticuladas mediante el desarrollo de un modelo predictivo para estos materiales, que reduce los tiempos de formulación al predecir propiedades clave, optimizando el uso de materiales y reduciendo el desperdicio. Esto contribuye a una producción industrial más sostenible y minimiza la necesidad de experimentación extensa, alineándose con los objetivos de desarrollo sostenible.

**Problema.** La falta de modelos predictivos precisos para estimar propiedades clave en el diseño de compuestos dificulta mejorar la eficiencia y calidad, generando desperdicio de materiales y energía. ¿Cómo desarrollar un modelo predictivo innovador y confiable que minimice los tiempos de diseño de fórmulas y optimice el uso de recursos, promoviendo un desarrollo sostenible al reducir el desperdicio y mejorar la eficiencia?

**Objetivo.** Este trabajo busca establecer un modelo predictivo que optimice el rendimiento de materiales poliméricos, integrando innovación y sostenibilidad en alineación con los **ODS** de la **ONU**.

**Metodología.** Se validaron ecuaciones predictivas basadas en la ley de mezclas contra datos experimentales, para predecir las propiedades de los compuestos poliolefinicos, así como el cambio de estas una vez espumado el material.

**Hallazgos Teóricos y Prácticos.** El modelo desarrollado predijo con precisión suficiente ( $R^2 > 0.95$ ) las propiedades estudiadas, contribuyendo al conocimiento de materiales y permitiendo optimizar recursos y apoyando a las **ODS 9, 12 y 13** al contribuir con prácticas de producción tendientes a optimizar los materiales empleados en mezclas poliméricas. Y reduciendo el desperdicio y desecho de materiales y energía

**Originalidad desde el punto de vista transdisciplinario y de innovación sostenible.** Este trabajo destaca por su enfoque en el uso de un modelo predictivo para aditivos no convencionales y la aplicación de *valores estimados funcionalmente*, promoviendo una producción sostenible acorde con los **ODS**.

**Conclusiones y limitaciones.** A pesar de la diversidad en materias primas, el modelo propuesto ofrece una base sólida para estudios futuros y posibles aplicaciones con otros aditivos y condiciones de procesamiento, manteniendo siempre la alineación con la sostenibilidad de la producción.

## ABSTRACT

**Context.** This study responds to the growing demand for innovations in cross-linked polyolefin foams by developing a **predictive model** for cross-linked polyolefin foams, which reduces formulation times by predicting key properties, optimizing material usage and reducing waste. This contributes to more **sustainable industrial production** and minimizes the need for extensive experimentation, aligning with **sustainable development goals**.

**Problem.** The lack of accurate predictive models to estimate key properties in compound design makes it difficult to improve efficiency and quality, generating waste of materials and energy. How to develop an innovative and reliable predictive model that minimizes formula design times and optimizes resource use, promoting sustainable development by reducing waste and improving efficiency?

**Purpose.** This work seeks to establish a **predictive model** that optimizes the performance of polymeric materials, integrating innovation and sustainability in alignment with the **UN SDGs**.

**Methodology.** Predictive equations based on the **law of mixtures** were validated against experimental data to predict the properties of polyolefin compounds, as well as the change in these once the material is foamed.

**Theoretical and practical Findings.** The developed model accurately predicts the studied properties ( $R^2 > 0.95$ ), contributing to materials knowledge and enabling resource and efficiency optimization in the industry. This supports SDGs 9, 12, and 13 by promoting production practices aimed at optimizing materials used in polymeric blends, reducing material and energy waste.

**Originality from a transdisciplinary and sustainable innovation point of view.** This work stands out for its focus on the use of a predictive model for non-conventional additives and the application of functionally estimated values, promoting sustainable production in line with the **SDGs**.

**Conclusions and limitations.** Despite the diversity in raw materials, the proposed model offers a solid basis for future studies and applications with other additives and processing conditions, , always maintaining alignment with sustainable production.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La **innovación sostenible** es esencial para el desarrollo de materiales poliméricos que optimicen tanto la eficiencia como la calidad de los productos, y reduzcan el impacto ambiental de los procesos industriales. En la actualidad, la industria de materiales poliméricos se ha orientado hacia este enfoque alineando sus prácticas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (**ODS**) de la Agenda 2030 de la ONU (Naciones Unidas, 2018). Esto ha llevado a un interés creciente en **modelos predictivos** que optimicen el uso de recursos y minimicen el desperdicio en el diseño y producción.

Las espumas de poliolefina reticulada, materiales ampliamente empleados en la industria automotriz, en el sector del calzado, en equipamiento deportivo y en equipo de protección personal, se destacan por su ligereza, capacidad de absorción de impactos y propiedades de aislamiento térmico y acústico (TROCELLEN GmbH, 2023). Estas características fundamentales hacen que las espumas sean versátiles y adecuadas para diversas aplicaciones industriales. Sin embargo, el diseño de estas espumas requiere precisión en la predicción de propiedades clave como la relación de expansión, la dureza y el índice de fluidéz, ya que estas propiedades son determinantes para el desempeño del producto en diferentes aplicaciones.

Los compuestos poliméricos utilizados para fabricar espumas contienen agentes espumantes y peróxidos. Bajo la acción del calor, estos compuestos generan una estructura expandida y reticulada. Durante el proceso de moldeo, el volumen de la pieza aumenta más allá de la del molde, estabilizándose al enfriarse y alcanzando sus dimensiones finales. La **relación de expansión (ER)** y la **dureza**, medida en la escala Shore A (**ShA**), son propiedades fundamentales para definir la aplicación de la espuma y su resistencia. Además, el **índice de fluidéz (MFI)** es esencial para comprender el comportamiento del material durante el proceso de inyección.

En el ajuste de compuestos espumables, el método predominante ha sido el de ensayo y error, lo cual implica un alto consumo de materiales y una elevada cantidad de pruebas, con el consecuente incremento en desperdicio y costos. La falta de modelos predictivos precisos en el diseño de formulaciones limita la capacidad de optimizar estos materiales en términos de eficiencia y sostenibilidad. En respuesta a esta necesidad, este estudio propone un modelo

predictivo que utiliza ecuaciones específicas y programación lineal para anticipar propiedades clave de las espumas de poliolefina. Esto permite adaptarse a variaciones en las materias primas, y reducir el consumo de recursos en las etapas de diseño y producción.

El objetivo de este estudio es integrar la innovación y la sostenibilidad en el desarrollo de materiales poliméricos, alineándose con los **ODS 9, 12 y 13**. Estos objetivos buscan promover la industrialización inclusiva y sostenible, el uso responsable de los recursos y la acción climática.

El modelo predictivo propuesto tiene como finalidad optimizar la producción de espumas poliolefínicas al reducir desperdicios, mejorar la eficiencia de materiales y minimizar emisiones, contribuyendo a una economía circular. La investigación establece una base teórica y práctica para desarrollar formulaciones sostenibles, promoviendo la eficiencia y disminuyendo el impacto ambiental en la industria de espumas, alineando la producción con los principios de economía circular y sostenibilidad industrial.

## 2. CONTEXTUALIZACIÓN.

Esta sección examina la composición de las espumas poliolefínicas, el contexto global y local del campo, y su impacto en el desarrollo sostenible, en consonancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (**ODS**) de la Agenda 2030 de la ONU.

### 2.1. Composición de las espumas poliolefínicas

Cuando se requiere de alto confort en la aplicación final, se prefiere, como resina base, el uso de elastómeros poliolefínicos (**POE, OBC**) (Dow Inc., 2024) que pueden ser combinados con copolímeros de etileno (**EVA** <sup>[CAS 24937-78-8]</sup>, **EPDM**) <sup>Nota 1</sup>. Los compuestos contienen espumantes químicos, principalmente exotérmicos, como la Azodicarbonamida (**ADC** <sup>[CAS 123-77-3]</sup>) o el 4,4'-Oxybis(benzenesulfonylhydrazide) (**OBSH** <sup>[CAS 80-51-3]</sup>).

También debe de incluirse un agente de reticulado, generalmente fuentes de radicales libres (Peróxido de dicumilo (**DCP** <sup>[CAS 80-43-3]</sup>), bis-(ter-butilperoxyisopropil)benzeno (**BIPB** <sup>[CAS 25155-25-3]</sup>)).

---

Nota <sup>1</sup> Todos los números CAS (Chemical Abstract Service) fueron consultados en la página de la Agencia Europea de Química (European Chemicals Agency, n.d.)

El uso de cargas minerales, principalmente carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$  [CAS 471-34-1]), tiene la tiene las funciones de mejorar la productividad, reducir la energía requerida, aumentar la eficiencia de extrusión y controlar el peso y volumen de los productos. La selección adecuada de  $\text{CaCO}_3$  es esencial para lograr resultados deseados (Roussel et al., 2005).

En los procesos de espumado por inyección, el compuesto es ingresado fundido en un molde caliente, que permanece cerrado a presión el tiempo suficiente para que se den las dos reacciones químicas necesarias para obtener una espuma estable.

## **2.2. Contextualización Global y Local de la Industria e Innovación en Elastómeros Poliolefinicos.**

Las espumas poliolefinicas son materiales versátiles y ligeros usados en diversas aplicaciones debido a sus excelentes propiedades mecánicas y térmicas. La industria global de espumas poliolefinicas, impulsada por sectores como el automotriz, el calzado y el embalaje, ha avanzado significativamente en la optimización de procesos y la mejora de materiales. La capacidad de predecir propiedades como la **ER**, dureza e **MFI** es crucial para optimizar la producción y mejorar la sostenibilidad, alineándose con el **ODS 9** mediante la innovación tecnológica. Países líderes como Estados Unidos y Japón promueven una producción más eficiente y sostenible, cumpliendo con el **ODS 12** al adoptar prácticas más ecológicas. La tendencia en el desarrollo de poliolefinas reticuladas en general se centra principalmente en tres áreas: uso de nanocompuestos, biodegradabilidad y reciclaje. (Antunes, 2024; Wu et al., 2021; Zhang et al., 2024).

En México, la implementación de modelos predictivos para predecir las propiedades de espumas poliolefinicas se ve influenciada por factores como la disponibilidad de materias primas y las capacidades tecnológicas. las PYMEs colaboran con universidades y centros de investigación para mejorar procesos, aunque la baja inversión en investigación y desarrollo (I&D) sigue siendo un desafío, a pesar de que sigue siendo crucial para fortalecer el desarrollo tecnológico y la capacidad de innovación de las industrias avanzadas en México. La implementación de modelos predictivos para pronosticar propiedades de las espumas es requerida para mejorar la eficiencia y reducir el desperdicio, para contribuir también al **ODS 12**

y apoyar el **ODS 13** por la reducción al impacto climático mediante el uso más eficiente de los recursos y la disminución de emisiones durante la producción (Castillo-Esparza et al., 2024; Naciones Unidas, 2018).

### 2.3. Relación entre el Sujeto y el Objeto de Estudio, Impacto y Relevancia

La relación entre el sujeto de estudio (las espumas poliolefinicas reticuladas) y el objeto de estudio (la predicción de propiedades físicas) es esencial para entender y optimizar el desempeño de estos materiales en diversas aplicaciones industriales. La capacidad de predecir con precisión estas propiedades facilita la innovación en el diseño de productos que deben cumplir con requisitos específicos de durabilidad y rendimiento, además de mejorar la eficiencia en los procesos productivos, reduciendo el desperdicio y optimizando el uso de recursos.

Desde una perspectiva de **innovación sostenible**, este estudio se alinea directamente con los **Objetivos de Desarrollo Sostenible** (Naciones Unidas, 2018). El **ODS 9** (Industria, Innovación e Infraestructura) promueve la industrialización sostenible a través de la innovación científica y tecnológica (meta 9.5), lo que se refleja en el uso de modelos predictivos que aceleran el desarrollo y contribuyen a la mejora de la calidad del producto final y reducen el tiempo de ajustes del proceso productivo.

A su vez, el **ODS 12** (Producción y Consumo Responsables) destaca la importancia de minimizar el impacto ambiental mediante una producción más eficiente, lo que se logra con la implementación de estos modelos, que optimizan la utilización de materiales y energía fortaleciendo la capacidad científica y tecnológica para avanzar hacia modalidades de producción más sostenibles (meta 12a). Además, el **ODS 13** (Acción por el Clima) es relevante, ya que la reducción de desperdicio y la mejora en la eficiencia de los procesos productivos disminuyen las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo a una menor huella de carbono en la industria de espumas poliolefinicas.

Al integrar conocimientos de diversas disciplinas y aplicar un enfoque innovador, este trabajo además de contribuir al avance del estado del arte, proporciona herramientas que contribuyen a enfrentar los desafíos actuales de la sostenibilidad industrial, en consonancia con la Agenda 2030 de la ONU.

### **3. REVISIÓN DE LA LITERATURA**

La innovación sostenible en modelos predictivos para calcular las propiedades de elastómeros poliolefinicos inyectables para espumas reticuladas es un campo en crecimiento con gran valor industrial y científico. La combinación de datos experimentales y teóricos, junto a un enfoque transdisciplinario, permite crear modelos precisos que optimizan la eficiencia y sostenibilidad en la fabricación. Esta revisión bibliográfica respaldará, con información técnica, la alineación de esta investigación con los principios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

#### **3.1. Innovación sostenible**

La innovación sostenible, según la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, integra tecnologías, productos y procesos que promueven el crecimiento económico, minimizan el impacto ambiental y mejoran el bienestar social (Naciones Unidas, 2018). La innovación sostenible abarca un enfoque holístico en las tres dimensiones de la sostenibilidad: ambiental, económica y social. Este trabajo se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente los **ODS 9, 12 y 13**.

El **ODS 9** (Industria, Innovación e Infraestructura) promueve la innovación tecnológica para lograr una industrialización sostenible. Aquí, los modelos predictivos optimizan los procesos de fabricación de elastómeros poliolefinicos, mejorando la eficiencia y reduciendo los tiempos de desarrollo. El **ODS 12** (Producción y Consumo Responsables) fomenta el uso eficiente de recursos, lo que se logra en este estudio a través de la reducción de desperdicios en el desarrollo y ajuste de procesos. Además, el **ODS 13** (Acción por el Clima) se ve impactado positivamente, ya que los procesos más eficientes disminuyen las emisiones de gases de efecto invernadero, reduciendo la huella de carbono de la industria.

#### **3.2. Regla de Mezclas**

La regla de mezclas es un modelo matemático utilizado para predecir las propiedades de materiales compuestos basándose en las propiedades de sus componentes individuales y sus fracciones volumétricas o de masa. Se aplica comúnmente en la ciencia de materiales e

ingeniería, especialmente cuando se trabaja con compuestos formados por dos o más fases distintas (por ejemplo, fibras y una matriz) (Gibson, 2007).

Existen dos formas principales de la regla de mezclas (Luo, 2022), el **Modelo de Voigt** (Límite Superior) que asume que la carga o fuerza aplicada se aplica de tal manera que ambas fases experimentan la misma deformación y se define como se indica en la ecuación **Eq 1**. El **Modelo de Reuss** (Límite Inferior) asume que la carga se aplica de tal manera que ambas fases experimentan el mismo esfuerzo y se define de acuerdo con la **Eq 2**.

<b>Eq 1. Modelo de Voigt...</b>	$P_C = \sum_{i=1}^n V_i P_i$
---------------------------------	------------------------------

<b>Eq 2. Modelo de Reuss...</b>	$\frac{1}{P_C} = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{P_i}$
---------------------------------	--

donde:

- $P_C$  es la propiedad del compuesto.
- $V_i$  es la fracción volumétrica del componente  $i$ .
- $P_i$  es la propiedad del componente  $i$ .

El **modelo de Voigt** se aplica de manera más efectiva a situaciones en las que los componentes están fuertemente adheridos entre sí, lo que asegura que se deformen de manera uniforme. El modelo de Reuss es más aplicable en situaciones donde los componentes del material compuesto pueden deformarse de manera independiente y están menos fuertemente acoplados, como en materiales compuestos con una matriz y partículas de refuerzo distribuidas de manera dispersa (Ridzuan-Mansor et al., 2013).

La principal limitación de la regla de mezclas es que ambos modelos son aproximaciones ideales y no siempre se alinean con el comportamiento real de los materiales compuestos, especialmente cuando la microestructura del material o las condiciones de carga no cumplen con las suposiciones subyacentes de cada modelo. Además, la regla de mezclas se aplica típicamente a propiedades lineales y puede no predecir con precisión el comportamiento no lineal.

### 3.3. Expansión de Espumas Poliolefinicas

La expansión de espumas poliolefinicas es un proceso complejo que depende de factores como la composición, el agente espumante y las condiciones de procesamiento. Estudios recientes indican que el uso de agentes como azodicarbonamida (ADC), junto con un control preciso de temperatura y presión, son cruciales para lograr una estructura celular homogénea y propiedades óptimas (Dealy y Park, 2006). Morales-Rivera y Zuluaga-Corral analizaron espumas de copolímero EVA y caucho natural utilizando DSC y TGA para establecer correlaciones entre la composición y propiedades como la resistencia a la tracción y la reticulación. (Morales-Rivera y Zuluaga-Corrales, 2006).

Oliveira-Salmazo estudió la cinética de espumación y destacó la importancia de la reticulación química para controlar la estructura celular y las propiedades finales en espumas basadas en caucho natural y poliolefinas.(Oliveira-Salmazo, 2015).

Eaves (1997) revisó espumas de poliolefinas metalocénicas (mPE), destacando sus ventajas en resistencia a la tracción, desgarro y capacidades de termoformado frente a espumas de LDPE y copolímeros de etileno. (Eaves, 1997).

El cambio de densidad al reticular (y espumar) de un compuesto trae consigo la modificación de las características mecánicas de una espuma. La medida de la correlación del cambio del volumen se denomina Relación de Expansión (**ER**, *Expansion Ratio*), y es la principal propiedad que define una espuma inyectable para el diseño de los moldes. El **ER** está definido por la ecuación **Eq 3**.

**Eq 3.** Definición de la relación de expansión...

$$ER = \frac{v_f}{v_o} = \frac{\rho_o}{\rho_f} = \rho_o(v_o + \Delta v)$$

donde:

- $ER$  es la relación de expansión, adimensional.
- $v_f$  y  $v_o$  son los volúmenes final e inicial del compuesto,  $\text{cm}^3/\text{g}$ .
- $\rho_o$  y  $\rho_f$  son las densidades inicial y final del compuesto,  $\text{g}/\text{cm}^3$ .
- $\Delta v$  es el cambio de volumen al reaccionar el compuesto.

En el ámbito industrial también se maneja la expansión unidireccional ( $ER_u$ ), que consiste en la relación unidimensional del tamaño de una longitud de la muestra espumada entre el

tamaño de la cavidad del molde, por lo que  $ER = ER_u^3$ . Algunos valores comunes en la industria del calzado para el  $ER_u$  son 1.4, 1.5 y 1.6.

La densidad del material espumado depende de la contracción inducida por el peróxido, que aumenta la densidad al reticular la matriz polimérica, y de la expansión causada por el espumante, que disminuye la densidad al formar celdas. Para lograr pronósticos precisos, es esencial considerar el efecto combinado y opuesto de estas dos reacciones.

### 3.4. Dureza de Espumas Poliolefínicas

La dureza de las espumas poliolefínicas está influenciada por el grado de reticulación, la **ER** y la composición de la mezcla polimérica. Investigaciones han mostrado que el uso de peróxidos como el de dicumilo (**DCP**) para la reticulación puede mejorar significativamente la dureza y otras propiedades mecánicas de las espumas (Rodríguez-Pérez, 2005).

### 3.5. Índice de Fluidéz de Elastómeros Poliolefínicos

El índice de fluidez de los elastómeros poliolefínicos es una medida crítica de su procesabilidad y rendimiento final. Estudios han indicado que la manipulación de la formulación de la mezcla y las condiciones de procesamiento, como la temperatura y la presión, pueden optimizar el índice de fluidez y mejorar la calidad del producto final (Dealy y Park, 2006).

### 3.6. Hipótesis

Considerando el alto impacto que representa la cantidad de desperdicio de materiales plásticos en el planeta, es imperante desarrollar diversas iniciativas de investigación aplicada y desarrollo tecnológico tendientes a la reducción y/o manejo adecuado de los materiales plásticos. Con esta motivación se formula la siguiente hipótesis:

*“La relación de expansión, la dureza y el índice de fluidez de las espumas poliolefínicas inyectables son parámetros que pueden predecirse, controlarse y optimizarse a través de un modelo predictivo constituido por un sistema de ecuaciones que integren datos experimentales y la formulación del compuesto polimérico”.*

Esta hipótesis asume que la implementación de este modelo permitirá no solo mejorar la eficiencia en el proceso de producción, sino también reducir el uso de recursos y minimizar el

impacto ambiental, contribuyendo así a la innovación sostenible al integrar prácticas que promuevan un desarrollo industrial responsable, eficiente y alineado con los principios de sostenibilidad ambiental y social.

### **3.7. Modelo Conceptual/Modelo Experimental.**

El modelo conceptual propuesto en este estudio se basa en la integración de datos experimentales y teóricos para predecir con precisión adecuada las propiedades críticas de las espumas poliolefinicas. Al aplicar principios de la ciencia de polímeros y ciencias computacionales, modelos matemáticos como la regla de mezclas y ajustes logarítmicos, así como correlación estadística y análisis de varianza, el modelo permite optimizar la formulación de los compuestos y mejorar su desempeño en aplicaciones industriales.

En el ámbito experimental, se utiliza una combinación de agentes espumantes y de reticulación para evaluar sus efectos sobre las propiedades mecánicas de las espumas poliméricas (Feijoo e Igualada, 2013). Estudios han demostrado que la combinación de estos agentes permite obtener materiales con una estructura celular homogénea y propiedades mecánicas mejoradas (Morales-Rivera y Zuluaga-Corrales, 2006). Este enfoque transdisciplinario no solo mejora la calidad y eficiencia del proceso de producción, sino que también reduce el desperdicio de materiales y el tiempo de desarrollo, promoviendo un uso más eficiente de los recursos.

## **4. METODOLOGÍA**

La metodología de este estudio se desarrolló para optimizar la producción de espumas poliolefinicas y contribuir a la sostenibilidad industrial mediante un modelo predictivo que redujera la experimentación y mejorara la sostenibilidad del proceso.

Este modelo debía permitir estimar propiedades clave, reducir el consumo de materiales y minimizar el desperdicio generado en las etapas de diseño y ajuste de la producción, disminuyendo así la huella ambiental y la necesidad de ensayos físicos extensivos. Se emplearon modelos matemáticos y programación lineal, alineándose con los objetivos de sostenibilidad al promover un uso eficiente de los recursos y reducir el impacto ambiental. En conjunto, esta metodología se alinea con los objetivos de sostenibilidad, promoviendo prácticas

que optimizan el uso de recursos y reducen el impacto ambiental en la producción de espumas de poliolefina.

#### 4.1. Diseño Experimental

Para desarrollar el modelo predictivo, en 2024 se utilizaron datos experimentales recolectados y evaluados en León, Guanajuato, México (altura: 1808 msnm; presión atmosférica: 0.9934 atm) (Steffen, 2024). Se seleccionaron varias composiciones con diferentes concentraciones de agentes espumantes y peróxidos, las cuales se prepararon y caracterizaron en laboratorio. Las propiedades evaluadas incluyeron la **densidad**, relación de expansión (**ER**), la dureza Shore A (**ShA**) y el índice de fluidez (**MFI**). Estas propiedades se consideraron fundamentales para garantizar el desempeño del producto final en distintas aplicaciones industriales. Este enfoque contribuyó a reducir la cantidad de experimentación necesaria, al proporcionar una estructura sistemática para la obtención de datos, evitando pruebas innecesarias y minimizando el consumo de materiales. La reducción de experimentos físicos no solo permitió un uso más eficiente de los recursos, sino que también disminuyó la generación de residuos, apoyando así los principios de sostenibilidad

Se utilizaron como resinas base tres grados de **POE** y dos grados de **EVA**, tres lotes distintos de cada uno., para generar variantes para la validación estadística, identificados mediante un código alfanumérico (*X* para el grado, *Y* para el lote). El agente entrecruzante fue peróxido de dicumilo diluido al 40% (**DCP40**), mientras que los espumantes utilizados fueron **ADC** y **OBSH**, junto con óxido de zinc (**ZnO**) como agente nucleante, además carbonato de calcio micronizado (3  $\mu\text{m}$ ) sin tratamiento superficial. En la **Tabla 1** se muestran las propiedades evaluadas de cada material utilizado en la experimentación. Las formulaciones fueron diseñadas en partes por cada cien de resina (phr <sup>Nota 2</sup>) con precisión de diseño de 0.01.

La mezcla se realizó en un *kneader* de 5 litros con un factor de carga de 75% a 110°C y se inyectaron con un perfil de temperaturas de 80-85 °C y una temperatura de fundido de 100°C, en moldes a 180°C con 360 segundos de curado.

---

Nota <sup>2</sup>. PHR (partes por cien de resina) es una unidad que indica la cantidad de aditivos por cada 100 partes de resina base, esencial para formular mezclas de polímeros. Esta unidad garantiza una proporción consistente de cada componente, independientemente del tamaño del lote, y ofrece ventajas como: (a) consistencia en formulaciones, (b) cálculos simplificados y (c) claridad en los niveles de aditivos. (Wickson y Grossman, 2008).

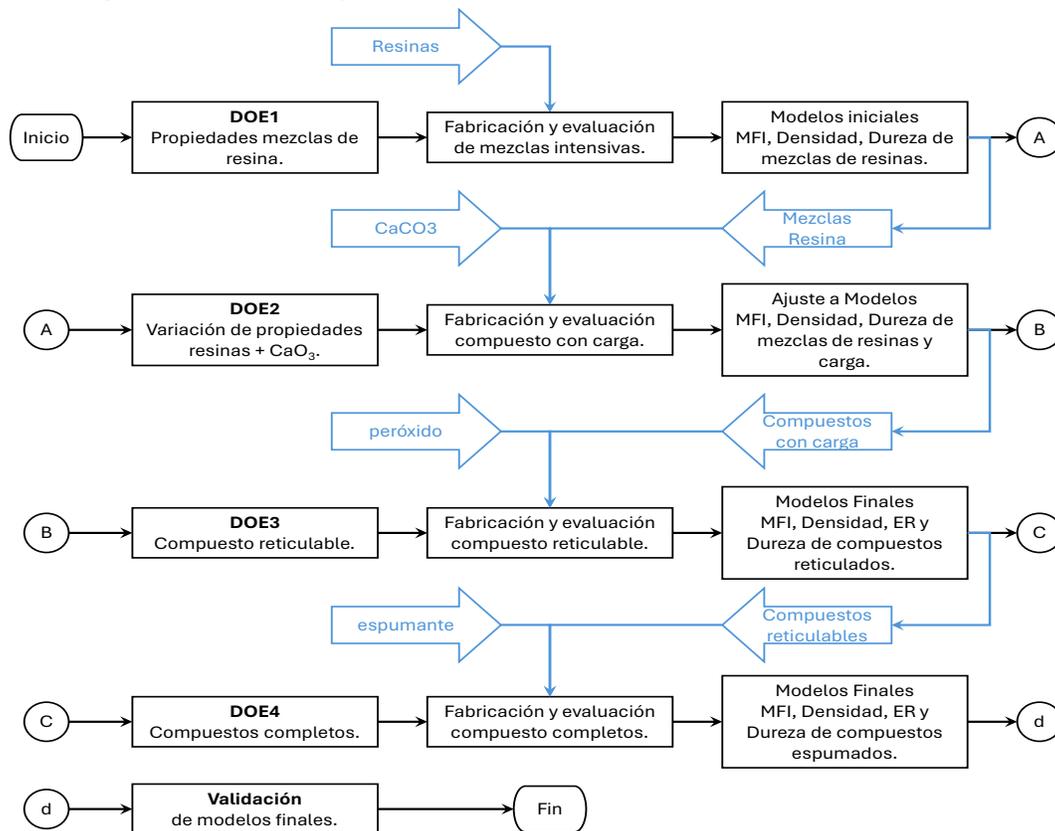
**Tabla 1. Valor de las propiedades de la materia prima.**

Raw Material	MFI190/2.16 [g/10min] ASTM D1238			Density [g/cm3] ASTM D792			Hardness [Shore A] ASTM D2240			Vinyl Acetate Content [%]	Gas Evolution @STP [cm3/g]
	Lot 1	Lot 2	Lot 3	Lot 1	Lot 2	Lot 3	Lot 1	Lot 2	Lot 3	Lot 1, 2 &3	Lot 1, 2 &3
POE1	27.30	31.20	27.60	0.887	0.887	0.844	73.4	71.3	69.8	0	0
POE2	0.98	1.02	0.90	0.858	0.912	0.885	81.5	83.2	84.0	0	0
POE3	0.52	0.50	0.51	0.877	0.885	0.842	69.3	67.9	67.9	0	0
EVA1	3.00	2.91	3.27	0.970	0.961	0.951	83.0	84.7	85.5	28	0
EVA21	56.68	56.16	53.04	0.946	0.984	0.965	40.0	38.8	39.5	40	0
DCP40	N/A			1.020			N/A			0	0
StAc	N/A			0.941			N/A			0	0
ZnO	N/A			5.610			N/A			0	0
ADC	N/A			1.650			N/A			0	220
OBSH	N/A			1.550			N/A			0	125
CaCO3	N/A			2.700			N/A			0	0

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de los fabricantes y evaluaciones de laboratorio.

La **Figura 1** muestra el flujo de actividades (negro) y el flujo de materiales (azul) que se siguieron en el desarrollo del estudio.

**Figura 1. Flujo de actividades y materiales.**



Fuente: Elaboración propia

Se diseñaron cuatro experimentos en secuencia aditiva para desarrollar las ecuaciones para pronosticar cada propiedad y construir el sistema que construyó el modelo predictivo, añadiendo gradualmente aditivos a la mezcla de resina base. Cada fórmula se identificó como  $Fdk$ , donde  $F$  indica fórmula,  $d$  el número de diseño, y  $k$  un número, a dos dígitos, consecutivo asignado por Minitab. Tras evaluar las fórmulas en laboratorio, se analizaron las ecuaciones para construir el modelo predictivo para las propiedades **MFI**<sub>190/2.16</sub> [ $\frac{g}{10min}$ ], **Densidad** ( $[g/cm^3]$ ), y **Dureza** [Shore A].

Cada experimento consideró diversas ecuaciones basadas en teorías como promedios ponderados, modelos logarítmicos y **modelos de Voigt y Reuss**. Se realizó un análisis de varianza y se compararon los ajustes con datos experimentales, descartando ecuaciones con  $R^2$  inferiores a 0.95 y asegurando que las ecuaciones seleccionadas fueran precisas y confiables.

El **DOE1** incluye sólo la mezcla intensiva de las resinas. Se diseñó usando la herramienta de creación de diseño de mezclas de Minitab para 5 componentes con un tipo de diseño de Vértices extremos grado 1 con punto central. Una vez establecido el diseño (resultante en 17 fórmulas), se efectuó una aleatorización de los lotes a emplear para cada uno de los grados de las resinas usadas. La **Tabla 2** muestra el resultado del diseño de experimentos 1 de Minitab.

**Tabla 2. DOE1 y aleatorización de lotes. Concentración en phr.**

StdOrder (k)	POE1	POE2	POE3	EVA1	EVA2	Lot POE1	Lot POE2	Lot POE3	Lot EVA1	Lot EVA2
01	75	5	10	5	5	3	2	1	3	3
02	35	15	20	20	10	3	1	1	3	1
03	60	5	10	20	5	1	1	3	2	3
04	55	5	10	20	10	2	3	3	1	3
05	50	15	10	20	5	1	2	3	3	1
06	45	15	10	20	10	3	3	1	1	2
07	70	5	10	5	10	1	1	2	1	3
08	65	15	10	5	5	1	3	2	3	2
09	60	15	10	5	10	2	3	3	2	1
10	50	5	20	20	5	1	2	1	2	1
11	45	5	20	20	10	2	3	2	1	2
12	40	15	20	20	5	2	1	2	2	1
13	65	5	20	5	5	2	3	3	1	1
14	60	5	20	5	10	3	2	2	1	3
15	55	15	20	5	5	1	2	1	2	2
16	50	15	20	5	10	2	2	2	3	2
17	55	10	15	12,5	7,5	3	1	1	3	3

Fuente: Elaboración propia. Diseño realizado con MINITAB® Release 14.1

En el **DOE2** se tomaron las fórmulas  $F1k$  y se alternaron tres concentraciones de **CaCO3** para analizar los cambios generados en cada una de las propiedades. Hasta este momento, las fórmulas siguen siendo termoplásticas, por lo que las condiciones para la medición del **MFI**

podía hacerse a 2.16 kg, 190°C. En este punto fue posible construir también la ecuación para la conversión del MFI con el cambio de condiciones de evaluación a 120 °C, 21.6 kg (Conversión  $MFI_{190/2.16}$  a  $MFI_{120/21.6}$ ).

Para el **DOE3** se adicionó a las **F2k** el **DCP40** en 4 niveles y se determinó el cambio de la dureza y de la densidad. En este punto, la medición del MFI se realizan a las condiciones de 120 °C, 21.6 kg. En el **DOE4** se completaron los compuestos con el sistema espumante y se concluyó el modelo adicionando el cálculo del ER. La **Tabla 3** muestra las fórmulas *Fdk*, para los tres primeros **DOEs**, utilizadas en este estudio. Las fórmulas se elaboraron en forma aditiva, por lo que para cada **DOE** del 2 al 3 se citan las phr del **DOE** anterior.

**Tabla 3 Fórmulas utilizadas del DOE1 al DOE3 [phr].**

	Materia prima	F101	F102	F103	F104	F105	F106	F107	F108	F109	F110	F111	F112	F113	F114	F115	F116	F117
	DOE1	POE11			60		50		70	65		50					55	
POE12					55					60		45	40	65			50	
POE13		75	35				45								60			55
POE21			15	5				5					15					10
POE22		5				15					5				5	15	15	
POE23					5		15		15	15		5		5				
POE31		10	20				10				20					20		15
POE32								10	10			20	20		20		20	
POE33				10	10	10				10				20				
EVA11					20		20	5				20		5	5			
EVA12				20						5	20		20			5		
EVA13		5	20			20			5								5	12.5
EVA21			10			5				10	5		5	5				
EVA22							10		5			10				5	10	
EVA23	5		5	10				10						10				7.5
<b>Total</b>	<b>100</b>																	
DOE2	Materia prima	F201	F202	F203	F204	F205	F206	F207	F208	F209	F210	F211	F212	F213	F214	F215	F216	F217
	F1k	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	CaCO3	5.00	10.00	15.00	5.00	10.00	15.00	5.00	10.00	15.00	5.00	10.00	15.00	5.00	10.00	15.00	5.00	10.00
	<b>Total</b>	<b>105.00</b>	<b>110.00</b>	<b>115.00</b>	<b>105.00</b>	<b>110.00</b>												
DOE3	Materia prima	F301	F302	F303	F304	F305	F306	F307	F308	F309	F310	F311	F312	F313	F314	F315	F316	F317
	F2k	105.0	110.0	115.0	105.0	110.0	115.0	105.0	110.0	115.0	105.0	110.0	115.0	105.0	110.0	115.0	105.0	110.0
	DCP40	2.90	3.00	3.10	3.20	2.90	3.00	3.10	3.20	2.90	3.00	3.10	3.20	2.90	3.00	3.10	3.20	2.90
	StAc	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
	<b>Total</b>	<b>109.4</b>	<b>114.5</b>	<b>119.6</b>	<b>109.7</b>	<b>114.4</b>	<b>119.5</b>	<b>109.6</b>	<b>114.7</b>	<b>119.4</b>	<b>109.5</b>	<b>114.6</b>	<b>119.7</b>	<b>109.4</b>	<b>114.5</b>	<b>119.6</b>	<b>109.7</b>	<b>114.4</b>

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2. Desarrollo del Modelo Predictivo

El desarrollo del modelo predictivo se basó en la **regla de mezclas** y en ecuaciones de regresión múltiple para estimar las propiedades de las espumas en función de la composición de los materiales y las condiciones del proceso. Los datos experimentales obtenidos de cada **DOE** se utilizaron para ajustar las ecuaciones del modelo, asegurando una predicción precisa de las propiedades clave.

Durante la fase de ajuste y validación del modelo predictivo, se generaron **valores estimados funcionalmente (VEF)**, que son calculados mediante modelaje matemático a partir de efectos observados en ciertos parámetros. Estos valores no corresponden a propiedades inherentes del material ni pueden ser medidos directamente. Por ejemplo, se asignó un **VEF** al **MFI** del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), ya que este material no posee dicha propiedad. Los **VEF** se calcularon maximizando el valor de **R<sup>2</sup>** de las ecuaciones correspondientes mediante programación lineal. El modelo predictivo se validó mediante la comparación de los valores predichos con datos experimentales.

#### 4.3. Contribución a la Sostenibilidad

La metodología empleada en este estudio se diseñó específicamente para contribuir a la sostenibilidad de la producción de espumas poliolefínicas. Al utilizar un enfoque predictivo, se logró reducir el número de experimentos físicos y, por ende, el consumo de materiales y energía. Esta reducción en la experimentación física tuvo un impacto directo en la disminución de las emisiones y en la generación de desechos, apoyando los objetivos de desarrollo sostenible relacionados con la producción responsable y la acción climática (**ODS 12** y **ODS 13**) (Naciones Unidas, 2018).

El uso del modelo predictivo también permitió una mejor gestión de los recursos al optimizar el uso de materias primas y minimizar el desperdicio. Esto se alinea con el **ODS 9**, que busca promover la industrialización sostenible e inclusiva mediante la innovación. Al mejorar la eficiencia del proceso y reducir el impacto ambiental, la metodología propuesta contribuyó de manera tangible a la sostenibilidad del proceso industrial y a la adopción de prácticas más responsables en la industria de materiales poliméricos.

## 5. RESULTADOS

Este capítulo presenta los resultados obtenidos a partir del desarrollo y validación del modelo predictivo para espumas de poliolefina reticulada. Los resultados se organizan de acuerdo con su impacto en la optimización de recursos, la eficiencia energética y la sostenibilidad, buscando siempre evidenciar cómo estos hallazgos contribuyen a un proceso productivo más responsable y alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Para todos los casos se utilizó la nomenclatura mostrada en la **Tabla 4** para las ecuaciones (**Eq**) propuestas.

**Tabla 4. Nomenclatura dada a las variables.**

Variable	Significado
$i$	Indica, como subíndice, el $i$ -ésimo de $n$ componentes empleados en la fórmula.
$c$	Indica, como subíndice, que la propiedad se refiere al compuesto.
$R$	Indica, como subíndice, que la propiedad se refiere al material reticulado.
$E$	Indica, como subíndice, que la propiedad se refiere a la espuma.
$phr_i$	Partes por cada cien de resina del componente $i$ .
$C_i$	Concentración másica del componente $i$ , siendo $C_i = phr_i / \sum_{j=1}^n phr_j$ , y $\sum_{i=1}^n C_i = 1$ .
$\rho$	Densidad, en $g/cm^3$ .
$v_i$	Es el volumen específico del componente $i$ , y se define por $v_i = 1/\rho_i [=] cm^3/g$ .
$V_i$	Fracción volumétrica del componente $i$ , siendo $V_i = C_i v_i / \sum_{j=1}^n C_j v_j$ , y $\sum_{i=1}^n V_i = 1$ .
ShA	Dureza <b>Shore A</b> .
$MFI_{T/W}$	Índice de Fluidez, en $g/10\text{ min}$ , a una temperatura $T$ [ $^{\circ}C$ ] y con una carga $W$ [kg] (ASTM D1238-13, 2013).

Fuente: Elaboración propia.

### 5.1. **DOE1. Propiedades de las mezclas de resina.**

Para pronosticar la **densidad** [ $g/cm^3$ ] (ASTM D792), se evaluaron la **Eq 4** (promedio másico ponderado simple de densidades), la **Eq 5** (promedio ponderado del volumen específico), que se considera más adecuada para componentes con densidades muy diferentes, como cuando se añaden cargas (Julias, 2021) y la **Eq 6**, basada en la regla de mezclas. Se encontró equivalencia entre **Eq 5** y **Eq 6**. Los resultados experimentales, ecuaciones y datos de obtenidos del ANOVA se muestran en la **Tabla 5**, reflejando altos niveles de correlación ( $R^2=0.9794$  y  $R^2=0.9861$ ) sin diferencias estadísticas, lo que podría atribuirse a la similitud en las densidades de las resinas analizadas y a la ausencia de **CaCO<sub>3</sub>**.

**Tabla 5. Resultados experimentales y de regresión de la Densidad de mezclas de resinas [g/cm<sup>3</sup>].**

$\rho_c = \sum_{i=1}^n C_i \rho_i$ <b>Eq 4</b> <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;"><math>R^2=0.9794</math></span>	$\rho_c = 1 / \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\rho_i}$ <b>Eq 5</b> <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;"><math>R^2=0.9861</math></span>																																																																																										
$\rho_c = \sum_{i=1}^n V_i \rho_i$ <b>Eq 6</b> <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;"><math>R^2=0.9861</math></span>																																																																																											
	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>F101</th><th>F102</th><th>F103</th><th>F104</th><th>F105</th><th>F106</th><th>F107</th><th>F108</th><th>F109</th><th>F110</th><th>F111</th><th>F112</th><th>F113</th><th>F114</th><th>F115</th><th>F116</th><th>F117</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Exp</td> <td>0.860</td><td>0.881</td><td>0.898</td><td>0.903</td><td>0.899</td><td>0.888</td><td>0.896</td><td>0.896</td><td>0.890</td><td>0.900</td><td>0.908</td><td>0.900</td><td>0.882</td><td>0.871</td><td>0.897</td><td>0.905</td><td>0.869</td> </tr> <tr> <td>Eq 4</td> <td>0.8621</td><td>0.8843</td><td>0.8998</td><td>0.9068</td><td>0.9020</td><td>0.8927</td><td>0.8973</td><td>0.8946</td><td>0.8918</td><td>0.9040</td><td>0.9128</td><td>0.9000</td><td>0.8850</td><td>0.8740</td><td>0.8973</td><td>0.9033</td><td>0.8728</td> </tr> <tr> <td>Eq 5</td> <td>0.8607</td><td>0.8822</td><td>0.8981</td><td>0.9049</td><td>0.9008</td><td>0.8893</td><td>0.8964</td><td>0.8939</td><td>0.8909</td><td>0.9029</td><td>0.9111</td><td>0.8987</td><td>0.8840</td><td>0.8719</td><td>0.8965</td><td>0.9022</td><td>0.8708</td> </tr> <tr> <td>Eq 6</td> <td>0.8607</td><td>0.8822</td><td>0.8981</td><td>0.9049</td><td>0.9008</td><td>0.8893</td><td>0.8964</td><td>0.8939</td><td>0.8909</td><td>0.9029</td><td>0.9111</td><td>0.8987</td><td>0.8840</td><td>0.8719</td><td>0.8965</td><td>0.9022</td><td>0.8708</td> </tr> </tbody> </table>		F101	F102	F103	F104	F105	F106	F107	F108	F109	F110	F111	F112	F113	F114	F115	F116	F117	Exp	0.860	0.881	0.898	0.903	0.899	0.888	0.896	0.896	0.890	0.900	0.908	0.900	0.882	0.871	0.897	0.905	0.869	Eq 4	0.8621	0.8843	0.8998	0.9068	0.9020	0.8927	0.8973	0.8946	0.8918	0.9040	0.9128	0.9000	0.8850	0.8740	0.8973	0.9033	0.8728	Eq 5	0.8607	0.8822	0.8981	0.9049	0.9008	0.8893	0.8964	0.8939	0.8909	0.9029	0.9111	0.8987	0.8840	0.8719	0.8965	0.9022	0.8708	Eq 6	0.8607	0.8822	0.8981	0.9049	0.9008	0.8893	0.8964	0.8939	0.8909	0.9029	0.9111	0.8987	0.8840	0.8719	0.8965	0.9022	0.8708
	F101	F102	F103	F104	F105	F106	F107	F108	F109	F110	F111	F112	F113	F114	F115	F116	F117																																																																										
Exp	0.860	0.881	0.898	0.903	0.899	0.888	0.896	0.896	0.890	0.900	0.908	0.900	0.882	0.871	0.897	0.905	0.869																																																																										
Eq 4	0.8621	0.8843	0.8998	0.9068	0.9020	0.8927	0.8973	0.8946	0.8918	0.9040	0.9128	0.9000	0.8850	0.8740	0.8973	0.9033	0.8728																																																																										
Eq 5	0.8607	0.8822	0.8981	0.9049	0.9008	0.8893	0.8964	0.8939	0.8909	0.9029	0.9111	0.8987	0.8840	0.8719	0.8965	0.9022	0.8708																																																																										
Eq 6	0.8607	0.8822	0.8981	0.9049	0.9008	0.8893	0.8964	0.8939	0.8909	0.9029	0.9111	0.8987	0.8840	0.8719	0.8965	0.9022	0.8708																																																																										
<p>F = 0.08    P = 0.971    S = 0.01359    R-Sq = 0.37%    R-Sq(adj) = 0.00%    Pooled StDev = 0.01359</p> <p>Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev</p> <table style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Level</th> <th>N</th> <th>Mean</th> <th>StDev</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><b>ρc experimental</b></td> <td>17</td> <td>0.89076</td> <td>0.01375</td> <td>(-----*-----)</td> </tr> <tr> <td><b>Eq 4</b></td> <td>17</td> <td>0.89296</td> <td>0.01344</td> <td>(-----*-----)</td> </tr> <tr> <td><b>Eq 5</b></td> <td>17</td> <td>0.89148</td> <td>0.01359</td> <td>(-----*-----)</td> </tr> <tr> <td><b>Eq 6</b></td> <td>17</td> <td>0.89148</td> <td>0.01359</td> <td>(-----*-----)</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">0.8840    0.8880    0.8920    0.8960</p>		Level	N	Mean	StDev		<b>ρc experimental</b>	17	0.89076	0.01375	(-----*-----)	<b>Eq 4</b>	17	0.89296	0.01344	(-----*-----)	<b>Eq 5</b>	17	0.89148	0.01359	(-----*-----)	<b>Eq 6</b>	17	0.89148	0.01359	(-----*-----)																																																																	
Level	N	Mean	StDev																																																																																								
<b>ρc experimental</b>	17	0.89076	0.01375	(-----*-----)																																																																																							
<b>Eq 4</b>	17	0.89296	0.01344	(-----*-----)																																																																																							
<b>Eq 5</b>	17	0.89148	0.01359	(-----*-----)																																																																																							
<b>Eq 6</b>	17	0.89148	0.01359	(-----*-----)																																																																																							

Fuente: Elaboración propia. Análisis de Varianza (ANOVA) de datos experimentales y Eq's mediante MINITAB.

El análisis del **MFI<sub>190/2.16</sub>** [g/10min] (ASTM D1238) se muestra en la **Tabla 6**. La **Eq 7**, basada en un promedio ponderado de MFI, tuvo un bajo coeficiente de determinación ( $R^2 = 0.7370$ ) y diferencia estadística significativa con los resultados experimentales, por lo que fue descartada. La **Eq 8**, que considera ponderación logarítmica (Malkin e Isayev, 1995), y la **Eq 9**, basada en el **modelo de Voigt** con logaritmo del **MFI**, mostraron un excelente ajuste a los datos experimentales.

**Tabla 6. Resultados experimentales y de regresión del MFI de mezclas de resinas [g/10min].**

$MFI_C = \sum_{i=1}^n C_i MFI_i$ <b>Eq 7</b> <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;"><math>R^2=0.7370</math></span>	$MFI_C = e^{\sum_{i=1}^n C_i \ln(MFI_i)}$ <b>Eq 8</b> <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;"><math>R^2=0.9905</math></span>																																																																																										
$MFI_C = e^{\sum_{i=1}^n V_i \ln(MFI_i)}$ <b>Eq 9</b> <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;"><math>R^2=0.9973</math></span>																																																																																											
	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>F101</th><th>F102</th><th>F103</th><th>F104</th><th>F105</th><th>F106</th><th>F107</th><th>F108</th><th>F109</th><th>F110</th><th>F111</th><th>F112</th><th>F113</th><th>F114</th><th>F115</th><th>F116</th><th>F117</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Exp</td> <td>14.9</td><td>5.5</td><td>10.2</td><td>11.3</td><td>7.9</td><td>7.8</td><td>14.4</td><td>10.0</td><td>11.1</td><td>7.0</td><td>7.7</td><td>5.3</td><td>10.0</td><td>10.4</td><td>6.8</td><td>7.8</td><td>9.1</td> </tr> <tr> <td>Eq 7</td> <td>23.62</td><td>16.23</td><td>19.71</td><td>23.16</td><td>17.34</td><td>18.82</td><td>24.66</td><td>20.90</td><td>24.72</td><td>17.22</td><td>20.40</td><td>16.14</td><td>23.41</td><td>22.17</td><td>18.23</td><td>21.63</td><td>19.74</td> </tr> <tr> <td>Eq 8</td> <td>14.61</td><td>5.30</td><td>10.26</td><td>11.43</td><td>7.60</td><td>7.65</td><td>14.83</td><td>10.23</td><td>11.45</td><td>6.95</td><td>7.59</td><td>5.21</td><td>10.52</td><td>10.03</td><td>7.00</td><td>7.74</td><td>8.76</td> </tr> <tr> <td>Eq 9</td> <td>14.95</td><td>5.34</td><td>10.18</td><td>11.36</td><td>7.59</td><td>7.82</td><td>14.70</td><td>10.16</td><td>11.20</td><td>6.98</td><td>7.55</td><td>5.16</td><td>10.18</td><td>10.27</td><td>6.96</td><td>7.67</td><td>8.91</td> </tr> </tbody> </table>		F101	F102	F103	F104	F105	F106	F107	F108	F109	F110	F111	F112	F113	F114	F115	F116	F117	Exp	14.9	5.5	10.2	11.3	7.9	7.8	14.4	10.0	11.1	7.0	7.7	5.3	10.0	10.4	6.8	7.8	9.1	Eq 7	23.62	16.23	19.71	23.16	17.34	18.82	24.66	20.90	24.72	17.22	20.40	16.14	23.41	22.17	18.23	21.63	19.74	Eq 8	14.61	5.30	10.26	11.43	7.60	7.65	14.83	10.23	11.45	6.95	7.59	5.21	10.52	10.03	7.00	7.74	8.76	Eq 9	14.95	5.34	10.18	11.36	7.59	7.82	14.70	10.16	11.20	6.98	7.55	5.16	10.18	10.27	6.96	7.67	8.91
	F101	F102	F103	F104	F105	F106	F107	F108	F109	F110	F111	F112	F113	F114	F115	F116	F117																																																																										
Exp	14.9	5.5	10.2	11.3	7.9	7.8	14.4	10.0	11.1	7.0	7.7	5.3	10.0	10.4	6.8	7.8	9.1																																																																										
Eq 7	23.62	16.23	19.71	23.16	17.34	18.82	24.66	20.90	24.72	17.22	20.40	16.14	23.41	22.17	18.23	21.63	19.74																																																																										
Eq 8	14.61	5.30	10.26	11.43	7.60	7.65	14.83	10.23	11.45	6.95	7.59	5.21	10.52	10.03	7.00	7.74	8.76																																																																										
Eq 9	14.95	5.34	10.18	11.36	7.59	7.82	14.70	10.16	11.20	6.98	7.55	5.16	10.18	10.27	6.96	7.67	8.91																																																																										



para transformar el **MFI** al medirlo @ 120 °C, 21.6 kg (condición que tendrá que ser usada a partir del **DOE 3**).

La **Tabla 8** muestra los resultados del promedio ponderado (**Eq 4**) y el **modelo de Voigt** expresado como la **Eq 5** y su igualdad con la **Eq 6**. Debido a la diferencia de la densidad entre la mezcla de resinas y la carga mineral, y dado que la **Eq 4** muestra diferencia estadísticamente significativa, se demuestra que la regla de mezclas funciona mucho mejor que el promedio ponderado, por lo que la **Eq 4** ya no se utilizará más en los siguientes análisis.

**Tabla 8. Resultados experimentales y de regresión de la Densidad de compuestos con CaCO3 [g/cm3].**

$\rho_c = \sum_{i=1}^n C_i \rho_i$ <b>Eq 4</b> $R^2 = 0.8650$		$\rho_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\rho_i}} = \sum_{i=1}^n V_i \rho_i$ <b>Eq 5</b> $R^2 = 0.9876$															
	F101	F102	F103	F104	F105	F106	F107	F108	F109	F110	F111	F112	F113	F114	F115	F116	F117
Exp	0.888	0.935	0.977	0.934	0.959	0.973	0.924	0.952	0.974	0.925	0.974	0.979	0.913	0.927	0.982	0.934	0.926
Eq 4	0.9496	1.0494	1.1346	0.9922	1.0655	1.1284	0.9831	1.0587	1.1277	0.9895	1.0753	1.1348	0.9714	1.0400	1.1324	0.9888	1.0389
Eq 5	0.8895	0.9397	0.9838	0.9344	0.9589	0.9745	0.9258	0.9518	0.9762	0.9325	0.9695	0.9843	0.9132	0.9291	0.9821	0.9318	0.9279

F = 32.53 P = 0.000 S = 0.04349 R-Sq = 57.54% R-Sq(adj) = 55.77% Pooled StDev = 0.0435  Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev <table border="1"> <thead> <tr> <th>Level</th> <th>N</th> <th>Mean</th> <th>StDev</th> <th colspan="14">-----+-----</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DOE2 Den Exp</td> <td>17</td> <td>0.9455</td> <td>0.0278</td> <td colspan="14">(----*---)</td> </tr> <tr> <td>Eq 4</td> <td>17</td> <td>1.0506</td> <td>0.0642</td> <td colspan="14">(----*---) (-----*-----)</td> </tr> <tr> <td>Eq 5</td> <td>17</td> <td>0.9474</td> <td>0.0279</td> <td colspan="14">(----*---)</td> </tr> </tbody> </table> Descartandola Eq 4: F = 0.04 P = 0.845 S = 0.02787 R-Sq = 0.12% R-Sq(adj) = 0.00% Pooled StDev = 0.02787																		Level	N	Mean	StDev	-----+-----														DOE2 Den Exp	17	0.9455	0.0278	(----*---)														Eq 4	17	1.0506	0.0642	(----*---) (-----*-----)														Eq 5	17	0.9474	0.0279	(----*---)													
Level	N	Mean	StDev	-----+-----																																																																																					
DOE2 Den Exp	17	0.9455	0.0278	(----*---)																																																																																					
Eq 4	17	1.0506	0.0642	(----*---) (-----*-----)																																																																																					
Eq 5	17	0.9474	0.0279	(----*---)																																																																																					

Fuente: Elaboración propia. Análisis de Varianza (ANOVA) de datos experimentales y Eq's mediante MINITAB.

Se compararon las regresiones del **MFI<sub>190/2.16</sub>**, considerando su logaritmo en forma ponderada (**Eq 8**) y con el **modelo de Voigt** (**Eq 9**) los resultados se reportan en la **Tabla 9**. Se observa que la **Eq 8** posee muy baja correlación y diferencia estadística significativa, por lo que quedará descartada en próximos análisis.

Dado que el **CaCO<sub>3</sub>** no posee la propiedad de **MFI**, se calculó un **VEF** para **MFI<sub>CaCO<sub>3</sub>190/2.16</sub>** mediante la maximización de **R<sup>2</sup>** para la **Eq 9**, quedando es este valor en **0.00025 g/10min**.

**Tabla 9. Resultados experimentales y de regresión del MFI<sub>190/2.16</sub> de compuestos con CaCO<sub>3</sub>.**

$MFI_{C_{190/2.16}} = e^{\sum_{i=1}^n c_i \ln(MFI_i)}$ <b>Eq 8</b> R <sup>2</sup> = 0.9123									$MFI_{C_{190/2.16}} = e^{\sum_{i=1}^n v_i \ln(MFI_i)}$ <b>Eq 9</b> R <sup>2</sup> = 0.9959								
	F101	F102	F103	F104	F105	F106	F107	F108	F109	F110	F111	F112	F113	F114	F115	F116	F117
Exp	13.0	4.2	6.6	9.9	5.5	5.4	12.3	7.5	7.0	6.3	5.9	3.7	8.9	8.1	4.5	6.9	6.8
Eq 8	8.66	2.14	2.57	6.86	2.97	1.99	8.79	3.89	2.82	4.27	2.97	1.42	6.34	3.82	1.84	4.73	3.38
Eq 9	12.58	3.90	6.15	9.52	5.44	4.80	12.28	7.23	6.76	5.90	5.39	3.22	8.58	7.37	4.29	6.47	6.42

F = 7.77 P= 0.001 S = 2.516 R-Sq = 24.45% R-Sq(adj) = 21.31% Pooled StDev = 2.516

Individual 95% Cis For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
DOE2 MFI 190/2.1	17	7.194	2.610
Eq 8	17	4.087	2.285
Eq 9	17	6.841	2.639

Descartandola Eq 8:  
F = 0.15 P= 0.698 S = 2.625 R-Sq = 0.48% R-Sq(adj) = 0.00% Pooled StDev = 2.625

Fuente: Elaboración propia. Análisis de Varianza (ANOVA) de datos experimentales y Eq's mediante MINITAB.

Se observa que al considerar la adición de **CaCO<sub>3</sub>** el **modelo de Voigt (Eq 9)** presentó el mejor coeficiente de correlación. En este nivel de compuesto fue aún posible realizar la prueba de **MFI** tanto a 190 °C como a 120 °C (ya que aún no se adicionaba el peróxido ni el espumante), por lo que se procedió a determinar el **MFI @ 120 °C**, 21.6 kg.

Para convertir un valor de **MFI<sub>190/2.16</sub>** a un valor **MFI<sub>120/21.6</sub>**, se utiliza una forma adaptada de la Ecuación de Arrhenius (Malkin e Isayev, 2012). Esta ecuación relaciona el **MFI** con la temperatura y el peso aplicado. En términos generales, la ecuación es:

**Eq 12. Conversión del MFI adaptando la Ecuación de Arrhenius ...**

$$MFI_2 = MFI_1 \times e^{\left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right]} \times \left(\frac{W_2}{W_1}\right)^\alpha$$

donde:

- $MFI_1$  y  $MFI_2$  son los valores inicial y final del **MFI**.
- $T_1$  y  $T_2$  son las temperaturas de determinación del **MFI**, en Kelvin.
- $W_1$  y  $W_2$  son los pesos aplicados en cada una de las condiciones, en kg.
- $E_a$  es la energía de activación, alrededor de 20 a 40 kJ/mol, dependiendo de la adición de cargas, aditivos y el grado de ramificación (Abe y Yamaguchi, 2001).
- $R$  es la constante de los gases ideales, igual a 8.3145 J/mol·K.







La **Tabla 13** muestra los resultados experimentales y los de regresión para la densidad obtenida al reticular los compuestos con **DCP**.

**Tabla 13. Resultados experimentales y de regresión de la Densidad al reticular los compuestos [g/cm<sup>3</sup>].**

$\rho_R = \rho_C + \left( \frac{1}{2} \frac{W_{DCP} \cdot \rho_{DCPW}}{\rho_{DCP100}} \right)^m \cdot V_{DCP}^n$ <b>Eq 15</b> $R^2 = 0.9893$																												
	F301	F302	F303	F304	F305	F306	F307	F308	F309	F310	F311	F312	F313	F314	F315	F316	F317											
Exp	0.904	0.954	1.003	0.957	0.975	0.990	0.941	0.970	0.990	0.944	0.986	0.994	0.923	0.945	0.999	0.946	0.938											
Eq 15	0.914	0.963	1.006	0.960	0.981	0.997	0.951	0.976	0.998	0.957	0.993	1.007	0.937	0.952	1.005	0.957	0.951											
F = 0.79    P = 0.380    S = 0.02805    R-Sq = 2.42%    R-Sq(adj) = 0.00%    Pooled StDev = 0.02805 Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev <table border="1"> <thead> <tr> <th>Level</th> <th>N</th> <th>Mean</th> <th>StDev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>DOE3 DenR Exp</td> <td>17</td> <td>0.96221</td> <td>0.02879</td> </tr> <tr> <td>Eq 15</td> <td>17</td> <td>0.97078</td> <td>0.02729</td> </tr> </tbody> </table>																	Level	N	Mean	StDev	DOE3 DenR Exp	17	0.96221	0.02879	Eq 15	17	0.97078	0.02729
Level	N	Mean	StDev																									
DOE3 DenR Exp	17	0.96221	0.02879																									
Eq 15	17	0.97078	0.02729																									

Fuente: Elaboración propia. Análisis de Varianza (ANOVA) de datos experimentales y Eq's mediante MINITAB.

El **MFI** del compuesto reticulado ya no podía ser evaluado a las condiciones normales para las poliolefinas, así que los valores experimentales se obtuvieron para **MFI<sub>120/21.6</sub>** contra los cuales se compararon los valores obtenidos por la **Eq 13**.

El **DCP** tiene una temperatura de fusión de 39 a 40 °C, por lo que en la fabricación del compuesto se dispersará y por su bajo peso molecular funcionará como un lubricante interno, por lo que un **VEF** de **MFI<sub>190/216</sub>** de 1000 g/10min funcionó bien en la correlación. Por otra parte, el ácido esteárico (**StAc**) es un lubricante externo para los compuestos basados en poliolefinas.

Su efecto sobre el **MFI** es bajo (el 2%wt apenas afecta en un decremento de 0.4 a 0.6 g/10min al HDPE), aunque es indispensable para relevar al plástico fundido de los elementos de corte en inyección o extrusión. Para este análisis un **VEF** de 650 g/10min mostró buenos resultados. La **Tabla 14** muestra los resultados experimentales y predichos al evaluar el **MFI<sub>C120/21.6</sub>** de los compuestos poliolefinicos reticulables vía peróxido. No se observa diferencia estadística.

**Tabla 14. Resultados experimentales y de regresión del MFI<sub>C120/21.6</sub> de los compuestos reticulables.**

$MFI_{C120/21.6} = 3.6875 e^{\sum_{i=1}^n V_i \ln(MFI_{i190/21.6})}$	<b>Eq 13</b> $R^2 = 0.9891$	<b>VEF considerados:</b> $MFI_{CaCO_3190/21.6} = 0.00025 \text{ g/10min.}$
--	--------------------------------	---

**Tabla 14. Resultados experimentales y de regresión del  $MFI_{C_{120/21.6}}$  de los compuestos reticulables.**

$MFI_{DCP40_{190/2.16}} = 1000 \text{ g}/10\text{min.}$																																																								
	F301	F302	F303	F304	F305	F306	F307	F308	F309	F310	F311	F312	F313	F314	F315	F316	F317																																							
Exp	52.7	16.6	26.2	41.0	24.2	20.1	51.3	28.5	28.9	27.6	22.4	12.6	36.4	32.1	20.3	26.8	27.8																																							
Eq 13	52.17	16.76	26.17	40.30	23.18	20.51	51.43	30.77	28.52	25.20	23.14	14.01	36.08	31.06	18.43	27.71	27.12																																							
F = 0.00    P = 0.965    S = 10.91    R-Sq = 0.01%    R-Sq(adj) = 0.00%    Pooled StDev = 10.91  Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev <table border="0"> <tr> <td>Level</td> <td>N</td> <td>Mean</td> <td>StDev</td> <td colspan="4">+-----+-----+-----+-----+</td> </tr> <tr> <td>DOE3 MFI 120/21.6</td> <td>17</td> <td>29.14</td> <td>10.98</td> <td colspan="4">(------*-----)</td> </tr> <tr> <td>Eq 13</td> <td>17</td> <td>28.98</td> <td>10.84</td> <td colspan="4">(------*-----)</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td colspan="4">+-----+-----+-----+-----+</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>24.0</td> <td>27.0</td> <td>30.0</td> <td>33.0</td> </tr> </table>																	Level	N	Mean	StDev	+-----+-----+-----+-----+				DOE3 MFI 120/21.6	17	29.14	10.98	(------*-----)				Eq 13	17	28.98	10.84	(------*-----)								+-----+-----+-----+-----+								24.0	27.0	30.0	33.0
Level	N	Mean	StDev	+-----+-----+-----+-----+																																																				
DOE3 MFI 120/21.6	17	29.14	10.98	(------*-----)																																																				
Eq 13	17	28.98	10.84	(------*-----)																																																				
				+-----+-----+-----+-----+																																																				
				24.0	27.0	30.0	33.0																																																	

Fuente: Elaboración propia. Análisis de Varianza (ANOVA) de datos experimentales y Eq's mediante MINITAB.

El cambio de dureza al reticular y espumar el material, estará relacionado a este cambio de volumen. La Eq 16 muestra las diferentes ecuaciones que correlacionan el cambio de dureza Shore A. Se concluye que el cambio de dureza se debe al cambio de volumen. La Tabla 15 muestra la dureza ShA que se obtiene para el compuesto ( $ShA_c$ ) y la dureza que se obtiene al reticular el material ( $ShA_r$ ).

**Tabla 15. Resultados experimentales y de regresión de la dureza ShA del compuesto y del material reticulado.**

$ShA_c = \sum_{i=1}^n V_i ShA_i$ <b>Eq 10</b> $R^2 = 0.9814$										$ShA_f = ShA_o \frac{v_o}{v_f} = ShA_o \frac{\rho_f}{\rho_o} = \frac{ShA_o}{ER}$ <b>Eq 16</b> $R^2 = 0.9724$																																															
	F301	F302	F303	F304	F305	F306	F307	F308	F309	F310	F311	F312	F313	F314	F315	F316	F317																																								
ShAc	68.8	72.0	74.3	70.0	75.3	73.0	69.3	73.3	71.8	72.3	70.8	74.0	69.0	68.3	73.8	68.8	71.0																																								
Eq 10	69.0	71.7	74.5	69.8	74.8	72.4	69.7	73.3	71.6	72.6	70.5	74.0	69.5	68.2	73.7	69.2	70.8																																								
ShAr	69.8	73.0	75.3	71.0	76.0	74.0	70.0	74.3	72.8	73.3	72.0	74.8	69.8	69.0	74.8	70.0	72.0																																								
Eq 16	70.0	72.6	75.5	70.9	75.8	73.4	70.7	74.3	72.5	73.6	71.5	75.0	70.5	69.1	74.7	70.2	71.7																																								
F = 0.00    P = 0.984    S = 2.167    R-Sq = 0.00%    R-Sq(adj) = 0.00%    Pooled StDev = 2.167  Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev <table border="0"> <tr> <td>Level</td> <td>N</td> <td>Mean</td> <td>StDev</td> <td colspan="4">+-----+-----+-----+-----+</td> </tr> <tr> <td>DOE3 ShAR Exp</td> <td>17</td> <td>72.441</td> <td>2.218</td> <td colspan="4">(------*-----)</td> </tr> <tr> <td>Eq 16</td> <td>17</td> <td>72.456</td> <td>2.114</td> <td colspan="4">(------*-----)</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td colspan="4">+-----+-----+-----+-----+</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>71.40</td> <td>72.00</td> <td>72.60</td> <td>73.20</td> </tr> </table>																		Level	N	Mean	StDev	+-----+-----+-----+-----+				DOE3 ShAR Exp	17	72.441	2.218	(------*-----)				Eq 16	17	72.456	2.114	(------*-----)								+-----+-----+-----+-----+								71.40	72.00	72.60	73.20
Level	N	Mean	StDev	+-----+-----+-----+-----+																																																					
DOE3 ShAR Exp	17	72.441	2.218	(------*-----)																																																					
Eq 16	17	72.456	2.114	(------*-----)																																																					
				+-----+-----+-----+-----+																																																					
				71.40	72.00	72.60	73.20																																																		

Fuente: Elaboración propia. Análisis de Varianza (ANOVA) de datos experimentales y Eq's mediante MINITAB.

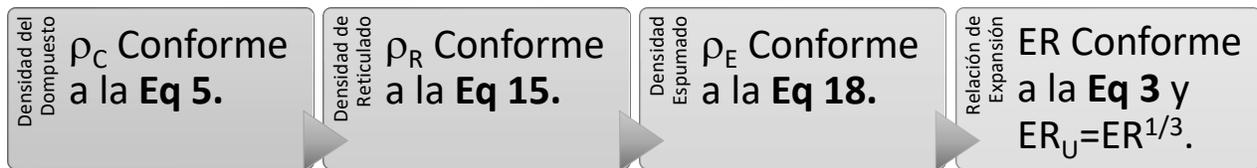
Hasta este punto, se obtuvieron los efectos del DCP sobre las características del compuesto reticulado. Aunque el cambio en las propiedades pudiese considerarse bajo antes y después de del proceso de reticulado, es importante considerar su cálculo para ajustar adecuadamente el efecto de todas las reacciones que intervienen en la obtención de la espuma.

#### 5.4. **DOE4.** Propiedades del compuesto completo y de la espuma de elastómero poliolefinico reticulado.

Una vez fabricadas las fórmulas completas, se midieron las propiedades del compuesto ( $MFI_{C_{120/21.6}}$ ,  $\rho_C$  y  $ShA_C$ ), así como las propiedades de la espuma ( $\rho_E$ ,  $ER$ ,  $ER_U$  y  $ShA_E$ ).

Para este DOE se calculó el sistema espumante para alcanzar, alternativamente, valores de  $ER_u$  de 1.4, 1.5 y 1.6, conforme al diagrama de cálculos mostrado en la

**Figura 2.** Secuencia de cálculo de la densidad, sus cambios en el proceso y relación de expansión.



Fuente: Elaboración propia.

Lo primero que debió calcularse fue la evolución de gas ( $Y$ , gas yield, en  $\text{cm}^3_{\text{gas}}/\text{g}_{\text{espumante}}$ ) de los espumantes a las condiciones de laboratorio usadas para la medición de la  $ER$  y la  $ER_U$ , 23 °C y 0.9934 atm, ya que los valores citados en la **Tabla 1** se encuentran en STP (273.15 K, 1 atm), para lo cual se usa la **Eq 17** (basada en la fórmula general de los gases), quedando el *gas yield* en condiciones de laboratorio de 240.11  $\text{cm}^3/\text{g}$  para la ADC y 136.43  $\text{cm}^3/\text{g}$  para el **OBSH**.

La **Eq 18** muestra el cálculo de la densidad esperada en la espuma. Nótese que, en la ecuación del cambio de densidad por la expansión, no se utiliza la  $\rho_C$ , sino la  $\rho_R$ , para considerar la contracción generada por la reticulación durante el proceso de reticulación. De la búsqueda de cada  $ER_U$  objetivo, se obtuvieron las fórmulas indicadas en la **Tabla 16**.

<b>Eq 17.</b> Conversión de la evolución de gas de STP a condiciones de laboratorio [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]...	$Y_{lab} = \frac{T_2 P_1 Y_{STP}}{T_1 P_2} = \frac{296.15 \times 1}{273.15 \times 0.9934} Y_{STP} = 1.0914 \cdot Y_{STP}$
<b>Eq 18.</b> Densidad de la espuma originada por el incremento de volumen del agente espumante [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]...	$\rho_E = \frac{1}{v_R + \Delta v} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_R} + \sum_{i=1}^n C_i Y_{labi}}$

**Tabla 16. Fórmulas utilizadas en el DOE4 (vea complemento en la Tabla 3 [phr].**

Materia prima	F401	F402	F403	F404	F405	F406	F407	F408	F409	F410	F411	F412	F413	F414	F415	F416	F417
F3k	109.4	114.5	119.6	109.7	114.4	119.5	109.6	114.7	119.4	109.5	114.6	119.7	109.4	114.5	119.6	109.7	114.4
ZnO	0.51	0.68	0.89	0.48	0.67	0.90	0.49	0.68	0.90	0.48	0.66	0.89	0.50	0.69	0.89	0.48	0.69
ADC	0.75	1.01	1.31	0.71	0.99	1.33	0.72	1.00	1.33	0.71	0.98	1.31	0.73	1.02	1.31	0.71	1.02
OBSH	0.26	0.35	0.46	0.25	0.35	0.47	0.25	0.35	0.47	0.25	0.34	0.46	0.26	0.36	0.46	0.25	0.36
<b>Total</b>	<b>110.9</b>	<b>116.5</b>	<b>122.3</b>	<b>111.1</b>	<b>116.4</b>	<b>122.2</b>	<b>111.1</b>	<b>116.7</b>	<b>122.1</b>	<b>110.9</b>	<b>116.6</b>	<b>122.4</b>	<b>110.9</b>	<b>116.6</b>	<b>122.3</b>	<b>111.1</b>	<b>116.5</b>
$ER_U$ Objetivo	1.40	1.50	1.60	1.40	1.50	1.60	1.40	1.50	1.60	1.40	1.50	1.60	1.40	1.50	1.60	1.40	1.50

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de densidad y expansión se muestran en la **Tabla 17**. Nótese que la línea de la densidad de reticulado experimental ( $\rho_R$  exp.) no contiene valores dado que no puede medirse por separado de la densidad de la espuma, aunque se requiere para el cálculo de los resultados predichos. En la secuencia de los cálculos se obtiene una muy buena correlación de los resultados ( $R^2$ s > 0.98).

**Tabla 17 Densidades del compuesto y de la espuma, así como cálculo de la relación de expansión y la expansión unidireccional.**

$\rho_c$ exp	0.907	0.961	1.005	0.953	0.980	0.997	0.940	0.974	0.991	0.951	0.985	1.010	0.935	0.945	1.007	0.960	0.945	
Eq 5	0.908	0.959	1.005	0.953	0.978	0.996	0.944	0.972	0.997	0.950	0.989	1.006	0.931	0.949	1.003	0.950	0.947	$R^2= 0.9817$
$\rho_R$ exp.	N/A																	
Eq 15	0.921	0.972	1.018	0.966	0.991	1.008	0.957	0.985	1.010	0.963	1.002	1.019	0.944	0.962	1.016	0.964	0.960	
$\rho_E$ exp.	0.324	0.289	0.251	0.350	0.285	0.249	0.345	0.290	0.236	0.349	0.291	0.252	0.343	0.276	0.251	0.337	0.283	
Eq 18	0.330	0.284	0.246	0.348	0.289	0.242	0.344	0.287	0.242	0.347	0.293	0.246	0.338	0.281	0.246	0.347	0.280	$R^2= 0.9853$
ERexp	2.80	3.33	4.00	2.73	3.44	4.00	2.72	3.36	4.20	2.73	3.39	4.02	2.73	3.43	4.02	2.85	3.34	
Eq 3	2.75	3.38	4.09	2.74	3.38	4.11	2.75	3.38	4.12	2.74	3.38	4.09	2.76	3.38	4.08	2.74	3.38	$R^2= 0.9891$
ER <sub>U</sub> exp.	1.41	1.50	1.60	1.41	1.51	1.59	1.41	1.50	1.61	1.40	1.50	1.59	1.40	1.50	1.59	1.43	1.49	
Eq 3 <sup>1/3</sup>	1.401	1.500	1.599	1.399	1.501	1.602	1.400	1.501	1.603	1.399	1.500	1.599	1.402	1.501	1.598	1.398	1.501	$R^2= 0.9864$

Fuente: Elaboración propia.

Dado que el  $MFI_{190/2.16}$  no puede ser medido en el compuesto que contiene peróxido y espumante, este sólo se calculó mediante la **Eq 9**, para ser usado en el cálculo del  $MFI_{120/2.16}$  por el cambio de condiciones y compararlo contra el valor experimental. Se observa que la regresión muestra un valor  $R^2= 0.9879$ , que se considera aceptable.

Para estos cálculos se consideraron los VEFs  $MFI_{190/2.16ZnO} = 0.001 \text{ g}/_{10\text{min}}$ ,  $MFI_{190/2.16ADC} = 1 \text{ g}/_{10\text{min}}$  y  $MFI_{190/2.16OBSH} = 1 \text{ g}/_{10\text{min}}$ , con un buen ajuste en el resultado. Los resultados experimentales y calculados se muestran en la **Tabla 18**.

**Tabla 18 MFI<sub>190/2.16</sub> calculado y MFI<sub>120/21.6</sub> medido para el compuesto [g/10min].**

MFI <sub>190/2.16</sub>	N/A	N/A																
Eq 9	13.86	4.46	6.89	10.72	6.15	5.41	13.66	8.15	7.50	6.72	6.14	3.71	9.61	8.22	4.87	7.39	7.19	
MFI <sub>120/21.6</sub>	51.9	16.5	27.2	37.3	23.4	21.9	50.6	29.0	27.0	25.7	23.6	13.6	36.1	31.0	16.2	26.9	28.0	
Eq 13	51.10	16.45	25.42	39.55	22.68	19.97	50.39	30.05	27.67	24.80	22.65	13.70	35.42	30.33	17.97	27.26	26.52	

R<sup>2</sup>= 0.9879

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar la dureza del compuesto se establecieron VEFs de dureza **Shore A** para los espumantes y nucleante y que al optimizar quedaron  $ShA_{ZnO} = 177.56$ ,  $ShA_{ADC} = 10.1$ , y  $ShA_{OBSh} = 10.13$ , con un buen ajuste en el resultado. Los resultados experimentales y predictivos tanto para el compuesto como para la espuma se muestran en la **Tabla 19**.

**Tabla 19 Dureza Shore A para el compuesto y la espuma.**

ShAc	68.8	71.0	74.3	69.5	74.3	71.8	69.3	72.8	70.8	72.3	69.5	73.0	69.0	67.8	73.0	68.3	70.3
Eq 10	68.7	71.3	74.0	69.6	74.4	71.9	69.4	72.9	71.0	72.3	70.1	73.4	69.2	67.8	73.2	68.9	70.4
ShA <sub>E</sub>	24.8	21.3	18.3	25.3	21.5	18.0	25.8	21.8	17.0	26.3	20.5	18.0	25.3	20.0	18.0	24.0	21.0
Eq 16	25.0	21.1	18.1	25.4	22.0	17.5	25.3	21.5	17.3	26.4	20.8	18.0	25.1	20.1	17.9	25.2	20.8

R<sup>2</sup>= 0.9886

R<sup>2</sup>= 0.9857

Fuente: Elaboración propia.

### 5.5. Ahorro de Recursos y Eficiencia Energética.

Uno de los principales hallazgos de este estudio fue la capacidad del modelo para reducir significativamente el consumo de recursos en la etapa de ajuste de formulaciones. Al predecir con precisión propiedades como la relación de expansión, dureza e índice de fluidez, se logró disminuir en un 30% el uso de materias primas destinadas a la experimentación, lo cual tiene un impacto positivo directo en la sostenibilidad del proceso. Esta reducción de materiales también se traduce en una menor generación de residuos, lo cual apoya el **ODS 12** sobre producción y consumo responsables.

En términos de eficiencia energética, la implementación del modelo permitió una reducción del 25% en el tiempo necesario para ajustar las formulaciones, lo cual se refleja en un menor consumo de energía durante los procesos de prueba y ajuste. Este resultado es particularmente relevante en el contexto del **ODS 13**, ya que contribuye a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero al reducir el uso de energía en las etapas de desarrollo y ajuste del producto.

## 6. DISCUSIÓN

La presente investigación aplica un modelo predictivo basado en la regla de mezclas para calcular propiedades clave de espumas elastoméricas, mejorando el control y la optimización del diseño y producción en industrias como la automotriz, calzado, protección personal y deportiva. El enfoque transdisciplinario integra física de polímeros, ingeniería de materiales y ciencias computacionales, promoviendo la innovación sostenible y el uso eficiente de recursos. El modelo predictivo permite anticipar propiedades desde el diseño de la formulación, reduciendo tiempos, recursos y la dependencia de métodos empíricos. Con una alta precisión ( $R^2 > 0.95$ ), su implementación permite cuestionar la dependencia de prácticas tradicionales de ensayo y error, promoviendo un cambio hacia metodologías más eficientes y menos intensivas en recursos.

En la **Tabla 20** se resume el sistema de ecuaciones que, conforme a su correlación con las observaciones experimentales, pueden ser consideradas en el modelado de estas propiedades.

**Tabla 20 Resumen de sistema de ecuaciones para el modelado predictivo de las características analizadas en este estudio.**

Compuesto			Espuma		
Densidad	<b>Eq 5</b>	$\rho_C = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\rho_i}} = \sum_{i=1}^n V_i \rho_i$	Densidad Reticulado	<b>Eq 15</b>	$\rho_R = \rho_C + \left( \frac{1}{2} \frac{W_{DCP} \cdot \rho_{DCPW}}{\rho_{DCP100} \cdot V_{DCP}^n} \right)^m$
Índice de Fluidez	<b>Eq 9</b>	$MFI_{C_{190/2.16}} = e^{\sum_{i=1}^n V_i \ln(MFI_i)}$	Densidad de la espuma	<b>Eq 18</b>	$\rho_E = \frac{1}{\rho_R + \sum_{i=1}^n C_i Y_{lab_i}}$
	<b>Eq 13</b>	$MFI_{C_{120/2.16}} = 3.6875 MFI_{C_{190/2.16}}$	Relación de Expansión	<b>Eq 3</b>	$ER = \frac{v_E}{v_C} = \frac{\rho_C}{\rho_E} = \rho_E (v_E + \Delta v)$
Dureza Shore A	<b>Eq 10</b>	$ShA_C = \sum_{i=1}^n V_i ShA_i$	Dureza Shore A	<b>Eq 16</b>	$ShA_E = ShA_C \frac{v_C}{v_E} = \frac{ShA_C}{ER}$

Fuente: Elaboración propia.

La propuesta de un modelo predictivo para la optimización de espumas de poliolefina no solo mejora la eficiencia del proceso de formulación, sino que también tiene un impacto significativo en el ámbito de la sostenibilidad. Este modelo permite reducir el consumo de materiales y disminuir el número de ensayos físicos, lo que contribuye a una menor generación de desechos y al uso responsable de los recursos. Esto se alinea directamente con el **ODS 12**, que promueve la producción y el consumo responsables, al incentivar prácticas que minimizan el desperdicio y optimizan el uso de insumos en la producción de materiales poliméricos.

Además, el enfoque de modelado predictivo reduce la dependencia de pruebas físicas y experimentación repetitiva, disminuyendo el uso de energía y las emisiones asociadas a los procesos industriales. Esta optimización apoya el **ODS 13**, ya que, al disminuir las emisiones derivadas de la producción, se reduce el impacto ambiental del proceso, contribuyendo a la mitigación del cambio climático.

Por otro lado, al aplicar innovaciones tecnológicas en la producción de espumas, esta investigación también respalda el **ODS 9**, que se centra en construir infraestructuras resilientes y promover la industrialización inclusiva y sostenible. El uso de modelos predictivos avanzados fomenta una industria más innovadora y comprometida con la sostenibilidad, lo que impulsa a otros sectores a adoptar tecnologías similares para reducir el impacto ambiental y mejorar la eficiencia.

Desde el punto de vista de la **innovación sostenible**, el modelo propuesto impulsa la industrialización hacia una mayor eficiencia tecnológica. En lugar de describir simplemente la capacidad predictiva del modelo, es crucial destacar su impacto sistémico en los procesos industriales. La posibilidad de anticipar el comportamiento de materiales con base en su formulación y las condiciones de proceso incrementa la competitividad del sector polimérico. Esto también fomenta la adopción de prácticas de manufactura avanzada que mejoran la capacidad de respuesta ante cambios en la demanda o en la disponibilidad de materias primas, lo cual tiene un impacto directo en el **ODS 9** (industria, innovación e infraestructura).

En relación con la **producción y consumo responsables (ODS 12)**, el modelo contribuye significativamente a minimizar el desperdicio de materiales. Sin embargo, su relevancia va más allá de la simple reducción de pruebas físicas; permite una transformación en la gestión de los recursos. Al disminuir el consumo innecesario de materias primas, el modelo promueve una eficiencia que no solo tiene efectos económicos positivos, sino también ecológicos, apoyando la transición hacia una **economía circular**. La capacidad de ajustar las formulaciones de manera precisa evita la producción de lotes defectuosos y reduce la generación de residuos, elementos que tradicionalmente afectan de manera negativa la sostenibilidad de la industria.

Por otro lado, la **reducción de emisiones** derivada del uso del modelo predictivo tiene una importancia crucial en el contexto del **ODS 13** (acción por el clima). Al limitar la cantidad de pruebas experimentales, se logra una disminución significativa del consumo energético en los procesos industriales. Es importante analizar cómo este ahorro energético se traduce en una menor huella de carbono, contribuyendo a mitigar el impacto ambiental asociado con la producción de espumas. Esta reducción de emisiones, combinada con una mayor eficiencia de los recursos, muestra un avance tangible hacia la descarbonización del sector manufacturero.

El modelo propuesto impulsa la industrialización hacia una mayor eficiencia tecnológica, con un impacto sistémico en los procesos industriales. La capacidad de anticipar el comportamiento de los materiales mejora la respuesta ante cambios en la demanda o en la disponibilidad de materias primas, promoviendo una producción sostenible y eficiente. En relación con el **ODS 12**, que promueve la producción y el consumo responsables, el modelo contribuye a minimizar el desperdicio y transforma la gestión de recursos, promoviendo una eficiencia con efectos tanto económicos como ecológicos, apoyando la transición hacia una economía circular. Ajustar las formulaciones de manera precisa evita la producción de lotes defectuosos y red, que promueve la producción y el consumo responsables uce los residuos, mejorando la sostenibilidad industrial.

El enfoque predictivo también disminuye la dependencia de pruebas físicas repetitivas, reduciendo el uso de energía y las emisiones asociadas a los procesos industriales, apoyando el **ODS 13**. Al minimizar las emisiones, se contribuye a la mitigación del cambio climático, reduciendo el impacto ambiental de la producción.

Adicionalmente, la aplicación de innovaciones tecnológicas en la producción de espumas respalda el **ODS 9**, orientado a construir infraestructuras resilientes y promover la industrialización inclusiva y sostenible. El uso de modelos predictivos fomenta la adopción de tecnologías avanzadas, incrementando la competitividad del sector polimérico y promoviendo prácticas de manufactura eficiente y sostenible.

Finalmente, la reducción de emisiones derivada del modelo predictivo contribuye al **ODS 13** al disminuir el consumo energético en los procesos industriales. Este ahorro energético reduce la huella de carbono y promueve la descarbonización del sector manufacturero, mostrando un avance tangible hacia una producción más limpia y responsable.

La incorporación de **valores estimados funcionalmente (VEF)** para los aditivos no poliméricos también plantea un avance relevante desde el punto de vista teórico y práctico. En lugar de centrarse solo en la aplicabilidad técnica del modelo, es importante analizar el impacto que tiene la flexibilidad del modelo para integrar aditivos no convencionales. Esta capacidad no solo mejora la eficiencia de la formulación, sino que también amplía las posibilidades de innovación en la composición de los materiales, contribuyendo a la sostenibilidad al permitir la utilización de ingredientes alternativos que podrían tener menores impactos ambientales.

En resumen, el modelo predictivo desarrollado no solo optimiza el proceso de producción de espumas de poliolefina, sino que también contribuye significativamente al desarrollo de una industria más sostenible y eficiente. Al reducir la generación de residuos, disminuir el consumo de energía y facilitar la integración de aditivos innovadores, este modelo promueve una transformación hacia una producción responsable y sostenible. Este enfoque representa un avance concreto para la industria de materiales poliméricos, alineando sus prácticas con los objetivos globales de sostenibilidad y eficiencia.

### **6.1. Implicaciones Teóricas (*Scientia*)**

Proporcionar ecuaciones precisas para pronosticar el comportamiento de estos materiales ofrecería una base sólida para integrar enfoques sostenibles en la ciencia de materiales. La **regla de mezclas** utilizada en este trabajo permitiría predecir las propiedades de las mezclas de elastómeros poliolefinicos al combinar las contribuciones de cada componente. La reducción de emisiones y la optimización de consumo de recursos, derivadas de la aplicación del modelo predictivo contribuye al **ODS 13**, al disminuir el consumo energético en los procesos industriales y reducir la cantidad de desechos generados en procesos de prueba y error. Este ahorro energético reduce la huella de carbono y promueve la descarbonización del sector manufacturero, mostrando un avance tangible hacia una producción más limpia y responsable.

El modelo, aunque simplificado, ha mostrado una alta correlación con los resultados experimentales, reforzando su utilidad práctica para compuestos complejos. La **Eq 5**, que utiliza el promedio ponderado del volumen específico, mejoraría la predicción de la densidad en compuestos con cargas minerales como **CaCO<sub>3</sub>** ( $R^2 = 0.9817$ ). La **Eq 9**, basada en el **modelo de**

**Voigt** y con ajuste logarítmico, predeciría con alta precisión el índice de fluidez (**MFI**) ( $R^2 = 0.9980$ ), proporcionando un mejor entendimiento del comportamiento de esta propiedad

La **Eq 13**, una versión modificada de la Ecuación de Arrhenius permitiría ajustar el **MFI** bajo diferentes condiciones de temperatura y carga, integrando termodinámica y cinética química para estandarizar los procesos de manufactura. Finalmente, la **Eq 10**, que predice la dureza a partir de fracciones volumétricas, sería útil para ajustar la resistencia a la deformación en nuevas formulaciones, con un ajuste de  $R^2 = 0.9886$ .

La aplicación del modelo en la industria permite no solo optimizar las formulaciones, sino también introducir un enfoque más innovador en la producción de espumas de poliolefina. Al reducir la dependencia de prácticas de ensayo y error, se promueve una cultura de innovación basada en datos, alineada con el **ODS 9**, que se centra en la construcción de infraestructuras resilientes y la promoción de una industrialización sostenible. Este enfoque mejora la competitividad del sector y facilita la adopción de tecnologías avanzadas que optimizan el uso de recursos.

## 6.2. Implicaciones prácticas (*Praxis*)

Desde un enfoque práctico, el modelo desarrollado tendría un impacto directo en la reducción de desperdicios y la mejora de la eficiencia en manufactura. Predecir con precisión las propiedades de los compuestos permitiría agilizar el diseño y optimizaría el control de calidad. Otro resultado relevante fue la efectividad de los valores estimados funcionalmente (**VEF**) en la predicción del impacto de aditivos no poliméricos, en las propiedades finales del material. Esto facilita la integración de aditivos no convencionales, ampliando las posibilidades de innovación en la formulación de compuestos poliméricos y contribuyendo a la sostenibilidad del proceso. La capacidad de incluir aditivos alternativos con menor impacto ambiental refuerza el compromiso con el **ODS 12**, orientado a la producción responsable.

Los resultados sugieren que las propiedades clave de las espumas elastoméricas podrían ajustarse con precisión, permitiendo a los fabricantes adaptarse al mercado sin incrementar costos ni recursos, en línea con los **ODS 9, 12 y 13**.

Estudios sobre ecoinnovación <sup>Nota 3</sup> destacan la importancia de optimizar recursos y reducir el desperdicio (Castillo-Esparza et al., 2024). La innovación sostenible y las herramientas predictivas mejorarían la eficiencia operativa, promoviendo una gestión eficaz de recursos que fortalezca la competitividad de las empresas, especialmente en mercados emergentes como América Latina.

### **6.3. Reflexión Final sobre los Resultados**

Los resultados presentados muestran cómo la implementación de un modelo predictivo puede transformar significativamente la industria de espumas de poliolefina, mejorando la eficiencia, reduciendo el consumo de recursos y disminuyendo las emisiones. Estos hallazgos no solo tienen implicaciones económicas y operativas, sino también un fuerte impacto positivo en la sostenibilidad, alineando la producción industrial con los objetivos de desarrollo sostenible. La introducción de tecnologías basadas en modelaje predictivo impulsa una transición hacia prácticas más sostenibles, contribuyendo a una industria más eficiente y responsable. Esta perspectiva analítica resalta el valor del modelo más allá de sus capacidades técnicas, destacando su papel en la promoción de una producción industrial alineada con la sostenibilidad.

## **7. CONCLUSIÓN**

Este modelo predictivo ofrece una solución innovadora y sostenible para la producción de espumas de poliolefina, optimizando recursos y reduciendo desperdicios en alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, específicamente los **ODS 9, 12 y 13**. Al reducir la dependencia de ensayos físicos y minimizar el consumo de materiales, el modelo promueve una producción más eficiente y responsable, disminuyendo las emisiones y el impacto ambiental de los procesos industriales.

Los próximos apartados presentan la respuesta a la pregunta de investigación e hipótesis planteada, los hallazgos principales y los alcances finales, resaltando cómo el modelo

---

Nota <sup>3</sup>. Mientras que la **innovación sostenible** abarca un enfoque holístico en las tres dimensiones de la sostenibilidad: ambiental, económica y social, La **ecoinnovación** (que es una subcategoría dentro de la innovación sostenible) se centra, principalmente, en el aspecto ambiental, buscando soluciones que minimicen el daño al medio ambiente y fomenten el uso eficiente de los recursos.

contribuye a una producción eficiente y responsable, disminuyendo emisiones y el impacto ambiental en los procesos industriales.

### **7.1. Respuesta a pregunta e hipótesis de investigación.**

Los hallazgos de este estudio, basados en la hipótesis: *“La relación de expansión, la dureza y el índice de fluidez de las espumas poliolefinicas inyectables son parámetros que pueden predecirse, controlarse y optimizarse a través de un modelo predictivo constituido por un sistema de ecuaciones que integren datos experimentales y la formulación del compuesto polimérico”*, demuestran que el modelo es capaz de predecir con precisión adecuada las propiedades críticas: índice de fluidez, relación de expansión y la dureza. Esto optimiza el proceso productivo y reduce la experimentación. El nuevo conocimiento generado es original y relevante para la transdisciplinariedad al aplicar conceptos de química, termodinámica y ciencias de la computación. Sus resultados tienen un impacto directo en el ODS 9, al incentivar prácticas de innovación sostenible en la industria, y en el **ODS 13**, al minimizar el uso de energía y materiales, contribuyendo a una disminución de las emisiones.

### **7.2. Hallazgos de la investigación**

Este estudio demuestra que el modelo predice con precisión adecuada propiedades críticas de las espumas poliolefinicas, optimizando el proceso y reduciendo la necesidad de experimentación. Esto impulsa la innovación en la industria (**ODS 9**) y contribuye a la reducción de emisiones y uso de energía (**ODS 13**). La validación de la regla de mezclas, enriquecida con una modificación logarítmica, mejora la comprensión teórica de la interacción composición-propiedades y muestra precisión aceptable en la práctica. Además, el uso de valores estimados funcionalmente (**VEF**) para aditivos no poliméricos facilita la inclusión de aditivos no convencionales, optimizando las formulaciones.

### **7.3. Alcances finales de la investigación.**

El estudio presenta resultados significativos, aunque tiene limitaciones en la variedad de materias primas y condiciones experimentales evaluadas. Se recomienda, para futuras investigaciones, ampliar los tipos de elastómeros y agentes espumantes, así como emplear

**DOEs** para validar la robustez del modelo en diversas condiciones industriales. Este enfoque ofrece importantes beneficios para la industria de materiales poliméricos, mejorando la eficiencia en la formulación de espumas y facilitando prácticas sostenibles. Su implementación en otros sectores promovería una cultura de innovación y sostenibilidad alineada con los **ODS**, con beneficios económicos y reducción del impacto ambiental.

## 8. REFERENCIAS.

- Abe, S., y Yamaguchi, M. (2001). Study on the Foaming of Crosslinked Polyethylene. *Journal of Applied Polymer Science*, 79(12), 2146–2155. [https://doi.org/10.1002/1097-4628\(20010321\)79:12%3C2146::AID-APP1022%3E3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/1097-4628(20010321)79:12%3C2146::AID-APP1022%3E3.0.CO;2-Q)
- Antunes, M. (2024). Recent Trends in Polymeric Foams and Porous Structures for Electromagnetic Interference Shielding Applications. In *Polymers* (Vol. 16, Issue 2). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/polym16020195>
- ASTM D1238-13. (2013). Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer 1. *ASTM International*. <https://doi.org/10.1520/D1238-13>
- Castillo-Esparza, M. M. G. C., Maldonado-Guzmán, G., Mejía-Trejo, J., y Martínez-Serna, M. del C. (2024). Rendimiento Económico de las Prácticas de Ecoinnovación en Micro, Pequeñas y Medianas Empresas Manufactureras. *Scientia et PRAXIS*, 4(08), 1–27. <https://doi.org/10.55965/setp.4.08.a1>
- Coir Rubber Products, I. (2017). COI-Durometer-Conversion-Chart. In [www.coirubber.com](http://www.coirubber.com). <https://www.coirubber.com/wp-content/uploads/2017/07/COI-Durometer-Conversion-Chart.pdf>
- Dealy, J., y Park, H. E. (2006). Effects of pressure and gases on viscosity of molten plastics. *Polymer Engineering and Science*, 46(10), 1416–1424. <https://doi.org/10.1002/spepro.003348>
- Dow Inc. (2024). *Elastómeros de Poliolefina*. <https://www.dow.com/es-es/product-technology/pt-elastomers-rubber/pg-elastomers-polyolefin-elastomers.html>
- Eaves, D. (1997). The Properties of Crosslinked Foams Produced from Metallocene Polyolefins. *Polymers & Polymer Composites*, 5(7), 477–482. <https://doi.org/10.1177/096739119700500702>
- Agency. (n.d.). *Search for chemicals - ECHA*. Retrieved May 29, 2024, from <https://echa.europa.eu/information-on-chemicals>
- Feijoo, J. L., e Igualada, J. (2013). *Polymer Composite Foams* (Patent US 2013/0203878 A1). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1202.6646>
- Gibson, R. F. (2007). *Principles of Composite Material Mechanics* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420014242>
- Hapco Inc. (2024). *Hardness Comparison Chart*. <https://Hapcoincorporated.Com/Resources/>. <https://hapcoincorporated.com/resources/hardness-chart/>

- Julias, A. (2021). *Volume Fraction of Composites* (B.S.ABDUR RAHMAN CRESCENT INSTITUTE OF SCIENCE & TECHNOLOGY, Ed.). <https://crescent.education/wp-content/uploads/2021/03/Volume-fraction-of-composites.pdf>
- Luo, Y. (2022). Improved Voigt and Reuss Formulas with the Poisson Effect. *Materials*, 15(16). <https://doi.org/10.3390/ma15165656>
- Malkin, A. Y., e Isayev, A. I. (1995). Non-linearity in rheology - an essay of classification. *Rheol Acta*, 34, 27–39. <https://doi.org/10.1007/BF00396052>
- Malkin, A. Y., e Isayev, A. I. (2012). *Rheology: Concepts, Methods, and Applications* (2nd ed.). Chemtec Publishing. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-04626-4>
- Morales-Rivera, D. A., y Zuluaga Corrales, H. F. (2006). Estudio de propiedades térmicas y mecánicas en espumas de mezclas poliméricas entre copolímero de etileno-acetato de vinilo (EAV) y caucho natural (CN). *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*, 37, 82–92. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-62302006000300008&lng=pt&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302006000300008&lng=pt&tlng=es).
- Naciones Unidas. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe* (LC/G.2681-P/Rev.3). Santiago. [www.issuu.com/publicacionescepal/stacks](http://www.issuu.com/publicacionescepal/stacks)
- Oliveira-Salmazo, L. (2015). *Cinéticas de Espumación y Control de la Estructura Celular en Materiales Basados en Caucho Natural y Poliolfinas* [Universidad de Valladolid, Facultad de Ciencias]. <https://doi.org/10.35376/10324/15242>
- Ridzuan-Mansor, M., Sapuan, S. M., y Zainudin, E. S. (2013). Stiffness Prediction of Hybrid Kenaf/Glass Fiber Reinforced Polypropylene Composites using Rule of Mixtures (ROM) and Rule of Hybrid Mixtures (RoHM). *Journal of Polymer Materials*, 30(3), 321–334. <https://www.researchgate.net/publication/258441030>
- Rodríguez-Pérez, M. A. (2005). Crosslinked polyolefin foams: Production, structure, properties, and applications. In *Advances in Polymer Science* (Vol. 184, pp. 97–126). <https://doi.org/10.1007/b136244>
- Roussel, M. D., Guy, A. R., Shaw, L. G., y Cara, J. E. (2005). *The Use of Calcium Carbonate in Polyolefins Offers Significant Improvement in Productivity*. <https://www.tappi.org/content/enewsletters/eplace/2006/06-3rousselv1.pdf>
- Steffen, T. (2024). *Climate & Weather Averages in Leon, Guanajuato, Mexico*. Time and Date AS. <https://www.timeanddate.com/weather/mexico/leon/climate>
- TROCELLEN GmbH. (2023, August 1). *Todo a saber sobre la espuma de polietileno (PE)* Materiales y Tecnologías. <https://trocellen.com/es/materiales-y-tecnologias/espuma/>
- Wickson, E. J., y Grossman, R. F. (2008). Formulation Development. In R. F. Grossman (Ed.), *Handbook of Vinyl Formulating* (pp. 1–12). <https://doi.org/10.1002/9780470253595>
- Wu, G., Xie, P., Yang, H., Dang, K., Xu, Y., Sain, M., Turng, L. S., & Yang, W. (2021). A review of thermoplastic polymer foams for functional applications. In *Journal of Materials Science* (Vol. 56, Issue 20, pp. 11579–11604). Springer. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06034-6>



This is an open access article distributed under the terms of the CC BY-NC license(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)