



MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN



JORNADAS CAUCHO

B O G O T Á 2 0 2 5

NUEVOS AVANCES EN
SOSTENIBILIDAD DE ELASTÓMEROS

Ignacio Benito Gómez, Juan Carlos Chicharro Sestines, Itziar
Mas Giner, Raquel Verdejo, Miguel Angel López-Manchado,
Marianella Hernández Santana

XVIII Jornadas Latinoamericanas de Tecnología del Caucho

OBJETIVOS Y HABILIDADES



- Desarrollar nuevos materiales atractivos comercialmente con propiedades y funcionalidades mejoradas
- Amplia experiencia en el procesamiento de polímeros, materiales compuestos y nanocomuestos
- Elastómeros, termoplásticos, termoestables y biomateriales
- Estado sólido, latex, espumas



JORNADAS CAUCHO
BOGOTÁ 2025

LINEAS DE INVESTIGACIÓN



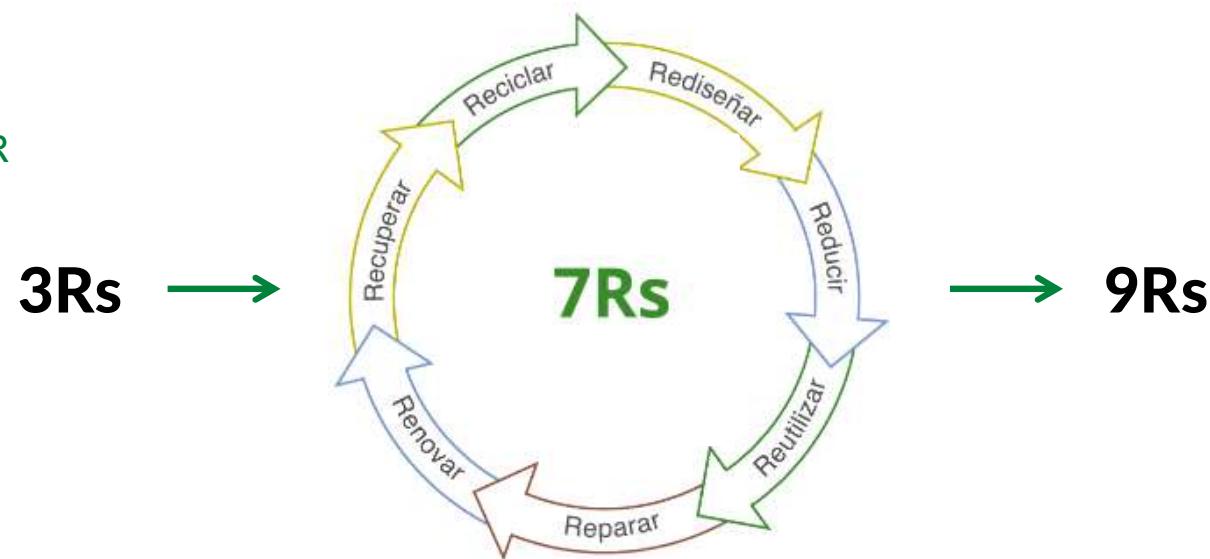
- Elastómeros termoplásticos (TPOs/TPVs)
- Nanocomuestos con nanosilicatos (arcillas)
- Nanocomuestos con cargas derivadas de carbono (CNT, TRGO)
- Elastómeros inteligentes: actuadores y sensores
- Espumas elastoméricas
- **Elastómeros autorreparables y reciclables**

ECONOMÍA CIRCULAR

ECONOMÍA LINEAL



ECONOMÍA CIRCULAR



<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/explore/the-circular-economy-in-detail>



JORNADAS CAUCHO
BOGOTÁ 2025

ESTRATEGIAS SOSTENIBLES



CIRCULARIDAD DE MATERIALES

Rediseñar

Recuperar



CIRCULARIDAD DE PRODUCTOS

Reparar /Reusar

Reciclar



PRODUCTIVIDAD DE RECURSOS

Renovar

Reducir



JORNADAS CAUCHO
BOGOTÁ 2025

CIRCULARIDAD DE MATERIALES

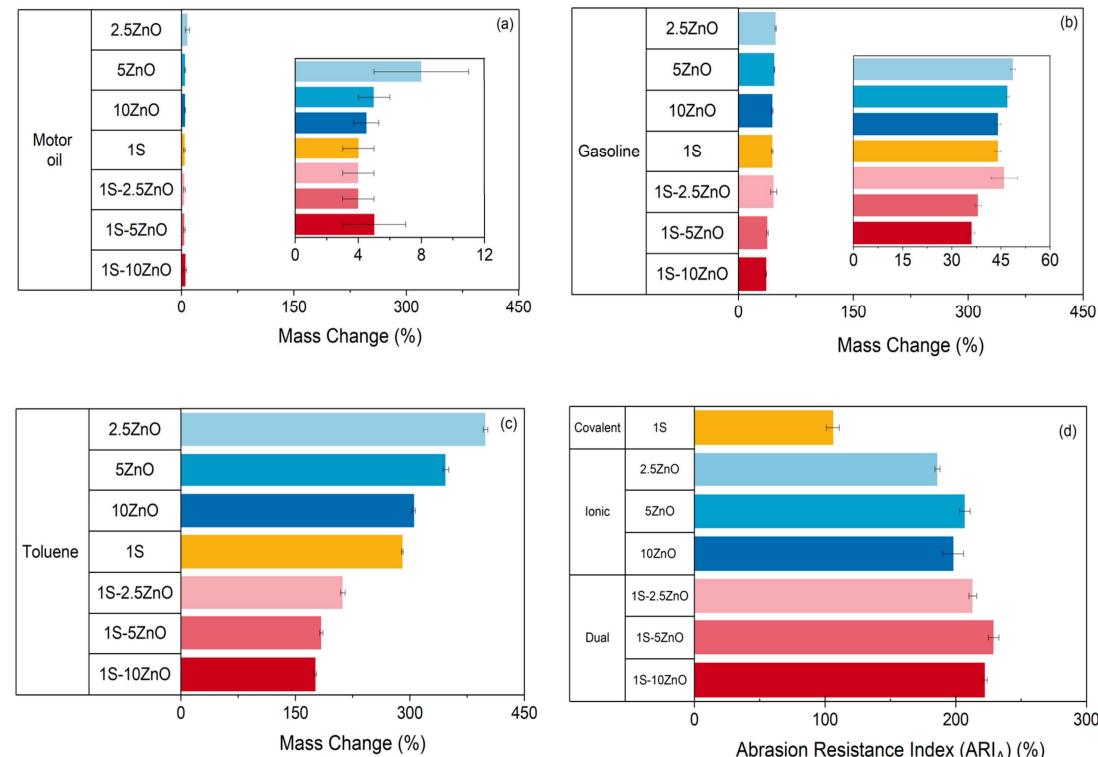
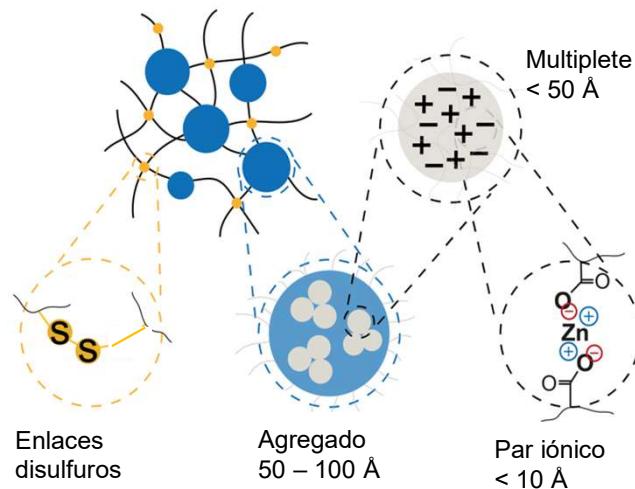


JORNADAS CAUCHO
BOGOTÁ 2025

REDISEÑAR

XNBR / S / ZnO

Disulfuros + enlaces iónicos



Efecto sinergístico:

- Resistencia a la abrasión mejora en ~15% comparado con un sistema iónico y ~115% comparado con un sistema de azufre
- Resistencia química mejorada frente a fluidos no-polares como tolueno y gasolina

Utrera-Barrios et al, *Polymers*, 2021, 13(19), 3234



JORNADAS CAUCHO
BOGOTÁ 2025

CIRCULARIDAD DE PRODUCTOS



JORNADAS CAUCHO
BOGOTÁ 2025



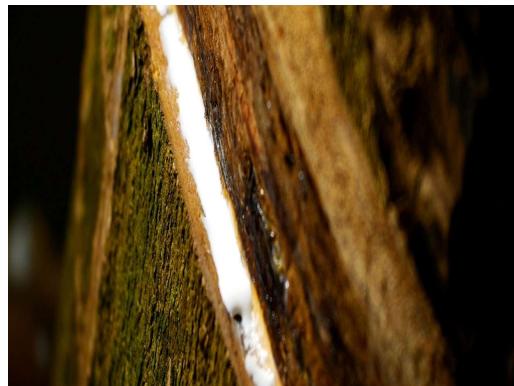
REPARACIÓN



JORNADAS CAUCHO
BOGOTÁ 2025

POLÍMEROS AUTORREPARABLES

INSPIRACIÓN: látex como elemento autosellante

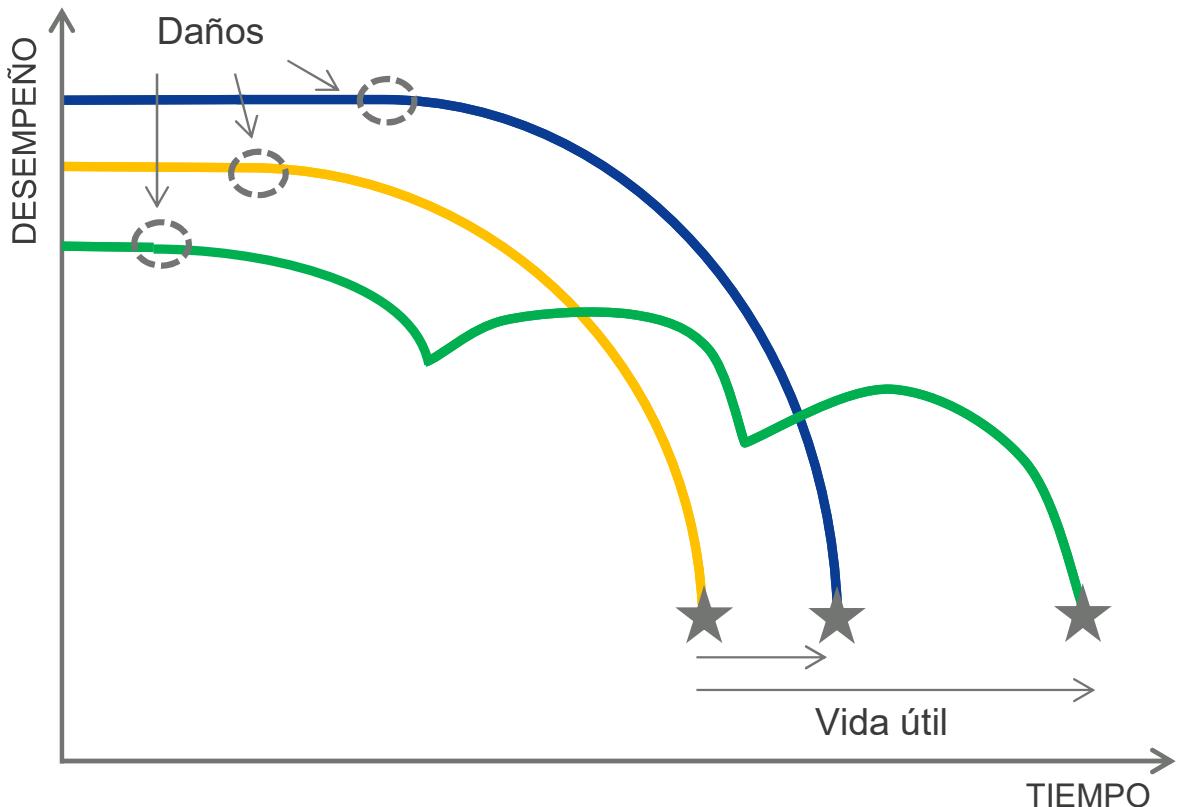


INSPIRACIÓN: regeneración de tejidos



JORNADAS CAUCHO
BOGOTÁ 2025

POLÍMEROS AUTORREPARABLES



Estrategia tradicional:
Desarrollo de materiales cada vez más resistentes

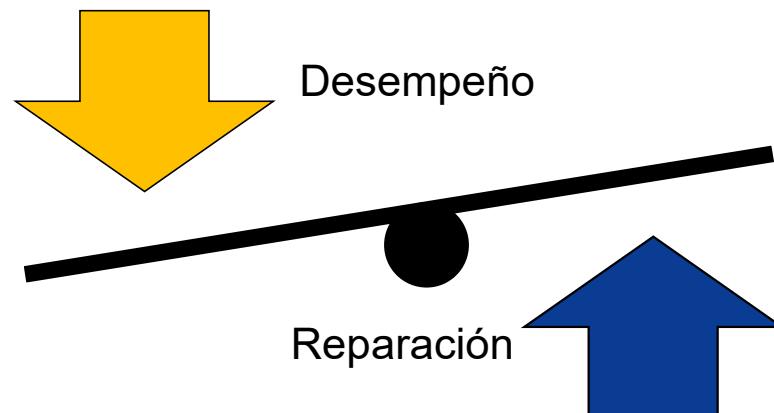
Estrategia de autorreparación:
Reparación de daños, recuperación de funcionalidades incrementando el ciclo de vida útil



RETO: AUTORREPARACIÓN EN CAUCHOS



- Elevada densidad de entrecruzamiento
- Rigidez
- Irreversibilidad

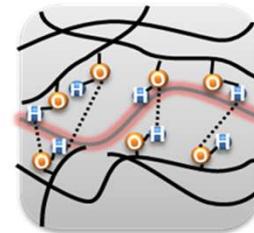
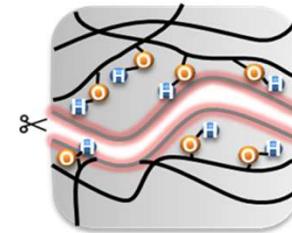
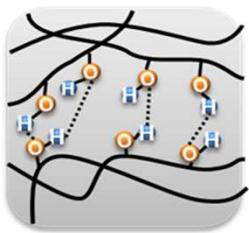


- Movilidad
- Enlaces reversibles
- Interdifusión de cadenas

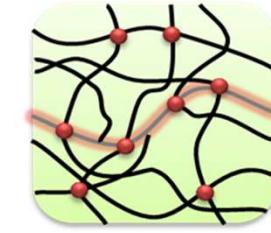
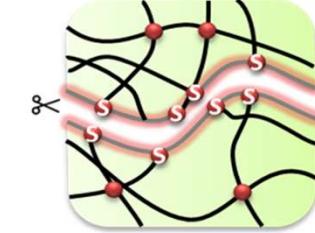
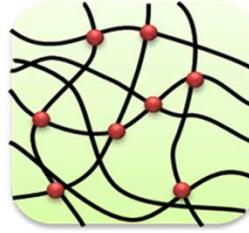


AUTORREPARACIÓN Y REVERSIBILIDAD

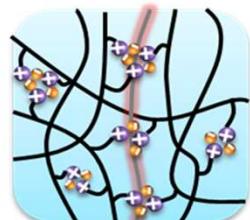
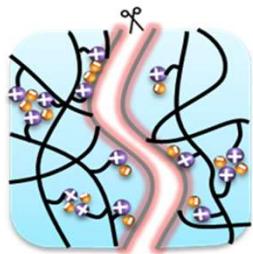
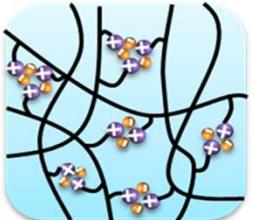
ENLACES DE HIDRÓGENO



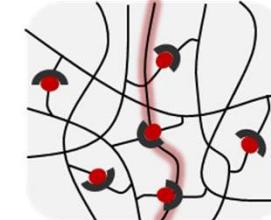
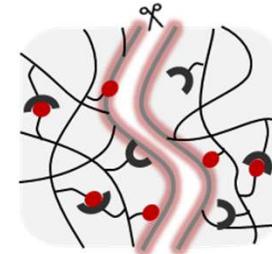
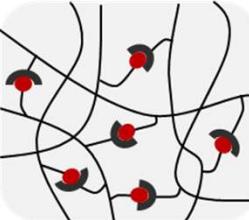
INTERCAMBIO DE DISULFUROS



INTERACCIONES IÓNICAS

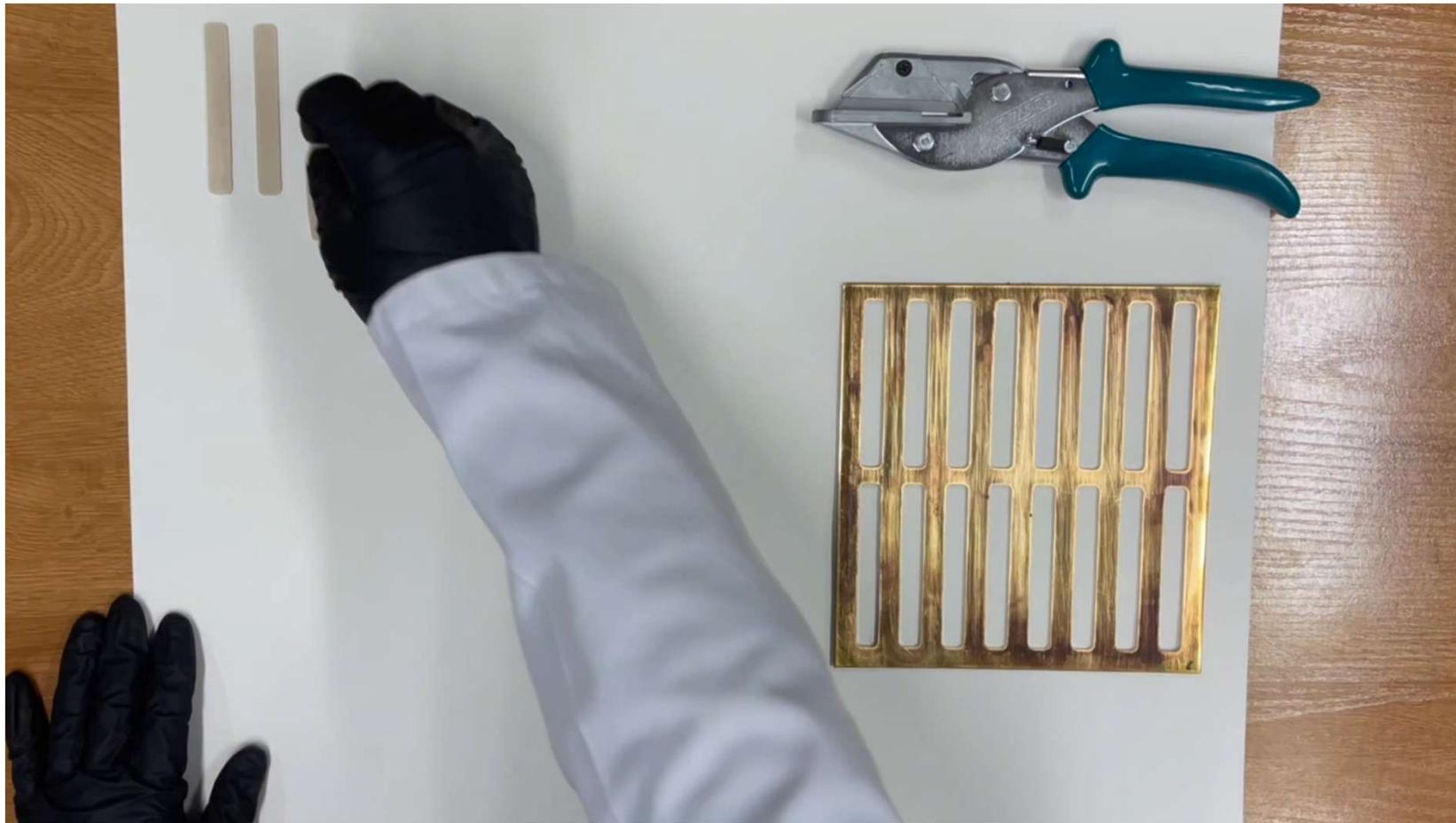


QUÍMICA DIELS-ALDER



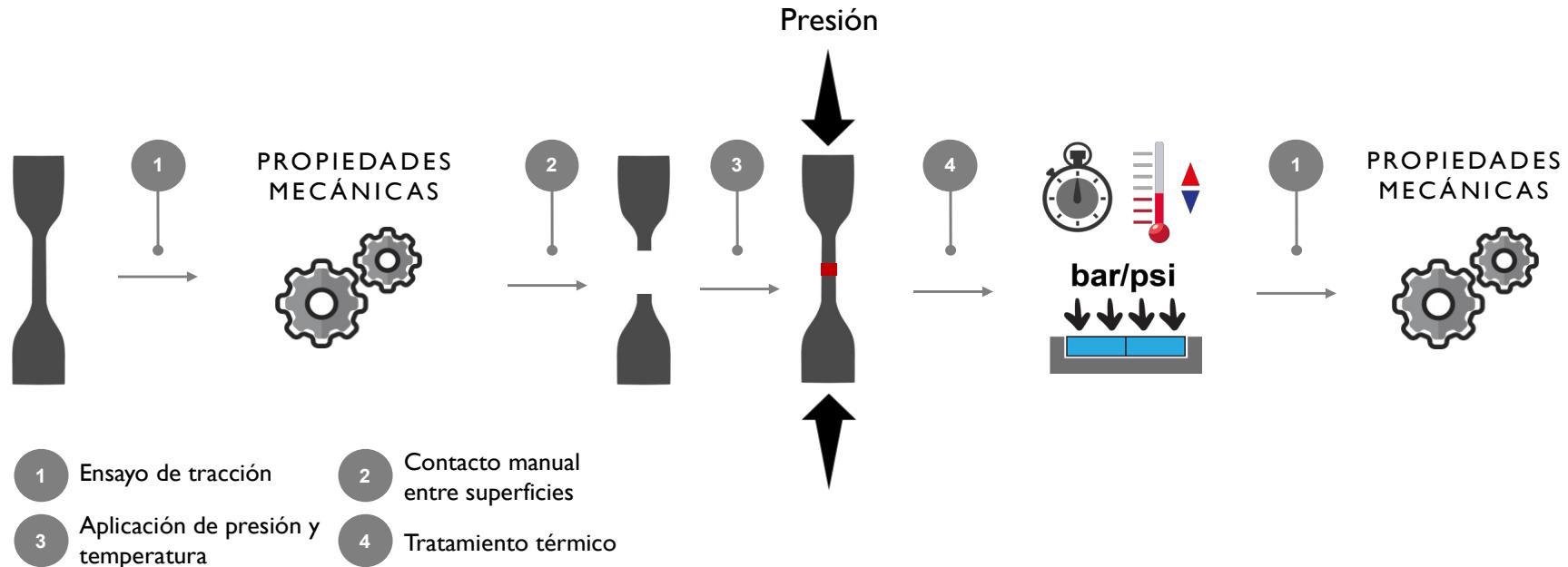
JORNADAS CAUCHO
BOGOTÁ 2025

PROTOCOLO DE AUTORREPARACIÓN



JORNADAS CAUCHO
BOGOTÁ 2025

CÓMO SE MIDE LA AUTORREPARACIÓN



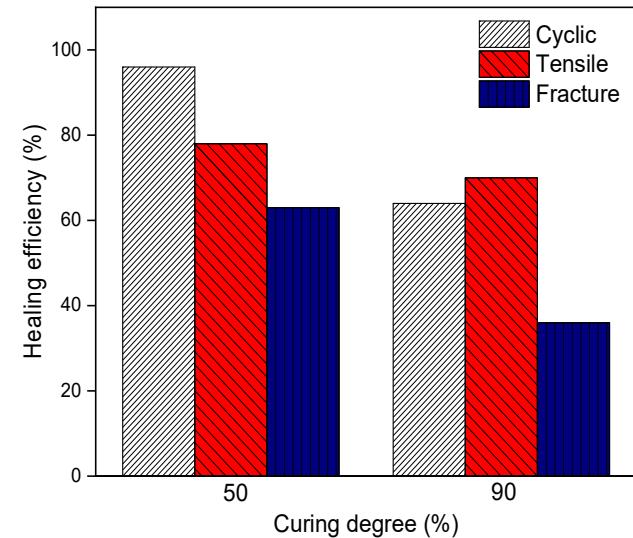
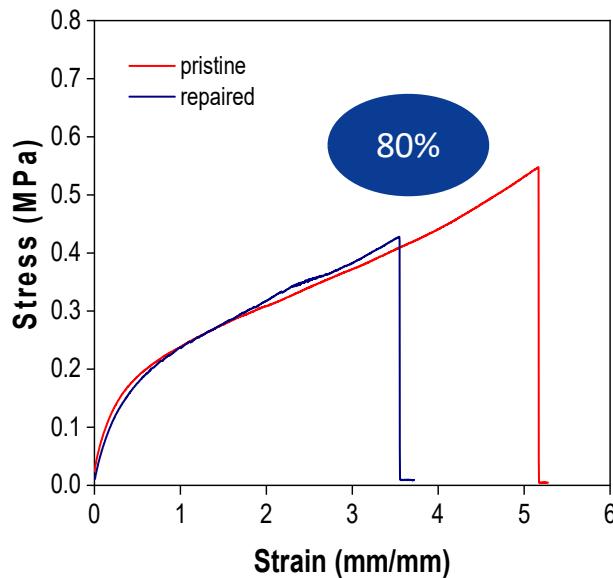
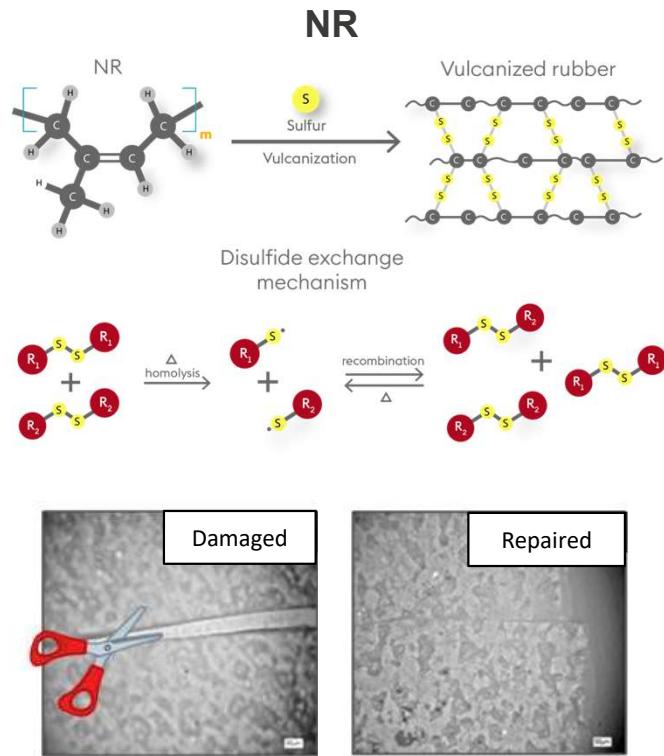
Eficiencia de reparación η :

$$\eta_p = \frac{p_{reparado}}{p_{virgen}} \times 100 \quad p = \text{propiedad de interés}$$



JORNADAS CAUCHO
BOGOTÁ 2025

REPARAR



Compuesto de NR convencional:

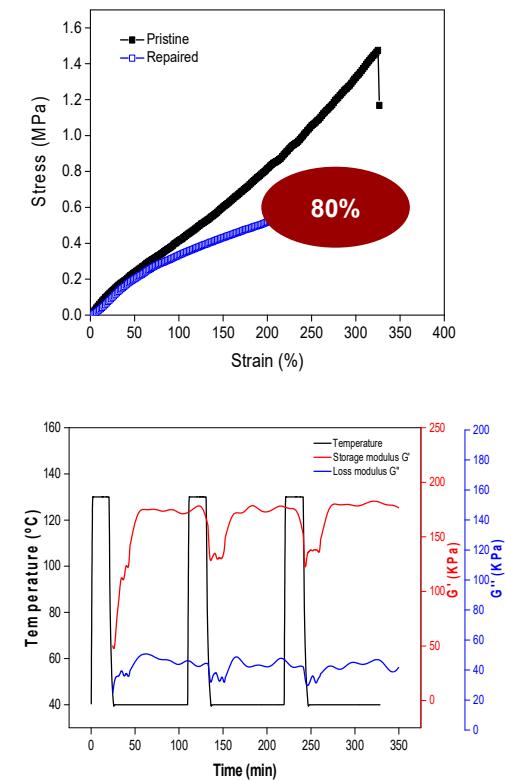
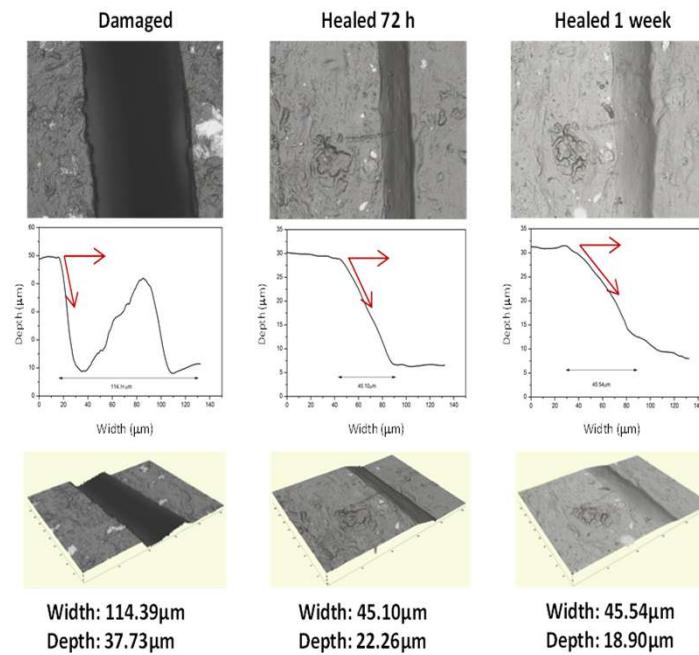
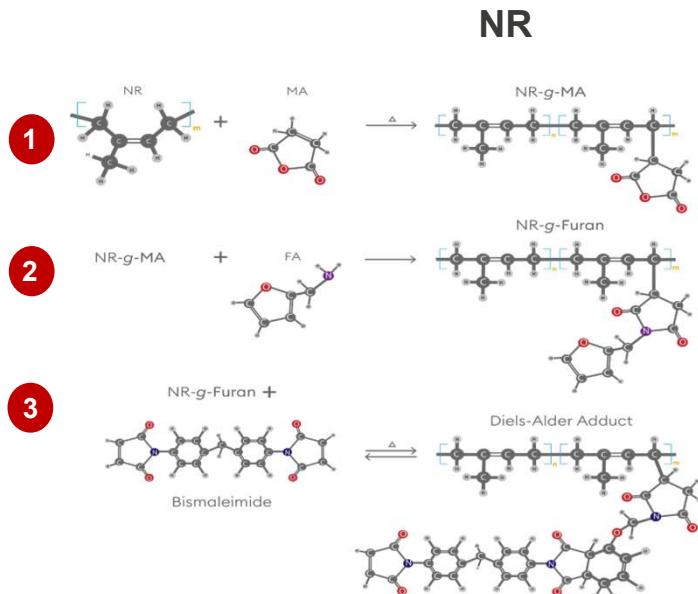
- Intercambio de disulfuros como mecanismo de reparación
- Reparación dependiente del grado de curado y tipo de daño

Hernández et al, ACS Sust Chem & Eng, 2016, 4 (10), 5776-5784



JORNADAS CAUCHO
BOGOTÁ 2025

REPARAR



Red entrecruzada de NR mediante reacciones Diels-Alder:

- La reparación se lleva a cabo desde los planos inferiores hacia los planos superiores
- 80 % de reparación a bajas deformaciones
- 3 ciclos de reparación

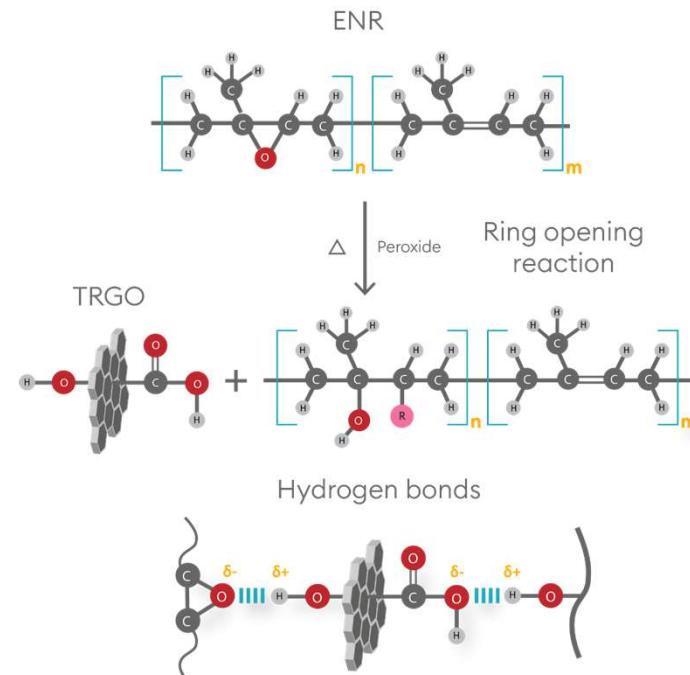
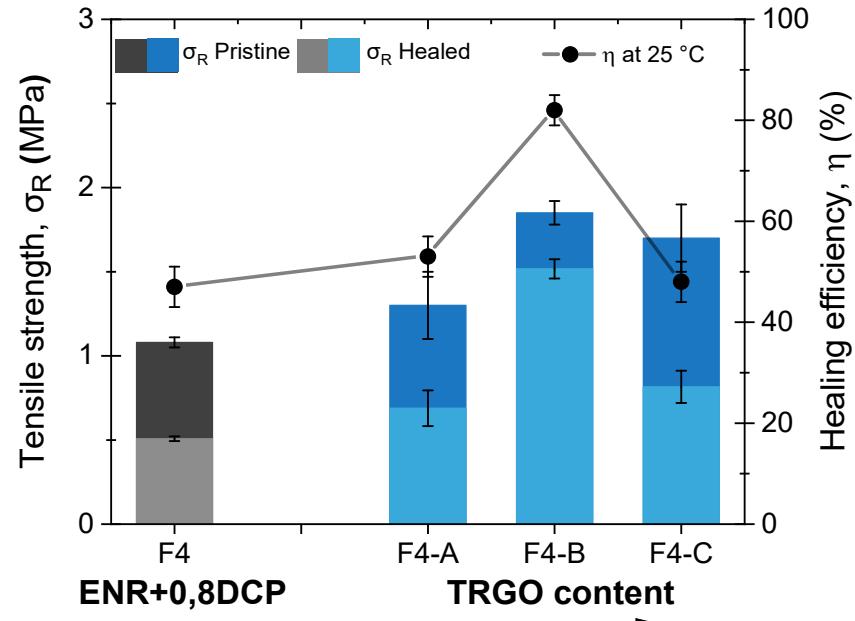
Tanasi et al, *Polymer*, 2019, 175, 15-24



JORNADAS CAUCHO
BOGOTÁ 2025

REPARAR

ENR + óxido de grafeno



Al incluir TRGO:

- 85% reparación a TEMPERATURA AMBIENTE con 0.5 ppc TRGO
- ~100% incremento en resistencia a la tracción

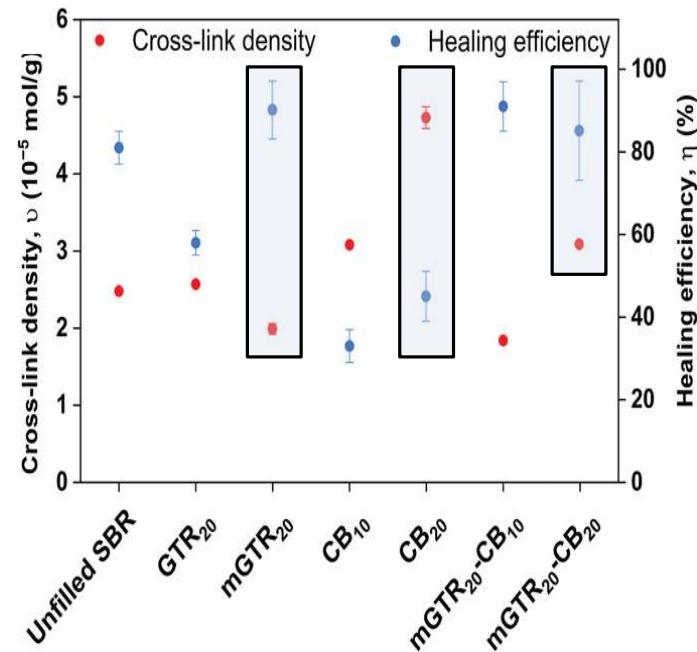
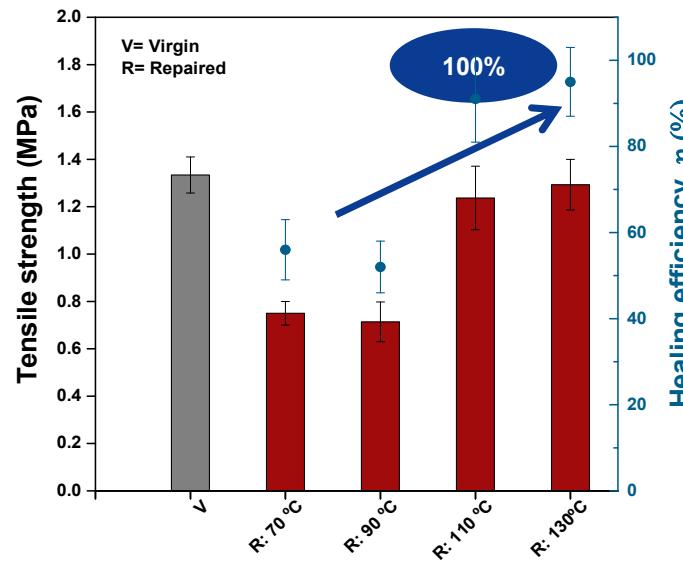
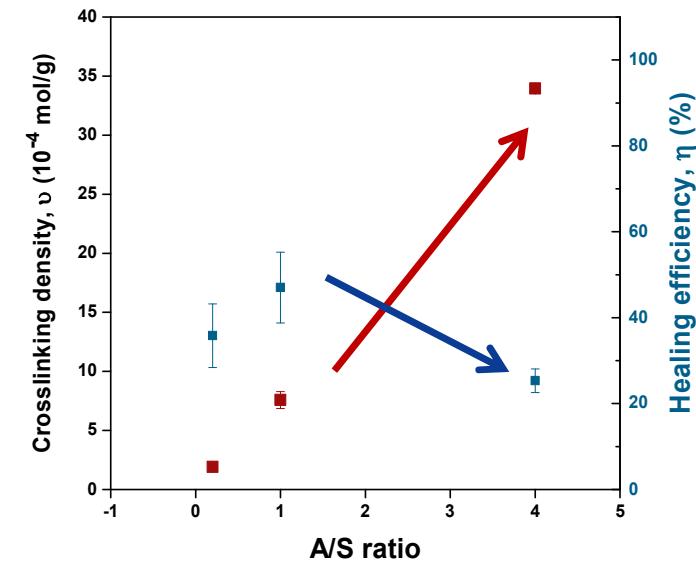
Utrera-Barrios et al, ACS Omega, 2020, 5, 1902-1910



JORNADAS CAUCHO
BOGOTÁ 2025

REPARAR

SBR + cargas híbridas (CB+ GTR)



Compuestos de SBR:

- Claro compromiso entre desempeño mecánico y reparación
- 100% recuperación a altas temperaturas
- Sistema de cargas híbrido (CB+GTR) balancea propiedades

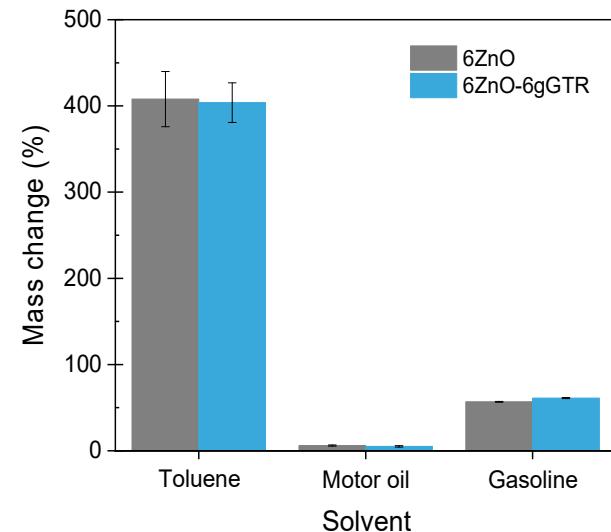
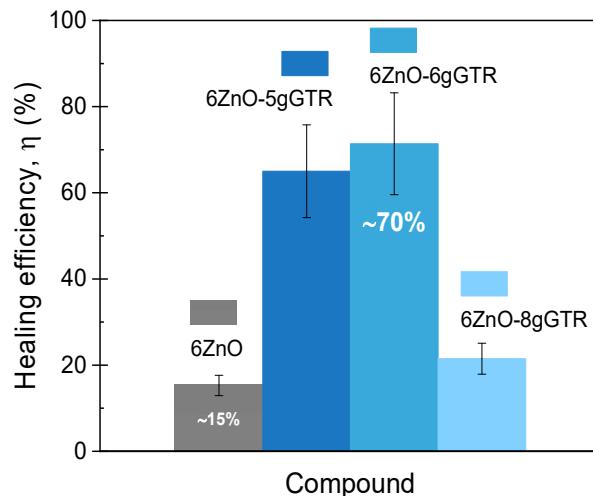
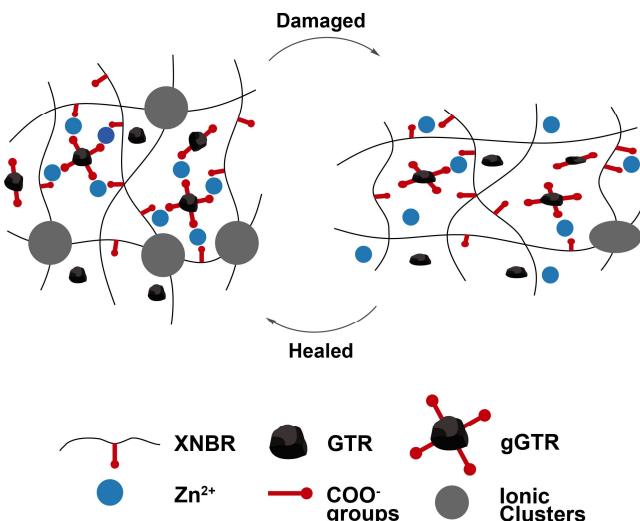
Hernández et al, Eur Polym J., 2018, 106, 273-283



JORNADAS CAUCHO
BOGOTÁ 2025

REPARAR

XNBR + GTR



Compuestos de XNBR:

- Compuesto autorreparable sostenible
- Aplicación potencial para el sector automotriz

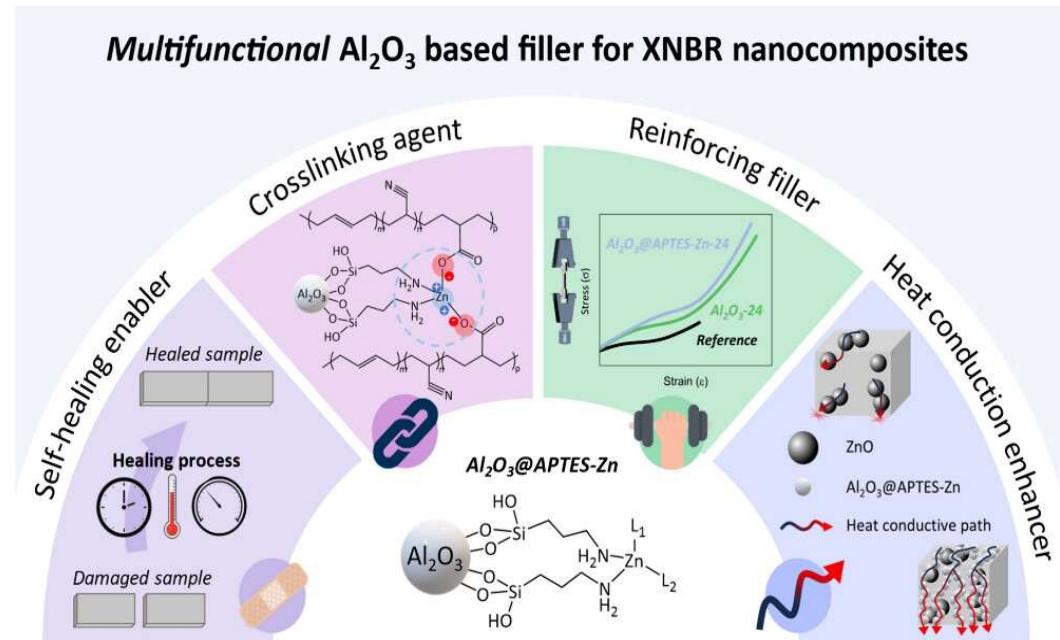
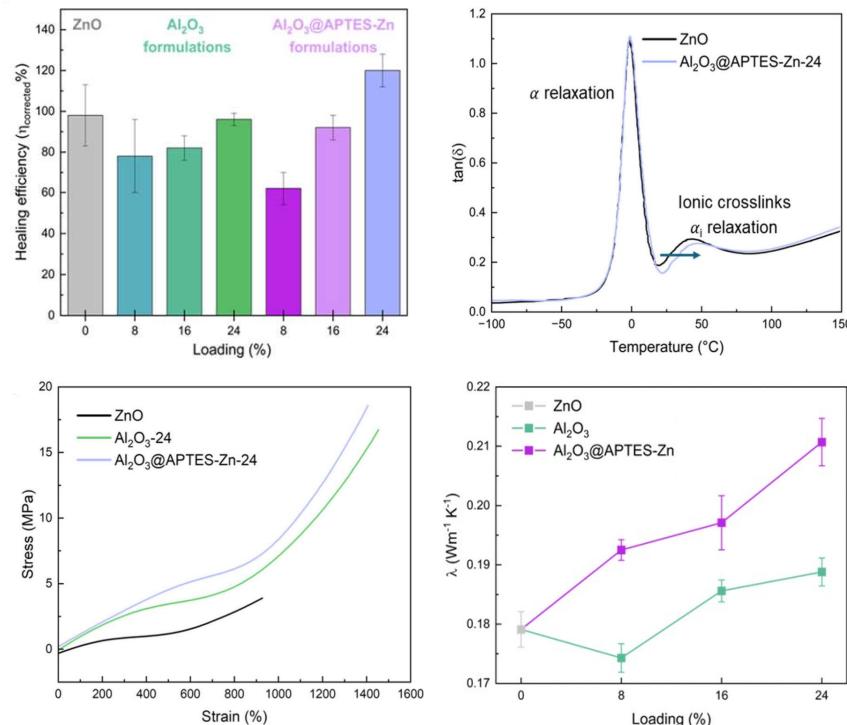
Utrera-Barrios et al, *Eur Polym J.*, 2020, 139, 110032



JORNADAS CAUCHO
BOGOTÁ 2025

REPARAR

XNBR + nanopartículas de Al_2O_3



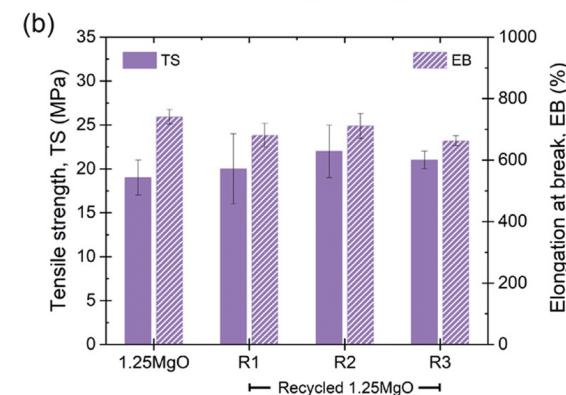
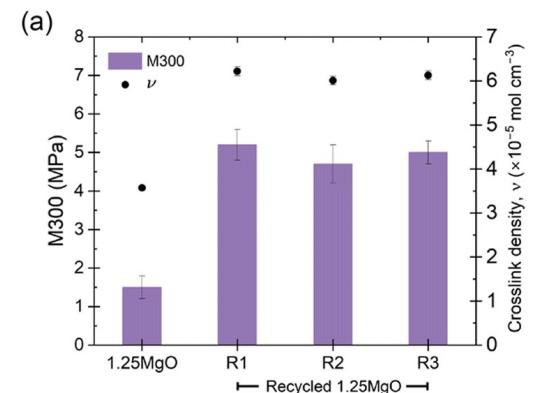
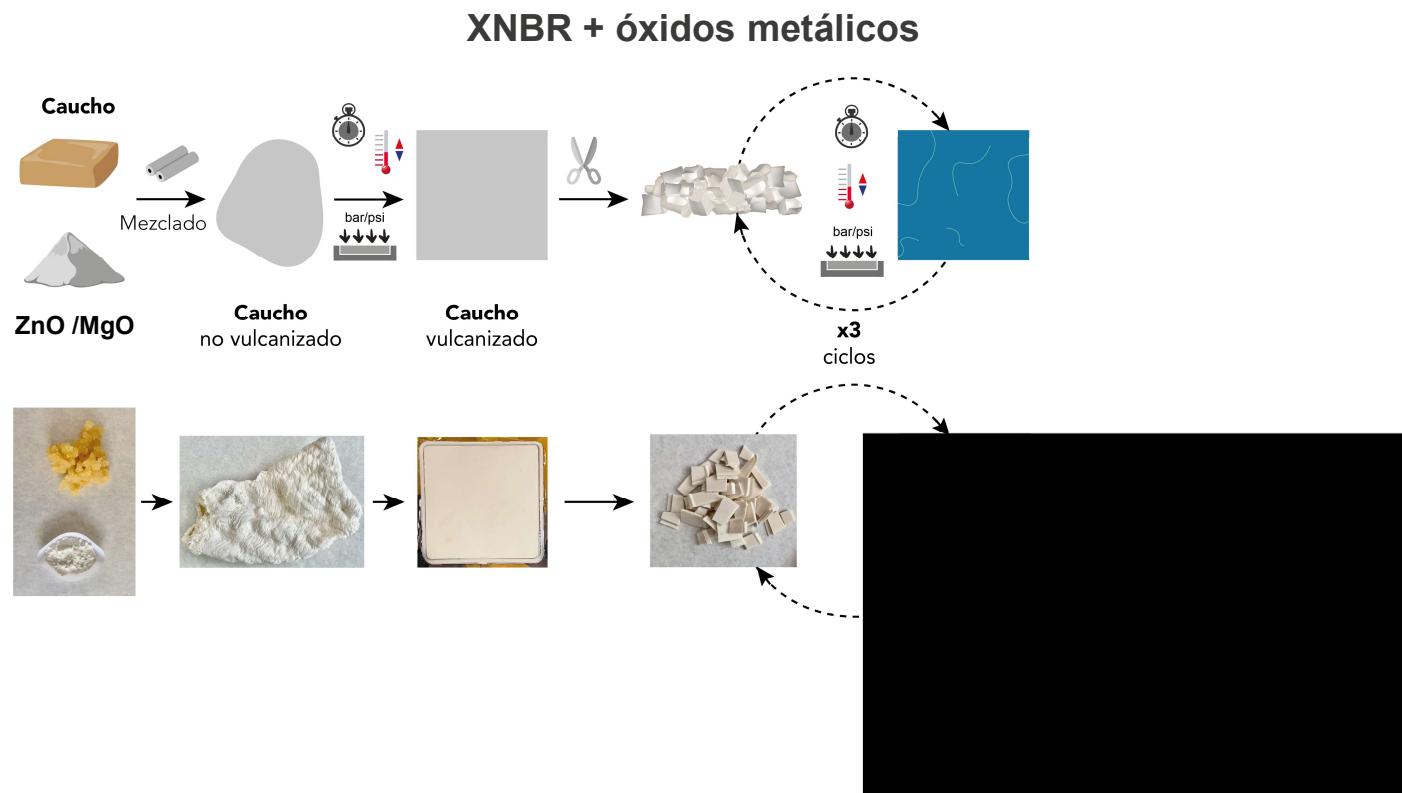
Las nanopartículas de Al_2O_3 modificadas con APTES-Zn:

- Actúan como agente entrecruzante iónico
- Promueven la reparación (100%)
- Mejoran las propiedades mecánicas (17 MPa y 1416%)
- Incrementan la conductividad térmica (+11.4%)

Faina et al, ACS Appl Polym Mater, 2025, 7(1), 234-246



RECICLAR



XNBR iónico:

- Hasta 3 ciclos de reciclado sin pérdida de propiedades

Utrera-Barrios et al, *Polymers*, 2021, 13(19), 3234

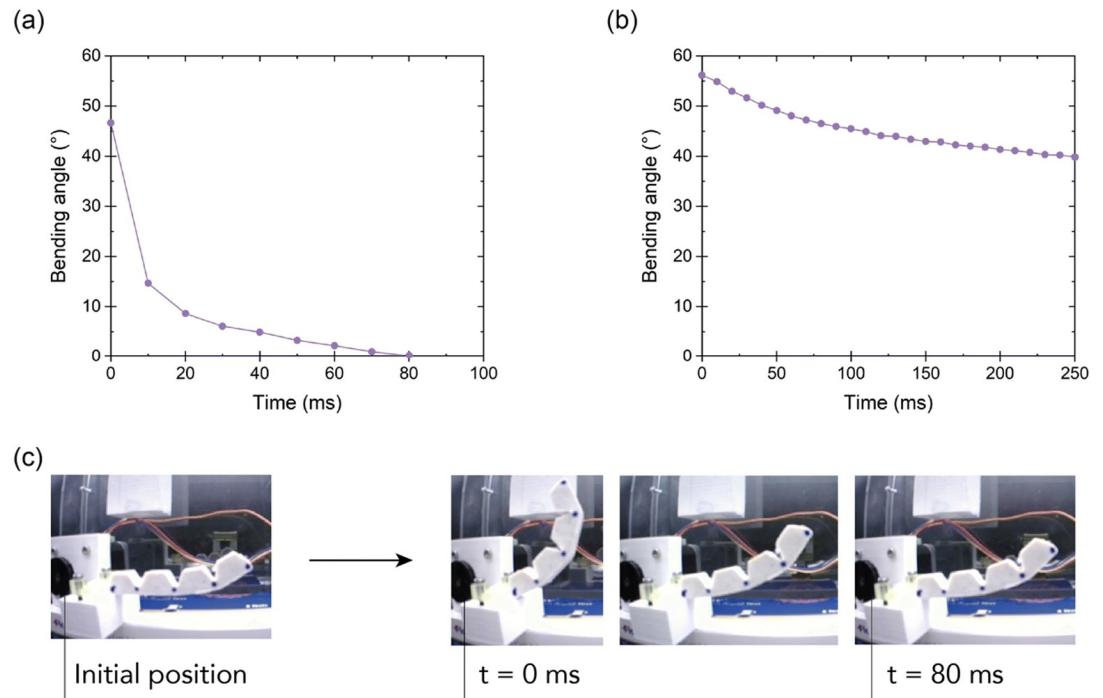
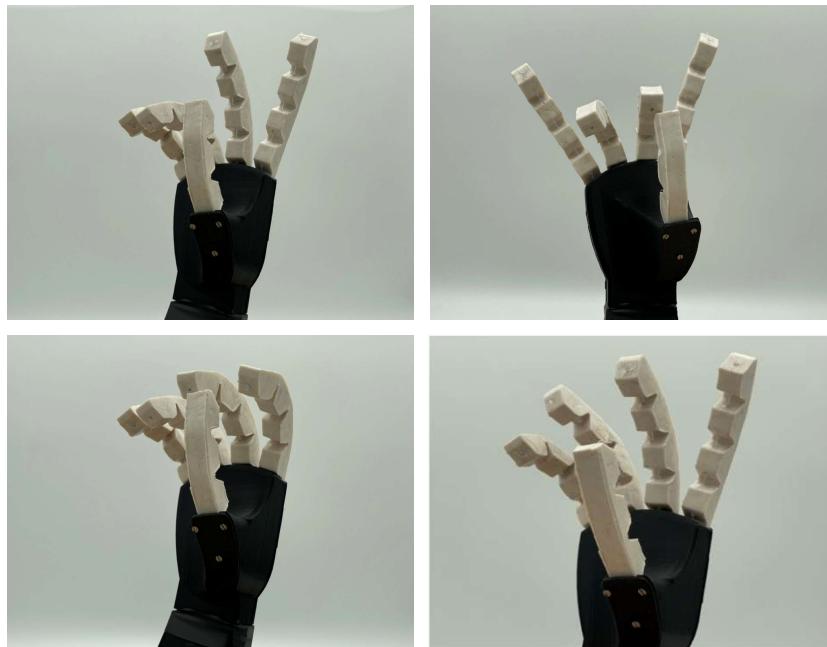
Utrera-Barrios et al, *Mater Design*, 2023, 233, 112273

Utrera-Barrios et al, *Mater Horiz*, 2024, 11, 708-725



JORNADAS CAUCHO
BOGOTÁ 2025

RECICLAR



XNBR iónico y reciclable:

- Apto para aplicaciones de robótica blanda
- Diseño exitoso de una mano robótica
- Recuperación en solo 80 ms

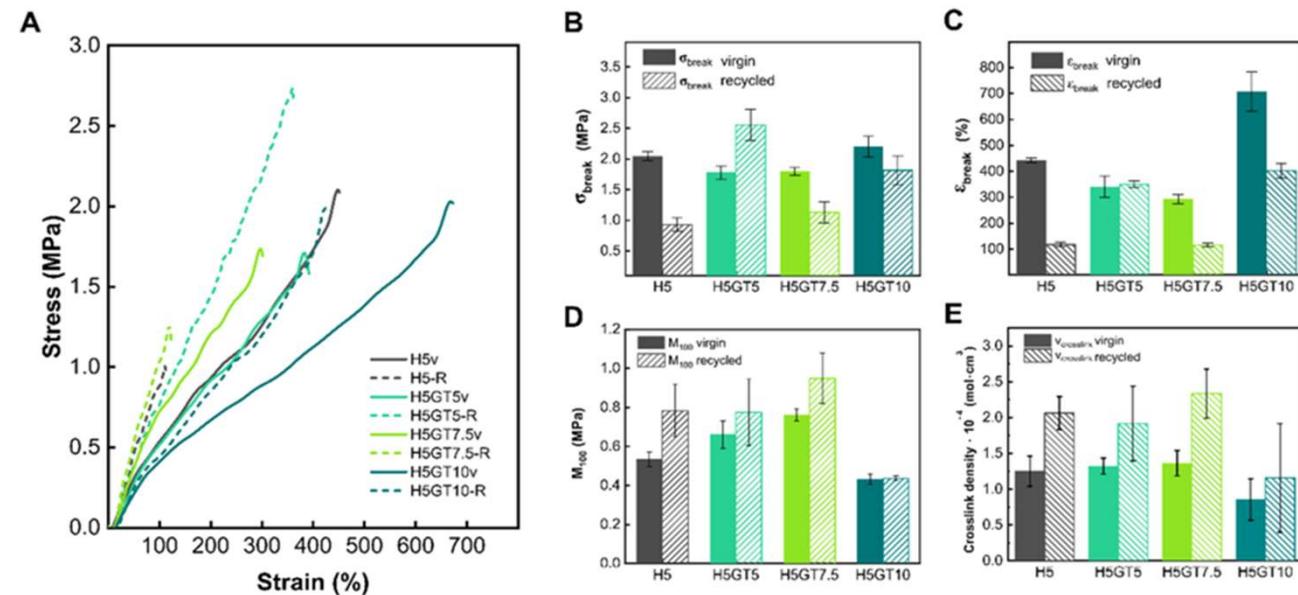
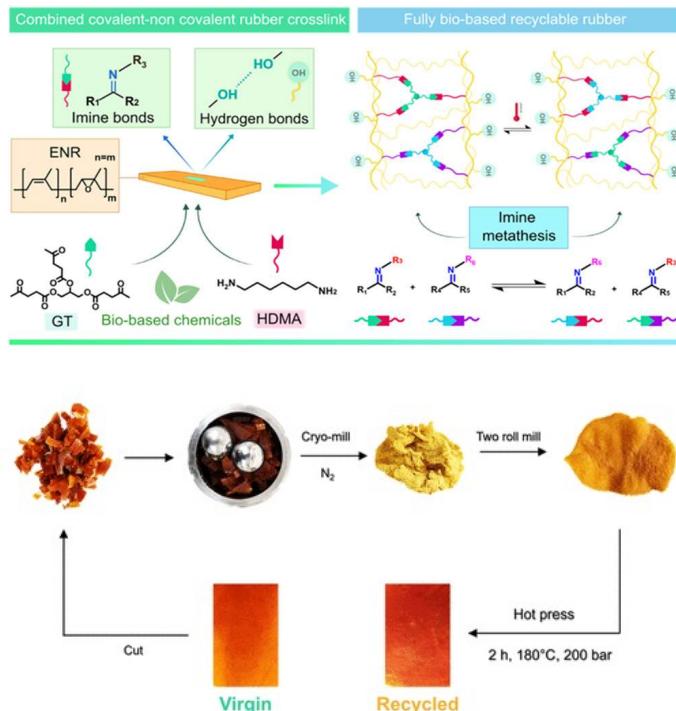
Utrera-Barrios et al, *Mater Horiz*, 2024, 11, 708-725



JORNADAS CAUCHO
BOGOTÁ 2025

RECICLAR

ENR

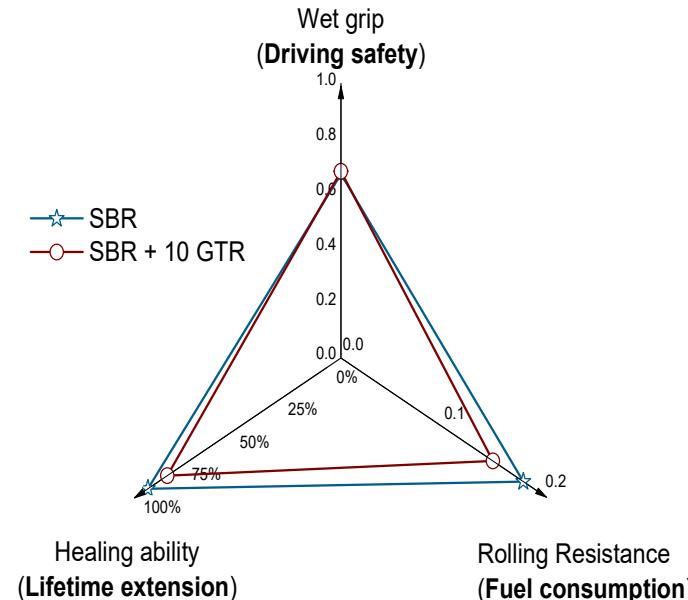
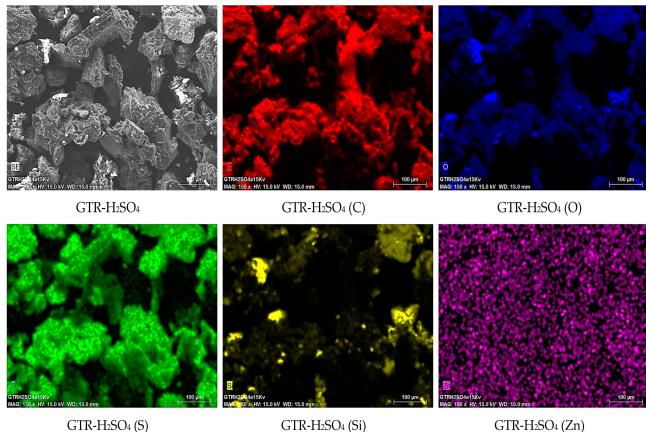


Compuesto de ENR biobasado:

- Red entrecruzada a partir de enlaces reversibles covalentes (imino) y no-covalentes (puentes de hidrógeno)
- Reciclabilidad y estabilidad mecánica mejorada

Lenzi et al, ACS Polym. Au, 2025, 5, 5, 656-668

RECICLAR



Caucho molido proveniente de neumáticos (GTR):

- Disminución de tamaño de partícula gracias a molienda criogénica
- Modificación superficial exitosa
- Triángulo mágico optimizado

Hernández et al, *Eur Polym J*, 2018, 106, 273-283

Araujo-Morera et al, *J Compos Sci*, 2021, 5, 68

Araujo-Morera et al, *Waste Manage*, 2021, 126, 309-322

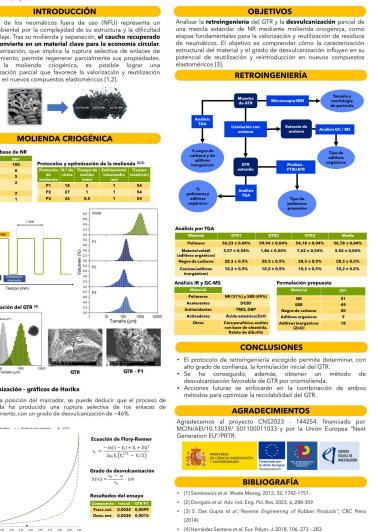
¿Quieres saber más?
Visita nuestro Póster

Retroingeniería y Des vulcanización: etapas clave para la valorización de residuos de neumáticos

Ignacio Rentería Gómez, Marisol Hernández Santacana, Miguel Ángel López Marchal, Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros (ICTP/CNCAI), Juan de la Cierva, 3, 28006, Madrid, España

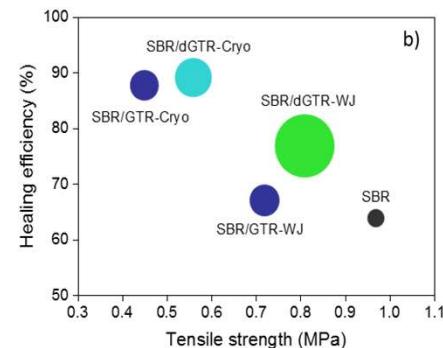
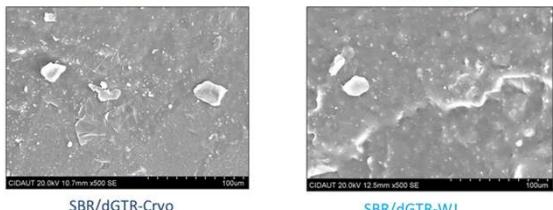
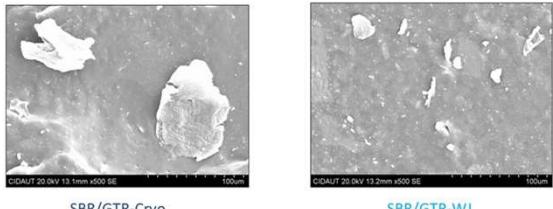
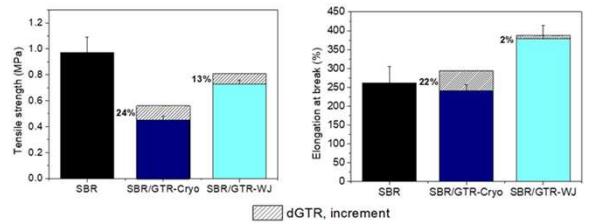


CSIC
Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros
RITC



JORNADAS CAUCHO
BOGOTÁ 2025

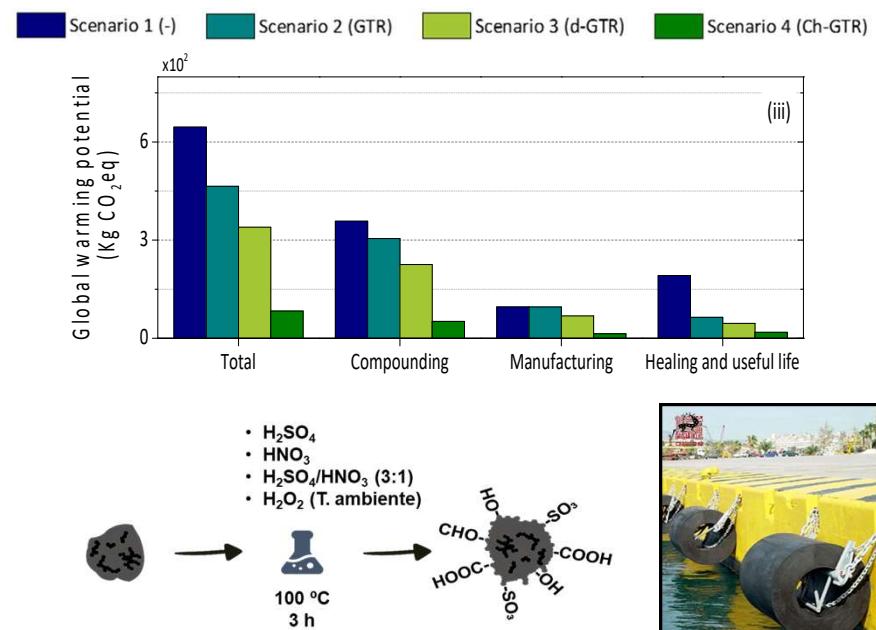
Desvulcanización



- La desvulcanización mejora el desempeño mecánico y la capacidad de autorreparación
- Estudio de LCA pionero con cauchos autorreparables y GTR
- 25-30% disminución en calentamiento global y huella de CO₂

Alonso Pastor et al, *Polymers*, 2022, 14(1), 11

Análisis de Ciclo de Vida (LCA)



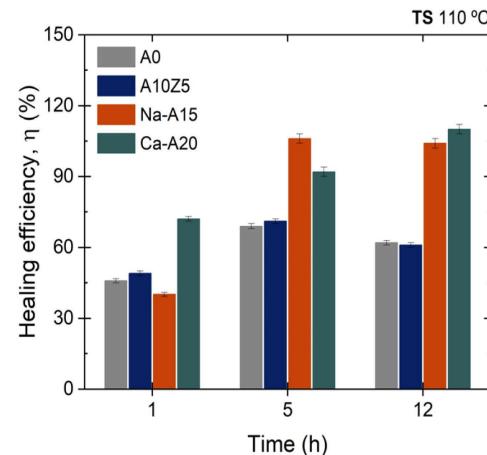
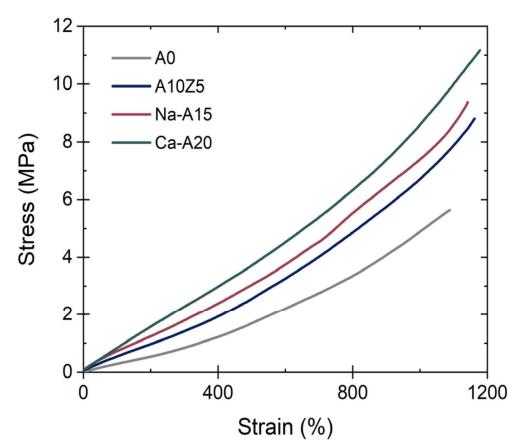
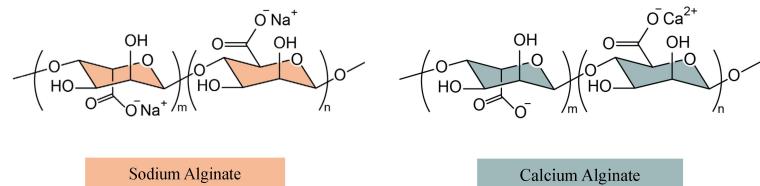
CIRCULARIDAD DE RECURSOS



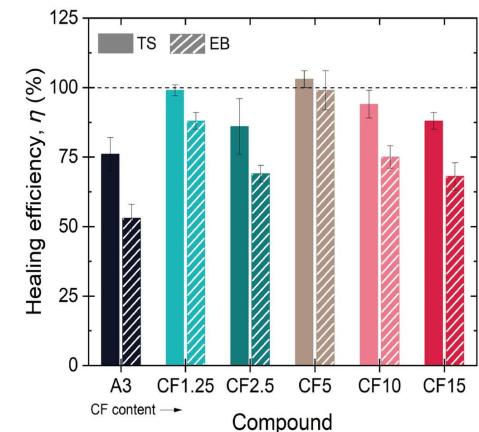
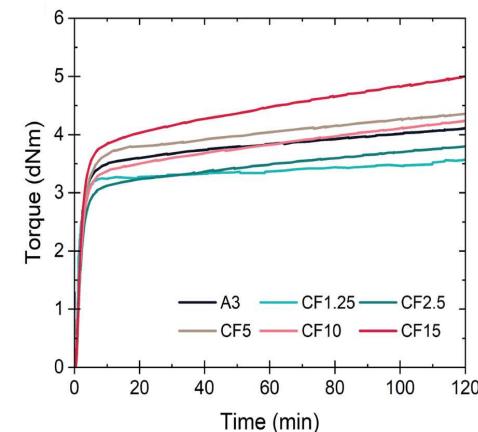
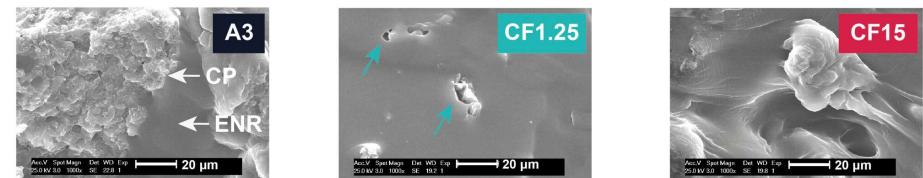
JORNADAS CAUCHO
BOGOTÁ 2025

RENOVAR

TPE1: ENR/policaprolactona/alginato



TPE2: ENR/propianato de celulosa/celulosa



TPEs biobasados:

Balance positivo entre propiedades mecánicas y autorreparación

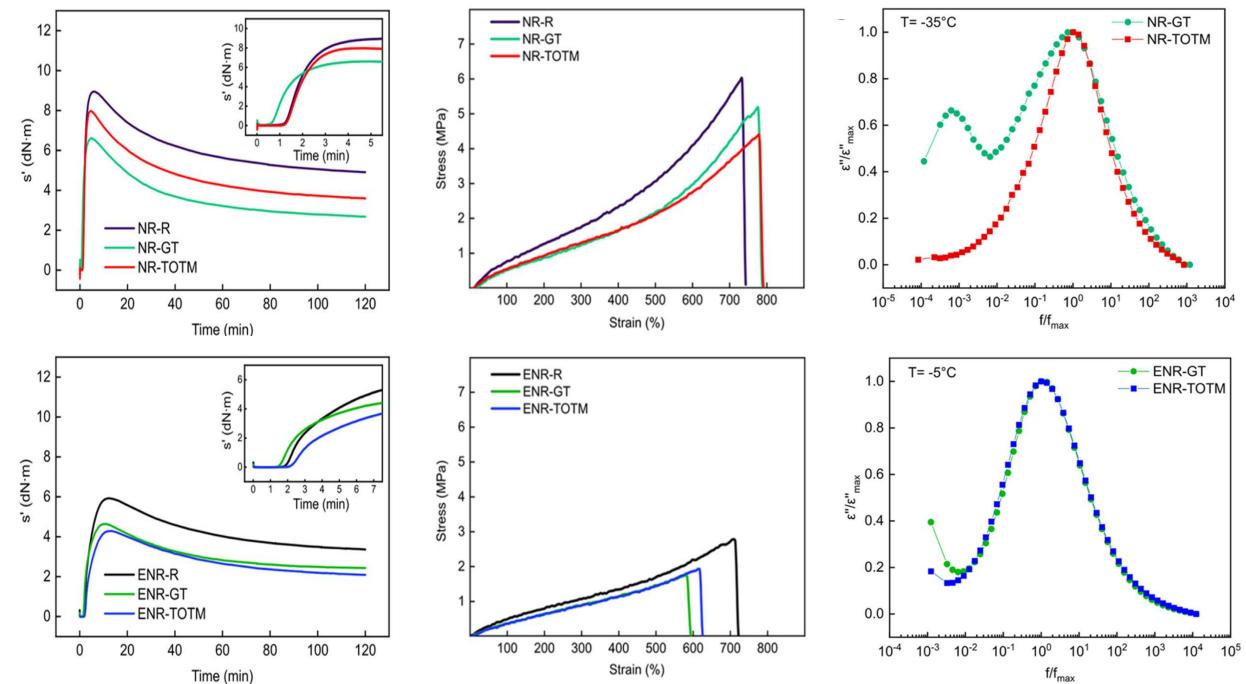
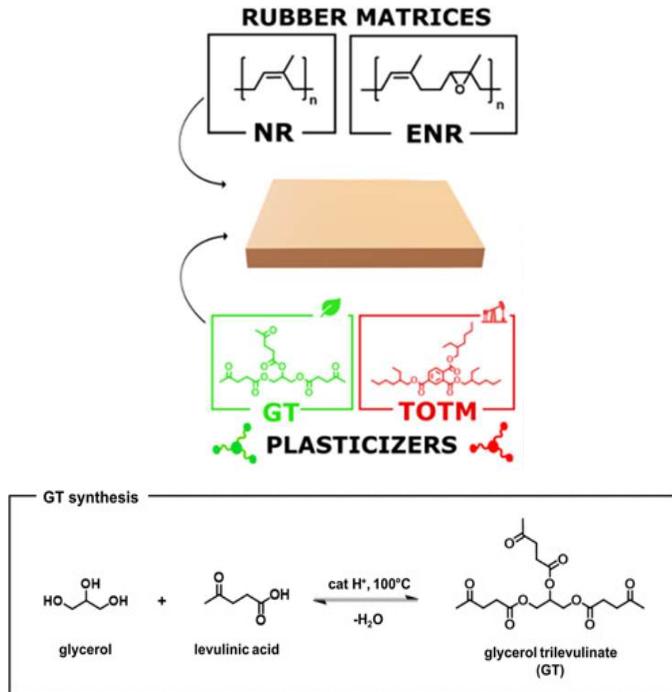
Utrera-Barrios et al, *Polymers*, 2022, 14(21), 4607

Utrera-Barrios et al, *Polym Compos*, 2024, 45(9), 7918-7931



JORNADAS CAUCHO
BOGOTÁ 2025

RENOVAR



Plastificante derivado del ácido Levulínico:

- GT acelera la vulcanización
- Plastificante biobasado equivalente a plastificante comercial
- GT parcialmente miscible con NR, totalmente miscible con ENR

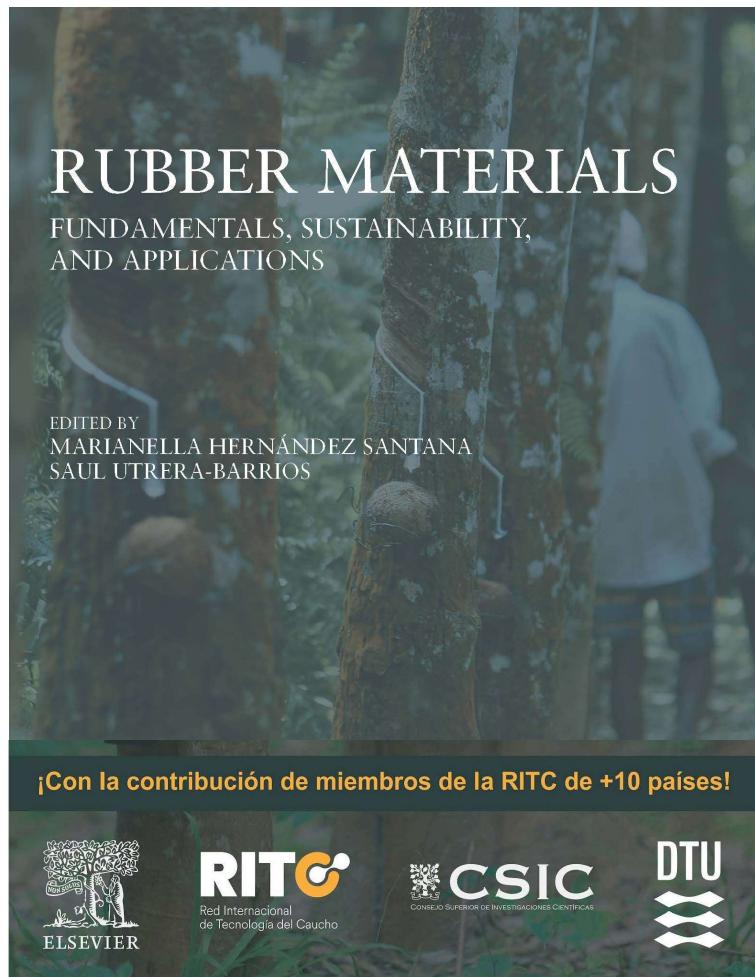
Lenzi et al, ACS Polym Au, 2025, 5, 3, 298–310

RESUMEN

- Diferentes estrategias sostenibles con balance positivo entre propiedades
- Vamos en la dirección correcta
- Combinación de diseño, materiales e ingeniería avanzada
- Acciones conjuntas entre industria, academia e instituciones gubernamentales



JORNADAS CAUCHÓ
BOGOTÁ 2025



RUBBER MATERIALS
FUNDAMENTALS, SUSTAINABILITY,
AND APPLICATIONS

Un nuevo libro de Elsevier que reúne +70 expertos en ciencia y tecnología del caucho a nivel mundial.

Edited por
Marianella Hernández Santana, CSIC, España - Directora de la RITC
Saul Utrera-Barrios, DTU, Dinamarca - Miembro de la RITC

¿Qué ofrece?

- Panorama actualizado del sector.
- Fundamentos, tendencias emergentes y aplicaciones avanzadas.
- Las 7Rs de la economía circular aplicadas al desarrollo de cauchos.
- Innovaciones en cauchos autorreparables, reciclables y de alto rendimiento para neumáticos, materiales inteligentes, robótica blanda, actuadores, manufactura aditiva, y más.





JORNADAS CAUCHO BOGOTÁ 2025

Gracias / Thank you



<https://pcg.ictp.csic.es/>



<https://www.linkedin.com/company/polymer-composite-group/>

