



JORNADAS RECICLAJE

B O G O T Á 2 0 2 5

**Mejora de caminos y rutas mediante el
agregado de polvo de NFU reciclados**

Lic. Witold R. Kopytyński

SIM – Servicio Integral de Medioambiente

Contenido de la presentación

1. Generalidades sobre medio ambiente y transporte.
2. El transporte en Argentina
3. Residuos de NFU, destino de los mismos: asfaltos modificados.
4. Infraestructura vial en LATAM
5. Mejoras de caminos y rutas con asfalto modificado con polvo de NFU
6. Beneficios en la mejora de pavimentos
7. Mercados potenciales: Argentina, Chile, Perú y Colonia
8. Precios, consumos

“El camión es un termómetro de la economía: cuando caen las ventas, la Argentina entra en recesión; cuando se recuperan, volvemos a tener crecimiento económico”

Raúl Barcesat CEO de Mercedes Benz Camiones y Buses

NFU, asfaltos y economía circular

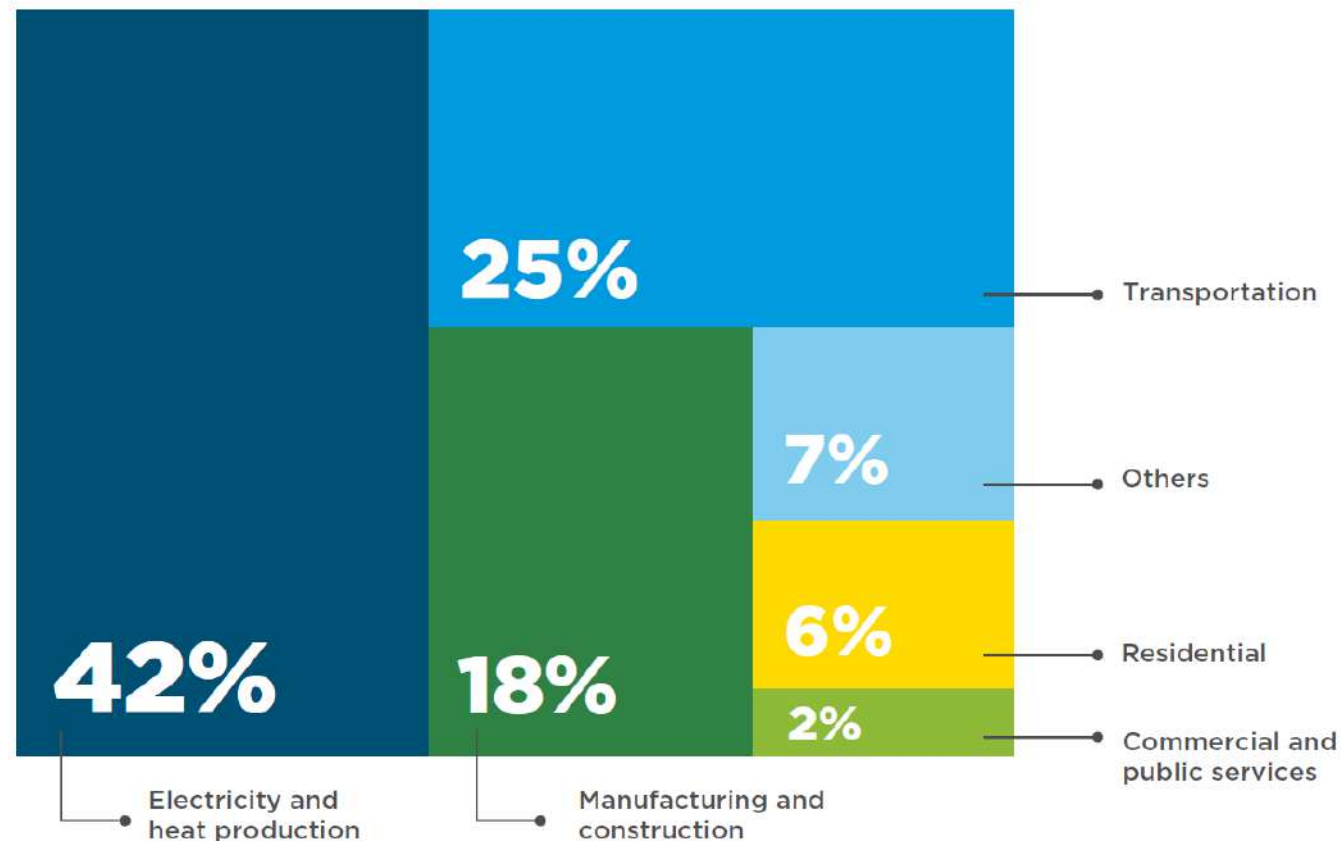
- A lo largo de las últimas décadas, el uso de polvo de neumáticos fuera de uso (NFU) como aditivo en mezclas asfálticas ha demostrado ofrecer mejoras significativas en la **durabilidad, resistencia al agrietamiento y rutting**, así como una notable **reducción del ruido** del tránsito. Además, este enfoque contribuye al **cierre del ciclo de economía circular**, reincorporando cientos de neumáticos por kilómetro de caminos construidos y reduciendo la presión sobre vertederos.
- La incorporación de polvo de NFU en pavimentos ofrece una solución técnica y ambiental que **optimiza la durabilidad, mejora la seguridad vial** (menor ruido y mejor adherencia) y **reduce significativamente el volumen de residuos de neumáticos en vertederos**.
- La tendencia global apunta a una mayor adopción de esta tecnología, impulsada por la economía circular y la regulación ambiental.

El transporte en Argentina

- La Argentina es un país extenso, por lo que la eficiencia en el transporte interno de mercaderías es crucial;
- También está lejos de los principales mercados internacionales y tiene que hacer un esfuerzo extra para competir con países que tienen una mejor ubicación estratégica.
- **El transporte por camión mueve el 92% de la producción en la Argentina, un porcentaje superior al de otros países.**
- La modalidad terrestre es adoptada en el 92% de los casos, a diferencia de la Unión Europea, con el 75% y de Estados Unidos, con el 73%;
- Por tren solo va el 4% de los productos en la Argentina, mientras que este porcentaje se eleva al 18% y al 12% en la UE y en EE.UU., respectivamente.
- La Argentina solo usa el transporte por agua en el 3,5% de los casos, mientras que EE.UU y la UE duplican este porcentaje.

Con el 25% de las emisiones globales, el transporte es el segundo contribuyente de CO2 procedente de la quema de combustibles, detrás generación de electricidad y calefacción (42%)

Global CO2 emissions from fuel combustion by sector in 1990, 2000, 2010, and 2019



Infraestructura vial

- Un desafío adicional es el estado de la infraestructura vial en la región: sólo el 33,2% de los kilómetros de carreteras están pavimentadas en LATAM.
- La calidad de la infraestructura vial tiene un impacto directo en los niveles de emisiones de los vehículos, que aumentan un 2,5% cada año en promedio cuando los vehículos circulan por carreteras en malas condiciones.

Residuos de NFU

- El uso de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en carreteras facilita la evaluación y adopción de nuevas tecnologías como **mezclas asfálticas con NFU** o el reciclaje de pavimentos que han alcanzado su vida útil, permitiendo estimar posibles reducciones en los impactos ambientales en comparación con tecnologías convencionales.
- Por ejemplo, al comparar el ciclo de vida (extracción, mezcla, construcción, rehabilitación y vida útil del trabajo) de la misma cantidad de material de **mezcla asfáltica modificado con polvo de NFU** versus una mezcla asfáltica modificada con polímeros plásticos (SBS), se comprueba una **disminución del 26,79% en las emisiones de GEI y del 27,3% en el consumo de energía.**

- Además, puede haber una mayor disminución de las emisiones y consumo considerando que **las mezclas asfálticas con polvo de NFU requieren un espesor de capa más fino**, lo que da como resultado una disminución de la explotación de materias vírgenes, menor transporte, y una vida útil más larga.
- Una reducción adicional significativa de las emisiones también se puede generar durante la construcción debido a una **menor compactación y temperaturas de mezcla**, con una carga medioambiental entre el 5% y el 10% inferior al de la tecnología tradicional.

- La tecnología de asfaltos modificados con NFU mejora el rendimiento de la estructura del pavimento y su durabilidad, al tiempo que facilita el drenaje del agua de la superficie de la carretera.
- Además, esta tecnología es más barata que otros modificadores y permite la sustitución de polímeros vírgenes en los asfaltos modificados.
- La tecnología de mezclas asfálticas modificadas con NFU ha comenzado a implementarse en Estados Unidos y España, así como en países de LATAM como **Chile**, México, Brasil, **Colombia**, Uruguay y **Argentina**.
- Respecto al reciclaje de pavimentos que han llegado al fin de su vida útil, las capas recicladas que están adecuadamente diseñadas y sometidas a un estricto control de calidad pueden funcionar tan bien o mejor que las capas fabricadas únicamente con materiales vírgenes.

Propiedades del polvo de NFU

- **Elevada elasticidad y viscosidad:** el caucho aporta flexibilidad al aglutinante bituminoso, mejorando la recuperación elástica tras cargas repetidas.
- **Aumento de la adhesión:** mejora la adherencia entre ligante y árido, lo que reduce la formación de fisuras por fatiga.
- **Amplio rango de temperaturas efectivo:** resiste mejor el agrietamiento en frío y el ablandamiento en altas temperaturas.

Beneficios en la mejora de pavimentos

- **Mayor vida útil:** Diversos estudios muestran que las mezclas asfálticas modificadas con NFU pueden duplicar su vida útil respecto a pavimentos convencionales.
- **Reducción de ruido:** En proyectos como los ejecutados por Sacyr en la Región Metropolitana de Santiago (Chile), la incorporación de polvo de caucho ha reducido el nivel de ruido en hasta 5 dB.
- **Resistencia al rutting y deformaciones permanentes:** Ensayos sobre la superficie de tránsito indican que **el asfalto con NFU forma ruts hasta un 30 % más superficiales que el asfalto convencional**, gracias al aumento de rigidez y viscosidad del ligante.

Casos de estudio e implementaciones

- **Chile (Sacyr):** tramos de Av. La Florida y Presidente Jorge Alessandri con NFU, demostrando menor ruido y mayor durabilidad.
- **Argentina (UTN):** proyectos piloto de asfaltos altamente modificados con contenido creciente de NFU, mostrando mejoras en resistencia a la fisuración.
- **España (Manual AENOR/CARRETEROS):** guía técnica para la dosificación y control de mezclas con polvo de NFU, validada en múltiples obras.

Mejora de caminos y rutas mediante el agregado de polvo de NFU reciclados

- A lo largo de las últimas décadas, el uso de polvo de NFU como aditivo en mezclas asfálticas ha demostrado ofrecer mejoras significativas en la **durabilidad, resistencia al agrietamiento y rutting**, así como una notable **reducción del ruido**. Además, este enfoque contribuye al **cierre del ciclo de economía circular**, reincorporando cientos de neumáticos por kilómetro de vía construida y reduciendo la presión sobre vertederos.
- El **rutting o ahuellamiento** es una deformación permanente que se manifiesta como hundimientos longitudinales en las huellas de las ruedas de un pavimento flexible, principalmente asfáltico.
- El rutting o ahuellamiento del pavimento es una depresión lineal permanente que se forma en las trayectorias de las ruedas, causada por las cargas de tráfico pesado que compactan o deforman la mezcla asfáltica o las capas subyacentes.

- Se origina por la acumulación de desplazamientos plásticos o consolidación en la mezcla bituminosa o en las capas inferiores (subbase o subrasante) debido al tránsito repetido.
- Este deterioro del pavimento genera problemas de seguridad, como la reducción del drenaje, que puede provocar aquaplaning, y también puede hacer que la conducción sea menos cómoda y más costosa debido al aumento de las necesidades de mantenimiento.
- El rutting puede clasificarse en **rutting de mezcla** (a nivel de la capa de asfalto) y **rutting estructural** (en las capas de apoyo).
- Sus efectos incluyen acumulación de agua en la calzada (riesgo de aquaplaneo), mayor desgaste de neumáticos y reducción de la comodidad de marcha, lo que impacta la seguridad vial y los costos de mantenimiento.

Beneficios en la mejora de pavimentos

- **Mayor vida útil:** Diversos estudios muestran que las mezclas asfálticas modificadas con NFU pueden **duplicar** su vida útil respecto a pavimentos convencionales.
- **Reducción de ruido:** En proyectos como los ejecutados por Sacyr en la Región Metropolitana de Santiago (Chile), la incorporación de polvo de caucho ha reducido el nivel de ruido en hasta **5 dB**.
- **Resistencia al rutting (ahuellamiento) y deformaciones permanentes:** Ensayos de pista de rodadura indican que el asfalto con NFU forma huellas hasta **un 30 % más superficiales** (menos profundos) que el asfalto convencional, gracias al aumento de rigidez y viscosidad del ligante.

Definición de rutting

- El **rutting** es una deformación permanente que se manifiesta como hundimientos longitudinales en las huellas de las ruedas de un pavimento flexible, principalmente asfáltico. Se origina por la acumulación de desplazamientos plásticos o consolidación en la mezcla bituminosa o en las capas inferiores (subbase o subrasante) debido al tráfico repetido.
- El rutting puede clasificarse en **rutting de mezcla** (a nivel de la capa de asfalto) y **rutting estructural** (en las capas de apoyo). Sus efectos incluyen acumulación de agua en la calzada (riesgo de aquaplaneo), mayor desgaste de neumáticos y reducción de la comodidad de marcha, lo que impacta la seguridad vial y los costos de mantenimiento.
- Un rut es un hundimiento longitudinal permanente en la superficie del pavimento, localizado en las trayectorias de las ruedas de los vehículos – especialmente camiones pesados – debido a deformaciones plásticas o consolidación bajo cargas repetidas.

Causas del rutting

- 1. Deformación plástica de la mezcla:** El ligante asfáltico, bajo tensiones elevadas y temperaturas altas, fluye plásticamente en la zona de la huella de rueda.
- 2. Consolidación excesiva:** Durante la construcción, una compactación insuficiente da lugar a consolidación posterior bajo carga de tráfico.
- 3. Debilidad de capas inferiores:** Cuando la subbase o subrasante no soporta adecuadamente las cargas, se deforma estructuralmente y produce hundimientos.

Tipos de rutting

- **Mix Rutting (de mezcla)**

Se produce dentro de la capa asfáltica por problemas de diseño o calidad (falta de cohesión, excesivo contenido de aire, ligante inadecuado).

- **Structural Rutting (estructural)**

Ocurre en las capas de apoyo (subbase o subrasante) por insuficiente espesor, compactación deficiente o materiales débiles.

Los tres tipos principales de ahuellamiento son:

1) Ahuellamiento en la mezcla

- El ahuellamiento en la mezcla se produce cuando la superficie del pavimento experimenta depresiones en el paso de ruedas debido a problemas de compactación o diseño de la mezcla, pero la subrasante no se ve afectada. Este tipo de ahuellamiento suele ser el resultado de un diseño o fabricación de la mezcla inadecuados, o de una mala selección de la misma.

2) Ahuellamiento en la subrasante

- El ahuellamiento en la subrasante (o ahuellamiento estructural) se produce por depresiones en el paso de ruedas en la subrasante bajo la carga del tráfico. El pavimento se asienta en estos ahuellamientos de la subrasante, lo que resulta en depresiones superficiales y un deterioro de las condiciones de la carretera.

3) Densificación

- La densificación se debe a una compactación insuficiente durante la construcción del pavimento. A medida que las cargas del tráfico continúan impactando el pavimento, este sufre una mayor compactación, lo que provoca deformaciones superficiales con el tiempo.

TYPES OF RUTTING

SOURCE: PAVEMENT INTERACTIVE; SHYAA & RAHMA (2022)

Mix rutting

Loads applied to the hot mix asphalt layer push the layer downwards, causing it to flow away from the loading point and upwards.

A noticeable raised elevation can be seen at the edges of the wheelpath.

Subgrade rutting

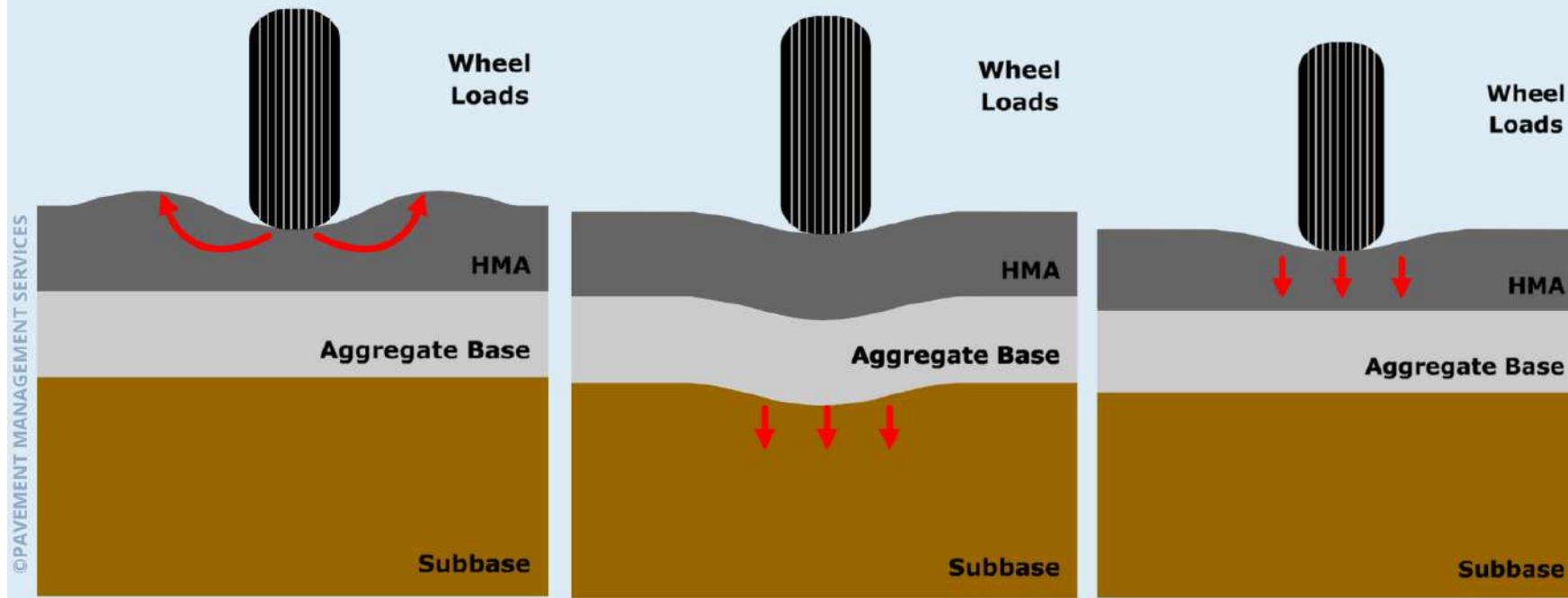
Loads exerted on the pavement structure compact the subgrade in the wheelpaths, leading to depressions in the pavement.

Subgrade rutting lack raised elevations on the rut edges and features cracked asphalt.

Densification

Rutting is limited to the asphalt layer which continues to compact under traffic loading.

Initially, densification happens rapidly due to consolidation. Rutting will remain constant throughout the pavement's life until it becomes accelerated from shear deformation.



INADAS RECICLAJE
OGOTA 2025

Rutting - fotos



Figura 1:

Serio ahuellamiento de la mezcla.



Figura 2:

Ahuellamiento de la mezcla.



Figura 3:

Ahuellamiento en el exterior de la trayectoria de las ruedas como resultado del ahuellamiento de la subrasante

Efectos y riesgos

- **Acumulación de agua:** Los surcos retienen agua, incrementando el riesgo de aquaplaneo y accidentes.
- **Confort y seguridad:** Aumenta la irritación de los usuarios y dificulta la maniobrabilidad al “atrapar” el neumático en el rut.
- **Mantenimiento:** Requiere rehabilitaciones más frecuentes, elevando costos de reparación.
- **Medición y evaluación**
 - El rutting se cuantifica midiendo la **profundidad del surco** en mm, generalmente mediante profilógrafos láser a velocidad de operación.

Estrategias de mitigación

- 1. Mejorar la mezcla:** Utilizar ligantes modificados (caucho, polímeros) y optimizar granulometría para mayor resistencia plástica.
- 2. Control de compactación:** Garantizar densidad adecuada en obra para minimizar consolidación posterior.
- 3. Refuerzo estructural:** Aumentar espesor y calidad de subbase/subrasante en tramos de alto tráfico.

toneladas de NFU que se utilizan anualmente en Argentina para la mejora de caminos

- A falta de datos oficiales específicos sobre la cantidad exacta dedicada a pavimentación, podemos estimar el orden de magnitud basado en las siguientes cifras:
 - **Generación anual de NFU en Argentina:** entre **130.000 y 170.000 t** al año.
 - **Tasa de reciclado nacional:** apenas el **8 %** de esos NFU (≈ 10.400 t) llega a ser reciclado materialmente, el **90 % restante** termina en vertederos o incinerado.
- Dado que **solo una fracción** de ese reciclado material se emplea en mezclas asfálticas, y considerando proyectos piloto y experiencias provinciales (e.g. en San Juan se usan entre 1.000 y 7.000 neumáticos por km de ruta, lo que equivale a 30–210 t/km), se puede inferir que la aplicación efectiva de NFU en **mejora de caminos** a nivel nacional no supera, hoy por hoy, **5.000–10.000 toneladas anuales**.
- Con un mejor marco regulatorio, la tasa de reciclado podría subir al 20–30 % en los próximos cinco años, lo que llevaría el uso en pavimentos a **20.000–30.000 t/año**.

Mercado potencial en Argentina para los NFU

- Se estima una generación de 35.000 Tn/año de NFU de transporte.
- Entre un 60 a 70% de esta cantidad se halla en las provincias de Buenos Aires, Santa Fe y Córdoba, es decir unas 23.000 Tn/año.
- Con una adición de 15% de polvo de NFU a asfaltos se pueden obtener 153.000 Tn/año de asfaltos modificados.
- Vialidad Nacional contrata anualmente unas 480.000 Tn de asfaltos.
- Estos asfaltos pueden modificarse con hasta un agregado del 15% de polvo de goma. Esto implica 72.000 Tn de polvo; más del doble de lo que los transportistas pueden aportar a partir de sus 35.000 Tn/año.
- **Esta cifra de unas 30.000 Tn/año repartida en 5 plantas implica 6.000 Tn/año para cada una, lo que equivale a una producción diaria de 20 Tn.**

Mercado anual en toneladas de asfalto, en Argentina, Chile, Perú y Colombia

- **Argentina:** 252.365 t de asfalto producido en 2022; 226.072 t en 2023.
- **Chile:** alrededor de 148.000 t de asfalto al año (dato de 2010).
- **Perú:** sin datos oficiales; el sector reporta un uso intensivo de asfalto en caliente, con pedidos frecuentes de 30.000–80.000 t mensuales en obra pública.
- **Colombia:** 267.000 t exportadas en 2022, más un consumo doméstico estimado en torno a 1.000.000 t anuales.

kilómetros de caminos y rutas asfaltadas en Argentina, Chile, Perú y Colombia

- . **Argentina:** 81.355 km – 117.616 km
- . **Chile:** 21.289 km – 28.333 km
- . **Perú:** 29.579 km – 38.699 km
- . **Colombia:** 32.280 km – 110.840 km

Precios orientativos por país

- **Argentina:** 1.000 USD/t (2023).
- **Chile:** 500 USD/t.
- **Perú:** 270 USD/t de polvo de NFU reciclado.
- **Colombia:** 570 USD/t de grano de caucho reciclado GCR (proyección 2017).
- Los precios pueden variar según la calidad del producto, el volumen de compra, los costos logísticos y las condiciones del mercado local.
- Las estimaciones en dólares estadounidenses se calculan utilizando los tipos de cambio actuales y pueden fluctuar con el tiempo.

Situación en Chile en el uso de NFU en caminos

- En Chile, la filial de Sacyr Valoriza Medioambiente implementó desde 2015 el aditivo RARX (65 % polvo de NFU) por vía semihúmeda en tramos de la Región Metropolitana, logrando reducciones de ruido de hasta 5 dB y mayor durabilidad del pavimento.
- El Grupo Vías Chile, por su parte, desde 2015 incorpora polvo de NFU en sus autopistas tras un tratamiento especial, consolidando evidencias de mejora en resistencia y vida útil.
- En 2021, el Ministerio de Obras Públicas trabaja en la inclusión de estándares de sustentabilidad para polvo de caucho en el “Manual de Carreteras 2021”, con vistas a estandarizar su uso en obras públicas.
- Sin embargo, un diagnóstico del MMA de 2017 indica que el reciclaje mecánico trató solo unas 11.000 t/año y el uso de NFU en mezclas asfálticas es “casi inexistente” por limitaciones técnicas y comerciales.

Situación en el Perú en el uso de NFU en caminos

- En el Perú, el Decreto Supremo n° 024-2021-MINAM establece un Régimen Especial de Gestión de NFU, definiendo objetivos de valorización y reciclaje sin especificar volúmenes para pavimentación.
- A nivel académico, la Universidad Católica (PUCP) desarrolló un proyecto de reutilización de NFU generando granulados de caucho para capas asfálticas, enfatizando su potencial en durabilidad y eco-eficiencia.
- Asimismo, una investigación de la Universidad Ricardo Palma evaluó mezclas con 4,5 % de aditivo RARX y 6,4 % de asfalto, cumpliendo criterios de estabilidad y deformación, confirmando la viabilidad técnica de su uso en caliente.
- El aditivo RARX es un aditivo de alta tecnología para asfaltos, compuesto por un 60% de polvo de NFU pretratado con betún y otros aditivos minerales. Su principal beneficio es que mejora las propiedades de las mezclas asfálticas, haciéndolas más duraderas y resistentes, al mismo tiempo que contribuye a la economía circular y a la sostenibilidad. Se puede usar directamente en las plantas de asfalto sin necesidad de procesos adicionales, simplificando su aplicación.

Situación en Colombia en el uso de NFU en caminos

- En Colombia, el Plan Nacional de Desarrollo de 2014 anunció la incorporación de cerca de cinco millones de NFU en obras viales, como parte de una estrategia de crecimiento verde.
- La Ley 193 de 2018 obliga a que al menos el 30 % de los metros cuadrados en contratos de obra pública con asfalto utilicen materiales derivados de NFU (grano de caucho reciclado, GCR).
- Además, en el departamento de Casanare se iniciaron estudios para la creación de plantas de reciclaje de NFU, apuntando a suministrar polvo de caucho para potenciales aplicaciones en pavimentos regionales.

Impacto ambiental y sostenibilidad

- La valorización de NFU contribuye a la **economía circular** y la mitigación de residuos:
 - Desvío de vertederos: cada kilómetro de pavimento puede reincorporar cientos de neumáticos, evitando emisiones y espacio en rellenos sanitarios.
 - Reducción de GHG: menor demanda de ligante virgen y ahorro energético en mantenimiento disminuyen las emisiones de CO₂ asociadas.

En conjunto, el uso de polvo de NFU en mezclas asfálticas combina ventajas técnicas, económicas y medioambientales, posicionándose como una solución madura y cada vez más adoptada en proyectos viales a nivel global.

LINDNER

ECOSTAR
The next recycling technologies™

NIHOT[®]
Airconomy™

P PRECIMECA

CROSS  **WRAP**[®]

KĀDANT | **PAAL**[®]

Integramos tecnologías y soluciones para la valorización de los residuos en la economía circular



Argentina – Uruguay – Paraguay – Chile

www.sim-alianza.com.ar
contacto@sim-alianza.com.ar

4