Infraestructura

Modelo de Mantenimiento y gestión de activos

En el Metro de Medellin para la toma de decisiones.

Casos de éxito oxidación y corrosión

Jaime Alberto Wilches Yepes – Jefe de Infraestructura

Metro de Medellin Ltda.




METRO
DE MEDELLÍN
CALIDAD DE VIDA




METRO
DE MEDELLÍN
CALIDAD DE VIDA





30 años de servicio a la comunidad



5.554 M
viajes acumulados desde 1995

10.958
días de operación

×9
120 mil a 1,1 millones de pasajeros/día

PTM Propósito Transformador Masivo

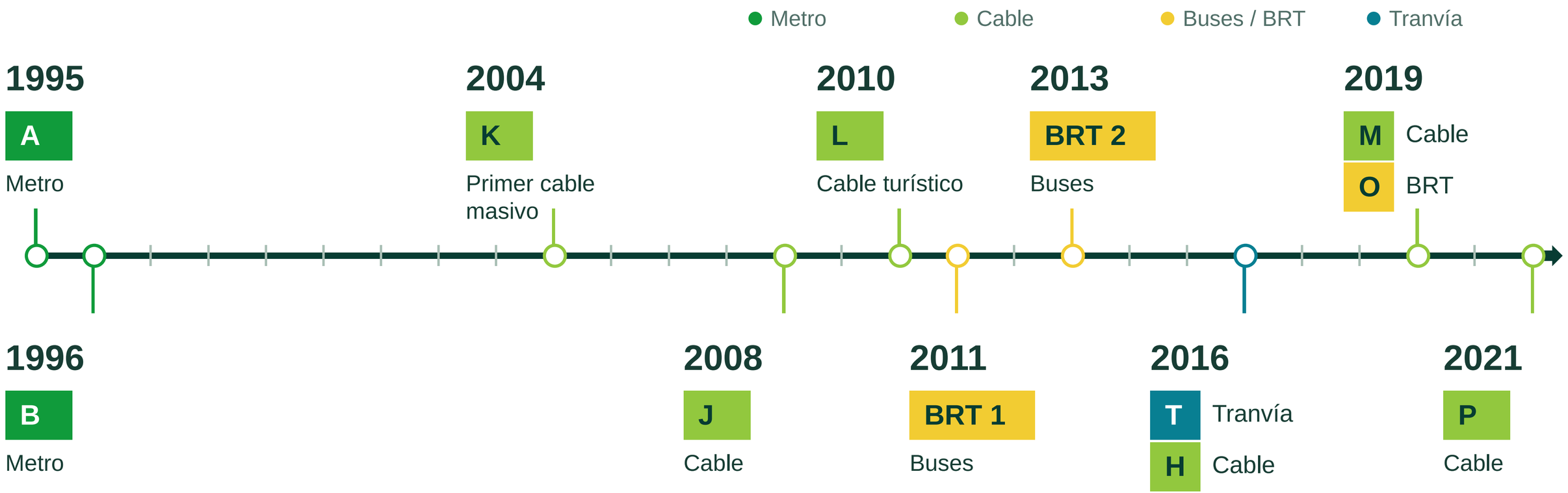
«Hacer del mundo un lugar mejor, conectando e impulsando su transformación».

La evolución de una red multimodal

12 líneas

4 medios de transporte

METRO DE MEDELLÍN
CALIDAD DE VIDA



1995–2021 · Escala temporal proporcional

Mantener lo que opera mientras se aprende a mantener lo nuevo

Gestión del mantenimiento

La norma da la estructura; los datos dan el criterio

GESTIÓN TRANSVERSAL

Cuidado de activos

Gestión de la información

P PLANEAR

- Gestión de catálogos de equipos
- Construcción de planes de mantenimiento
- Planificación, programación

REFERENCIA

ISO 55001

Gestión de activos en su ciclo de vida

H HACER

- Gestión de mantenimiento
- Aseguramiento metrológico
- Reparaciones externas de EH
- Gestión de herramientas

REFERENCIA

ISO 14224

Datos de confiabilidad y mantenimiento

V VERIFICAR

- Gestión de indicadores
- Análisis de eventos e intervenciones
- Análisis de fallas

REFERENCIA

UNE-EN 15341 · 16646

KPIs y rol del mantenimiento

A ACTUAR

- Grupo Estratégico de Mantenimiento (GEM).

REFERENCIA

ISO 13379-1

Monitorización de condición y diagnóstico

Ciclo PHVA: cada hallazgo vuelve al plan

Metodologías de mantenimiento

Bases del Modelo de Gestión de Mantenimiento

FP · Gestión del Mantenimiento de la Infraestructura de Transporte y Material Móvil

No mantenemos activos: hacemos posible el servicio.

Gestión y desempeño

Escala de la operación y el mantenimiento

1.288.631,37 m²

Instalaciones físicas



80
Trenes



501
Cabinas de cable



12
Tranvías



142
Buses

Activos de soporte

Vehículos auxiliares
Equipos y herramientas de taller
Sistemas de información y control

Mantenimiento preventivo mensual

708
personas

34.618
equipos

Gestión y desempeño

96% de lo planeado se ejecuta a tiempo

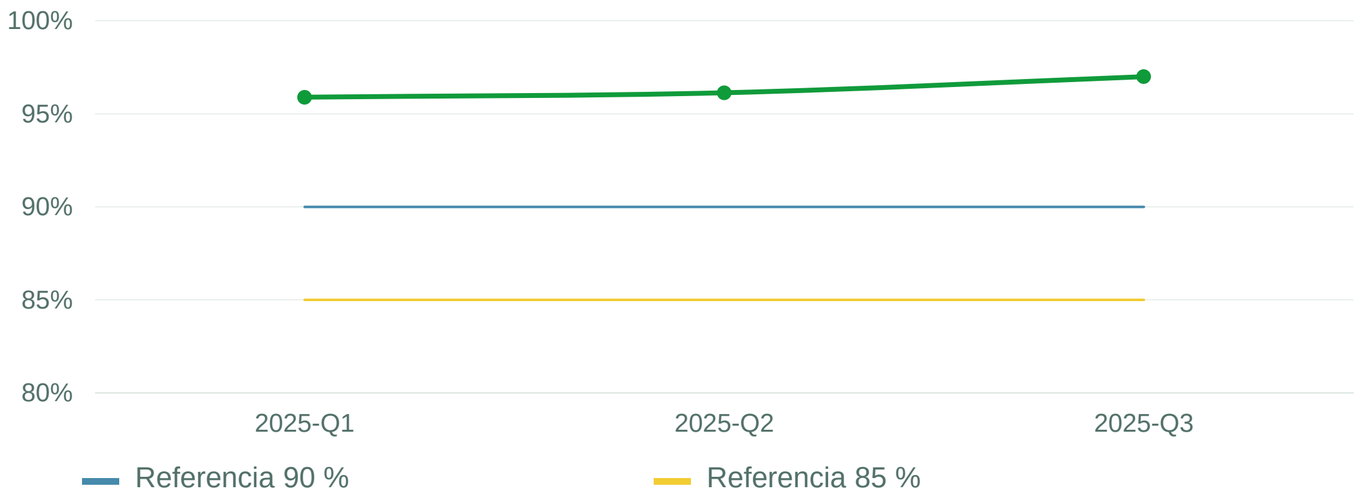
96,35 %
Cumplimiento a tiempo

36.838
Órdenes planificadas

35.492
Órdenes ejecutadas dentro del periodo

Tendencia del cumplimiento

95,89 % → 96,13 % → 97,00 %



Desempeño por medio

Medio	A tiempo	Planes
Buses	**99,20 %**	**394**
Cables	**96,17 %**	**1.067**
Férreo	**94,57 %**	**1.591**

Referencia de cumplimiento por medio: 85,00 %

Índice de calidad de tráfico por línea

0,13 %

Los atrasos totales en 2025 equivalen al 0,13 % de los minutos totales de operación.

Indicadores por línea

	2025
Línea A	95,01 %
Línea B	99,10 %
Línea T	96,38 %
Línea K	97,99 %
Línea J	98,35 %
Línea L	98,72 %
Línea H	99,35 %
Línea M	99,50 %
Línea P	98,92 %
Línea 1	94,20 %
Línea 2	95,88 %
Línea O	96,04 %

Mantenimiento Basado en Condición (CBM)

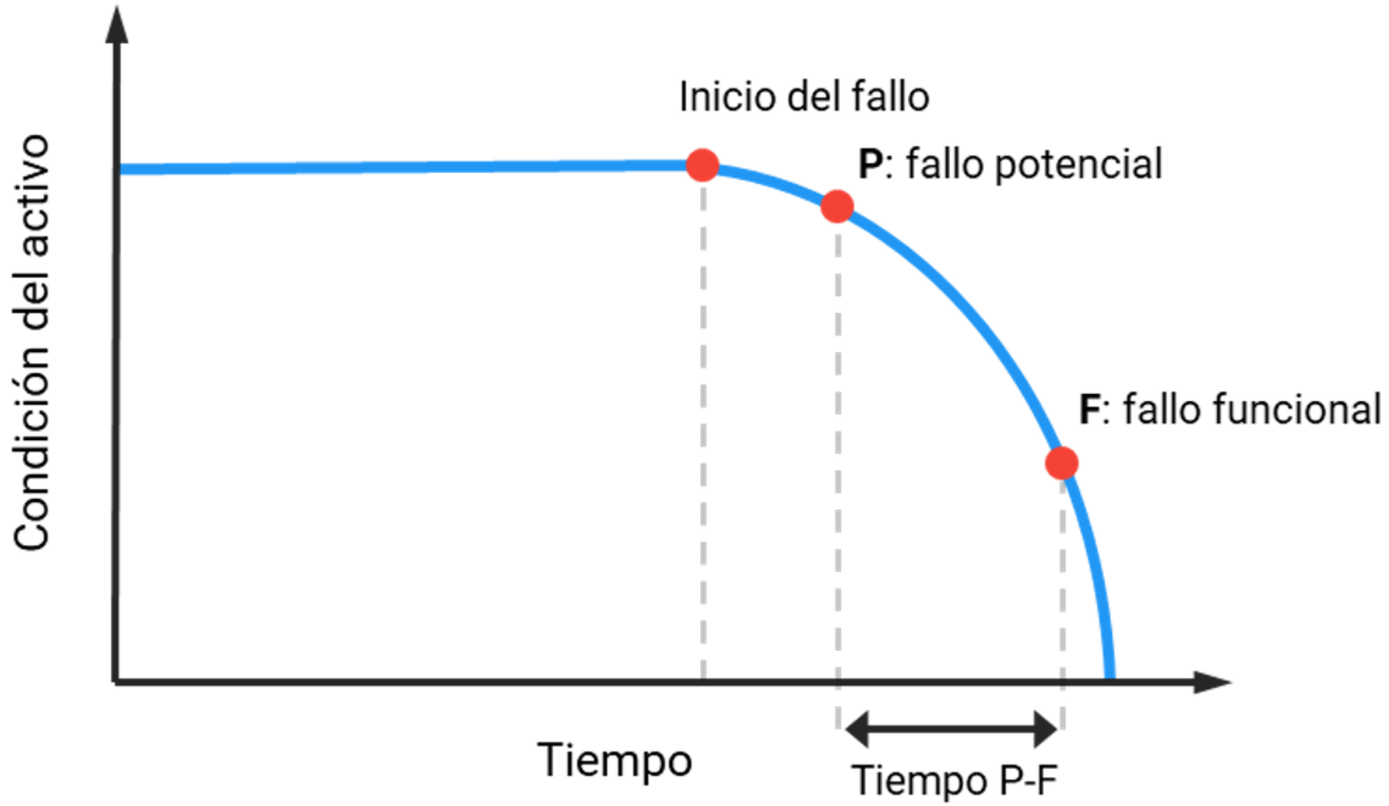
Nuestra apuesta metodológica

Conocer la condición

para decidir
cómo conservar
nuestros activos.



Misma curva, cuatro sistemas: el principio es común, la lectura no



- Trenes
- Cables
- Tranvía
- Buses

Ensayos no destructivos
aplicados al sistema multimodal



Marco metodológico
RCM2

Define qué activo inspeccionamos, con qué técnica y con qué frecuencia.

Los END no se eligen por costumbre, sino porque el análisis de modos de falla lo justifica.

FÉRREO

Líquidos penetrantes

Activo: vigas pivote de trenes

Detecta fisuras superficiales e internas en zonas de alta fatiga mecánica.

CABLE AÉREO

Radiografía industrial

Activo: pinzas y mordazas del cable

Evalúa integridad interna. Crítico donde el fallo implica riesgo de caída.

BUS BRT

Partículas magnéticas

Activo: componentes estructurales del chasis

Identifica discontinuidades superficiales y subsuperficiales en partes bajo esfuerzo.

TRANVÍA

Corrientes de Eddy + ultrasonido

Activo: componentes estructurales

Eddy detecta defectos; ultrasonido evalúa uniones estructurales.

LECTURA DEL RCM2

Falla oculta con consecuencia catastrófica.	Clasifica como tarea a condición.	Identificó modo de falla por fatiga estructural con consecuencia operacional directa.



Metro Digital: Transformación Tecnológica

Gestión permanente

Información para decidir sobre nuestros activos

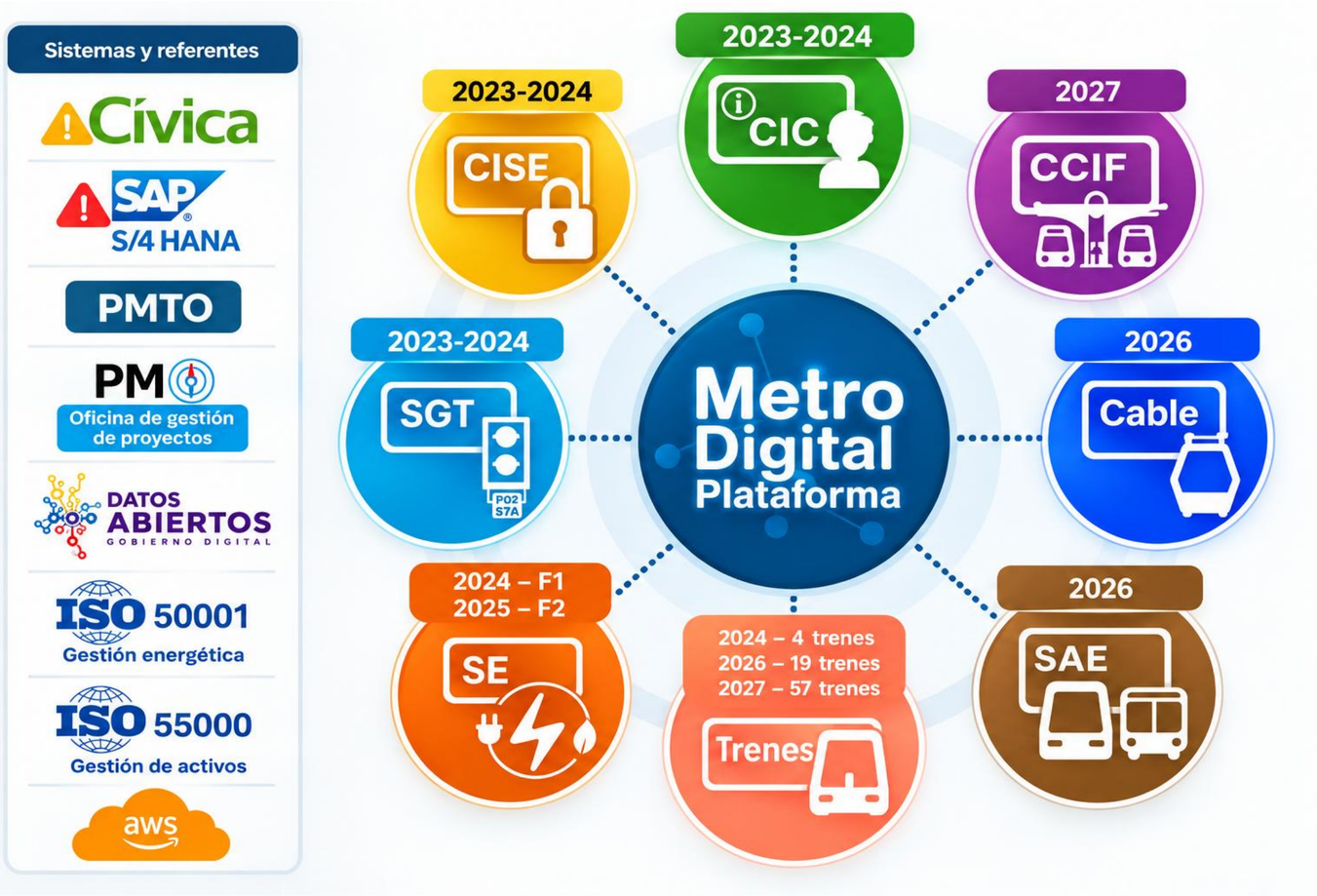
Operación y seguimiento



DE LA INFORMACIÓN A LA DECISIÓN

Conocer la condición
Priorizar la intervención
Verificar y dar seguimiento

Metro digital y referencias de gestión



Conexión conceptual: condición del activo → evidencia → decisión → seguimiento.

5 años construyendo sobre la nube

Evidencia, no promesa

01 Subestaciones de energía

Medidores, tensión, carga y eventos.

02 Cables aéreos

Estaciones motrices, vientos y tensiones.

03 Cambiavías ferroviarios

Activos críticos; anomalía = riesgo directo.

04 Tráfico ferroviario

Circulación en tiempo real integrado.

05 Integración Cívica

Recaudo, flujo de usuarios y cruce con operación.

06 Tren Digital

EN PROCESO

Gemelo digital funcional por tren.

INFORMACIÓN → **OPERACIÓN** → **GESTIÓN DE ACTIVOS**

Información para decidir

Subestaciones de energía

Dashboard_ajustado | Dahboard_medidores | Monitoreo de dispositivos

Dashboard Sistema de Gestión de Energía (SGE)

METRO DE MEDELLÍN
CALIDAD DE VIDA

Rango de fecha registrada
01-01-2025
hasta
Wednesday, 15 de April de 2026 11:45pm

Fecha Inicial
15/04/2026 00:00

Fecha Final
15/04/2026 23:59

Tipo de dia
All

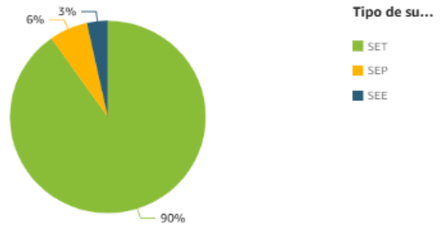
Tipo Hora
All

Nombre Subestación
All

Wednesday, 15 de April de 2026 . Sin Novedad

Energía consumida SET (MWh)	Energía consumida SEP (MWh)	Energía consumida SEE (MWh)
191.41	13.51	7.29

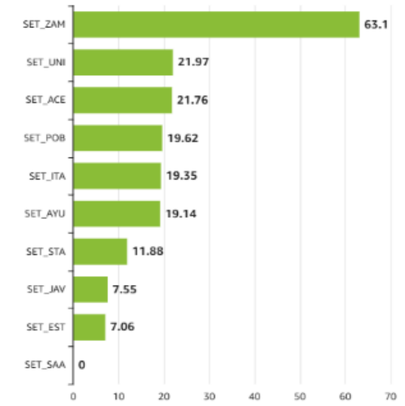
Proporción de energía activa consumida por tipo de subestación (%)



Energía activa por subestación de tracción

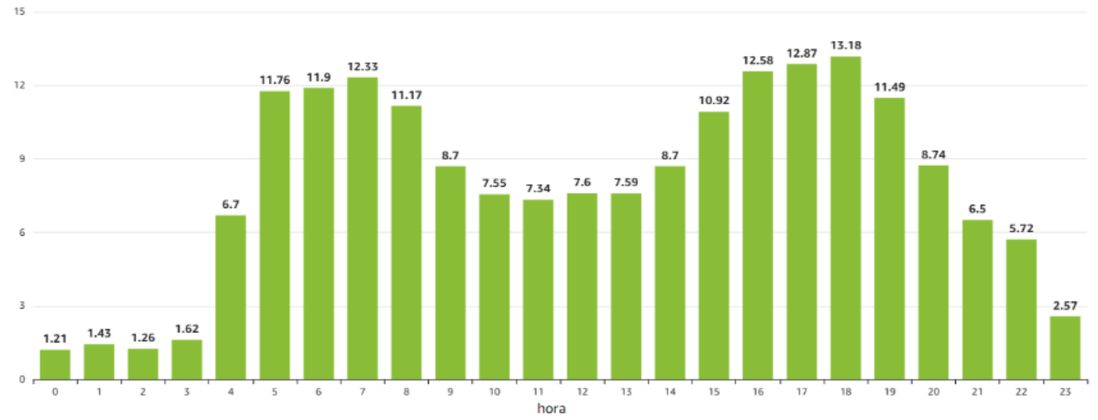
Energía activa total(MWh)

Descripción: Cantidad de energía consumida, agrupada por subestaciones de tracción



Energía activa total en intervalos de hora (MWh)

Descripción: Comportamiento del consumo de energía, agrupado por horas. (00:00 - 23:00)



Telemetría Cambiavías





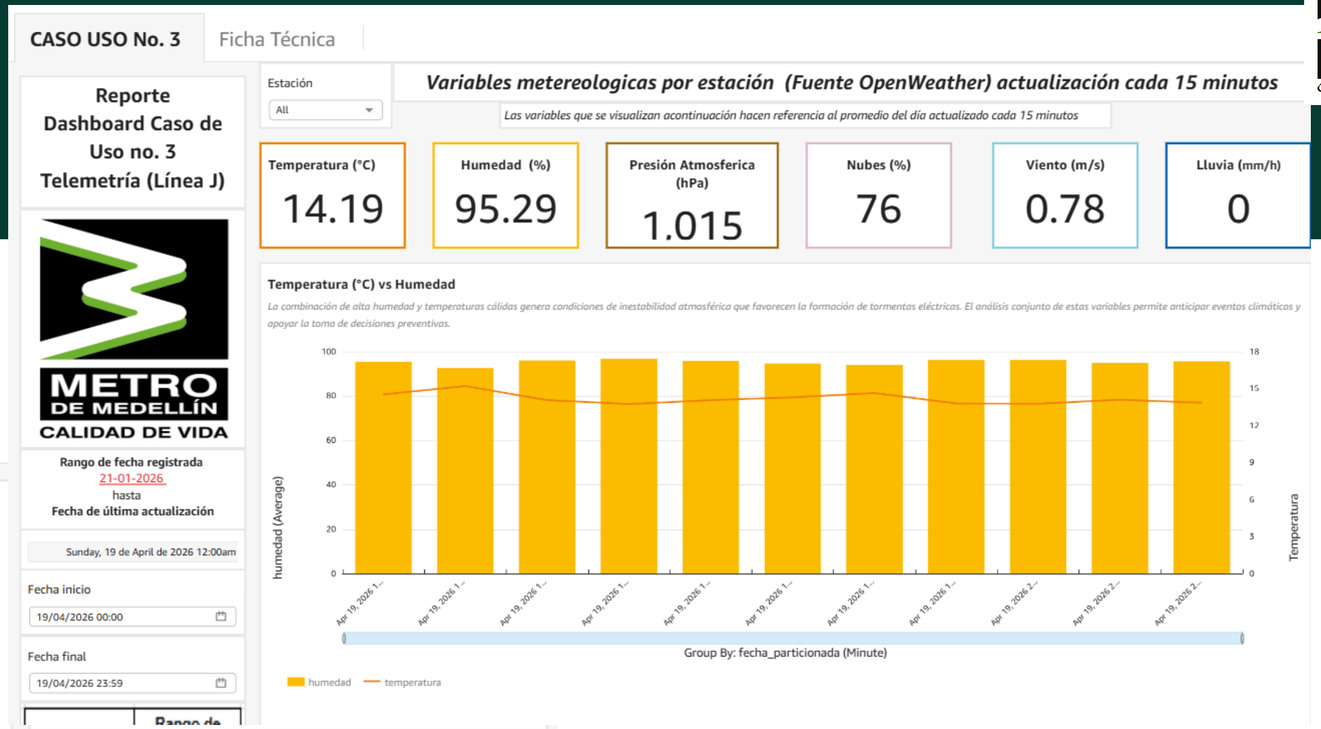


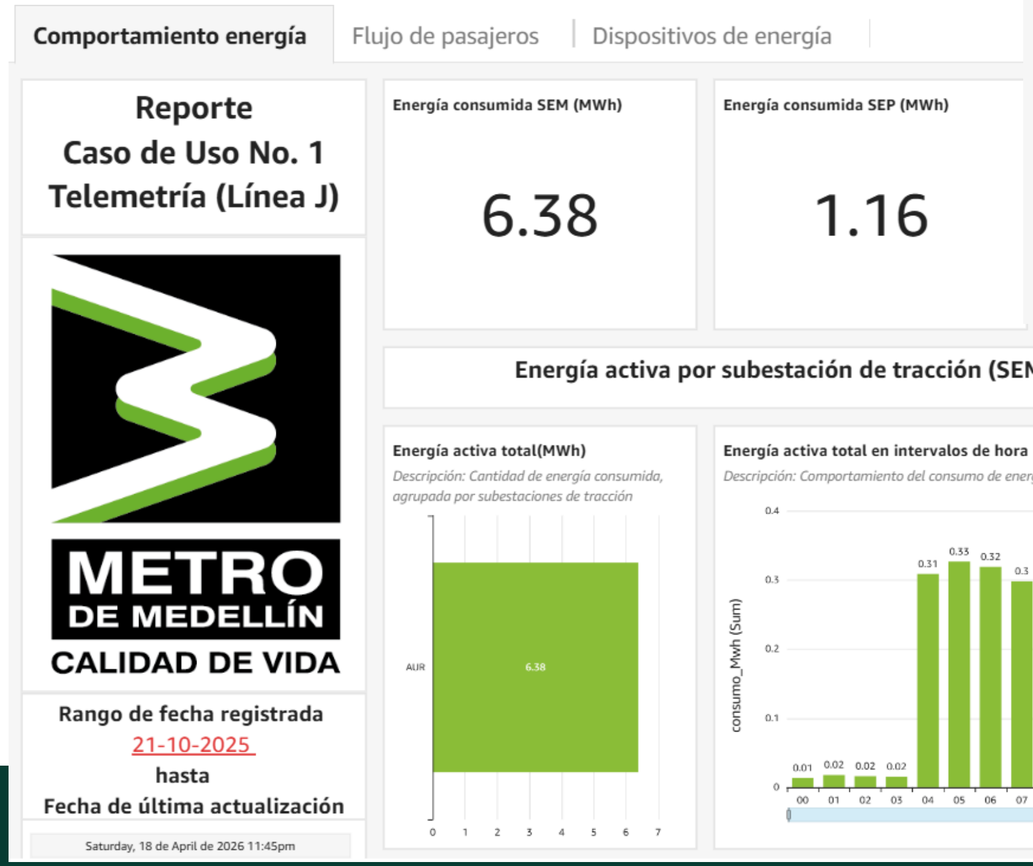






Cables aéreos





Infraestructura y servicio a la comunidad

La condición del activo orienta la decisión de mantenimiento

Conocer el deterioro permite anticipar decisiones sobre el servicio y la vida útil.

01	02	03	04	05
Detección	**Diagnóstico**	**Decisión técnica**	**Intervención**	**Seguimiento**
Señales y condición	Mecanismo y alcance	Consecuencias y prioridades	Reparación y protección	Verificación y vida útil

La evidencia se incorpora al historial del activo y orienta la siguiente evaluación.

INFORMACIÓN PARA DECIDIR

El impacto social también forma parte de la gestión



01

Impacto social

Medir efectos sobre las personas, además de costos

02

Gobierno de datos

Cuidar la información que sustenta decisiones

03

Afectación del servicio

Registrar las consecuencias de los atrasos

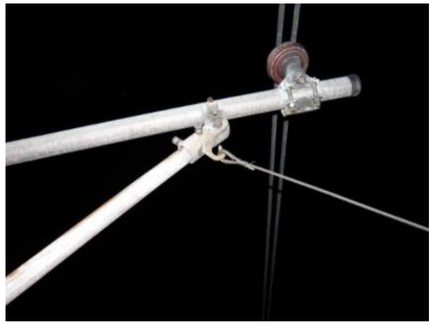
Aplicación en infraestructura

Cuatro casos, una misma lógica de gestión



01 Tornillos

Validar la unión
y su ambiente



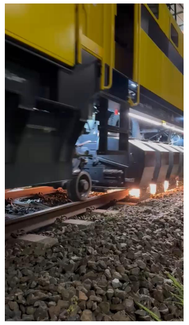
02 Mástiles

Decidir por componente
y condición de protección



03 Concreto

Reparar y proteger
según la causa



04 Rieles

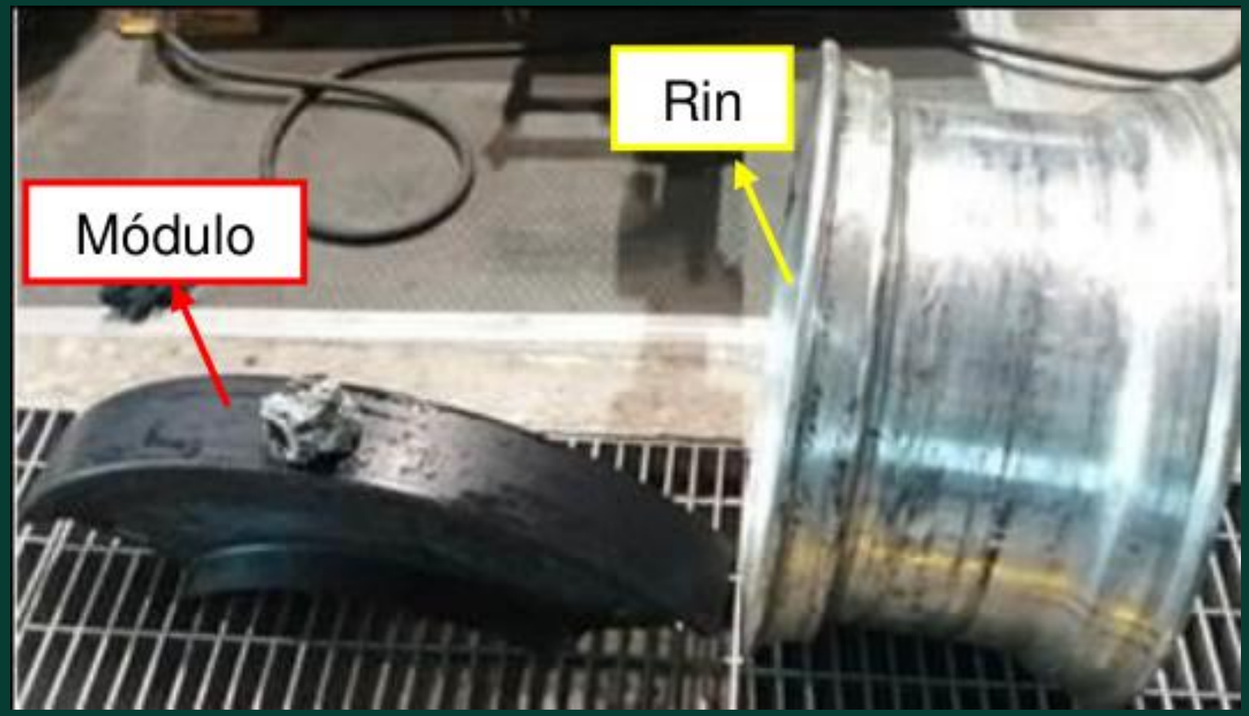
Recuperar el perfil
y seguir la degradación

Condición, evidencia y consecuencias sustentan la intervención y el seguimiento.

Tornillos del dispositivo de antihundimiento



Rueda del tranvía



Función de respaldo

Tres módulos acoplados al rin soportan carga ante el desinflado.

Tornillos del dispositivo de antihundimiento

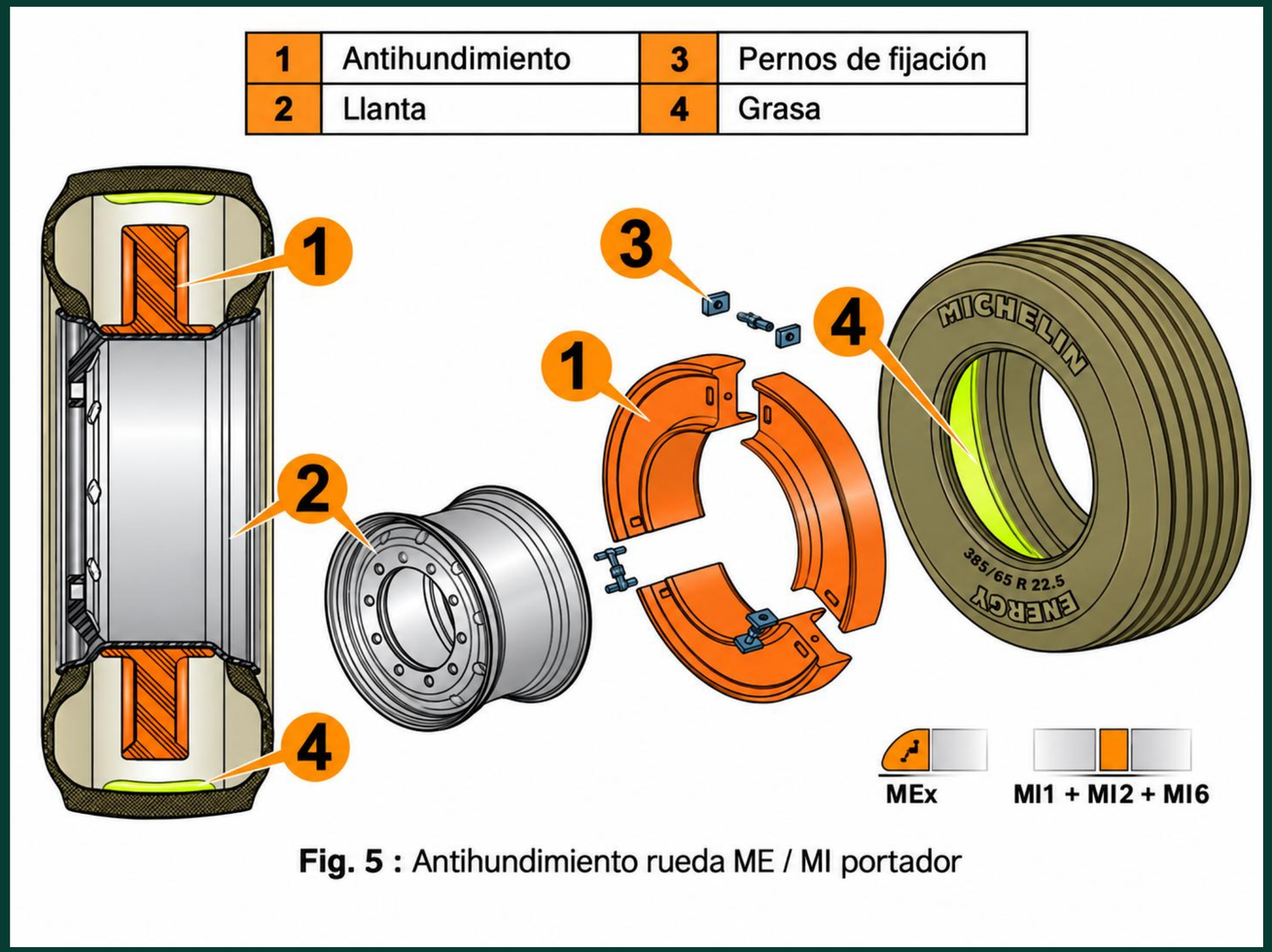
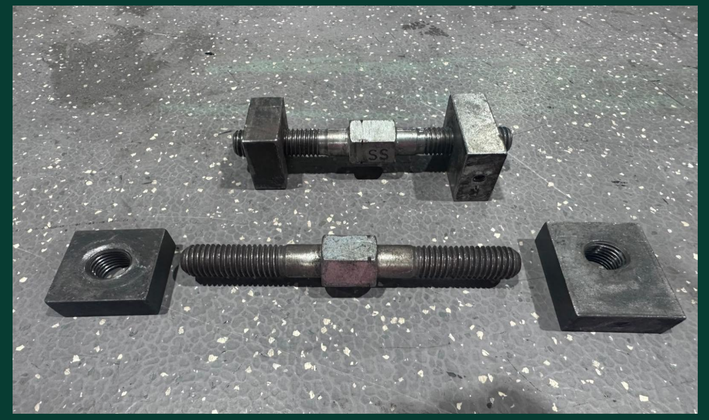


Fig. 5 : Antihundimiento rueda ME / MI portador





El desacoplamiento motivó evaluar el conjunto

Tornillo local



Hecho reportado

Desacoplamiento del tornillo local

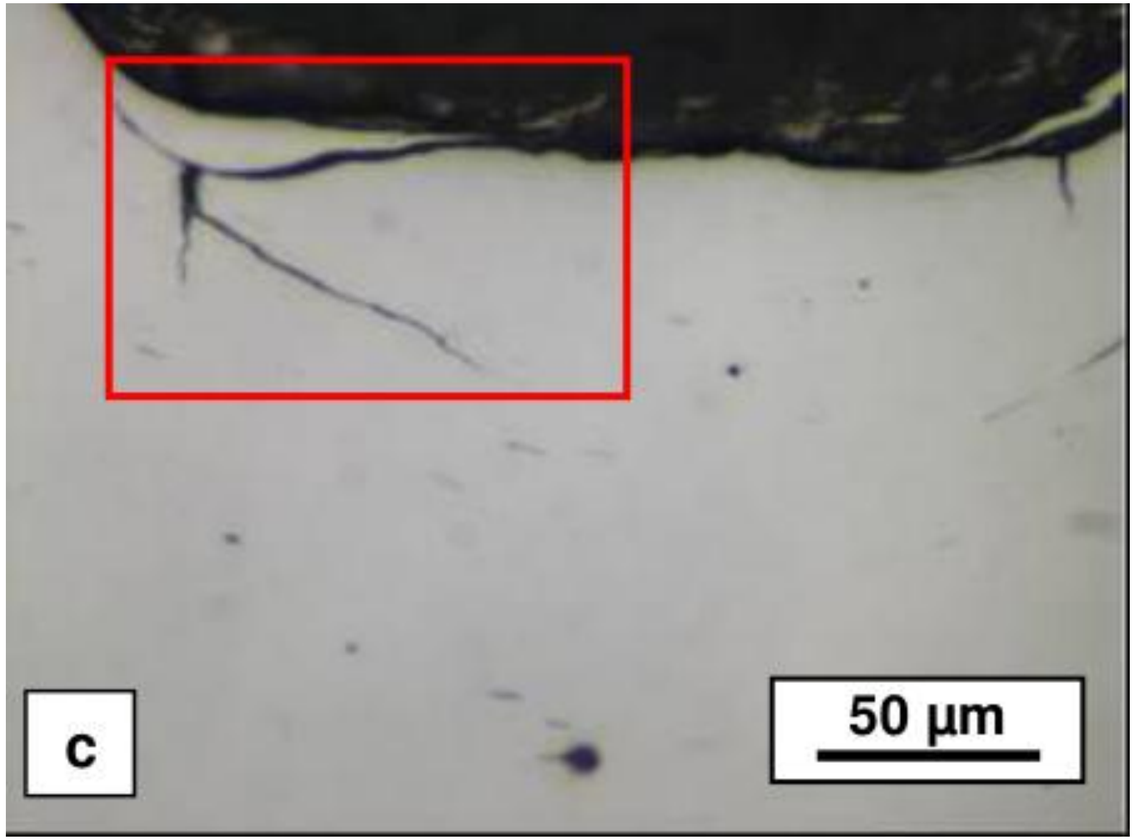
Tornillo original



Observación del estudio

Corrosión también en originales y una tuerca adherida

Ensayos complementarios para explicar el deterioro



Micrografía del informe

01 **Material**

Composición, dureza y metalografía

02 **Superficie**

SEM, DRX y observación del daño

03 **Exposición**

Ensayo salino de 158 horas

04 **Ambiente**

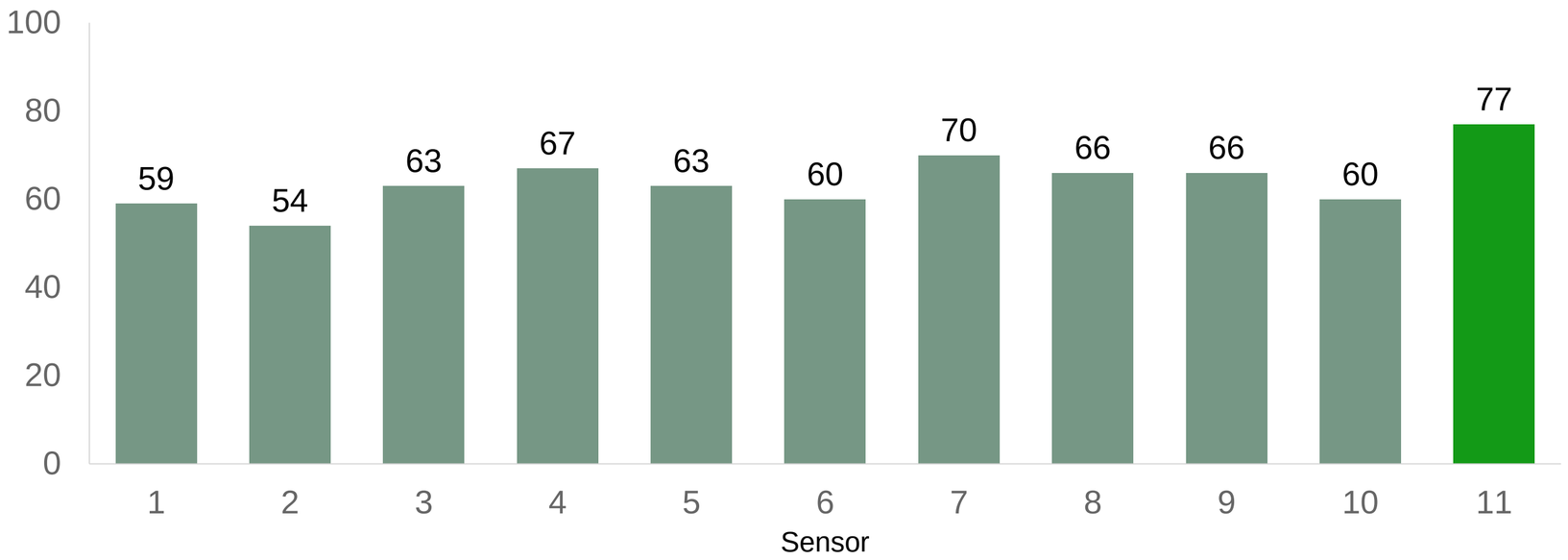
HR dentro de ruedas y ensayo con Gel Hut

Métodos complementarios para delimitar la incertidumbre

Caso 01 tornillos

La humedad interna orienta una medida de control

Humedad relativa máxima por sensor (%)



< 60 %

Recomendación del informe

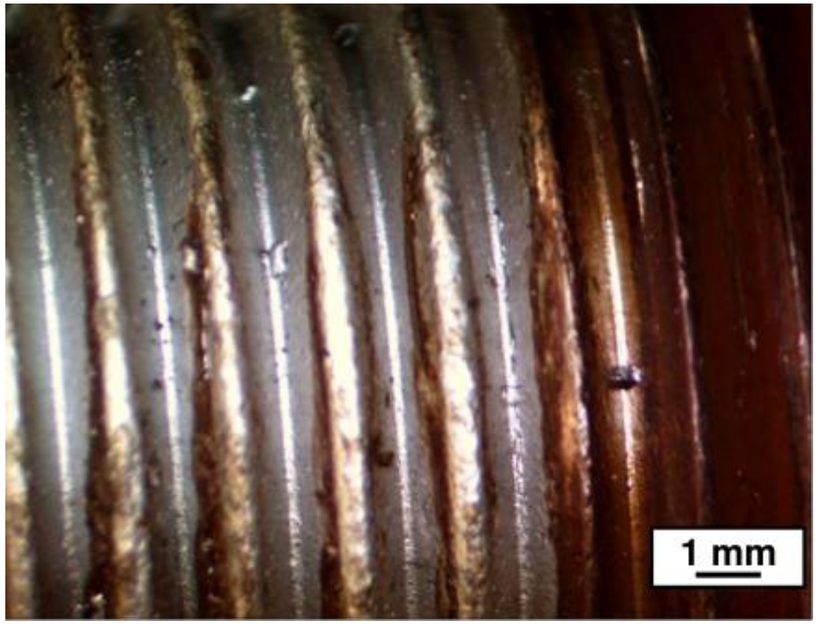
Controlar y verificar
la humedad del aire

11 registros válidos
Aproximadamente 60 días

Máximos observados, no promedios.
El umbral corresponde a este caso.

Caso 01 tornillos

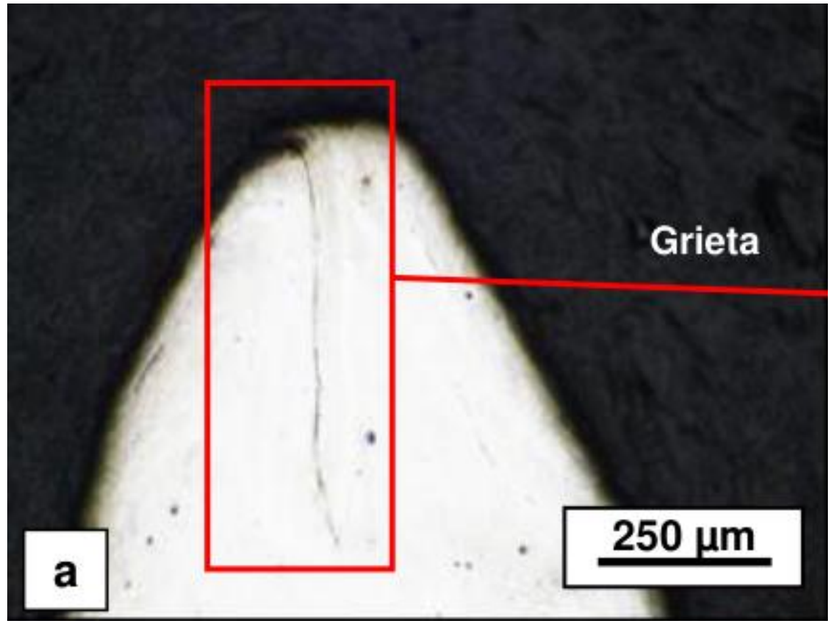
Corrosión en la unión roscada y valoración de grietas



Unión roscada

Rendija

→ Humedad y diferencia de oxígeno



Grietas: valoración adicional

La decisión integra material, contacto, recubrimiento y ambiente.

Caso 01 tornillos

Criterio de decisión: validar la unión completa



Validación del conjunto

Conservar la función en las condiciones internas de la rueda

01 **Humedad**

Medir el ambiente

02 **Recubrimiento**

Resistir el contacto

03 **Sellado**

Validar el montaje

04 **Seguimiento**

Comprobar el desempeño

Resultado disponible: diagnóstico y recomendaciones. Desempeño posterior por confirmar.

Mástiles y brazos requieren decisiones diferentes

Una estructura contiene componentes con decisiones distintas

Mástil

Conservar y dar seguimiento según evidencia

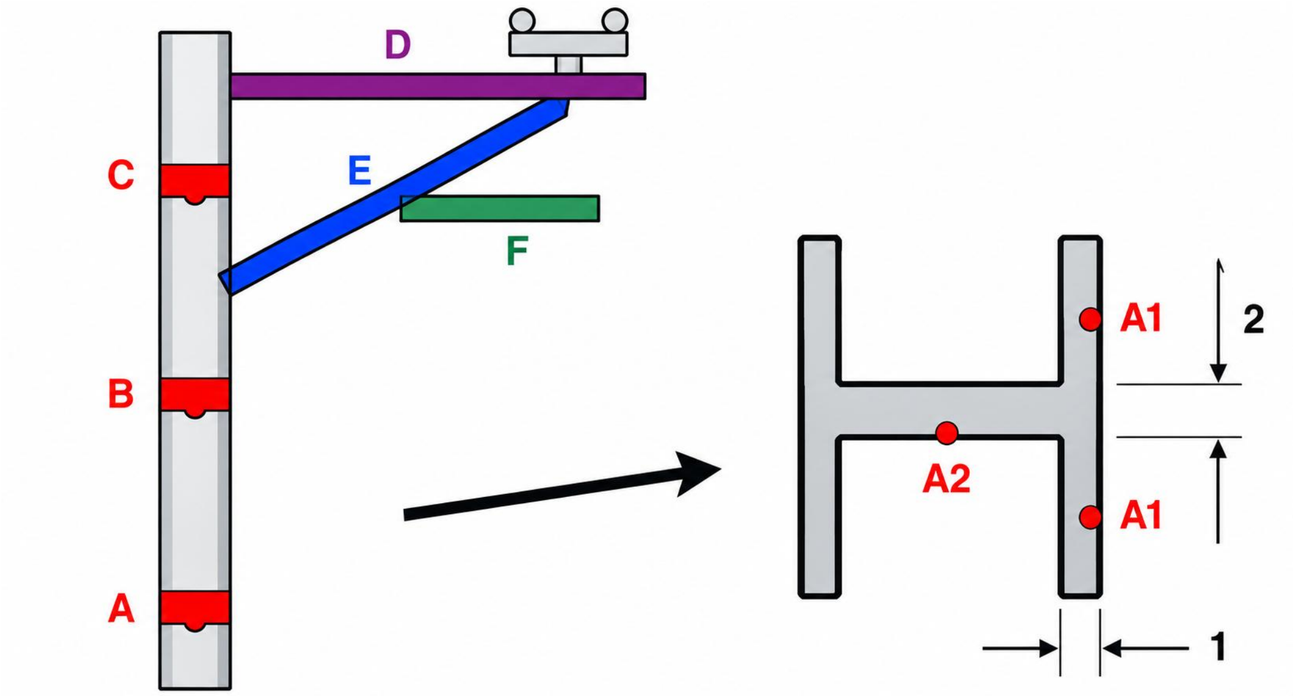
Brazos

Evaluar recuperación de la protección



Caso 02 catenaria

Diagnóstico del metal base y del recubrimiento



Metal base

Calibrador y ultrasonido
Dimensiones del componente

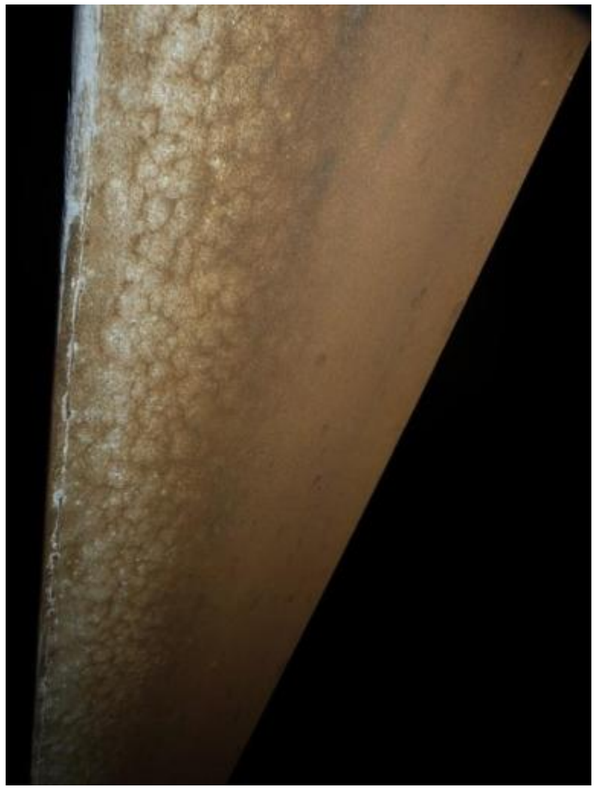
Recubrimiento

Medición magnética
Condición de la protección

La comparación histórica requiere puntos y métodos equivalentes.

Caso 02 catenaria

El informe distingue pátinas con función protectora





2006 **2023**

Comparación disponible

Dimensiones comparables conservadas

Interpretación

Pátinas con función protectora del zinc

Caso 02 catenaria

El informe recomienda recuperar la protección de los brazos



Pérdida de galvanizado

➡ **Acero expuesto**



Productos de corrosión

➡ **Recuperación a evaluar**

Caso 02 catenaria

La condición define el alcance de la intervención



Mástil

Protección conservada

Conservar e inspeccionar



Brazo tubular

Protección deteriorada

Evaluar recuperación

Actualizar condición, comprobar aptitud y definir criterios de aceptación.

Caso 02 catenaria

La trazabilidad permite revisar la decisión



01

Identidad

Componente y punto

02

Medida

Método, unidad e incertidumbre

03

Historia

Intervenciones y sustituciones

04

Control

Responsable y nueva evaluación

Antecedente de 2023. La condición actual y las intervenciones posteriores requieren verificación.

Concreto y armaduras: mecanismos diferentes

Concreto

Daños físicos, químicos
o mecánicos

Armaduras

Carbonatación, cloruros
y humedad según diagnóstico



Columnas: lesiones que requieren evaluación





4 **caras con lesiones reportadas**

Delimitar la evaluación
y verificar el estado actual

El diagnóstico orienta el proyecto de reparación



01
Información
Historia y exposición

02
Evaluación
Daño y causas

03
Estrategia
Objetivo del propietario

04
Diseño
Reparación y protección

05
Ejecución
Control de calidad

06
Aceptación
Resultados y seguimiento

Reparar, proteger y reforzar

Reparar — **Restituir forma y función**

Geometría y compatibilidad

Proteger — **Controlar el deterioro**

Exposición y mecanismo

Reforzar — **Modificar la capacidad**

Evaluación estructural y diseño



El diagnóstico orienta la familia de soluciones

Problema diagnosticado	Objetivo	Familia de soluciones
Ingreso de agentes	Controlar penetración	Protección superficial
Pérdida de concreto	Restaurar	Reposición del concreto
Pérdida del pasivado	Restituir protección	Restauración del pasivado
Condición de corrosión	Controlar el proceso	Resistividad y otros métodos
Necesidad de capacidad	Reforzar	Solución definida por diseño

Caso 03 concreto

La reparación requiere diseño, control y aceptación







01 Retiro localizado del concreto

02 Acero y conectores según diseño

03 Protección del refuerzo

04 Mortero y recuperación superficial


METRO
DE MEDELLÍN
CALIDAD DE VIDA

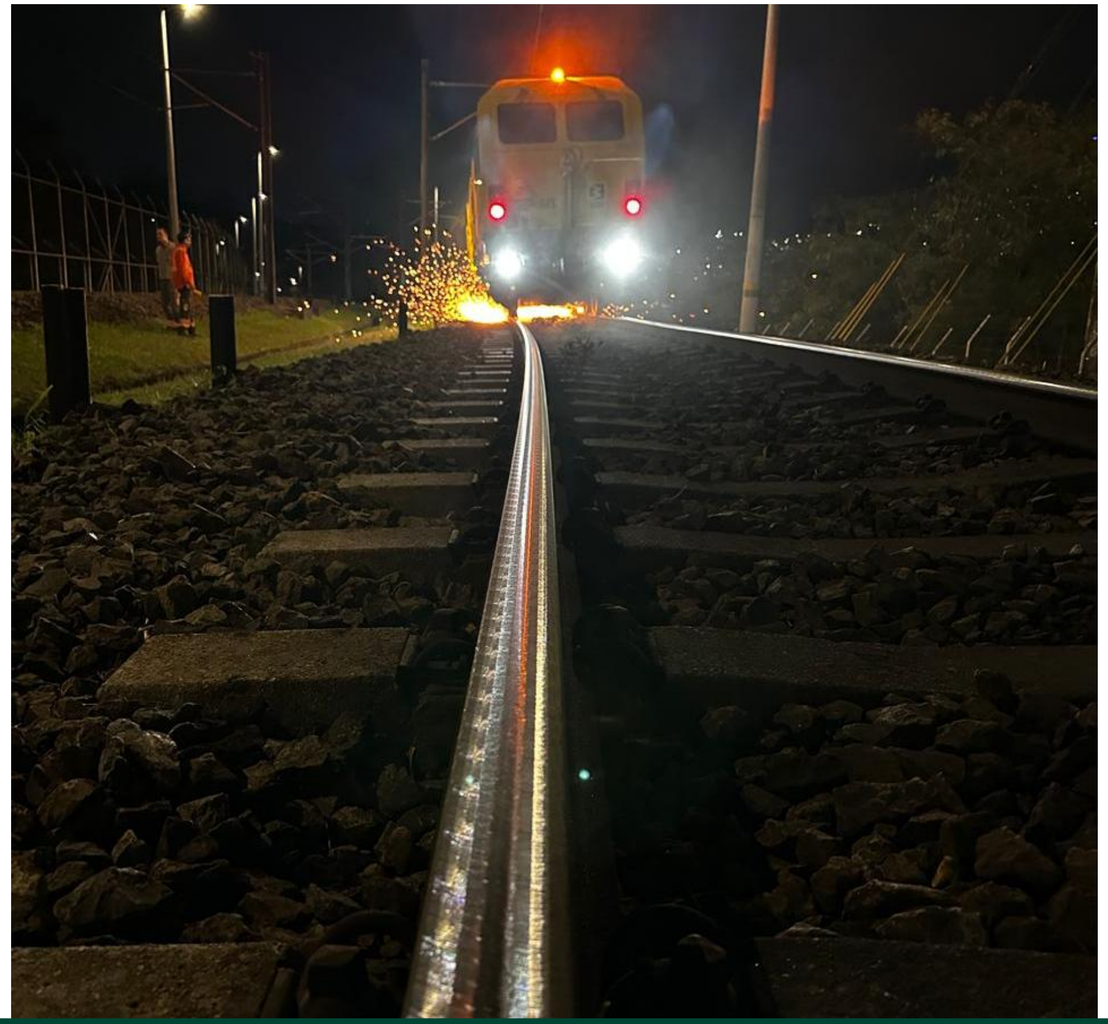
Reperfilado de rieles: intervención clave del activo

Restaurar el perfil funcional

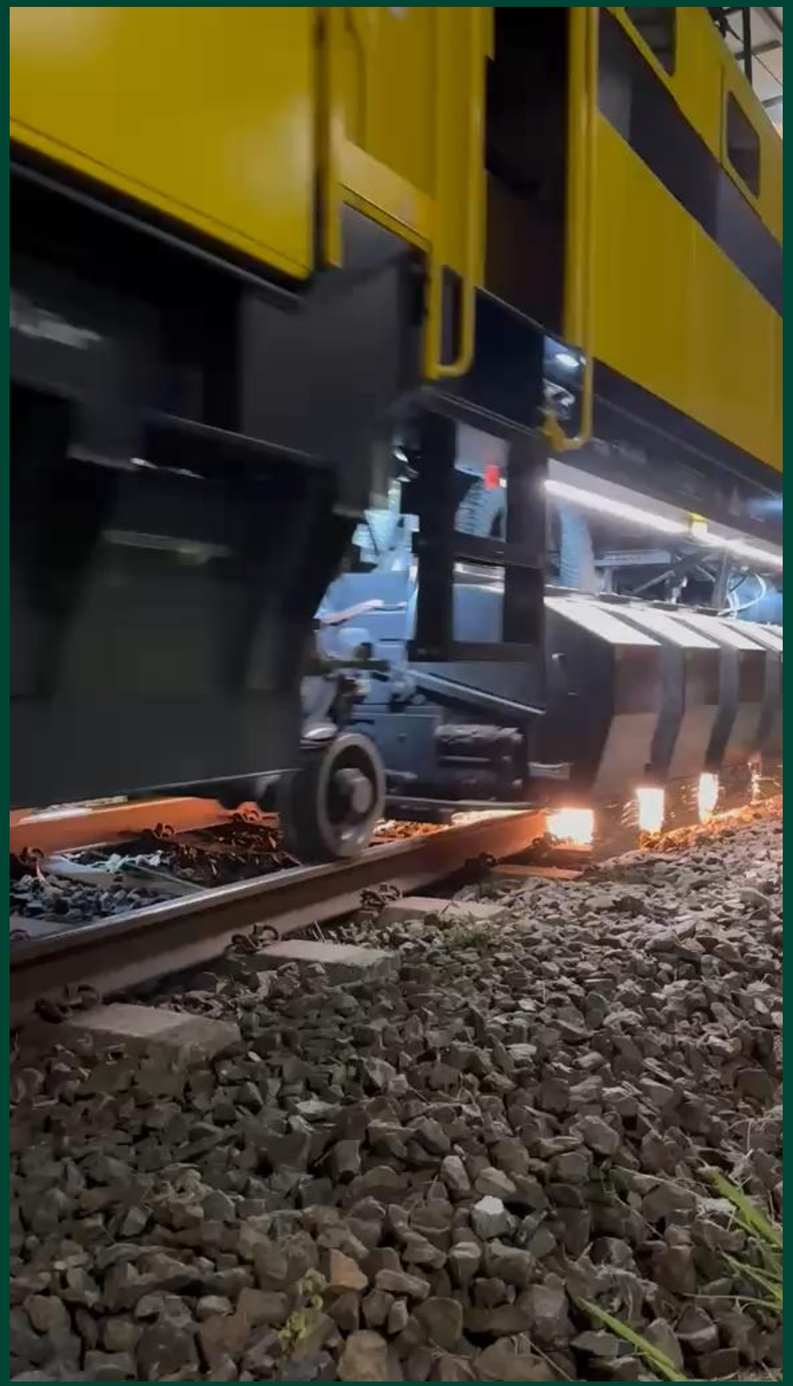
1 activo crítico para seguridad, confort y disponibilidad

3 mecanismos controlados: desgaste, fatiga superficial y corrosión

- Corrige irregularidades superficiales en la cabeza del riel.
- Mejora la interacción rueda–riel y reduce vibraciones.
- Disminuye puntos de inicio de defectos y facilita la inspección posterior.



Vía permanente



De actividad de mantenimiento a decisión basada en riesgo

La intervención se programa por condición, criticidad y tendencia

1	**Diagnóstico**	Inspección visual, medición geométrica, rugosidad y defectología.
2	**Ejecución**	Reperfilado nocturno con control operacional y seguridad de vía.
3	**Verificación**	Confirmación del perfil obtenido y condición final del riel.
4	**Monitoreo**	Histórico de defectos, corrosión, recurrencia y vida remanente.

Resultado esperado: menor riesgo operativo, mayor disponibilidad y decisiones de reposición mejor sustentadas.



Aportes del reperfilado a la gestión de corrosión

El reperfilado no reemplaza la protección anticorrosiva: la fortalece como parte de una estrategia integral.

01

Superficie controlada

Reduce rugosidades que favorecen humedad, contaminación y defectos superficiales.

02

Inspección más clara

Permite identificar zonas con corrosión persistente o daño que excede el tratamiento superficial.

03

Vida útil extendida

Retrasa reemplazos cuando el desgaste y la corrosión están dentro de límites aceptables.

04

Decisión con trazabilidad

Alimenta el historial del activo para priorizar intervenciones por criticidad y riesgo.



Gestionar el riel como activo exige integrar reperfilado, control de corrosión, inspección y análisis de tendencia para asegurar confiabilidad del sistema.

Cada caso exige una decisión y una verificación

ACTIVO		DECISIÓN TÉCNICA	VERIFICACIÓN
	**Tornillos**	**Validar la unión**	Compatibilidad y desempeño
	**Mástiles y brazos**	**Decidir por componente**	Condición y medidas comparables
	**Concreto y columnas**	**Intervenir según la causa**	Diseño, ejecución y aceptación
04	**Rieles**	**Reperfilar según condición**	Perfil, defectos y recurrencia

La gestión conserva el conocimiento del activo y fundamenta la próxima intervención.

Conservar los activos es cuidar la continuidad del servicio

01 **Comprender**

Conocer el activo y anticipar su degradación

02 **Priorizar**

Intervenir con sustento técnico y coordinación

03 **Verificar**

Comprobar resultados y gestionar la vida útil



Anticiparse al deterioro es proteger la operación

Jaime Alberto Wilches Yepes

Jefe de Infraestructura · Metro de Medellín

PCC → Buses → Tranvía → **Infraestructura**

CONTACTO

jwilches@metrodemedellin.gov.co

linkedin.com/in/jaime-alberto-wilches-yepes-b8394414



XCORROSION 2026

Gracias