

METODOLOGÍA PARA LA CLASIFICACIÓN DE TRAMOS DE VÍA FERROVIARIA PARA LA RENOVACIÓN DEL BALASTO A PARTIR DE INFORMACIÓN TÉCNICA

sometido en cumplimiento parcial de los requisitos
para el título de
Maestría en Ingeniería

RUBIELA MARÍA MONTOYA GÓMEZ
rmmontoyag@eafit.edu.co

Asesora
SILVANA MONTOYA NOGUERA

**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN
2020**

Resumen

El balasto de una vía férrea cumple un papel muy importante como es mantener la vía estable y segura, es por esto por lo que la conservación de este activo es fundamental para el correcto funcionamiento y no deterioro de los demás componentes de la vía, así como de los vehículos ferroviarios. Por ser sistemas masivos son ejes esenciales en la movilidad de las ciudades de influencia, por lo cual las actividades complejas como la renovación del balasto deben ser debidamente planeadas, para mitigar las afectaciones que se puedan presentar.

La ciudad de Medellín fue la primera en Colombia en construir un sistema de transporte tipo metro el cual es operado y mantenido por la empresa Metro de Medellín, que será la empresa objeto de estudio. Este medio de transporte cuenta con una vía férrea o vía permanente de estructura sobre balasto, el cual tiene una vida útil de 30 años aproximadamente. Se estima que el balasto está cerca de cumplir con su ciclo de vida, haciendo necesaria la evaluación para determinar el tiempo estimado en que se debe hacer la renovación.

Este trabajo plantea una nueva metodología para la clasificación de tramos de vía ferroviaria a partir de la priorización. Esta priorización se basa en metodologías de mantenimiento y el análisis de información técnica sobre la vía férrea y las condiciones del balasto. A partir de este trabajo, se logró establecer los criterios de clasificación para realizar la renovación del balasto con las menores afectaciones en la prestación de la operación y servicio de este medio de transporte. De igual manera se evidenció que cada vía tiene sus particularidades, por lo que es muy importante tenerlas identificadas y hacer correcto seguimiento de sus principales parámetros, que permita conocer la realidad del activo y que facilite sus intervenciones en el momento oportuno.

Palabras clave

Metodologías de mantenimiento, vía férrea, balasto, criterios de clasificación.

Contenido

1	Introducción	1
1.1	Formulación del problema	2
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivo General	3
1.2.2	Objetivos específicos.....	3
1.3	Justificación.....	3
2	Marco conceptual	4
2.1	Vía férrea.....	4
2.2	Metodología FMEA.....	6
2.3	Metodología FMECA	7
2.4	Metodología RCM.....	9
3	Plan de trabajo (Diseño procedimental)	10
4	Resultados	12
4.1	Análisis de la información técnica.....	13
4.1.1	El mantenimiento y su relación con la vida útil del balasto	13
4.1.2	Factores de diseño relacionados con la vida útil del balasto	15
4.1.3	Análisis de resultado de laboratorio de estudios realizados al balasto.....	17
4.1.4	Desgaste del riel y sistema portátil de diagnóstico (SPD).....	23
4.1.5	Tasa mágica de desgaste.....	24
4.1.6	Sistema Portátil de Diagnóstico (SPD)	27
4.1.7	Definición criterios para clasificación de la vía férrea.....	28
4.1.8	Análisis de la información de intervenciones de mantenimiento.	33
4.1.9	Orden de intervención de acuerdo con tecnología utilizada.....	37
a)	Método manual para renovación de balasto	37
b)	Método semiautomático para cambio de balasto	40
5	Conclusiones	43

Lista de tablas

Tabla 1. Metodología FMEA en orden de los interrogantes a resolver.	7
Tabla 2. Metodología FMECA en orden de las preguntas a resolver.	8
Tabla 3. Metodología RCM en orden de las preguntas a resolver.	9
Tabla 4. Planteamientos iniciales para el desarrollo de la metodología.	10
Tabla 5. Preguntas planteadas para definición de metodología propia.	11
Tabla 6. Cuadro con la información de mantenimiento y resultados del análisis realizado. ...	28
Tabla 7. Entrevista a personal de mantenimiento de la vía permanente.	31
Tabla 8. Criterios definidos.	32
Tabla 9. Clasificación de los tramos de la vía férrea del sistema Metro.	33
Tabla 10. Ponderaciones definidas a cada criterio definido.	34
Tabla 11. Convención de definición de prioridades.	34
Tabla 12. Tramos en cada clasificación por prioridades.	37

Lista de Figuras

Figura 1. Perfil transversal de una vía férrea.....	5
Figura 2. Diagrama con metodología para el análisis de la información.	12
Figura 3. Presencia de polvo blanco sobre durmientes en la vía comercial.	14
Figura 4. Distribución de tramos rectos y curvos en la vía.	16
Figura 5. Material fino que pasa por tamiz N° 200.	19
Figura 6. Distribución granulométrica.	20
Figura 7. Máquina de los Ángeles.	21
Figura 8. Porcentaje de partículas alargadas y planas.....	21
Figura 9. Porcentaje de absorción.....	22
Figura 10. Carga total acumulada soportada por la infraestructura de la vía (Mt).....	23
Figura 11. Gráfica explicativa de tasa mágica de desgaste.	25
Figura 12. Gráfico de tasa de desgaste tramos en LA.....	26
Figura 13. Gráfico de tasa de desgaste tramos en LB.....	26
Figura 14. Señales de aceleración vertical del SPD para la LB ascendente.....	27
Figura 15. Señales de aceleración vertical del SPD para la LB descendente.....	28
Figura 16. Línea A- vía sentido norte-sur con identificación de los tramos prioridades.	35
Figura 17. Línea A-vía sentido sur-norte con identificación de los tramos prioridades.	35
Figura 18. Línea B-Vía sentido occidente-oriente con identificación de tramos.	36
Figura 19. Línea B-Vía sentido oriente-occidente con identificación de tramos.	36
Figura 20. Línea C con identificación de los tramos prioridades.	37
Figura 21. Orden de intervención prioridad 1.	38
Figura 22. Orden de intervención prioridad 2.	39
Figura 23. Orden de intervención prioridad 3.	39
Figura 24. Equipo marca Plasser & Theurer para renovación de balasto.	40
Figura 25. Equipo marca COLMAN para renovación de balasto.	41
Figura 26. Equipo marca KINSHOFER para renovación de balasto.	41
Figura 27. Orden de intervención para método semiautomático.....	42

1 Introducción

La vía férrea es la encargada de guiar los trenes evitando su descarrilamiento y soportando los esfuerzos verticales, transversales y longitudinales; para esto cada uno de los elementos que conforman la vía son primordial, en especial el balasto. El balasto es la capa de agregado grueso triturado y de granulometría uniforme que le da estabilidad y seguridad a la vía. Sobre el balasto se instalan los componentes de la superestructura: los durmientes, fijaciones y rieles sobre los cuales pasan los trenes.

El Metro de Medellín inició la operación comercial en noviembre de 1995, hace 25 años. Primero en una parte de la Línea A, entre las estaciones Niquía y Poblado y meses después se amplió la operación hasta la estación Itagüí, y las seis estaciones de la Línea B. El valor estimado de la construcción de la vía férrea es de alrededor de \$73.122.204.912, incluyendo los sobrecostos causados por la inflación, la deuda externa, los paros y reprocesos que se dieron durante la etapa constructiva.

Este es el único transporte tipo metro con el que cuenta el país. La totalidad de la vía férrea es sobre balasto cumpliendo con los diseños y construcción acorde al material rodante. La vida útil del balasto es estimada en 30 años (Lichtberger, 2007). Según esto, en el 2025 se tendría que proceder a la renovación de los 65 kilómetros lineales que actualmente comprende esta vía permanente. Desde que se inició la operación comercial, los mantenimientos a esta vía se realizan acordes con sus manuales y normativa correspondiente a vías férreas, en busca de lograr que sus activos se mantengan y conserven lo máximo posible su vida útil estimada. Sin embargo, próximos al fin estimado de la vida útil del balasto, se hace necesario definir una estrategia para que esta renovación tenga la menor afectación posible a la prestación del servicio. Más necesario aún ya que este sistema se encuentra conectado con otros sistemas como: tranvía, cables aéreos y buses, que transportan entre 1.000.000 a 1.300.000 usuarios diarios en el Valle de Aburrá, por lo que un paro o restricción de su operación tendría serias implicaciones en la movilidad de la ciudad.

Es de destacar que para esta vía se tienen unas condiciones de infraestructura con tramos en terraplén y en viaducto que limitan con áreas urbanas, donde ambos cuentan solo con las dimensiones de gálibo que cumple con la normativa de dinámica de este tipo de medio, pero que limita actividades complejas como lo es la renovación del balasto. Por lo anterior, se ve la necesidad de analizar la información técnica y de mantenimiento que permita conocer el estado de la vía permanente y verificar la viabilidad de clasificar la vía dando un orden de priorización a los tramos. Esta priorización, por una parte, facilitará la planeación y programación de intervenciones de renovación en busca de mitigar la afectación en la calidad y confort en la prestación del servicio comercial. Por otra parte, esta priorización busca plantear posibles ordenes de los tramos para su intervención con tecnologías disponibles donde los costos de la actividad de la renovación no sean muy elevados.

Teniendo como base que la actividad de renovación se debe realizar en un futuro próximo, se pretende utilizar la mayor información posible que tenga a disposición la empresa del proceso de mantenimiento. Esta información permitirá identificar qué factores tienen mayor relación con la calidad del balasto, para así poder tener un panorama lo más real posible de este activo. Además, permitirá al personal de mantenimiento tener una herramienta que facilite la toma de decisiones

para la programación de las actividades. Esta programación debe ajustarse a varias condiciones y restricciones como: la menor afectación del servicio, puesto que no se cuenta con vías alternas a las de operación comercial, y la selección de tecnologías que más se ajuste con control de costo y eficiencia para el trabajo requerido.

Este trabajo cuenta con un capítulo de marco conceptual donde se consolidan tres metodologías (FMEA, FMECA y RCM) utilizadas en mantenimiento y que incluyen criticidades para las maquinas o activos. Luego se planteará la metodología propia para el análisis de la información técnica encontrada en relación con el estado del balasto, que permitirá definir criterios para aplicar en el análisis de intervenciones de mantenimiento de los últimos años para la clasificación de los tramos por prioridades. Por último, se propone un orden de intervenciones de la vía de acuerdo con dos posibles métodos para cambio del balasto con tecnologías básicas disponibles.

1.1 Formulación del problema

La renovación de balasto de una vía férrea por fin de vida útil es una actividad compleja y, aunque se cuenta con referenciación bibliográfica donde se definen los parámetros para hacer seguimiento y mantener la vía, así como tecnologías que cada vez facilitan las actividades de intervención, también es cierto que cada vía es única, tiene sus características y sus particularidades, lo que hace necesario que cada empresa las tenga plenamente identificadas pues esto es fundamental para conocer la realidad del activo y su trazabilidad en el análisis de la información.

El no iniciar a tiempo la renovación lleva a que el balasto pierda su funcionalidad causando una cadena de daños en los demás componentes que se verá reflejado en la pérdida del confort y la seguridad de este sistema en la prestación del servicio, e incluso puede causar accidentes graves durante la operación. Y al ser el sistema férreo una interacción entre la vía y los trenes, estos últimos también pueden sufrir daños severos si las condiciones de la vía no se mantienen óptimas. Por lo tanto, se debe conocer la realidad del activo con sus particularidades para programar su intervención identificando puntos críticos por donde iniciar, que permita escoger las herramientas y procedimientos adecuados sin que implique paradas prolongadas del servicio comercial.

Se pretende revisar en las metodologías de mantenimiento las bases para definir una metodología propia para el análisis de datos de varias fuentes de información técnica. Este análisis permitirá extraer los datos relevantes del estado del balasto para definir criterios de clasificación de la vía férrea por tramos dando prioridades que sirvan de referencia para la primera renovación del balasto proponiendo un orden de intervención tomando como referencia dos escenarios de acuerdo con la tecnología disponible que le sirva de referencia a los responsables de la vía para la toma final de decisión.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Desarrollar una metodología propia para el análisis de información técnica de la vía férrea, con el fin de clasificar los tramos de la vía ferroviaria para la renovación del balasto cuando cumpla su vida útil.

1.2.2 Objetivos específicos

- Revisar metodologías de mantenimiento que permitan desarrollar una metodología propia que facilite el análisis de información técnica que se tenga de la vía férrea para identificar el estado del balasto.
- Identificar los criterios, a partir de los resultados de la información técnica analizada acorde al estado del balasto, para usarlos en el análisis de intervenciones de un periodo determinado de tiempo que permita la clasificación de la vía férrea.
- Definir el orden de intervención acorde con las prioridades obtenidas en la clasificación de la vía férrea, planteando dos escenarios con tecnologías disponibles.

1.3 Justificación

Las vías férreas sobre balasto son sistemas eficaces probados a lo largo de décadas, tienen bajos costos de construcción y mantenimiento, reducidas emisiones acústicas, cortos tiempos de reparaciones lo que permite mejoras fáciles de la geometría de la vía dando continuidad en la prestación del servicio. El balasto es un componente muy importante que permite dar estabilidad y seguridad a la vía, sobre éste se instalan los demás componentes de la superestructura que permite la circulación de los trenes. Es fundamental garantizar la homogeneidad y compactación del lecho de balasto para el tránsito de los vehículos ferroviarios, pues el deterioro de este componente no sólo afectaría la vía y la infraestructura, sino también componentes importantes de los trenes, pues se trata de un sistema rueda-riel donde a través de la adherencia se transmiten los esfuerzos tracción.

Además, los sistemas ferroviarios son un eje fundamental para la movilidad de las ciudades, en especial cuando tiene integración con otros medios de transporte, facilitando la comunicación con diferentes localidades, pues estos son ampliamente usados para el transporte de pasajeros y de cargas.

La renovación del balasto es una actividad compleja que se debe realizar y para esto se debe contar con una metodología adaptada a cada sistema ferroviario que permita programar esta intervención con todas las medidas en busca de evitar o disminuir considerablemente las interrupciones en la operación y servicio de este sistema de transporte, pues esto acarrearía en caos

y congestiones en los otros sistemas de transporte, ya que no tendrían la capacidad y el alcance para cubrir y atender la afluencia actual y total que ofrece un sistema férreo, como es el caso de la empresa objeto de estudio, Metro de Medellín.

Adicional, hay que tener en cuenta que el sistema tipo metro es limpio ya que trabaja con energía eléctrica y su suspensión aumentaría la emisión de CO₂ (Dióxido de carbono, compuesto químico que afecta la calidad del aire), pues se estaría incentivando el uso de transporte privado y otros que en su mayoría hacen uso de combustibles fósiles, deteriorando la calidad del aire para las poblaciones.

De acuerdo con lo anterior, este trabajo busca desarrollar una metodología propia para analizar toda la información técnica con la que cuenta la empresa Metro, para encontrar los criterios que permitan clasificar la vía por prioridades que faciliten la programación y escogencia de la tecnología apropiada para la renovación del balasto sin que haya afectación en la prestación del servicio comercial.

2 Marco conceptual

En este apartado se define de manera sucinta los principales elementos de la vía férrea. Posteriormente, se relacionan las metodologías de mantenibilidad y confiabilidad consultadas que se encontraron aplicables para el caso de estudio y se tomaron de referencia para la definición de una metodología propia.

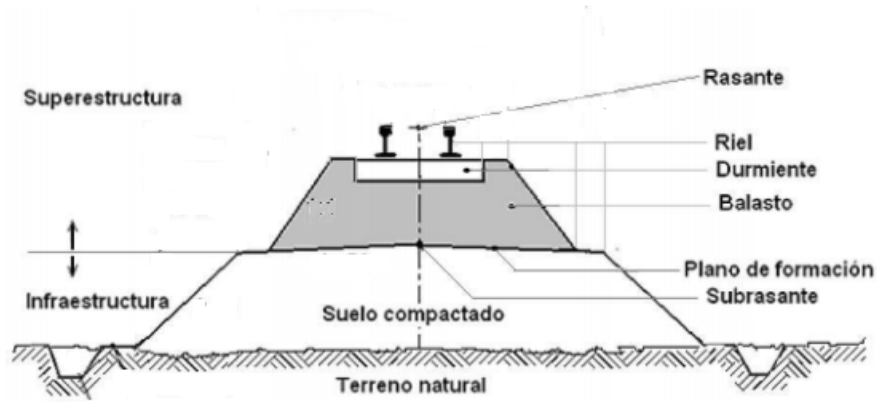
2.1 Vía férrea

La vía férrea o vía permanente es la estructura física de un medio de transporte terrestre donde los vehículos son trenes que se apoyan sobre un camino de rodadura-rieles, por medio de elementos rotativos metálicos-ruedas, donde la vía debe cumplir con ciertas condiciones como: la forma de las curvas, rasante e inclinación de acuerdo con las condiciones del terreno y el trazado, y que estas a la vez correspondan a las características intrínsecas del vehículo permitiendo su circulación segura.

La estructura de la vía está compuesta por la infraestructura y la superestructura, como se puede apreciar en la Figura 1. La infraestructura está constituida por la plataforma y la superestructura está conformada principalmente por el riel, los durmientes, fijaciones o sujeciones y el balasto.

Las condiciones de diseño de la vía férrea objeto de este trabajo no incluyeron capa de subbalasto, es decir solo cuenta con la capa de balasto de un espesor mínimo de 0.30 m tanto en estructura a terraplén como en el viaducto. Debajo de la capa de balasto, el terreno natural fue reemplazado en algunos lugares por rellenos para asegurar condiciones de subrasante aceptables con un grado de compactación del 99%.

Figura 1. Perfil transversal de una vía férrea.



Fuente: Tomado del manual integral de vía (NCA Nuevo central Argentino S.A, 2014).

Solo la alta calidad de cada componente y la óptima armonización de sus propiedades da como resultado una vía duradera, de fácil mantenimiento y que cumpla con:

- Guiar los vehículos evitando el descarrilamiento
- Soportar las fuerzas verticales y horizontales de los vehículos
- Transmitir estas fuerzas hacia la plataforma a través del emparrillado de la vía y del balasto.
- Proporcionar confort durante el viaje
- Garantizar alta disponibilidad de explotación (Lichtberger, 2007)

En este trabajo se busca definir una metodología propia que permita realizar una clasificación de una vía férrea para la programación de intervenciones por renovación. Para esto, se describe brevemente el significado de la palabra metodología. Esta posee varias acepciones, en primer término, es una palabra compuesta por método (vía o camino para llegar a una meta) y por logos que significa estudio o tratado, por lo tanto, la metodología se constituye como el estudio de los métodos empleados para alcanzar un fin (Toala, Mendoza, & Moreira, 2019). De acuerdo con el diccionario de la real academia de la lengua española, la metodología es un conjunto de métodos que se siguen en una investigación científica o exposición doctrinal (RAE, 2020).

Desde el enfoque funcional, la metodología ubica al estudiante para la realización de estudios-diagnósticos, identificación de prioridades y análisis para la toma de decisiones, que contribuyan en la solución de problemas (Toala et al., 2019); por lo tanto, se puede concluir que es el paso a paso ordenado que sigue una persona para realizar una tarea.

En el ámbito de la industria y su mantenimiento a lo largo de la historia se han desarrollado varias metodologías para la gestión del mantenimiento, cada vez más encaminados a la confiabilidad de los equipos. De acuerdo con Pico (2016), el mantenimiento es un conjunto de actividades que permiten mantener un equipo, sistema o instalación en condición operativa, de tal forma que cumpla las funciones para las cuales fueron diseñados y asignados, además de restablecer dicha condición cuando ésta se pierde.

Los equipos, sistemas o instalaciones no son más que los objetos que genera la ingeniería en sus diferentes versiones; por ejemplo, la ingeniería mecánica con sus máquinas, la ingeniería civil con edificaciones, puentes, carreteras, instalaciones físicas, la ingeniería eléctrica con sus sistemas de generación o transmisión eléctrica, la ingeniería electrónica con sus sistemas y aparatos electrónicos, etcétera (Mora, 2015)

Finalmente según Ávila (1995), la función del mantenimiento debe estar enfocada a las tres etapas que tiene el ciclo de vida de un equipo (mantenimiento, reparación o sustitución). En esta definición, la reparación es entendida como una especie de mantenimiento especial en un estado de uso (o abuso) más avanzado del equipo, es decir con una mantenibilidad más reducida.

El mantenimiento ha ido evolucionando, como respuesta al incremento del número de activos y su complejidad, haciendo que su uso sea más exitoso; pero, donde las fallas y riesgos ameriten que se entiendan y resuelvan. Lo anterior ha llevado a las organizaciones a cambiar la óptica hacia el mantenimiento, tomando mayor conciencia de la afectación de las fallas a la seguridad, medio ambiente y control de costos (Moubray, 2004). Por consiguiente, se cuenta con los cambios del mantenimiento a lo largo de su historia y se suele agrupar en cuatro generaciones actualmente, que enmarcan el paso de las actividades netamente correctivas hacia una gestión de mantenimiento proactivo y de clase mundial.

A continuación, se relacionarán conceptos que son aplicados a la gestión de mantenimiento y que sirven de referencia para el desarrollo de los objetivos que se busca con este proyecto.

2.2 Metodología FMEA

La metodología del análisis del modo y efecto de las fallas (Failure Mode and Effect Analysis, FMEA por sus siglas en inglés) permite identificar las fallas potenciales de un activo o un proceso y sus efectos, a partir de un análisis de su frecuencia, formas de detección y el efecto que provocan. Estas fallas se jerarquizan, y para las fallas que vulneran más la confiabilidad del activo o el proceso será necesario generar acciones para atenderlas (Kalathil, Renjith, & Augustine, 2020).

De acuerdo con Moubray (2004), esta metodología se desarrolla resolviendo las preguntas listadas en la Tabla 1:

Tabla 1. Metodología FMEA en orden de los interrogantes a resolver.

Orden	Preguntas
1.	¿Cuáles son los elementos del activo a analizar?
2.	¿Cuáles son las funciones que debe cumplir el elemento?
3.	¿Que causa que falle? (causa de falla)
4.	¿Qué es lo que ocurre si falla? (efecto de la falla)
5.	¿Qué se debe hacer para manejar las fallas? (acciones)

Fuente: Elaboración propia basado en (Moubray, 2004)

Dentro del desarrollo del FMEA, se puede aplicar el análisis de criticidad, el cual determina el número de prioridad de riesgo (NPR), como la multiplicación por tres índices de probabilidad: (1) la gravedad o severidad, (2) el nivel de ocurrencia y (3) la facilidad de detección (Ramírez, 2017).

El análisis de criticidad es una metodología de análisis de riesgo que permite establecer una jerarquía o prioridades de las instalaciones, sistemas, equipos y dispositivos, mediante el estudio de la frecuencia o probabilidad de falla y las respectivas consecuencias en seguridad, higiene, ambiente y producción. El objetivo de un análisis de criticidad es establecer un método que sirva de instrumento de ayuda en la determinación de esa jerarquía, permitiendo subdividir los elementos en secciones que puedan ser manejadas de manera controlada y auditable. Para realizar un análisis de criticidad se debe: definir un alcance y propósito para el análisis, establecer los criterios de evaluación y seleccionar un método de evaluación para jerarquizar la selección de los sistemas objeto del análisis (Santo, Gutiérrez, Strefezza, & Agüero, 2013).

Con lo anterior se da paso a la siguiente metodología utilizada para la gestión del mantenimiento cuando se tiene necesidad de: fijar prioridades en sistemas complejos, administrar recursos escasos, crear valor, determinar el impacto y aplicar metodologías de confiabilidad operacional.

2.3 Metodología FMECA

La metodología del análisis del modo, efectos y criticidad de las fallas (Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis, FMECA por sus siglas en inglés) es muy utilizada en el análisis de fallas y tiene un gran impacto en las decisiones sobre fiabilidad y mantenibilidad en particular. FMECA busca la determinación y mitigación de posibles escenarios de riesgo derivados de los elementos técnicos a evaluar (productos, sistemas o procesos). Una vez son definidos los componentes relevantes o las unidades funcionales requeridas para la operatividad del elemento

evaluado y su organización jerárquica, se identifican las cadenas de causa-efecto correspondientes que conducen a la falla, que se define como el incumplimiento de un requisito especificado. Cada cadena causa-efecto consiste en un modo de falla potencial, luego se definen sus consecuencias y causas respectivas. Siguiendo la organización jerárquica de los componentes, la consecuencia de la falla en cierto nivel jerárquico puede considerarse como la causa de la falla en el siguiente nivel superior. En una evaluación de criticidad posterior, las cadenas de causa-efecto se priorizan para las medidas de mitigación en función de su número de prioridad de riesgo (Panenka, Nyobeu, Rabe, Schmidt, & Sorgatz, 2020).

FMECA parte del concepto de que ya se conocen todas las fallas reales y potenciales, se sabe de los modos de fallas en que se pueden presentar y se tiene un perfecto dominio de todas las funciones principales y auxiliares de los elementos o máquinas a evaluar con el procedimiento. Así que tiene como función principal organizar todas las tareas correctivas, modificativas o proactivas a realizar en el mantenimiento. Adicionalmente, esta metodología cuenta con un análisis de criticidad que utiliza para calificar los efectos de las causas de falla de acuerdo con su severidad, probabilidad de ocurrencia y facilidad de detección. Esto lo que hace es jerarquizar cada una de las tareas a realizar en los diferentes elementos o equipos, con el fin de priorizar los esfuerzos en los equipos que más lo requieran acorde a su grado de criticidad (Mora, 2015).

La metodología FMECA se desarrolla dando respuesta a los siguientes interrogantes de la Tabla 2:

Tabla 2. Metodología FMECA en orden de las preguntas a resolver.

Orden	Preguntas
1.	¿Cuáles son los elementos del activo a analizar?
2.	¿Cuáles son los síntomas que puede presentar el elemento?
3.	¿Qué causa que falle? (causa de la falla)
4.	¿Qué es lo que ocurre si falla? (efectos de la falla)
5.	¿Qué tan crítica es la causa de la falla?
6.	¿Qué se debe hacer para manejar las fallas? (acciones)

Fuente: Elaboración propia

FMECA es muy conocida y aplicada en la industria y está muy relacionada con la metodología que viene a continuación, ya que, con el análisis de criticidad aplicado a los modos y efectos de las fallas, se determinan los equipos críticos, por las consecuencias de sus fallas para la producción/servicio, seguridad o ambiental, a los que se hace necesario implementar esta metodología.

2.4 Metodología RCM

El mantenimiento centrado en la confiabilidad (Reliability centred Maintenance, RCM por sus siglas en inglés) es una metodología sistemática de pasos orientados para determinar qué se debe hacer para asegurar que cualquier activo físico continúe haciendo lo que sus usuarios desean que haga, en su contexto operacional actual. Ampliamente reconocido por los profesionales de mantenimiento como la forma más “costo-eficaz” de desarrollar estrategias de mantenimiento de clase mundial, lleva a mejoras rápidas, sostenidas y sustanciales en la disponibilidad y confiabilidad de planta, calidad de producto, seguridad e integridad ambiental (Ramírez, 2017).

De acuerdo con Moubray (2004), la metodología RCM se desarrolla resolviendo las siguientes preguntas de la Tabla 3:

Tabla 3. Metodología RCM en orden de las preguntas a resolver.

Orden	Preguntas básicas
1.	¿Cuál es la función? (Lo que el usuario desea que el equipo o sistema haga)
2.	¿Cuál es la falla funcional? (¿Cómo deja de hacer lo que el usuario desea que haga?)
3.	¿Cuál es el modo de falla? (¿Qué causa la falla funcional?)
4.	¿Cuál es el efecto de la falla? (¿Qué ocurre cuando la falla se produce?)
5.	¿Cuál es la consecuencia de la falla? (¿cuánto importa que falle?)
6.	¿Qué hacer para prevenir o predecir la falla?
7.	¿Qué hacer si no se encuentra tarea para prevenir o predecir la falla?

Fuente: Elaboración propia basada en Moubray (2004)

El proceso está basado en dar la definición de funciones y comportamientos funcionales a cada elemento de los equipos o sistemas en su contexto operacional. Para cada posible modo de falla encontrado, se evalúa el riesgo y vulnerabilidad generada al sistema. De acuerdo con el nivel de riesgo, se conoce la criticidad de la falla y el nivel de atención necesario de implementación (Ramírez, 2017).

3 Plan de trabajo (Diseño procedimental)

Este trabajo busca correlacionar las tres metodologías del mantenimiento y de análisis de criticidad presentadas previamente (i.e. FMEA, FMECA y RCM) en un análisis de información técnica para establecer criterios de decisión aplicables al plan de mantenimiento enfocado en la renovación del balasto.

La información utilizada es de fuente primaria suministrada por el personal de mantenimiento experto en la vía permanente, así como datos históricos de intervenciones. También, se contó con fuentes de información secundarias, de documentos académicos sobre las metodologías de mantenimiento, teorías del balasto y vías férreas.

Se parte de la situación que el balasto está cerca de finalizar su ciclo de vida útil y se debe proceder con su sustitución, por lo cual la información de mantenimiento de intervenciones se a considerar consiste en los históricos de los últimos 3 años. Se pretende integrar esta información de mantenimiento y correlacionarla con la opinión sobre el estado de la vía de los expertos de mantenimiento.

En la Tabla 4 se relacionan los planteamientos iniciales por los cuales se ve apropiado la búsqueda de metodologías aplicadas a mantenimiento.

Tabla 4. Planteamientos iniciales para el desarrollo de la metodología.

Falla	Pérdida de la función operacional del balasto (deterioro por fatiga debido a la aplicación de ciclos sucesivos de carga y deterioro progresivo por movimiento relativo en la superficie limitante causado por la rueda-riel)
Causa de la falla	Fin de vida útil
Efectos de la falla	<ul style="list-style-type: none">• Daños en elementos complementarios de la vía, entre otros.• Perdida de confort durante paso de los trenes• Aumento del ruido al paso del material rodante• Restricciones en las condiciones del tránsito de los trenes.• Aumento en número de intervenciones de mantenimiento
Consecuencias de la falla.	Insostenibilidad para la prestación del servicio comercial en el sistema tipo Metro por: <ul style="list-style-type: none">• Condiciones inseguras de la superestructura• Deterioros a componentes de la infraestructura, plataformas y material rodante• Alto riesgo de accidentalidad con afectación directa en los usuarios y la estructura.• Perjuicios en la movilidad del área de influencia del medio de transporte, así como los sistemas a los que se integra.• Incremento en los costos de mantenimiento.

Fuente: Elaboración propia.

Por último, se busca resolver los interrogantes planteados en la Tabla 5 para hacer una correlación de las metodologías mencionadas previamente.

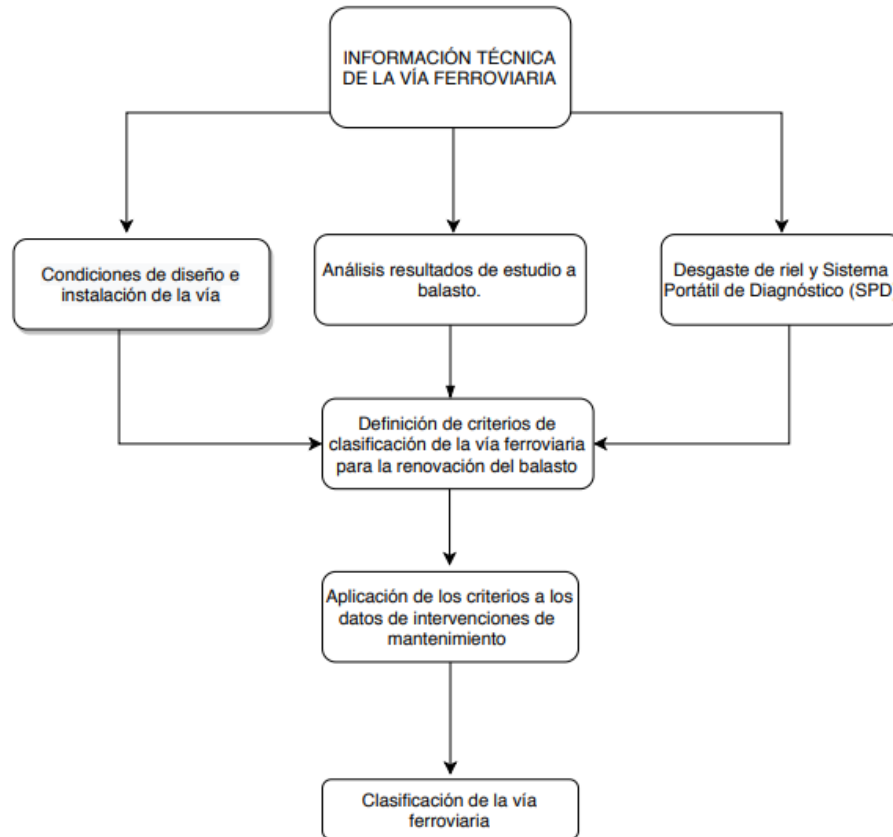
Tabla 5. Preguntas planteadas para definición de metodología propia.

Pregunta	Cómo resolverla
¿Descripción de las condiciones del activo?	Revisión de los factores de diseño, construcción y operación relacionados con la vida útil del balasto
¿Cuáles son las funciones que debe realizar el activo?	Revisión de propiedades y funciones del balasto en una vía férrea
¿Cuáles son los síntomas que puede presentar el activo?	Análisis de la información técnica y de mantenimiento recopilada.
Evaluación general del activo	Análisis de la información anterior.
Recopilación de la información pertinente	<ul style="list-style-type: none"> • Estudio de datos obtenidos por el personal de mantenimiento de su monitoreo del estado del balasto. (Analizar los resultados de laboratorio realizados en 2006, 2012 y 2016) • Históricos de mantenimiento preventivo y correctivo. • Información de intervención de bateo de los últimos 3 años • Información de intervención de reperfilado de los últimos 3 años • Información de riego de balasto de los últimos 3 años • Tonelaje que ha transitado por la vía • Información de cambios de riel. <p>Datos de diseño y construcción de la vía y operacionales.</p>

Fuente: Elaboración propia.

Para esto en la Figura 2, se plantea el siguiente diagrama de presentación de la información técnica recopilada como parte de la metodología para el análisis de la información técnica de la vía férrea. Según este diagrama, la definición de los criterios relevantes de clasificación de la vía surge de la combinación de tres fuentes de información diferentes: (1) las condiciones de diseño e instalación de la vía, según el estado del arte y la información recopilada de los inicios de la empresa Metro; (2) el análisis de los resultados de ensayos de laboratorio realizados en distintos puntos de la vía; y (3) el desgaste del riel y mediciones con el Sistema Portátil de Diagnóstico (SPD).

Figura 2. Diagrama con metodología para el análisis de la información técnica de la vía ferroviaria para definición de los criterios relevantes de clasificación de la vía.



Fuente: Elaboración propia.

4 Resultados

Los resultados de este proyecto se dividen en tres partes. Primero, se presenta el análisis de la información técnica recopilada. Luego, se definen los criterios de clasificación y se presentan los resultados para el caso de estudio. Por último, se presenta dos propuestas del orden de intervención de renovación de acuerdo a un método manual y a un método semiautomático de renovación de balasto.

A continuación, se presenta el desarrollo de lo expuesto en la Figura 2 con el fin de alcanzar los objetivos planteados de definir los criterios que permitan establecer la clasificación de los tramos para realizar las intervenciones de mantenimiento.

4.1 Análisis de la información técnica

De toda la información recopilada en la empresa, en esta sección se relaciona sólo la más relevante al área de mantenimiento que tiene relación de manera directa o indirecta con el estado y calidad actual del balasto.

4.1.1 El mantenimiento y su relación con la vida útil del balasto

El plan de mantenimiento para las condiciones de balasto desde el comienzo de la operación se ha enfocado en acciones preventivas con el objetivo de conservar las condiciones iniciales de la superestructura. Las principales acciones de mantenimiento enfocadas a la capa de balasto son: bateo, riego de balasto y tratamiento a la sub-base (Rhayma, Bressolette, Breul, Fogli, & Saussine, 2013). Además de las actividades que se relacionan con la capa de balasto de manera indirecta: reperfilado de rieles, para reducir las ondulaciones, y reforma de la cabeza del riel desgastada, para que tenga la forma correcta.

Las rutinas de mantenimiento incluyen medición de los siguientes parámetros: alineación longitudinal, ancho de vía, nivel longitudinal, y nivel transversal (o peralte). Estas mediciones se realizan con flexómetro de equipo manual, regla de ancho vía y peralte o máquina de bateo. Posteriormente, estas medidas se comparan con los niveles de calidad establecidos en normativa internacional.

Por lo general, la alineación y ancho de vía están dentro de los niveles de calidad. Sin embargo, cuando el nivel longitudinal o el nivel transversal están fuera de los niveles estándar, se realiza un bateo inmediato a lo largo del área afectada total para evitar daños a la superestructura.

Cuando el área afectada está en una sección curva, se interviene toda la sección. Es de resaltar que, desde el comienzo del servicio, es decir, hace más de 25 años, no se han realizado acciones de renovación de balasto completa (i.e. en toda la capa de balasto) porque el plan de monitoreo nunca lo ha clasificado como inaceptable. Ni las mediciones fuera de los niveles de calidad ni la presencia de polvo blanco son condiciones inaceptables. Estos implican acciones de mantenimiento reactivo para recuperar su condición inicial por diseño.

También se cuenta con inspecciones visuales de rutina, mediciones de parámetros geométricos y condiciones superficiales de los rieles, cuando se detecta polvo blanco sobre los durmientes como se muestra en la Figura 3, se tiene indicios de fragmentación y desgaste del balasto, por lo que está directamente relacionado con la falta de compactación de la capa de balasto.

El polvo blanco es un síntoma de la desconsolidación de la vía que degrada notoriamente el balasto. Por lo tanto, es evidencia de una etapa avanzada de desconsolidación, y conlleva a una acción correctiva inmediata en todo el tramo donde fue localizado. Esta acción correctiva consiste en realizar un bateo a la vía.

Figura 3. Presencia de polvo blanco sobre durmientes en la vía comercial.



Fuente: Tomada durante un recorrido de inspección de la vía.

El bateo de balasto se realiza para restablecer la geometría de la vía en términos de alineación longitudinal, nivel longitudinal y nivel transversal. El bateo consiste en reorganizar y compactar el balasto en el lugar para reducir los movimientos del vehículo y las consecuentes fuerzas en la pista. Esta acción se realiza periódicamente, en promedio una vez al año. Sin embargo, la frecuencia de bateo puede modificarse por la presencia de defectos superficiales en el riel, como desgaste ondulatorio, grietas, descascaramientos o por huecos entre durmiente y balasto. La formación de huecos debajo de los durmientes resulta de un problema de contacto entre los durmientes y la capa de balasto, lo que a su vez aumenta los efectos dinámicos a medida que el durmiente golpea el balasto y produce asentamientos adicionales. Debido a la abrasión y la rotura de partículas en la posición de un durmiente hueco, a menudo es necesario apisonar, lo que puede conducir a una mayor contaminación del balasto y al final a una desestabilización de la vía (Tzanakakis, 2013). Además, a menudo los defectos en la superestructura de la plataforma, tales como el desgaste abrasivo, el corrugado del riel y las grietas plásticas debido a la fatiga por contacto rodante, pueden provocar un aumento de las fuerzas estáticas y dinámicas en la capa de balasto. Por lo tanto, se estima que el reperfilado de los rieles reduce las acciones de mantenimiento necesarias en el balasto (Tzanakakis, 2013).

El reperfilado de rieles es una acción de mantenimiento preventivo que consiste en corregir la calidad de la superficie del riel, dándole nuevamente el perfil adecuado para rodadura de la rueda. Se realiza mediante ruedas giratorias abrasivas que eliminan deformaciones locales y precisas de la cabeza del riel. Esta acción superficial puede extender la vida útil de la alineación longitudinal entre 30-50% (Lichtberger, 2007). El rectificadado de rieles se realiza una o dos veces al año en secciones curvas y cada dos años en secciones rectas.

El riego de balasto es una acción de mantenimiento que consiste en agregar nuevo balasto en lugares donde los huecos debajo de los durmientes afectan el nivel transversal. El balasto agregado tiene la misma calidad que el que ya está instalado.

Vale la pena mencionar que el rectificadado de rieles y el bateo de balasto son acciones de mantenimiento independientes. Por lo tanto, las secciones donde se realiza el bateo de balasto no requieren rectificadado de rieles. Este último sólo se realiza cuando la superficie del riel presenta defectos. Así que, si bien cada acción de mantenimiento es independiente, ya que se centra en

diferentes defectos, todos son complementarios y benefician la calidad y el estado general de la vía del ferrocarril.

4.1.2 Factores de diseño relacionados con la vida útil del balasto

La información mencionada a continuación fue obtenida de consultas al personal de mantenimiento y en documentos del diseño y reportes de recepción de la vía. La mayoría de estos documentos se encuentran en su estado original guardados en el centro de documentación del Metro de Medellín.

a) Velocidades

La velocidad de diseño para el sistema metro de Medellín es de 80 km/h y, de acuerdo con mediciones recientes, su velocidad promedio en servicio comercial es de 40 km/h. Estos valores han permanecido desde inicios de la operación y en ningún tramo se han realizado cambios de incremento de velocidad a los inicialmente establecidos.

b) Espesor de la capa del balasto

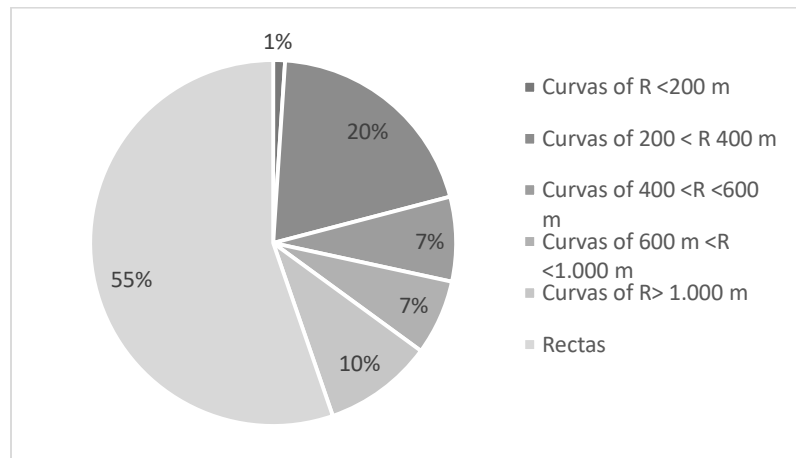
De acuerdo con el diseño y en cumplimiento de la instalación, el espesor del balasto en la vía es de mínimo 0.30 m bajo durmiente.

c) Trazado vertical y horizontal

La configuración del trazado de una línea férrea se compone por las alineaciones en recta y en curva, teniendo en cuenta su adaptación a la orografía del terreno, así como el tipo de vehículo y elementos a transportar (mercancía o pasajeros) (Oliveros, López, & Megía, 1977). En el año 1995, el Metro de Medellín recibió la vía férrea con una calificación de buen estado de acuerdo con las normas RENFE vigentes en su momento. El trazado del sistema férreo del Metro de Medellín cuenta con un porcentaje elevado de curvas de radio menor a 1000 m (35% aproximadamente), en las cuales se ha evidenciado la presencia de desgaste ondulatorio fenómeno que repercute directamente en la durabilidad del balasto, por las constantes vibraciones que ocasiona a toda la superestructura. Se resalta que, en la Línea B, el trazado cuenta con equivalencia de curvas a izquierda con las curvas a derecha.

Como se muestra en la Figura 4, el 45% de la longitud total tiene curvas de radio variable. Las curvas de menos de 400 m de radio representan el 21% de la longitud total.

Figura 4. Distribución de tramos rectos y curvos en la vía.



Fuente: Elaboración propia a partir de información suministrada por el Metro de Medellín Ltda.

d) Cargas por eje

De acuerdo con el manual de vía, la carga máxima de los vehículos de pasajeros del Metro de Medellín es de 18 toneladas por eje, basados en este dato se hicieron los cálculos de las construcciones y obras de mejoramiento o estabilización del suelo portante.

e) Montaje-Recepción-Calificación de la vía

La instalación de la vía se realizó siguiendo los lineamientos de la normativa RENFE de la vía vigente en ese momento, actualmente se encuentran estas normas reguladas por ADIF, que es el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias del gobierno de España. Igualmente, sobre esta norma se basó la recepción de la vía férrea del Metro de Medellín. Esta recepción obtuvo una calificación de estado buena, puesto que cumplía los parámetros para una vía nueva, esto sucedió luego de finalizar la instalación y fue aval para continuar con las actividades para inicio de operación comercial.

f) Calidad de la roca

Asimismo, según el diseño establecido, las vías y los cambiavías deben estar, por regla general, asentados en un lecho de balasto proveniente de piedra dura. Dicho balasto está expuesto a degeneración por las sollicitaciones dinámicas a las que está sometido por lo que es importante definir las condiciones específicas. A continuación, se presentan las principales funciones, propiedades y forma del balasto recopiladas de la Empresa de los Ferrocarriles del Estado (EFE, 2006).

Funciones del balasto

Debe cumplir las siguientes funciones principalmente:

- a) Amortiguar y distribuir uniformemente las acciones que ejercen los vehículos sobre la vía al transmitir las a la plataforma.
- b) Garantizar la elasticidad de la vía con el fin de reducir las fuerzas dinámicas.

- c) Impedir el desplazamiento de la vía, estabilizándola en vertical, transversal y longitudinal.
- d) Facilitar el drenaje de las aguas lluvias, a través de los espacios entre las piedras del balasto.
- e) Permitir la recuperación de la geometría de la vía mediante operaciones de alineación y nivelación.

Propiedades del balasto

Para cumplir con las funciones mencionadas, el balasto instalado debe reunir las siguientes propiedades:

- a) Elasticidad suficiente para absorber las acciones de los trenes y repartir sus cargas.
- b) Resistencia y tenacidad para resistir sin desintegrarse por la acción trituradora de las cargas móviles.
- c) Dureza para resistir la abrasión producida por el roce entre sus partículas.
- d) Estabilidad física ante la acción del agua.
- e) Tamaño uniforme para que la trabazón, fricción interna y compacidad tengan valores adecuados y permitir el drenaje por los espacios de sus componentes.
- f) Estabilidad para que sus componentes se mantengan en su lugar, sin moverse bajo la acción de cargas vibratorias.
- g) Ser fácilmente compactable en forma mecánica, para permitir recuperar la calidad geométrica de la vía.
- h) Tener una resistencia eléctrica mínima de 3 Ohm por kilómetro de vía para corriente continua y balasto húmedo.

Forma de la roca

El material usado como balasto debe estar formado por agregado grueso de aristas vivas y caras rugosas, provenientes de fracturas, cuya forma se asimile a la forma de un poliedro regular, debiéndose excluir las piedras que presenten caras redondeadas o lisas con dimensiones notoriamente predominantes. En la siguiente sección se presentan los resultados de ensayos de laboratorio y definición de los parámetros de calidad que debe cumplir el balasto.

4.1.3 Análisis de resultado de laboratorio de estudios realizados al balasto

Como parte de las actividades de monitoreo y control de la vía férrea a partir del año 2006, se iniciaron los análisis al balasto por medio de ensayos de propiedades físicas y granulométricas, elaborados por la universidad de Antioquia en los años 2006, 2012 y 2016.

Las muestras siempre fueron tomadas en tres puntos de referencia definidos por la Empresa Metro de Medellín por ser representativas de la vía en condiciones de funcionamiento más exigentes.

Tabla 6. Tramos analizados en 2006, 2012 y 2016

Identificación	Tramo	Línea	Ubicación	Radio(m)	Peralte (mm)
1	JAV-LUC	Línea B	Terraplén	190	75
2	TRI-CAR	Línea A	Terraplén	300	130
3	CAR-UNI	Línea A	viaducto	303	150

Fuente: Elaboración propia a partir de datos suministrados por el Metro de Medellín Ltda.

A continuación, se presenta la comparación de los resultados obtenidos en los años 2006, 2012 y 2016. Para esto, se tomó como referencia las normas AREMA, la cual se basa en las normas ASTM para la caracterización física del balasto en la vía del tren. Estas son aplicables al Metro de Medellín, puesto que determina cómo deben ser la distribución granulométrica y las propiedades físicas del balasto.

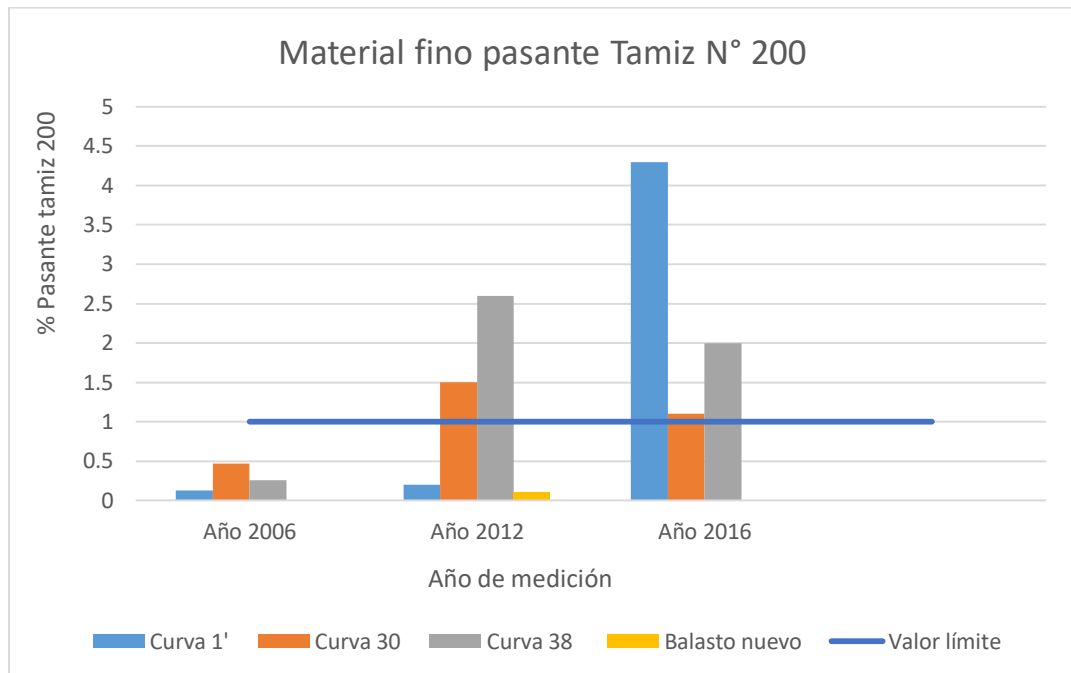
Los resultados del análisis granulométrico son para garantizar que el tamaño promedio de las partículas es el apropiado y que el conjunto sea de tamaño uniforme. Esto permite que el balasto cumpla con su resistencia al corte, estabilidad física y facilitar el drenaje. Asimismo, permite que sea debidamente compactado. Es importante resaltar que las propiedades físicas y mecánicas del balasto, como conjunto de agregados, es determinado por el tipo de roca de origen, así como por la configuración de la distribución de las partículas. Por ende, la correcta compactación es necesaria para cumplir con los requerimientos mecánicos del balasto, y a su vez, permitirá que desempeñe su función de acuerdo con lo esperado.

a) Distribución granulométrica y porcentaje de material fino

Para los resultados de porcentaje de material fino (pasante malla No 200) en las tres mediciones presentados en la Figura 5, se encuentra que las tres zonas analizadas ya superaron el valor límite de material fino. Este resultado indica que estas curvas y sus similares están evidenciando desgaste y deterioro de la vía, por lo que se debe considerar su cambio a futuro. Pues el material fino, por gravedad se desplaza hacia abajo y se va acumulando, lo que va generando que se presenten zonas de concentración de humedades por obstrucción del drenaje del agua.

Hay que destacar que la curva 1' (JAV) aunque ha tenido riego de balasto, del 2012 a 2016, presenta incremento en este parámetro, como se puede apreciar en la Figura 5. En los tres puntos, el contenido de finos en general aumenta con el tiempo, sobre todo si se toma en consideración el valor indicado para el balasto en estado nuevo. Sin embargo, es importante resaltar que los valores presentan gran variación para los diferentes años y las diferentes curvas. Desde un punto de vista estadístico, la muestra podría no ser representativa de todas las secciones de curva de la vía.

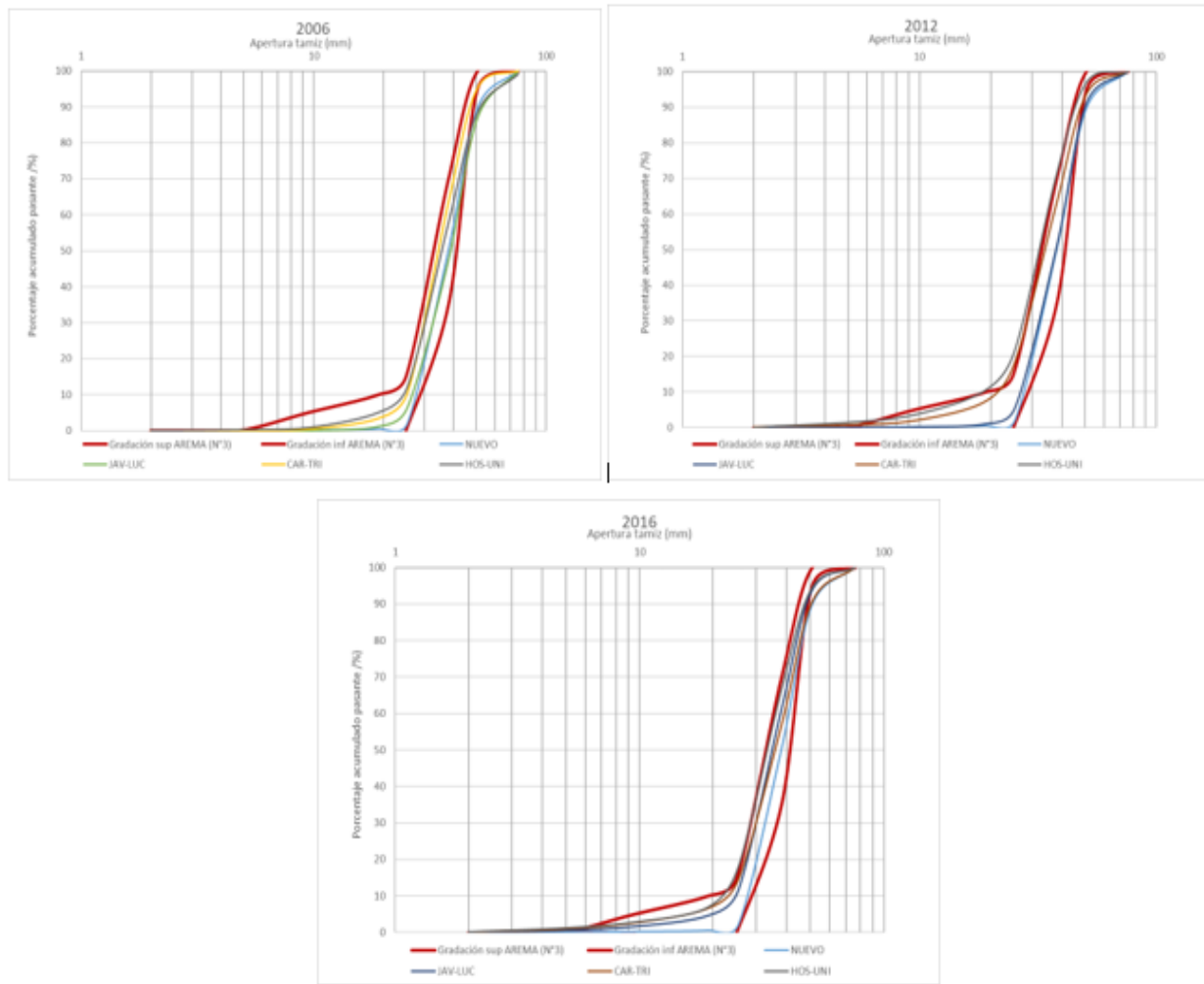
Figura 5. Material fino que pasa por tamiz N° 200.



Fuente: Modificado de (Universidad de Antioquia, 2016)

En cuanto a las curvas granulométricas, la Figura 6 muestra los resultados por año obtenidos para cada tramo y se adicionaron los datos de análisis del balasto nuevo (línea azul) y los límites superior e inferior de la norma AREMA para gradación No.3 (ver las líneas rojas). Esta gradación es la más cercana a los resultados. En esta Figura, se puede apreciar cómo las líneas de los tramos se van corriendo hacia la izquierda frente a la línea del balasto nuevo, lo que indica una disminución en el tamaño de las partículas a medida que van pasando los años. Lo anterior va en coherencia con el porcentaje de material fino presentado en la Figura 5. Adicionalmente, en la Figura 6 se evidencia una menor pendiente en las curvas granulométricas, lo que indica un decremento en la uniformidad de las partículas. A medida que el balasto se compone de partículas de distintos tamaños, su compactación requerirá de mayor energía y su resistencia al corte disminuirá.

Figura 6. Distribución granulométrica.

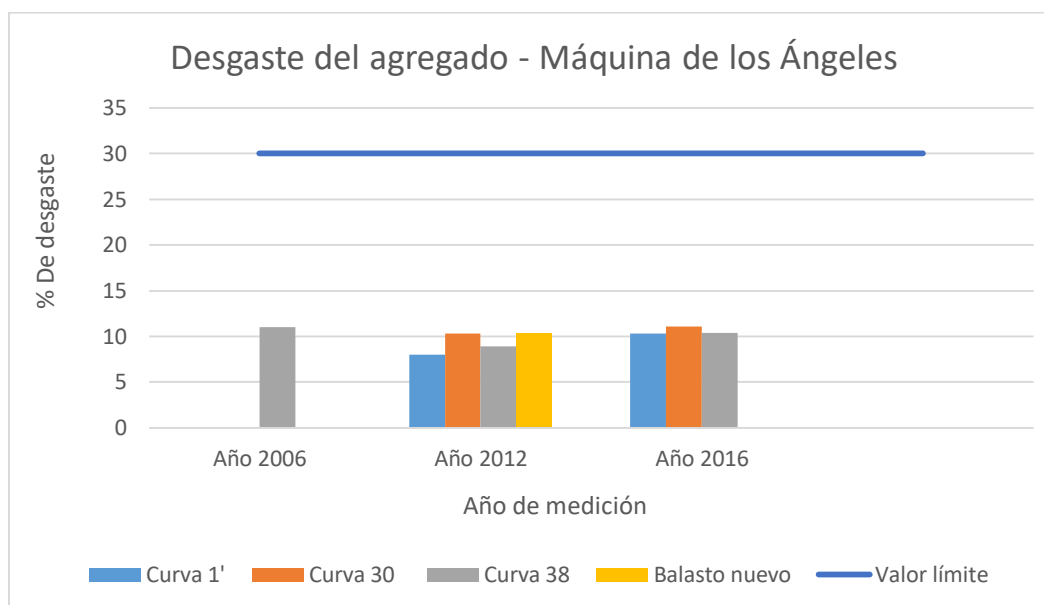


Fuente: Modificado de (Universidad de Antioquia, 2016)

b) Máquina de desgaste

Los resultados de la prueba en la máquina de los Ángeles, en los tres puntos se ha conservado muy por debajo del límite de la norma AREMA (30%). Además, los resultados presentan muy poca variación, lo que indica que el material es resistente a la degradación frente a esfuerzo de abrasión o fatiga a los cuales se encuentra normalmente expuesto el balasto en una vía férrea.

Figura 7. Máquina de los Ángeles.

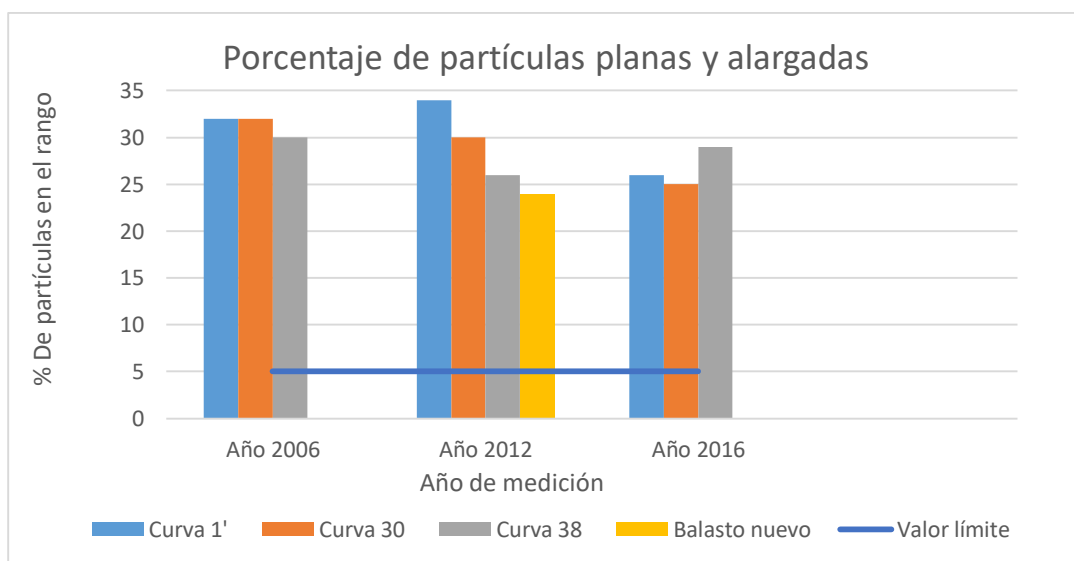


Fuente: Modificado de (Universidad de Antioquia, 2016)

c) Participación partículas planas y alargadas

Los resultados de porcentaje de partículas planas y alargadas para las tres zonas analizadas se presentan en la Figura 8. Se evidencia que todos los valores son superiores a lo establecido en la norma AREMA (5%). Sin embargo, para los tres años medidos, los valores han sido similares y proporcionales a los del balasto nuevo. Esto tiene relación con el entrecruzamiento que se dan entre las rocas del balasto permitiendo siempre contar con los espaciamientos requeridos para la evacuación del agua, pero sin dejar de lado el amortiguamiento de los esfuerzos.

Figura 8. Porcentaje de partículas alargadas y planas.

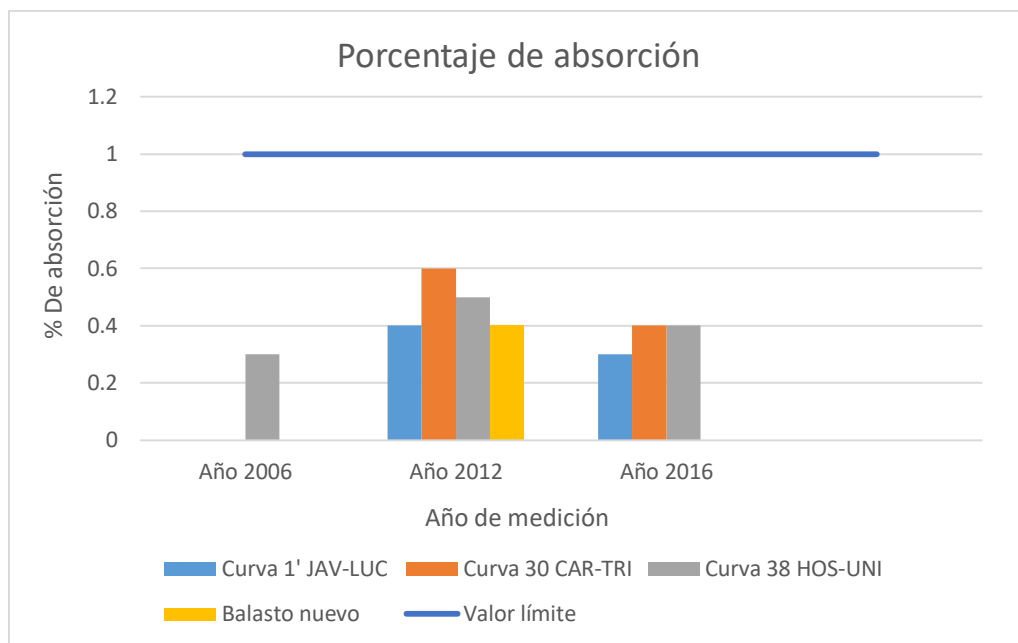


Fuente: Modificado de (Universidad de Antioquia, 2016)

d) Absorción de agua

Como se puede apreciar en la Figura 9, el porcentaje de absorción de agua evaluado en las muestras de los tramos se encuentra por debajo del valor máximo establecido por la norma, lo que indica que el balasto analizado cumple. Además, tiene posiblemente baja porosidad superficial, lo que puede generar menor carga a la plataforma.

Figura 9. Porcentaje de absorción.



Fuente: Modificado de (Universidad de Antioquia, 2016)

Fue una muy buena práctica de mantenimiento el iniciar seguimiento a las condiciones del balasto con anterioridad, pues esto permite tener criterios definidos desde el principio con los cuales se puede en el tiempo medir su deterioro y tiempo oportuno de reposición. La extracción de muestras y la realización de ensayos de laboratorio es, en general, una actividad costosa (en cuanto a los recursos de tiempo, personal y económicos). Por lo que el alcance es muy limitado, en este caso sólo están disponibles resultados de 4 ensayos, para muestras de tres tramos, analizadas tres veces en 10 años. Por lo anterior, es necesario tomar en cuenta otras fuentes de información para estimar o aproximar las condiciones y el comportamiento actual del balasto.

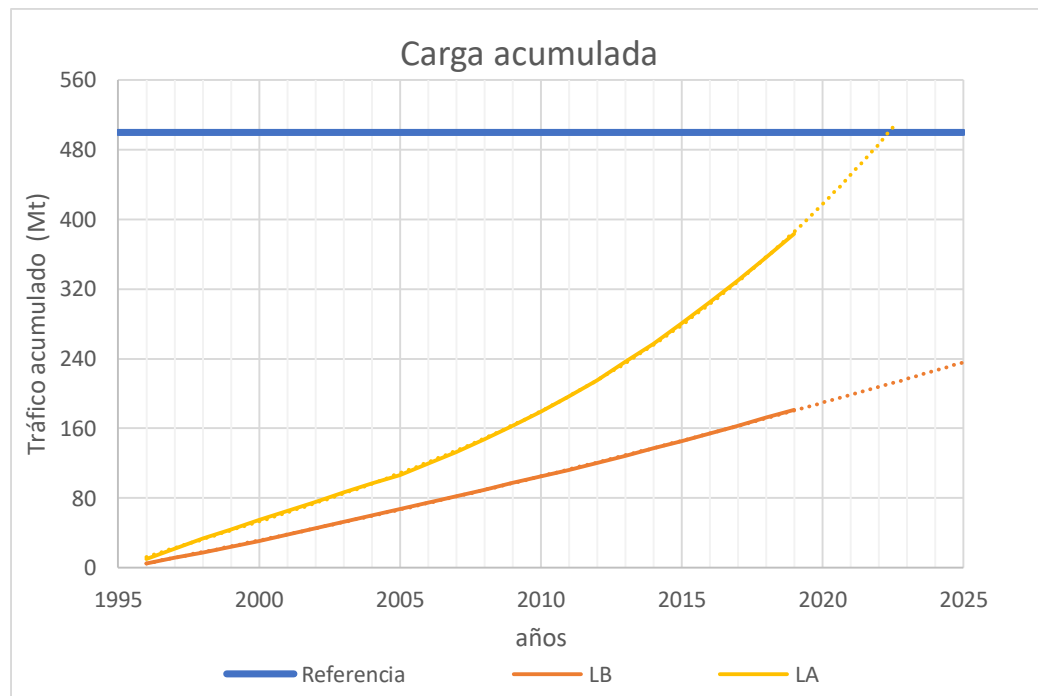
Se continúa con el análisis de datos relacionados con el desgaste del riel, el cual tiene mucha relación con el estado del balasto tanto por el tonelaje que transita, y por ende es soportado por el balasto, así como los mantenimientos preventivos de reperfilado para conservar el perfil del riel y garantizar el contacto del riel con la rueda de acuerdo con trazado de la vía

4.1.4 Desgaste del riel y sistema portátil de diagnóstico (SPD)

Para el tema de cargas que soporta la vía se contó con un archivo del área de vía permanente, donde se calculaba la carga total anual del sistema férreo (Línea A, LA y Línea B, LB), teniendo en cuenta el estudio origen -destino que realizó la empresa Metro de Medellín en diferentes años, estos datos solo se tomaron hasta el año 2009. Para el año 2010 al 2019 se realizaron cálculos teniendo en cuenta los datos de vueltas total reales anuales y verificaciones puntuales de cargas reales utilizando sistema de pesaje con el que cuenta la empresa Metro de Medellín; y tomando un porcentaje de la carga total a la que puede llegar a estar sometida la vía de acuerdo con diseños, es decir un porcentaje de carga total de los trenes (AW2).

Los resultados de la carga total acumulada cada año desde el inicio de la operación se muestra en la Figura 10. Para estos resultados, se tomó en cuenta que en promedio la carga por eje en las horas picos (más cargado) es aproximadamente de 15t/eje, estando por debajo del valor de diseño. Es decir que el balasto está sometido a esfuerzos estimados en su diseño, sin embargo, la fatiga por acumulación de cargas sucesivas durante estos años se va acercando al valor de referencia para el cambio.

Figura 10. Carga total acumulada soportada por la infraestructura de la vía.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos suministrados por el Metro de Medellín Ltda.

En esta Figura, se observa un cambio de pendiente en la LA debido al crecimiento representativo de los usuarios por acciones como: inicio de operación de las líneas de los cables aéreos (LK, LJ, LL) y por implementación de los trenes dobles, inicialmente solo en horas pico y luego en horario completo y; más recientemente la línea de tranvía LTA con sus dos líneas de cables aéreos (LH, LM).

Tomando en consideración todo lo anterior y teniendo en cuenta las características de diseño de la vía y de los trenes, se puede concluir que los esfuerzos que está soportando la vía se encuentran acorde con lo esperado. Según Lichtberger (2007), para una vía principal con operación intensiva típica, la renovación del balasto se debe realizar cada 20 a 30 años, lo que se relaciona a una carga de tráfico acumulada entre 200 y 500 Mt. En la Figura 10 se indica este límite máximo con una línea azul. Si se hace una proyección siguiendo una ecuación polinómica de tercer orden, para la LA esto se estaría cumpliendo después del año 2022 y para la LB en el 2049, aproximadamente.

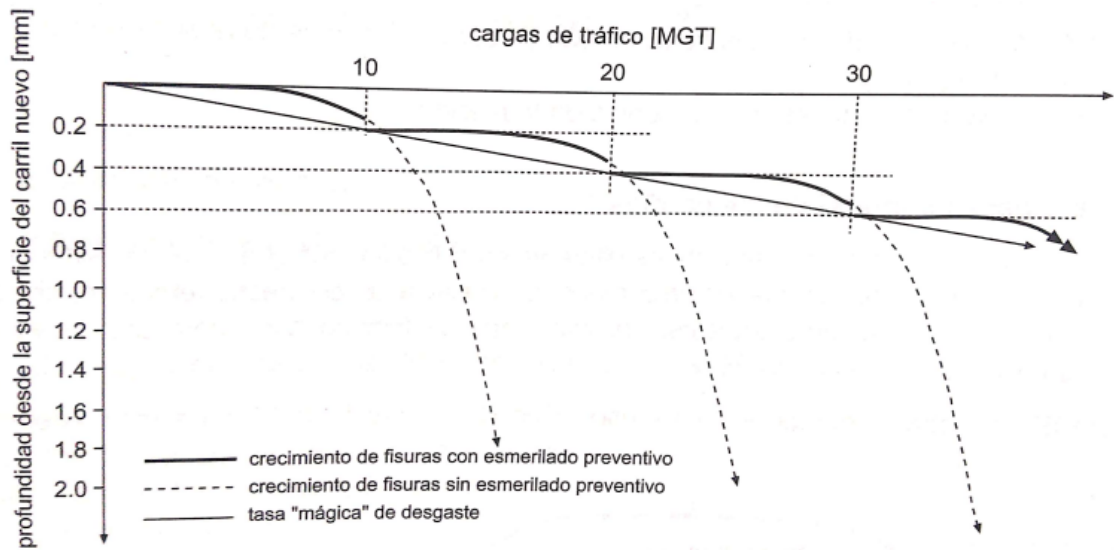
La tendencia para la LB está muy por debajo respecto a la LA, ya que desde el inicio de la operación por la LB sólo han circulado en servicio comercial trenes de configuración sencilla y sólo tiene una línea de cable aéreo integrada (KJ). Sin embargo, esto no indica que se deba repensar o programar la renovación de su balasto, pues como se observó en el análisis anterior la degradación de la roca se evidencia tanto en los tramos de LA como el de LB analizado.

4.1.5 Tasa mágica de desgaste

Debido al desgaste de los aceros de la rueda y riel, a lo largo de los años se han ido desarrollando nuevos materiales para la fabricación de estos elementos que permitan disminuir su desgaste, es por esto que se cuentan con aceros aleados o los endurecidos con tratamientos térmicos, como el templado que permite una reducción de la tasa de desgaste entre 1-10mm por cada 100 millones de toneladas, esto de acuerdo con las condiciones de cada vía. Sin embargo, se debe tener muy presente los defectos que se presentan en los rieles por su interacción con las ruedas, como las fisuras y demás defectos. Para esto ya se tiene establecido el reperfilado como un procedimiento desde el mantenimiento preventivo que permite mitigar la propagación de las fisuras y continuar con la conservación de la vía, dando el confort a los usuarios. Pero esto genera una reducción en la tasa de desgaste esperada para los rieles, ya que con el reperfilado se busca disminuir las geometrías de contacto puntual las cuales, por medio de eliminación de material de manera controlada, junto con elevadas cargas por rueda, elevadas fuerzas de guiado y elevados esfuerzos longitudinales favorecen el crecimiento extremo de las fisuras al interior de los rieles (Lichtberger, 2007).

Con el reperfilado preventivo surge el principio de tasa mágica de desgaste para los rieles, esta consiste en un gráfico que a partir de datos propios de cada sistema férreo como: la carga axial, la velocidad, el tonelaje anual, la lubricación, el tipo de material, el tipo de vehículo, condiciones ambientales como temperatura y humedad, entre otros. Con la tasa mágica de desgaste se puede estimar la vida útil teniendo en cuenta la cantidad total de metal que se elimina desde el desgaste causado entre rueda-riel, como el desgaste por reperfilado que busca optimizar la vida útil de los rieles, con una intervención a tiempo que permita la corrección de los defectos como fisuras y desgaste ondulatorio (Velásquez, 2014).

Figura 11. Gráfica explicativa de tasa mágica de desgaste.



Fuente: Tomado del libro de la vía (Lichtberger, 2007).

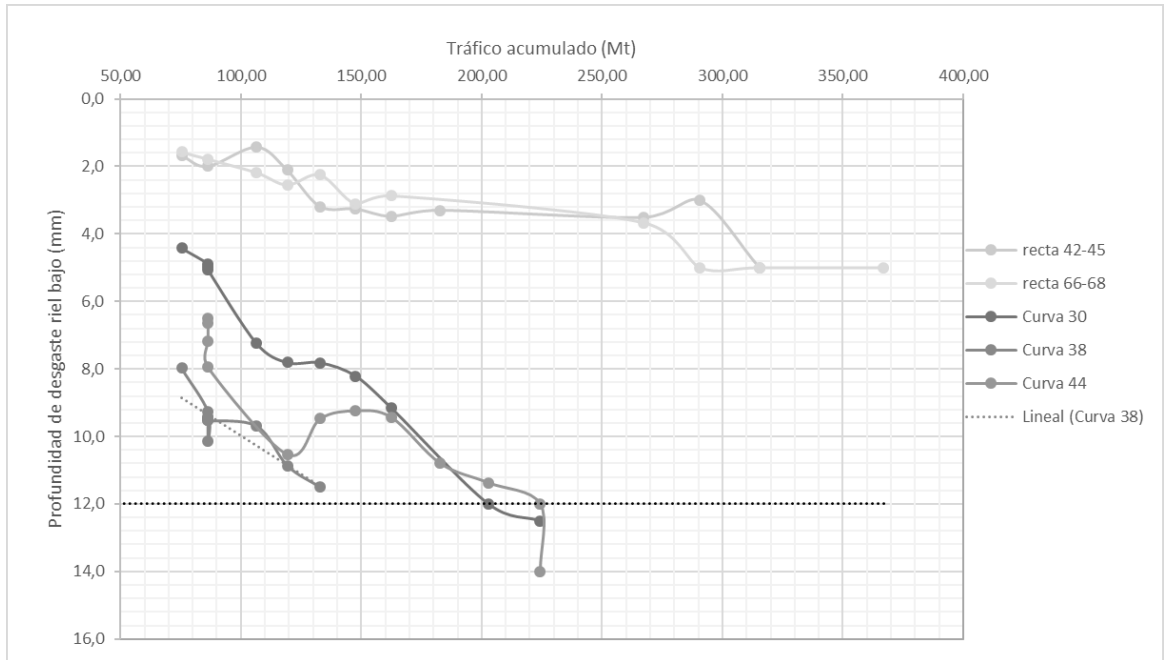
Tomando como referencia la definición de tasa “mágica” de desgaste y los datos para su elaboración, se tomaron datos de mantenimiento de la vía y se escogió tres curvas y dos rectas representativas de la línea A y para la línea B se escogieron dos curvas y una recta, y se elaboró una gráfica de desgaste de estos tramos escogidos.

En las Figuras 12 y 13 se puede apreciar cómo la rata de desgaste de las curvas difiere del comportamiento de desgaste de los tramos rectos para ambas líneas férreas. Se aclara que los datos graficados corresponden a históricos de mantenimiento desde el año 2002 hasta el año 2018; para las curvas se realizó con los valores en el riel bajo, el cual de acuerdo con experiencia es el que presenta mayor desgaste, los datos llegan hasta valores cercanos a 12 mm de profundidad de desgaste, valor considerado de alerta y a partir del cual se debe programar con el cambio de riel.

Tener en cuenta que los datos graficados corresponden a información obtenida de mantenimiento los cuales son datos de campo (registro manual) que pueden presentar errores desde la manualidad a la transcripción digital, lo cual puede hacer variar el comportamiento de las series las cuales aplicando el concepto de tasa de desgaste se debe asociar a un comportamiento con tendencia lineal.

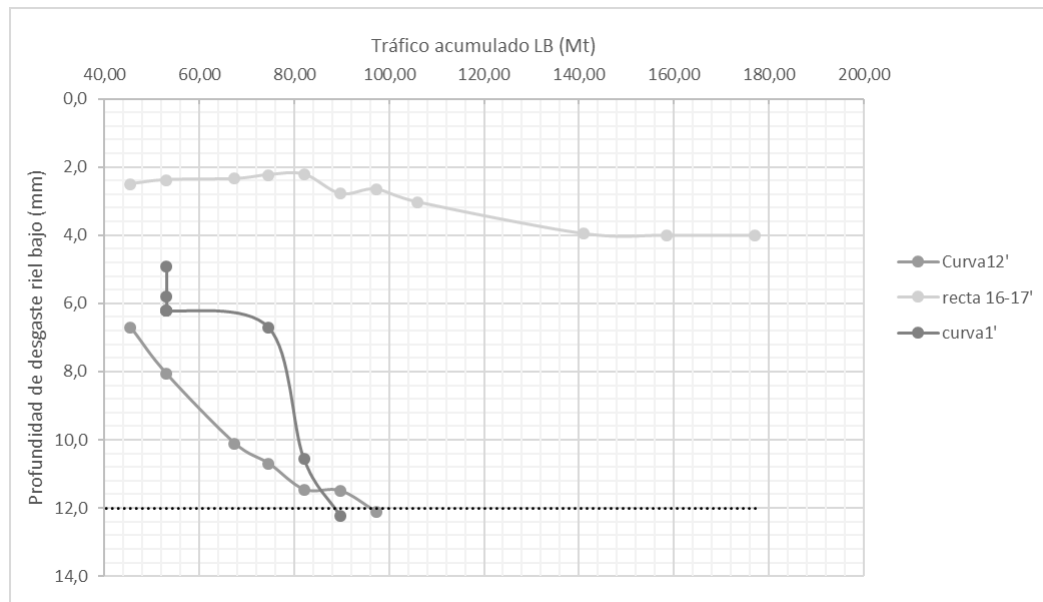
Aunque el desgaste del riel tiene relación en el estado y deterioro de la vida útil del balasto, pues los tramos de cambio también son los tramos de vía con mayores intervenciones de mantenimiento, desde el reperfilado. Por lo que un buen mantenimiento del riel, mitigando los defectos que sobre éste se presentan como desgaste ondulatorio y fisuraciones, ayuda en la conservación de la vida útil estimada de la vía. La cual acorde a la bibliografía es de alrededor de 30 años, debido a lo anterior se considera que los datos más representativos para determinar y estimar el desgaste del balasto son los basados en la información procedente de los mantenimientos de la vía permanente.

Figura 12. Gráfica de tasa de desgaste tramos en LA.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos suministrados por el Metro de Medellín Ltda.

Figura 13. Gráfica de tasa de desgaste tramos en LB.



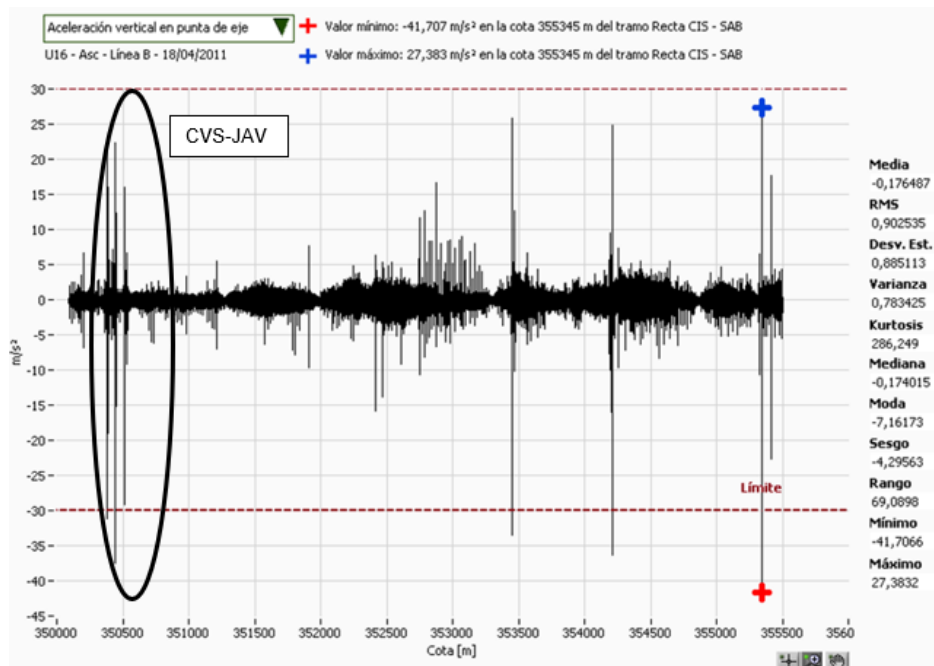
Fuente: Elaboración propia a partir de datos suministrados por el Metro de Medellín Ltda.

4.1.6 Sistema Portátil de Diagnóstico (SPD)

Es un sistema que fue desarrollado con el objeto de estudiar las condiciones de operación del sistema ferroviario y sirve para analizar el comportamiento dinámico de los vehículos de pasajeros basado en la norma UIC518 (International Union of Railways). Durante las mediciones se obtienen diferentes gráficos comparativos con la norma en los aspectos de seguridad, fatiga de la vía y condiciones de marcha (e.g. estabilidad, confort). Con estos datos, se obtienen gráficos de aceleraciones verticales del comportamiento en su rodadura sobre la vía férrea.

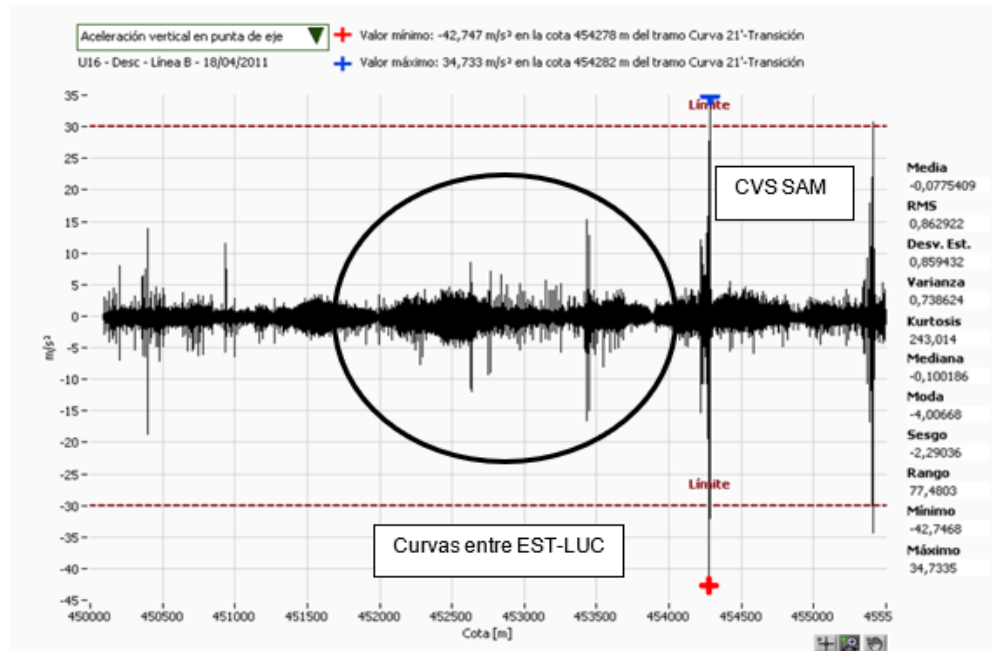
Las siguientes figuras corresponden a gráficos de resultados de una medición con el SPD de las aceleraciones verticales realizadas en la línea B en el año 2019, en ellas se aprecian las variaciones de la aceleración que de acuerdo con la cota se identifica el tramo de la vía en la que se presenta. Esta información permite al mantenedor de la vía saber con exactitud cuáles son los puntos donde mayormente se presentan grandes aceleraciones, las cuales normalmente se pueden asociar a los tramos curvos y zonas de cambiavías facilitando el mantenimiento basado en condición.

Figura 14. Señales de aceleración vertical del SPD de medición realizada en la LB ascendente.



Fuente: Tomado reporte de SPD medición realizada en 2019.

Figura 15. Señales de aceleración vertical del SPD de medición realizada en la LB descendente.



Fuente: Tomado reporte de SPD medición realizada en 2019.

En las Figuras 14 y 15, se puede observar el comportamiento de la aceleración vertical y cómo el personal identifica los picos sobresalientes. Es de resaltar que algunos de estos picos, corresponden a los lugares, basados en la cota, donde se ubican los cambiavías. En estos lugares, las vibraciones se deben a la libertad con la que queda la rueda en el corazón del cambiavía. Adicional a estos picos, se observa cómo en las zonas curvas también se presentan picos altos, y se prestan especial atención a los que se encuentran entre 4-5 gravedades (40 a 50 m/s^2 , aproximadamente) ya que estos se suelen presentar en curvas cerradas, es decir de radio pequeño.

4.1.7 Definición criterios para clasificación de la vía férrea.

En la tabla 7 se presenta una relación de la información recopilada y los resultados del análisis que se tiene partiendo de su relación con el estado y calidad del balasto de la vía. Con estos resultados se identifican los criterios que se utilizarán para la clasificación de la vía.

Tabla 6. Cuadro con la información de mantenimiento y resultados del análisis realizado.

Información analizada		Resultados del análisis.
Informes UdeA	General	Los 3 ensayos (2006, 2012 y 2016) se realizaron a muestras de balasto tomadas en los mismos lugares (Curva 1', curva 38 y curva 30) de LA y LB, correspondientes a zonas de radios pequeños y por ende consideradas de mayor deterioro, presentando mayores mantenimientos.

	Material fino	En las zonas se evidencia el incremento con el paso de los años de la presencia de material fino, sobrepasando los límites de la norma AREMA, bajo la cual fue analizada. En el análisis granulométrico se evidencia la disminución del tamaño del balasto.
	% de desgaste	En la máquina de los Ángeles, los resultados para las tres zonas en general permanecen constante en el tiempo y sólo en una tercera parte del límite superior de la norma.
	Partículas alargadas y planas	En las tres zonas se tiene que la participación de partículas alargadas y planas esta superior a lo establecido en la norma AREMA de 5%, pero en todo el tiempo han conservado valores similares y proporcionales a los valores del balasto nuevo.
	Gravedad específica (Bulk)	Para las tres zonas los valores son similares a las del balasto nuevo, dando en promedio 2.8 ± 0.1 . en los 3 años de pruebas y estos valores son levemente mayores al límite de la norma de 2.6.
	% Absorción	El porcentaje de absorción de agua evaluado en las muestras de los tramos se encuentra por debajo del valor máximo establecido por la norma, lo que indica que el balasto analizado cumple y tiene una posible baja porosidad superficial.
Desgaste de riel	Carga acumulada (Mt)	El tráfico acumulado que ha circulado por las vías férreas del Metro de Medellín está cercano a los 400 Mt para la LA en el transcurso de estos 25 años de operación comercial, y acorde con bibliografía se sugiere cambios a partir de 500 Mt. Aunque la carga puntual por eje está por debajo del valor de diseño, la fatiga por acumulación de cargas sucesivas durante estos años se va acercando al valor de referencia para el cambio.
	tasa "mágica" de desgaste	La tasa "mágica" de desgaste se construye a partir de datos de mantenimiento y se toman de zonas curvas y algunas rectas para que se pueda apreciar su comportamiento. Se ratifica que el desgaste del riel tiene relación en el estado y deterioro de la vida útil del balasto, pues los tramos de cambio también son los tramos de vía con mayores intervenciones de mantenimiento. Por lo que un buen mantenimiento del riel, mitigando los defectos que sobre este se presentan, como desgaste ondulatorio y fisuraciones, ayuda en la conservación de la vía. Las zonas que más impacto tiene son las curvas de radios pequeños debido al desgaste ondulatorio y que tienen más labores de mantenimiento

	SPD	Con las mediciones de las aceleraciones verticales se pueden identificar las zonas donde se presentan picos por encima de los límites establecidos. Además de los picos presentados en cambiavías; se identifican picos, en su mayoría en tramos curvos, que indican una desconsolidación del balasto.
Intervenciones de mantenimiento	Reperfilado	Las intervenciones de reperfilado debido a la aparición de defectos superficiales en el riel, principalmente desgaste ondulatorio, está directamente asociada al estado del balasto, puesto que los defectos generan golpeteo en esa zona con cada paso de los trenes, llevando a la desconsolidación de la vía.
	Bateo de balasto	Esta acción sobre el balasto tiene una relación directa con su calidad y estado, puesto que toda descompensación en alineación, nivelación y compactación en el balasto se debe recuperar con acción de mantenimiento de bateo para que el tramo vuelva a las condiciones de diseño y por ende óptimas y seguras de operación.

Fuente: Elaboración propia basada en análisis de la información técnica.

De la tabla anterior, se tiene lo siguiente:

- a) el tipo de roca usado en la construcción de la vía y su comportamiento concuerdan con los diseños y ha estado cumpliendo su función correctamente. Pero, como es de esperar, con el paso de tiempo se va haciendo notorio su deterioro;
- b) el riel hace parte de la interfaz para el tránsito de los trenes y es el que transmite los esfuerzos al balasto y donde se evidencia que las anomalías (como desgaste ondulatorio) en su superficie repercuten en el balasto de dicha zona. Esto hace que se tenga que hacer actividades de mantenimiento como el bateo y el reperfilado para la conservación de la funcionalidad del balasto;
- c) en los tramos curvos, y en especial a medida que se reduce el radio, el número de intervenciones es mayor respecto a las zonas rectas.

Como parte procedimental se coordinó entre los meses de marzo y septiembre de 2019 una serie de reuniones y entrevistas personales con 3 profesionales de la empresa con conocimiento y experiencia en el mantenimiento de la vía permanente, cuyos nombres no serán relacionados por tema de confidencialidad, y con quienes se consultaba sobre la información recopilada y se aclaraban dudas que surgían para tener mayor entendimiento para su análisis. En la Tabla 7 se presenta de manera resumida lo conversado.

Tabla 7. Entrevista a personal de mantenimiento.

Pregunta	Respuesta
1- ¿Cuáles son las causas que degradan la vía férrea?	No cumplimiento en periodicidad de intervenciones de bateo, golpeteo en la vía por defectos puntuales como: puntos de soldadura, presencia de desgaste ondulatorio que produce vibraciones. Suciedad en el balasto que impida el drenaje del agua. Todo lo anterior produce desconsolidación del balasto y su posterior degradación (perdida de sus propiedades y funcionalidad)
2- ¿Cuáles son las acciones de mantenimiento más importantes y necesarias en las zonas más degradadas? y ¿qué se busca con ellas?	Las acciones más relevantes son el bateo, el reperfilado y la medición de parámetros, ya que con estas tres acciones se controla la desconsolidación del balasto que es la que provoca el deterioro de éste y con la consecuente pérdida del confort y de la seguridad del viaje
3- ¿Cómo aumentan los mantenimientos en las zonas más degradadas?	El mantenimiento aumenta al tratar de consolidar más el balasto, como lo es el bateo del balasto y el reperfilado del riel que afecta significativamente al balasto al producir vibraciones en la vía de hasta 5 aceleraciones en dirección vertical. Hay tramos que requieren mayor mantenimiento, principalmente las de curva de radios menor, que producen desgaste ondulatorio, defectos de riel (grietas, descascaramientos) y mayores vibraciones; también las zonas con cambiavías. Las intervenciones y la criticidad dependen del radio y de presencia de cambiavías.
4- Según su experiencia, ¿cuáles son las zonas más degradadas que presenta la vía permanente?	Para la línea A las siguientes zonas identificadas como: 1,35,30, 38, 37, 32, 26, 27, 28, 36 tramo recto de cambiavías en CAR, y para línea B: 1' y 3'.

Fuente: Elaboración propia.

Con la información antes relacionada se procede a definir los criterios que serán aplicados en las intervenciones de mantenimiento de los últimos años para clasificar la vía permanente. En la Tabla 8 se relacionan los criterios definidos.

Tabla 8. Criterios definidos.

Información analizada	que criterio arroja para clasificación del balasto
Pruebas de laboratorio al balasto	Zonas curvas de radio pequeño
Desgaste de riel	Relación indirecta del deterioro del balasto principalmente en zonas curvas
Intervenciones de mantenimiento	Relación directa con el deterioro del balasto, el bateo y el reperfilado.
Opinión del mantenedor	Bateo, desgaste ondulatorio (reperfilado), curvas de radio pequeño

Fuente: Elaboración propia.

Se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- El comportamiento en un punto de una curva es similar en toda la curva.
- Curvas similares tienen comportamientos similares.
- En un tramo recto se debe identificar si tiene cambiavías.
- Tramos críticos exigen mayor mantenimiento.
- La clasificación de la vía por tramos de acuerdo con su radio de la curva y líneas rectas que incluyen las estaciones. La definición de las curvas según su radio es:
 - a. Curva $R < 400$ m
 - b. Curva $400 \text{ m} < R < 600$ m
 - c. Curva $600 \text{ m} < R < 1000$ m
 - d. Curvas $R > 1000$ m
 - e. Rectas (con o sin cambiavías)

Se toma como referencia el radio 400 m como límite para los tramos de radios pequeños, esto luego de analizar las características de las zonas mencionadas por los expertos cómo las más degradadas. "Por lo tanto se considerarán todos los tramos con radios igual o menor a 400 m como tramos cerrados o de radio pequeño.

Teniendo en cuenta que el personal de mantenimiento de la vía permanente del Metro de Medellín ha clasificado la vía férrea en líneas A, B y C. En las tres líneas existentes se han identificado 311 tramos, distribuidos así:

Tabla 9. Clasificación de los tramos de la vía férrea del sistema Metro.

Tipo de Tramo	Cantidad de tramos		
	Línea A	Línea B	Línea C
Curvas $400 \text{ m} \leq R$	27	12	3
Curvas $400 \text{ m} \leq R < 600 \text{ m}$	21	1	
Curvas $600 \text{ m} \leq R < 1000 \text{ m}$	19	3	
Curvas $R \geq 1000 \text{ m}$	37	4	8
Rectas (con y sin cambiavías)	91	17	12
Estaciones	42	14	

Fuente: Elaboración propia a partir de datos suministrados por el Metro de Medellín Ltda.

Con los criterios antes expuestos se procede a aplicarlos en el análisis del número de las actividades de mantenimiento de los últimos 3 años.

4.1.8 Análisis de la información de intervenciones de mantenimiento.

Con el mantenimiento se busca conservar en todo momento en un estado adecuado la vía para el servicio comercial, tanto desde el punto de vista de la seguridad, como del confort de los usuarios.

La información analizada consiste en las intervenciones preventivas y correctivas. Esta información fue entregada por la empresa Metro de Medellín y se le aplicó los criterios definidos en la sección anterior con el fin de obtener la clasificación de la vía por prioridades.

- Información de intervenciones de mantenimiento realizadas a las vías férreas del Metro de Medellín, en actividades de: Reperfilado, bateo, riego de balasto y cambio de rieles, de los últimos 3 años.
- Archivo con parámetros geométricos del trazado de las líneas férreas del Metro de Medellín los tramos de vía en curvas con sus respectivos radios y longitudes.

En la tabla 11, se relacionan los criterios definidos luego del análisis de la información y de identificar en qué se asociaba con el balasto. La ponderación se define partiendo de que se cuenta con tres criterios que pueden tener igual participación, pero debido a que, en la mayoría de la

información analizada, y en especial por la opinión del experto mantenedor de la vía, los tramos más críticos son los de radios pequeño, por lo que se le da a este criterio un valor mayor.

Tabla 10. Ponderaciones definidas a cada criterio definido.

Criterios para clasificación de la vía férrea para la renovación del balasto	
CRITERIO	PARTICIPACIÓN
Bateo	30%
Reperfilado	30%
Curvas de radio pequeño	40%

Fuente: Elaboración propia

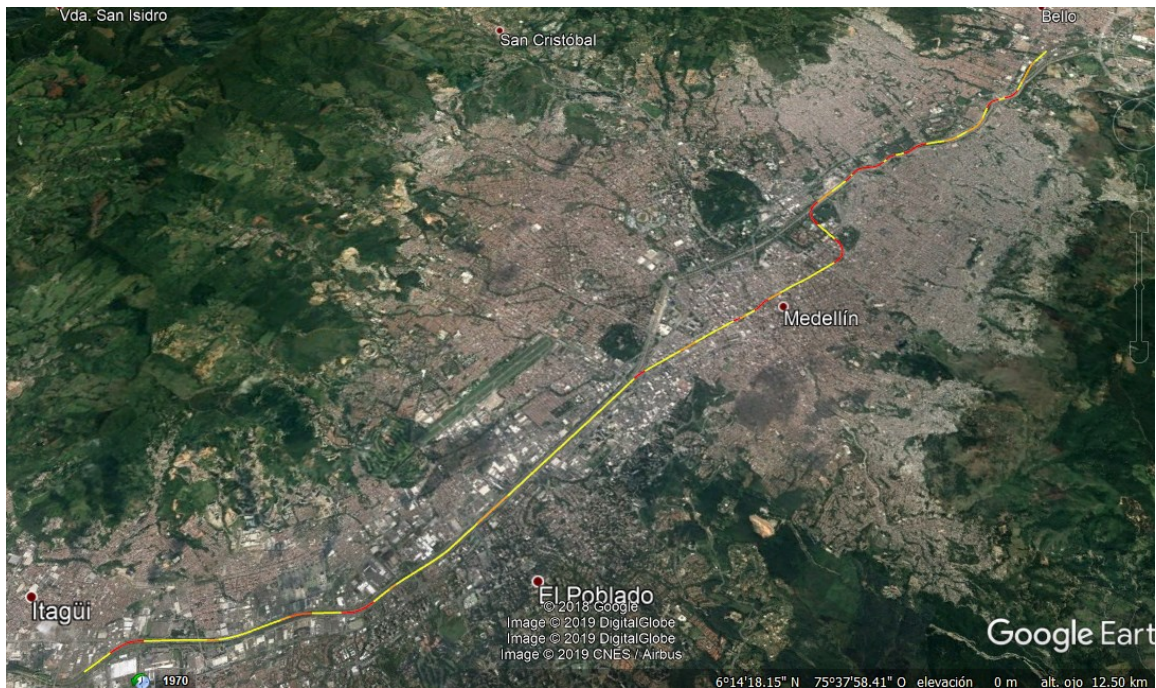
A continuación, en las figuras 16 a la 20 se presentan las líneas A, B y C del Metro de Medellín con la priorización de los tramos para el cambio del balasto representadas con la ayuda de la herramienta Google Earth y teniendo en cuenta la convención de prioridades mostrada en la Tabla 11.

Tabla 11. Convención de definición de prioridades.

Prioridad 1	Para tramos con curvas de radio menor a 400 m y tiene registrado dos o más intervenciones o dos clases de intervenciones, es decir bateo varias veces o bateo más reperfilado, y si hace parte de la lista de críticas de los mantenedores entrevistados.
Prioridad 2	Se definió para los tramos con hasta dos intervenciones y que tuviera curvas de radio hasta de 1000 m.
Prioridad 3	Abarca los tramos con máximo una intervención y de radios grandes, así como las rectas, incluyendo las estaciones.
No requiere cambio	Los tramos que no requieren renovación son los construidos en el proyecto de extensión del sur, es decir los tramos comprendidos entre la estación Itagüí y la Estrella. Esta ampliación fue construida hace 7 años, por lo que no se debe considerar en la renovación del balasto.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 16. Línea A- vía sentido norte-sur con identificación de los tramos prioridades.



Fuente: Elaborado a partir del análisis de datos suministrados por el Metro de Medellín Ltda.

Figura 17. Línea A- vía sentido sur-norte con identificación de los tramos prioridades.



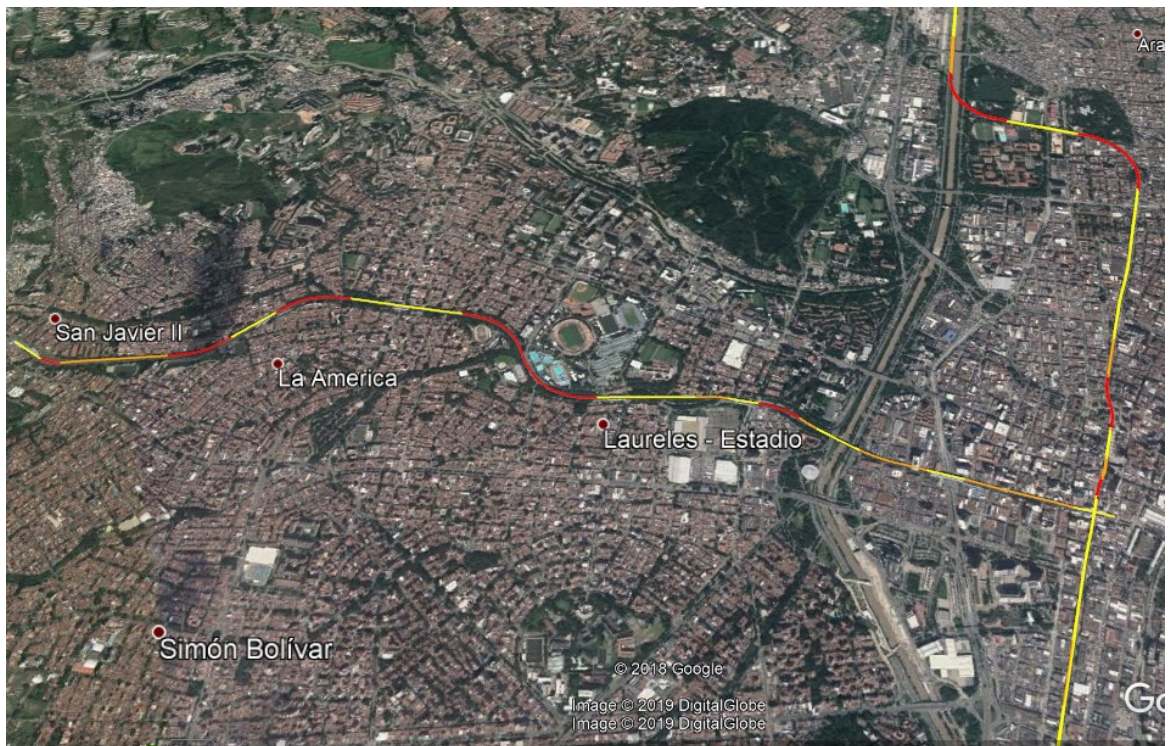
Fuente: Elaborado a partir del análisis de datos suministrados por el Metro de Medellín Ltda.

Figura 18. Línea B-Vía sentido occidente-oriente con identificación de los tramos prioridades.



Fuente: Elaborado a partir del análisis de datos suministrados por el Metro de Medellín Ltda.

Figura 19. Línea B-Vía sentido oriente-occidente con identificación de los tramos prioridades.



Fuente: Elaborado a partir del análisis de datos suministrados por el Metro de Medellín Ltda.

Figura 20. Línea C con identificación de los tramos prioridades.



Fuente: Elaborado a partir del análisis de datos suministrados por el Metro de Medellín Ltda.

En la Tabla 12 se presenta de manera resumida la cantidad de tramos en cada prioridad definida, con lo cual se puede apreciar que la prioridad 1 representa el 18% del total de tramos y de acuerdo con las Figuras 16 y 17 para la línea A, estos están principalmente concentrados desde el centro de la ciudad hacia el norte. Para la prioridad 2 se cuenta con un 13% del total de tramos para la línea A y se encuentran distribuidos a lo largo de ambas vías que la conforman, de acuerdo con las Figuras 16 y 17. Finalmente, la prioridad 3 presenta el mayor porcentaje (57%) teniendo mayor concentración en la línea A del centro hacia el sur. Lo cual tiene lógica puesto que es la zona donde más tramos rectos presenta la vía férrea. En la Línea B las 3 prioridades se presentan distribuidas a lo largo de todo su trayecto.

Tabla 12. Tramos en cada clasificación por prioridades.

	Línea A	Línea B	Línea C
Prioridad 1	45	12	0
Prioridad 2	29	11	1
Prioridad 3	126	28	22
No cambio	37	0	0

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados.

4.1.9 Orden de intervención de acuerdo con tecnología utilizada.

De acuerdo con los resultados anteriores y tomando como referencia las tecnologías disponibles, se propone un orden de intervención según dos métodos disponibles para la renovación de balasto: manual y semiautomático

a) Método manual para renovación de balasto

Se entiende como procedimiento manual el que comprende:

- Cuadrilla de 14 auxiliares, más maniobristas para vehículos auxiliares.

- Herramienta: Palas, azadones, barras.
- Equipos: bates manuales, gatos elevación de vía de 200 kg, luminarias, plantas eléctricas.
- Vehículos auxiliares: plataformas, tolvas, locomotora, bateadora.

El rendimiento estimado en este procedimiento es de 5 m por noche, considerando una jornada de trabajo de un máximo de 4 horas durante la noche, luego de la operación comercial. En total sería un rendimiento de 2 km anual.

Se puede establecer este mismo grupo en 2 o 3 frentes de trabajo (línea A norte, Línea B, línea A sur o reforzar zonas), de acuerdo con la disponibilidad de los equipos existentes. Con esto se duplicaría o triplicaría el rendimiento.

A cada prioridad se le define un orden de trabajo por tramos, así:

- **Prioridad 1**

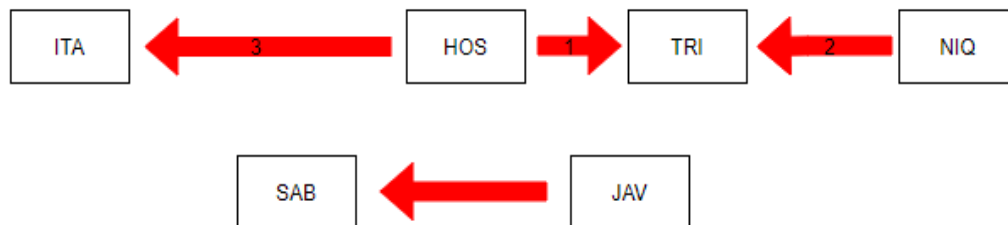
Según el esquema presentado en la Figura 21, para la línea A se propone intervenir primero los tramos clasificados como prioridad 1 comprendidos entre las estaciones Hospital (HOS) y Tricentenario (TRI) en orden intercalando por inter-estación los tramos de la vía ascendente (en sentido norte-sur) y descendente (en sentido sur-norte).

Una vez terminado este parte, se procede con la intervención de los tramos comprendidos entre las estaciones Niquía (NIQ) y Tricentenario (TRI) en orden intercalado.

Y por último realizar el cambio en los tramos entre las estaciones Hospital (HOS) e Itagüí (ITA) nuevamente intercalando por inter-estación la vía ascendente y descendente.

Para la línea B el orden definido para los tramos en esta prioridad sería entre las estaciones San Javier (JAV) hacia San Antonio (SAB) intercalando en inter-estación la vía ascendente (sentido occidente a oriente) y descendente (sentido oriente a occidente).

Figura 21. Orden de intervención prioridad 1.



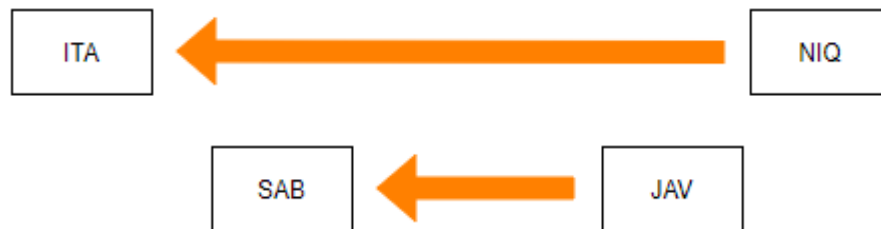
Fuente: Elaboración propia

- **Prioridad 2**

Como se muestra en el esquema de la Figura 22, para los tramos con prioridad 2 se define el siguiente orden en la línea A: Iniciar en los tramos comprendidos entre Niquía (NIQ) hacia estación Itagüí (ITA) intercalando los tramos en inter-estación de la vía ascendente (en sentido norte-sur) y descendente (en sentido sur-norte).

Para línea B iniciar en orden desde San Javier (JAV) hacia San Antonio (SAB) intercalando en inter-estación la vía ascendente (sentido occidente a oriente) y descendente (sentido oriente a occidente).

Figura 22. Orden de intervención prioridad 2.



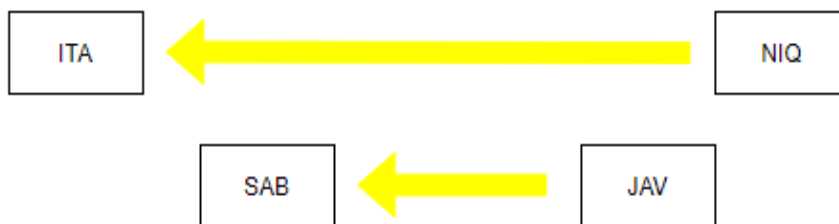
Fuente: Elaboración propia

- **Prioridad 3**

Como se muestra en la Figura 23, en los tramos en prioridad 3 están incluidas todas las estaciones y se define para la línea A iniciar desde estación Niquía (NIQ) hacia Estación Itagüí (ITA) intercalando los tramos en inter-estación de la vía ascendente (en sentido norte-sur) y descendente (en sentido sur-norte).

Para línea B iniciar en orden desde estación San Javier (JAV) hacia San Antonio (SAB) intercalando en inter-estación la vía ascendente (sentido occidente a oriente) y descendente (sentido oriente a occidente).

Figura 23. Orden de intervención prioridad 3.



Fuente: Elaboración propia.

b) Método semiautomático para cambio de balasto

Para este método es necesario contar con un vehículo ferroviario diseñado para este tipo de actividades. Por ejemplo, el vehículo VM 170 Jumbo de Plasser & Theurer es apto para gálibos pequeños y trabajos en sectores urbanos. Con este vehículo se pueden obtener rendimientos de hasta 40 km anuales o soporte con equipos similares.

Figura 24. Equipo marca Plasser & Theurer para renovación de balasto en método semiautomático.



Fuente: Tomado de (“Plasser & Theurer-Vaciado flexible del lecho de balasto para metropolitanos,” n.d.)

También se pueden utilizar equipos bimodales (pavimento y rieles), que sirvan para otras actividades de mantenimiento. Por ejemplo, la máquina COLMAN T9000FS para renovación del balasto y cambio de durmientes. Otra alternativa sería un equipo que tenga opción de intercambio de los cabezales, como la máquina T9000 de la marca KINSHOFER, entre otras.

Figura 25. Equipo marca COLMAN para renovación de balasto en método semiautomático.



Fuente: Tomado de (“Colmar T9000FS changing sleepers - YouTube,” 2015)

Figura 26. Equipo marca KINSHOFER para renovación de balasto en método semiautomático.



Fuente: Tomado de (“Kinshofer Railway Attachments for Road Rail Excavators-YouTube,” 2017).

Para este método, el orden de intervenciones tiene en cuenta las zonas con más tramos en prioridad 1 y 2 y se define el orden por zonas adyacentes, debido a que el rendimiento en este procedimiento se optimiza con intervenciones continuas.

- **Línea A**

Iniciar interviniendo la zona norte desde la estación Hospital (HOS) hasta la estación Niquía (NIQ), intercalando los tramos en inter-estación de la vía ascendente (en sentido norte-sur) y descendente (en sentido sur-norte) incluyendo las estaciones. Luego proceder de norte a sur, con los tramos de HOS hasta la estación Itagüí (ITA) incluyendo de igual manera las estaciones e intercalando los tramos en inter-estación de la vía ascendente (en sentido norte-sur) y descendente (en sentido sur-norte)

NOTA: Tener en cuenta que los tramos que conforman lo denominado extensión al sur, es decir desde ITA hasta la estación Sabaneta (BAN) no requieren cambio puesto que fue construido en el año 2012.

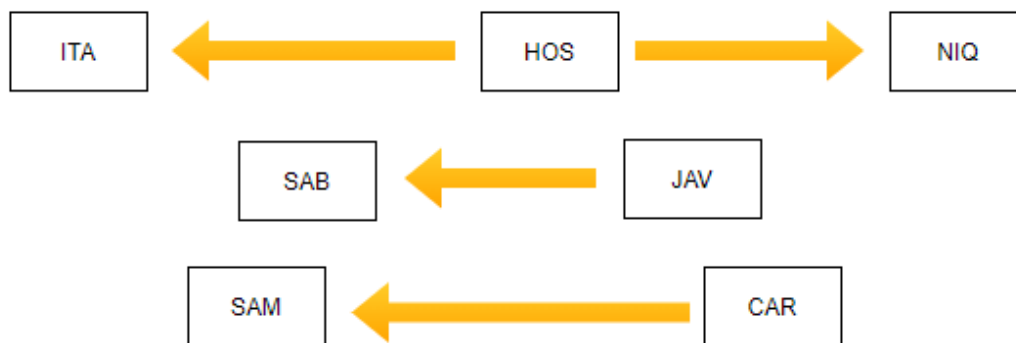
- **Línea B**

Se recomienda realizar la intervención desde la estación San Javier (JAV) hasta San Antonio (SAB), intercalando estaciones e inter-estación de las vías ascendente (en sentido occidente a oriente) y descendente de (oriente a occidente).

- **Línea C o vía de enlace**

Para la línea C se propone un orden de intervención que aplica para el método manual como para el semiautomático y sería para iniciar desde la estación Caribe (CAR) hacia Suramericana (SAM).

Figura 27. Orden de intervención para método semiautomático.



Fuente: Elaboración propia.

5 Conclusiones

Dentro del proceso de investigación de este trabajo se evidenció la importancia de que los responsables de mantener las vías férreas tengan claras cuáles son las características y particularidades de sus vías, pues esto permite hacer un mejor seguimiento e interpretación de datos de mantenimiento. Esta investigación identificó que la trazabilidad de los mantenimientos es lo más importante al momento de tener que definir intervenciones complejas como la renovación del balasto. Lo anterior se debe a que, aunque se cuente con referencias bibliográficas de los parámetros mecánicos, las tecnologías a utilizar y los tiempos estimados de duración de los componentes, entre otros; cada vía es diferente por lo que se debe contar con una metodología que permita su adaptación acorde a la situación real de la vía y su entorno.

Cada actividad de mantenimiento bien registrada reporta datos que, si se interpretan apropiadamente, destacan la relevancia de unos parámetros frente a otros. Por ende, el correcto seguimiento e identificación de los parámetros claves para cada vía y su correlación con los demás datos y los comportamientos de otros componentes de la vía hacen más fácil la tarea de monitoreo y conservación. Para el buen uso de la metodología propuesta en este trabajo se propone que a futuro la empresa objeto de estudio implemente más tecnología de la industria 4.0 que permita el control de las condiciones de la vía y de esta manera facilite encontrar la correlación de datos y consolidación de los resultados en un mismo sitio de consulta.

La metodología planteada se aplicó satisfactoriamente para el Metro de Medellín, logrando obtener criterios de la información técnica suministrada, que soportaban los definidos por los expertos en mantenimiento de la empresa. A su vez, los expertos consultados respaldaron los criterios seleccionados por la metodología consolidando los resultados de este estudio como una referencia en la planeación de la renovación del balasto.

Se recomienda que se continúe con las mediciones de pruebas de laboratorio del balasto en los mismos puntos que se han estado realizando y en las mismas condiciones, para poder continuar con la trazabilidad y el análisis de la degradación de estos puntos ya que estos puntos son representativos de tramos similares. Además, se recomienda adicionar un par de puntos más en tramos con condiciones diferentes, como rectas o zonas de cambiavías.

Referencias

- (NCA Nuevo central Argentino S.A). (2014). *Manual integral de la vía*.
- Alias, J. V. A. (1990). *La vía del ferrocarril* (1ra edición). Madrid: Bellisco.
- Avila, R. (1995). *Fundamentos del mantenimiento: guías económicas, técnicas y administrativas* (Limusa, Ed.).
- Colmar T9000FS changing sleepers - YouTube. (2015). Retrieved April 23, 2020, from <https://www.youtube.com/watch?v=t0oTellA82Y&t=488s>
- Empresa de los Ferrocarriles del Estado EFE. (2006). *Norma técnica suministro de balasto de piedra chancada NT-01-01-04*.
- Kalathil, M. J., Renjith, V. R., & Augustine, N. R. (2020). Failure mode effect and criticality analysis using dempster shaferttheory and its comparison with fuzzy failure mode effect andcriticality analysis: A case study applied to LNG storage facility. *Process Safety and Environmental Protection*, 138, 337–348. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.03.042>
- Kinshofer Railway Attachments for Road Rail Excavators (2017). Retrieved April 23, 2020, from <https://ww.youtube.com/watch?v=wnOsXqbjFXM>
- Lichtberger, B. (2007). *Manual de vía* (1ra edición). Madrid: Eurailpress.
- Mora, A. (2015). *Mantenimiento industril efectivo* (2015th ed.). COLDI Ltda.
- Moubray, J. (2004). *Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCMII)*. Aladon LLC.
- Oliveros, F., López, A., & Megía, M. (1977). *Tratado de ferrocarriles I*. Madrid.
- Panenska, A., Nyobeu, F. M., Rabe, R., Schmidt, H., & Sorgatz, J. (2020). Reability assessment of ageing infrastructures: an interdisciplinary methodology. *Structure and Infraesctruture Engineering*, 16(4), 698–713. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1662063>
- Pico, E. C. (2016). *Plan de mantenimiento centrado en la confiabilidad para la inyectora de poliuretano de la empresa Murcia Buffalo Industrial*. Universidad Técnica de Ambato.
- Plasser & Theurer (n.d.). Vaciado flexible del lecho de balasto para metropolitanos. Retrieved April 21, 2020, from <https://www.plassertheurer.com/es/maquinas-sistemas/vm-170-m-jumbo.html>
- RAE. (2020). Diccionario de la lengua española. Retrieved from <https://dle.rae.es/>
- Ramírez, J. C. M. H. F. (2017). *Elaboración de un análisis de criticidad y disponibilidad para la atracción X-treme del parque mundo aventura.*. Universidad distrital José de Caldas.
- Rhayma, N., Bressolette, P., Breul, P., Fogli, M., & Saussine, G. (2013). Reliability analysis of maintenance operations for railway tracks. *Reliability Engineering and System Safety*, 114(1), 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2012.12.007>
- Santo, J., Gutiérrez, E., Strefezza, M., & Agüero, M. (2013). Análisis de criticidad integral de activos físicos. *Revissta Investigaciones Científicas*, 4.
- Toala, G., Mendoza, A., & Moreira, L. M. (2019). Importancia de la enseñanza de la metodología de la investigación científica en las ciencias administrativas. *Dominio de Las Ciencias*, 5(2), 56–70.
- Tzanakakis, K. (2013). *The railway track an its long term behaviour*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36051-0_30
- Universidad de Antioquia. (2016). *Informe de servicio Comparación de los resultados de los análisis de balasto de los años 2006, 2012 y 2016*. Medellín, Antioquia.
- Velásquez, P. A. (2014). *Análisis experimental del efecto del proceso de reperfilado sobre el desgaste y fatiga por contacto de rodadura de riel en el sistema rueda-riel en el Metro de Medellín*". Universidad Nacional.