



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Evaluación del nivel de protección de pasos a nivel en el
corredor ferroviario del Regiotram de Occidente en
Cundinamarca, Colombia.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Transporte, Territorio y Urbanismo

AUTOR/A: Agamez Hernandez, Juan Camilo

Tutor/a: Argente Cuesta, Sebastián José

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALENCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Evaluación del nivel de protección de pasos a nivel en
el corredor ferroviario del Regiotram de Occidente en
Cundinamarca, Colombia.

Trabajo Fin de Máster

AUTOR/A: Agamez Hernandez, Juan Camilo

Tutor/a: Argente Cuesta, Sebastián José

CURSO ACADÉMICO: 2022-2023



Agradecimientos

A la Empresa Férrea Regional y la Secretaría distrital de Movilidad de Bogotá, por la disposición para ayudar y suministrar información necesaria para el desarrollo del presente trabajo.

A mi tutor Sebastián Argente, por el apoyo y confianza que me permitieron desarrollar el presente trabajo.

A mi familia, madre y hermana por su apoyo incondicional en todo momento, a mi novia María del Rosario, por su compañía y apoyo en todo este proceso y en especial a mi padre que desde el cielo me da la fuerza y motivación para superarme cada día como profesional y persona.

Resumen

El presente trabajo de fin de máster se centra en desarrollar una metodología para evaluar la seguridad de los pasos a nivel existentes en la Red Ferroviaria de Colombia. Esta metodología está dividida en tres partes fundamentales:

1. **Establecimiento del nivel de protección adecuado:** En esta primera parte, se determinará el nivel de protección que cada paso a nivel debe tener, basado en los criterios del Real Decreto 920/2020 sobre seguridad operacional e interoperabilidad ferroviaria de la reglamentación española.
2. **Hallazgo de la criticidad:** Esta sección de la metodología se enfocará en determinar la urgencia de implementar acciones para mejorar la seguridad de los pasos a nivel. La criticidad se evaluará analizando diversos parámetros que describen las condiciones técnicas, operativas, geométricas, ambientales y sociales de cada paso a nivel. Este análisis permitirá desarrollar un plan de trabajo que centralice esfuerzos y recursos en los pasos a nivel más críticos.
3. **Determinación del Nivel de Riesgo:** La última parte de la metodología se dedicará a clasificar los pasos a nivel en cuatro niveles de riesgo, siendo el Nivel 1 el más bajo y el Nivel 4 el más alto. Esta clasificación permitirá agrupar acciones de mejora según el nivel de riesgo, facilitando a los administradores ferroviarios la toma de decisiones para mejorar la seguridad en función del riesgo presente en cada paso a nivel de su corredor.

Como parte final del documento, se presentará una aplicación práctica de la metodología desarrollada en el Proyecto del Regiotram de Occidente. Para ello, se recopiló información del proyecto con la empresa encargada de su desarrollo, obteniendo los datos necesarios para implementar la metodología propuesta. Con los resultados obtenidos, se propondrán soluciones para dos de los pasos a nivel del corredor ferroviario con el objetivo de mitigar los niveles de riesgo identificados.

El objetivo principal de este trabajo de fin de máster es presentar una guía metodológica que sienta las bases para el estudio de la seguridad ferroviaria en Colombia, en respuesta a la incesante necesidad de reactivar el transporte ferroviario en el país.

Abstract

The present master's thesis focuses on developing a methodology to evaluate the safety of existing level crossings in the Colombian Railway Network. This methodology is divided into three fundamental parts:

- 1. Establishment of the appropriate level of protection:** In this first part, the level of protection that each level crossing should have will be determined, based on the criteria set out in Royal Decree 920/2020 on operational safety and railway interoperability from the Spanish regulations.
- 2. Identification of criticality:** This section of the methodology will focus on determining the urgency of implementing actions to improve the safety of level crossings. Criticality will be assessed by analyzing various parameters that describe the technical, operational, geometric, environmental, and social conditions of each level crossing. This analysis will help develop a work plan that centralizes efforts and resources on the most critical level crossings.
- 3. Determination of Risk Level:** The final part of the methodology will classify level crossings into four risk levels, with Level 1 being the lowest and Level 4 the highest. This classification will allow grouping improvement actions according to the risk level, facilitating railway administrators in decision-making to improve safety based on the risk level present at each level crossing in their corridor.

As the final part of the document, a practical application of the methodology developed for the Regiotram de Occidente Project will be presented. For this purpose, information was collected from the project with the company responsible for its development, obtaining the necessary data to implement the proposed methodology. Based on the results obtained, solutions will be proposed for two of the level crossings in the railway corridor to mitigate the risk levels identified.

The main objective of this master's thesis is to present a methodological guide that lays the foundation for the study of railway safety in Colombia, in response to the ongoing need to reactivate railway transport in the country.



Tabla de contenido

1. Introducción	13
2. Objetivo	15
3. Marco teórico.	16
4. Situación actual.....	17
4.1. Descripción del problema.....	17
4.2. Legislación existente en Colombia sobre Cruces a Nivel (Manual de Normativa Ferroviaria de Colombia).....	20
4.3. Análisis Real Decreto 929/2020 de 27 de octubre, sobre Seguridad Operacional e Interoperabilidad Ferroviarias.	22
5. Metodología.....	23
5.1. Metodología para la determinación del nivel de protección de los cruces a nivel. 24	
5.1.1. Visibilidad.....	25
5.1.2. Transito promedio diario (TPD)	29
5.1.3. Momento de circulación.....	30
5.1.4. Determinación del nivel de protección de los pasos a nivel.	32
5.1.5. Consideraciones de aplicación.....	35
5.2. Procedimiento para determinar la criticidad de los cruces a nivel.....	36
5.2.1. Parámetros técnicos y de explotación.	38
5.2.2. Parámetros sociales.....	45
5.2.3. Parámetros ambientales y climatológicos	48
5.2.4. Parámetros geométricos.	51
5.2.5. Determinación de la criticidad general del paso a nivel	59
5.3. Determinación del nivel de riesgo de los pasos a nivel.....	61
6. Aplicación práctica de la Metodología para evaluación de la seguridad de pasos a nivel (PPNN) en el Proyecto del Regiotram de Occidente Bogotá.	65
6.1. Situación actual proyecto y generalidades del Proyecto Regiotram de Occidente. 66	
6.1.1. Antecedentes.	67
6.1.2. Descripción general del proyecto.....	68
6.1.3. Ubicación geográfica del proyecto.....	69
6.1.4. Caracterización del corredor.....	69
6.1.5. Plan de operación.....	73
6.1.6. Diseño geométrico del corredor	73



6.1.7.	Diseño general Superestructura de vía.....	79
6.1.8.	Material Rodante	82
6.1.9.	Cruces a nivel del Proyecto Regiotram de Occidente	82
6.2.	Implementación de la Metodología para la determinación del nivel de seguridad en los pasos a nivel (PPNN).....	87
6.2.1.	Identificación de los pasos a nivel a analizar.....	87
6.2.2.	Determinación de las distancias de visibilidad técnica y real de los pasos a nivel del Corredor Ferroviario del Proyecto Regiotram de Occidente.....	92
6.2.3.	Análisis de las intensidades de tráfico vehiculares y peatonales en los pasos a nivel	97
6.2.4.	Cálculo del Momento de Circulación [AxT].....	102
6.2.5.	Determinación del Nivel de Protección de los pasos a nivel (PPNN) del Regiotram de Occidente.....	108
6.3.	Determinación de la criticidad de los Pasos a Nivel en el Regiotram de Occidente.....	110
6.3.1.	Determinación de la Criticidad asociada a los parámetros técnicos y de explotación.	111
6.3.2.	Determinación del Coeficiente de Criticidad asociado a los parámetros sociales.121	
6.3.3.	Determinación de Coeficiente de Criticidad asociado a los Parámetros Ambientales y Climatológicos.....	126
6.3.4.	Determinación del Coeficiente de Criticidad asociado a Parámetros Geométricos de los pasos a nivel del Regiotram de Occidente.	129
6.3.5.	Criticidad general de los Pasos a Nivel en estudio dentro del Regiotram de Occidente.....	138
6.4.	Determinación del Nivel de Riesgo de los pasos a nivel objeto de estudio dentro del corredor ferroviario del Regiotram de Occidente (NR).	144
7.	Análisis de soluciones para mitigar el riesgo de accidentes en los Pasos a Nivel en función de la Criticidad y el Nivel de Riesgo	148
7.1.	Alternativa de mejora de la seguridad para el paso a nivel 3 (PPNN3) del corredor Regiotram de Occidente.....	149
7.2.	Alternativa de mejora de la seguridad para el paso a nivel 15 (PPNN15) del corredor Regiotram de Occidente.....	155
7.2.1.	Estudio de alternativa de soluciones para el tráfico vehicular.....	156
7.2.2.	Proyección de un paso inferior de gálibo máximo en el mismo punto kilométrico del paso a nivel 15.	169
7.2.3.	Solución para el itinerario peatonal del paso a nivel 15.....	177
8.	Conclusiones y recomendaciones	180

9. Bibliografía.....	184
10. ANEXOS.....	185

Índice de tablas.

Tabla 1. Criterios para aplicación de las clases de protección a los pasos a nivel. Fuente: (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020).....	34
Tabla 2. Ponderación de factores técnicos y de explotación. Fuente: Elaboración propia.	44
Tabla 3. Anchos recomendados de carril y bermas para carreteras que confluyen en un cruce a nivel. Fuente: Elaboración propia.	56
Tabla 4. Anchos recomendados para cruces a nivel con vías nacionales o urbanas. Fuente: Elaboración propia.	57
Tabla 5. Coeficientes de ponderación para determinar la criticidad general de los parámetros geométricos. Fuente: Elaboración propia.	58
Tabla 6. Parámetros de ponderación para hallar la criticidad de un cruce a nivel. Fuente: Elaboración propia.....	60
Tabla 7. Categorías del Nivel de Riesgo.....	62
Tabla 8. Gálibos dinámicos en curva Proyecto Regiotram de Occidente. Fuente:(EGIS et al., 2019).....	77
Tabla 9. Gálibos de acuerdo a radio de curva Proyecto Regiotram de Occidente. Fuente:(EGIS et al., 2019).....	78
Tabla 10. Características principales del Material Rodante. Elaboración propia a partir de (EGIS et al., 2019).....	82
Tabla 11. Inventario de pasos a nivel (PPNN) considerados dentro de la estructuración del Proyecto Constructivo del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia a partir de (EGIS et al., 2019).....	83
<i>Tabla 12. Inventario de PPNN ubicados dentro de la ciudad de Bogotá. Fuente Elaboración propia a partir de (EGIS et al., 2019).....</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 13. Identificación de pasos a nivel para aplicación de la metodología propuesta. Fuente: Elaboración propia a partir de (EGIS et al., 2019).....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 14. Valores de visibilidad técnica para los PPNN objeto de estudio dentro del Corredor Ferroviario del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia a partir de (AECOM Colombia, 2022).....</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 15. Resultados Distancias de Visibilidad Real PPNN Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia mediante el uso de la herramienta informática de Google Earth.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 16. Tránsitos promedios diarios en los PPNN objeto de estudio. Fuente: Elaboración propia. A partir de (AECOM Colombia, 2022).</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 17. Datos de partida para la estructuración de la Malla de Operación. Fuente: (AECOM Colombia, 2022).....</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 18. Pasos a nivel con su PK correspondiente dentro del abscisado del Corredor Ferroviario. Fuente: Elaboración propia a partir del (EGIS et al., 2019).</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 19. Número de trenes que circulan por cada paso a nivel. Fuente: Elaboración propia a partir de (AECOM Colombia, 2022).....</i>	<i>106</i>
Tabla 20. Momentos de circulación para cada PPNN.	107

Tabla 21. Nivel de Protección Mínimo para los PPNN del Regiotram de Occidente de acuerdo al Real Decreto 929/2020.....	108
<i>Tabla 22. Valores de las Distancias de Visibilidad Real mínima y máxima dentro del análisis integral del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>111</i>
<i>Tabla 23. Coeficientes de Criticidad asociados a la Distancia de Visibilidad Real en los cruces del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia.....</i>	<i>112</i>
Tabla 24. DVT _{máx} y DVT _{mín} en el Proyecto Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia.....	113
Tabla 25. Coeficiente de Criticidad asociado a la Distancia de Visibilidad Técnica (PC _{dvt}). Fuente: Elaboración propia.....	114
Tabla 26. TPD vehiculares y peatonales mínimos y máximos dentro de los pasos a nivel analizados en el corredor del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia.....	115
Tabla 27. Cálculo de los coeficientes de criticidad asociados a los TPD. Fuente: Elaboración propia.....	116
Tabla 28. Distancia al paso a nivel más próximo. Fuente: Elaboración propia.....	118
Tabla 29. Coeficientes de criticidad asociado a la distancia entre pasos a nivel. Fuente: Elaboración propia.....	118
Tabla 30. Coeficiente de criticidad asociada a los parámetros técnicos y de explotación del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia.....	120
<i>Tabla 31. Base histórica de accidentes en el periodo comprendido entre el año 2007-2019 de los pasos a nivel del Corredor del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de accidentalidad reposados en (AECOM Colombia, 2022).....</i>	<i>122</i>
Tabla 32. Índice de siniestralidad de los Pasos a Nivel del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia.....	124
Tabla 33. Cálculo de la criticidad asociada a los parámetros sociales (P _{csoc}). Fuente: Elaboración propia.....	125
<i>Tabla 34. Coeficiente de criticidad en función de los Parámetros Ambientales y Climatológicos. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos de (IDEAM, 2023).....</i>	<i>128</i>
Tabla 35. Procedimiento para la obtención de la pendiente de aproximación. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.....	130
Tabla 36. Pendientes de aproximación de los pasos a nivel pertenecientes al Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia.....	131
Tabla 37. Coeficiente de criticidad en función de la pendiente de aproximación (P _{cpend}) para los pasos a nivel pertenecientes al corredor del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia.....	131
Tabla 38. Número de Carriles vehiculares que convergen en los distintos PPNN. Fuente: Elaboración propia.....	133
Tabla 39. Coeficiente de Criticidad en función del número de carriles que convergen en los pasos a nivel. Fuente: Elaboración propia.....	133
Tabla 40. Ancho de los PPNN del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia.....	135
Tabla 41. Coeficiente de criticidad asociado al ancho de los pasos a nivel (PC _{xc}). Fuente: Elaboración propia.....	136
Tabla 42. Coeficiente de criticidad asociada a los parámetros geométricos. Fuente: Elaboración propia.....	137

Tabla 43. Criticidad general de los PPNN objeto de estudio dentro del Proyecto Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia.	139
Tabla 44. Cuadro resumen y clasificación por color de los PPNN en función de su criticidad. Fuente: Elaboración propia.	140
Tabla 45. Orden de prioridad de intervención sobre los PPNN objeto de estudio pertenecientes al Proyecto del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia....	142
Tabla 46. Valor y clasificación de los pasos a nivel de acuerdo al Nivel de Riesgo (NR). Fuente: Elaboración propia.	145
Tabla 47. Porcentaje de representación de los niveles de riesgo dentro del tramo analizado en el corredor del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia	147
Tabla 48. Resumen de las características de los PPNN 3 y 15. Fuente: Elaboración propia.	148
Tabla 49. Comparación características técnicas y geométricas de los PPNN 3 y 4. Fuente: Elaboración propia.....	153
Tabla 50. Análisis de la criticidad del PPNN3 al incrementar su TPD bajo la hipótesis de que recibirá todo el tráfico del PPNN4. Fuente: Elaboración propia.....	154
Tabla 51. Análisis del cambio del NR en función del aumento del TPD del PPNN3. Fuente: Elaboración propia.....	154
Tabla 52. Condicionantes geométricos para el desarrollo de pasos a distinto nivel. Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2008).	158
Tabla 53. Comprobación geométrica para desarrollo de rampas del paso elevado. Fuente: Elaboración propia.....	160
Tabla 54. Comprobación geométrica para desarrollo de rampas del paso inferior. Fuente: Elaboración propia.....	160
Tabla 55. Comprobación geométrica para desarrollo de rampas del paso inferior con gálibo restringido. Fuente: Elaboración propia.	161
Tabla 56. Vista en la actualidad de los accesos en la calzada oeste costado sur.4	163
Tabla 57. Comprobación geométrica para desarrollo de rampas del paso elevado opción 2. Fuente: Elaboración propia.	166
Tabla 58. Comprobación geométrica para la construcción de un paso inferior con gálibo restringido para las condiciones de contorno modificadas. Fuente: Elaboración propia.	167
Tabla 59. Comprobación geométrica para la construcción de un paso inferior con gálibo máximo de acuerdo a la reconfiguración de las condiciones de contorno actuales del paso a nivel 15. Fuente: Elaboración propia.....	168
Tabla 60. Características geométricas de la sección transversal del paso inferior proyectado. Fuente: Elaboración propia.....	170
Tabla 61. Soluciones para la continuidad de los movimientos vehiculares tras la construcción del paso inferior para la supresión del PPNN 15.	173
Tabla 62. Parámetros generales para la proyección en planta de la pasarela peatonal.	178

Índice de figuras.

Figura 1. Inventario de la red ferroviaria Colombiana. Fuente: (BID, 2016).....	18
Figura 2. Red ferroviaria de Colombia. Fuente: (BID, 2016).....	19
Figura 3. Inspección de cruces a nivel para determinar la esquina con mayor porcentaje de obstaculización en la visibilidad del tren desde la carretera o itinerario vehicular perteneciente al cruce a nivel.	27
Figura 4. Elección de esquina con peor visibilidad de la vía férrea. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.	27
Figura 5. Establecimiento de línea de visibilidad. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.	28
Figura 6. Establecimiento de la intersección entre el eje de la carretera y el eje de la vía del ferrocarril. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.....	28
Figura 7. Establecimiento del triángulo de visibilidad y hallazgo de la distancia de visibilidad real. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.	29
Figura 8. Ejemplo malla de explotación ferroviaria línea 5 Maritim-Aeroport de Metro valencia. Fuente:(Alvarez & Eduardo, 2020).	30
Figura 9. Cuadro resumen de los tipos o clases de pasos a nivel junto con las medidas de seguridad o protección que tienen. Fuente: (Agencia Nacional de Seguridad Ferroviaria, 2024)	33
<i>Figura 10. Mapa de precipitaciones anuales Colombia año 2016. Fuente: Mapa obtenido a partir de la galería de mapas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (IDEAM, 2016).</i>	<i>49</i>
Figura 11. Ubicación geográfica del trazado ferroviario del Proyecto Regiotram de Occidente. Fuente: (EGIS et al., 2019)	69
Figura 12. Trazado Ramal Metro. Fuente: (EGIS et al., 2019)	71
Figura 13. Situación actual de las antiguas vías del Tren de Occidente. Fuente: (EGIS et al., 2019).....	71
Figura 14. Empalme del corredor principal con el Ramal Metro. Fuente: (EGIS et al., 2019).	72
Figura 15. Sección transversal tipo del corredor Principal del Regiotram de Occidente. Fuente: (EGIS et al., 2019)	72
Figura 16. Parámetros del diseño del trazado en planta y alzado. Fuente: (EGIS et al., 2019)	74
Figura 17. Parámetros de diseño de estaciones del Proyecto Regiotram de Occidente. Fuente:(EGIS et al., 2019).	75
Figura 18. Gálibos en recta. Fuente:(EGIS et al., 2019).....	76
Figura 19. Sección tipo de vía doble en placa. Fuente: (EGIS et al., 2019).....	79
Figura 20. Sección tipo vía doble sobre balasto. Fuente:(EGIS et al., 2019).....	79
Figura 21. Estado actual vías del antiguo Ferrocarril de Occidente: Fuente:(EGIS et al., 2019)	80
Figura 22. Imagen ilustrativa paso a nivel de la Avenida NQS.	89
Figura 23. Ubicación geográfica de los PPNN dentro de la ciudad de Bogotá. Fuente: Elaboración propia a partir del uso de la herramienta Google Earth.	92
Figura 24. Velocidades de operación en los cruces a nivel del Regiotram de Occidente.Fuente: (AECOM Colombia, 2022).....	93

Figura 25. Ejemplo de la conformación del triángulo de visibilidad para uno de PPNN del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia	96
Figura 26. Procedimiento para la identificación y toma de la información primaria en el Estudio de Tránsito y Demanda del Regiotram de Occidente. Fuente: (AECOM Colombia, 2022).	98
Figura 27. Tasas de crecimiento para los tráficos vehiculares Fuente: (AECOM Colombia, 2022)	99
Figura 28. Horarios de servicio. Fuente: (AECOM Colombia, 2022).	103
Figura 29. Malla de Operación Regiotram de Occidente. Fuente: (AECOM Colombia, 2022)	104
Figura 30. Malla de operación identificando cada PPNN dentro de ella. Fuente: Elaboración propia a partir de (AECOM Colombia, 2022).	106
Figura 31. Ubicación geográfica PPNN corredor del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth	117
Figura 32. Características climatológicas de la ciudad de Bogotá. Fuente: Gráficos obtenidos de (IDEAM, 2023).	127
Figura 33. Vista aérea en plante y sección transversal en la actualidad del PPNN15. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.	142
Figura 34. Gráfico de Representación de los niveles de Riesgo dentro del Corredor ferroviario del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia.....	147
Figura 35. Inspección virtual del PPNN 3.....	150
Figura 36. Detalle de obstáculos que empeoran la visibilidad de los usuarios en el PPNN3.	151
Figura 37. Detalle zona este del paso inferior 3.	152
Figura 38. Distancia de separación entre el PPNN3 y el PPN4. Fuente: Elaboración propia.	152
Figura 39. Vista aérea del paso a nivel 15 ubicado en la Carrera 50 con Calle 22.....	156
Figura 40. Vista aérea PN15 con sentidos viales. Fuente:(EGIS et al., 2019).....	157
Figura 41. Accesos identificados sobre la Carrera 50 en el PPNN 15. Fuente: Elaboración propia.	158
Figura 42. Identificación de calzadas de la Carrera 50. Fuente: (EGIS et al., 2019)	159
Figura 43. Reubicación acceso sur calzada oeste. Fuente: Elaboración propia.....	163
Figura 44. Situación actual calzada oeste costado norte de la Carrera 50.....	164
Figura 45. Ubicación del nuevo acceso de la calzada oeste costado norte.....	165
Figura 46. Sección disponible para la reconfiguración viaria necesaria para la implantación de un cruce a distinto nivel sobre la Carrera 50.	166
Figura 47. Movimientos vehiculares presentes en el paso a nivel 15 del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia.	169
Figura 48. Sección transversal disponible para la construcción del paso inferior y reconfiguración de viales. Fuente: Elaboración propia.	170
Figura 49. Numeración movimientos actuales presentes en el paso a nivel 15. Fuente: Elaboración propia.....	172
Figura 50. Vista en planta paso inferior en el actual punto kilométrico del Paso a Nivel 15. Fuente: Elaboración propia.	175
Figura 51. Solución a los movimientos vehiculares existente en el PPNN 15. Fuente: Elaboración propia.....	176
Figura 52. Áreas para posible desarrollo de rampa peatonal.	177

Figura 53. Vista en Planta Pasarela Peatonal. Fuente: Elaboración propia..... 179
Figura 54. Vista frontal y lateral Pasarela Peatonal..... 179
Figura 55. Capacidad de transporte por tipología de sistema. Fuente:(Argente, 2023).. 181

Índice de ecuaciones.

Ecuación 1. Ecuación para la determinación de la visibilidad técnica de los cruces a nivel de itinerario vehicular. Fuente: (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020) 26
Ecuación 2. Ecuación para la determinación de la visibilidad técnica de los cruces a nivel de itinerario Peatonal. Fuente: (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020) 26
Ecuación 3. Ecuación para el hallazgo del momento de circulación vehicular..... 30
Ecuación 4. Ecuación para el hallazgo del momento de circulación peatonal. 31
Ecuación 5. Fórmula para determinar la criticidad asociada a la distancia de visibilidad real. 39
Ecuación 6. Expresión para calcular la criticidad asociada a la Distancia de visibilidad técnica. 40
Ecuación 7. Ecuación para determinar la criticidad de un cruce a nivel en relación con el tránsito promedio diario de vehículos y peatones. 41
Ecuación 8. Fórmula para halla la criticidad correlacionada a la distancia entre cruces a nivel consecutivos cuando la distancia es menor o igual a 1000 m..... 43
Ecuación 9. Fórmula para halla la criticidad correlacionada a la distancia entre cruces a nivel consecutivos cuando la distancia es mayor a 1000 m 43
Ecuación 10. Cálculo del coeficiente de criticidad integrada de los parámetros técnicos y de explotación..... 44
Ecuación 11. Cálculo de la exposición al riesgo de los pasos a nivel..... 46
Ecuación 12. Índice de siniestralidad 47
Ecuación 13. Coeficiente de criticidad asociada al Índice de peligrosidad de accidentes en los cruces a nivel. 48
Ecuación 14. Coeficiente criticidad asociado a las condiciones climatológicas de la zona donde se encuentra ubicado el paso a nivel. 51
Ecuación 15. Criticidad de un cruce a nivel asociada a la pendiente de aproximación de los viales que en el convergen..... 53
Ecuación 16. Coeficiente de criticidad asociado al número de carriles vehiculares que convergen en un paso a nivel. 55
Ecuación 17. Criticidad asociada al ancho de los cruces a nivel..... 57
Ecuación 18. Ponderación para hallar la criticidad general de los parámetros geométricos. 59
Ecuación 19. Criticidad de un paso a nivel..... 61
Ecuación 20. Cálculo del nivel de riesgo del cruce a nivel. 61
Ecuación 21. Ecuación utilizada en el Estudio de Tránsito y Demanda del Regiotram de Occidente para la proyección de los volúmenes vehiculares. Fuente: (AECOM Colombia, 2022) 99
Ecuación 22. Cálculo del TPD anual para el periodo 2023-2027 100

1. Introducción

El transporte ferroviario, al destacarse por su capacidad para movilizar grandes volúmenes de carga y pasajeros, desempeña un papel de suma importancia en la infraestructura global. Sin embargo, esta eficacia y utilidad inherentes también plantean desafíos significativos en términos de seguridad, especialmente en puntos críticos como los pasos a nivel, donde convergen vías ferroviarias y carreteras. Esta intersección exige una atención especial hacia la protección y prevención de accidentes.

La relevancia de la seguridad ferroviaria no se limita únicamente a la salvaguarda de vidas y la integridad física, sino que se extiende a la preservación de la eficiencia y confiabilidad del sistema de transporte en su conjunto. Los pasos a nivel representan áreas de convergencia entre distintos modos de transporte, creando un escenario donde la interacción entre trenes, vehículos y peatones puede tener consecuencias significativas.

Considerando lo expuesto y analizando el panorama colombiano, donde el transporte ferroviario se presenta como un tema pendiente para el país, en su búsqueda por posicionarse como una nación más competitiva en el ámbito del transporte sostenible tanto para pasajeros como para mercancías, es importante destacar la actual dinámica gubernamental. En la actualidad, el gobierno nacional de Colombia concentra sus esfuerzos en la reactivación del transporte ferroviario, impulsando y gestionando diversos proyectos ferroviarios con el propósito fundamental de revitalizar la explotación ferroviaria en la región. Este esfuerzo del Gobierno de Colombia para revitalizar el transporte ferroviario debe ir de la mano con una actualización integral de la normativa técnica y legal que regula el sector ferroviario en el país. La importancia de esta actualización se vuelve evidente al considerar los notables avances tecnológicos en la industria ferroviaria. El Manual de Normatividad Férrea Colombiana, que fue regularizado por última vez en 2013, ha permanecido desactualizado durante 11 años desde su última revisión, sin presenciar una reactivación y explotación significativa del transporte ferroviario en el país. Este intervalo prolongado resalta la urgencia de adecuar las regulaciones a las innovaciones y necesidades actuales de la industria para asegurar el éxito de los esfuerzos de revitalización del transporte ferroviario en Colombia.

Considerando la información previamente expuesta, es fundamental enfocar nuestro análisis en un aspecto clave del manual de normatividad ferroviaria colombiana: las especificaciones técnicas para la seguridad de los cruces a nivel. Se puede observar una clara deficiencia de parámetros técnicos que definan el nivel de protección que se requieren en la operación y explotación ferroviaria de estos cruces, y la falta de alternativas para mejorar las condiciones de seguridad. Dicha carencia resalta la necesidad crítica de llevar a cabo un estudio técnico detallado para establecer criterios sólidos que determinen los niveles de protección necesarios, generar planes de trabajo que permitan a los administradores ferroviarios mejorar sistemáticamente los pasos a nivel en sus respectivos corredores y proponer acciones que garanticen una circulación segura para todos los actores involucrados en estos cruces.

De acuerdo con lo anterior, nos enfocaremos en definir una metodología que permita realizar una evaluación de seguridad en los pasos a nivel. Dicha evaluación se llevará a cabo a través de una serie de parámetros relacionados con las actuales condiciones de operación en cada caso particular. La metodología se dividirá en tres partes fundamentales. En primer lugar, realizaremos un análisis del nivel mínimo de protección que debe existir en cada paso a nivel, de acuerdo con la normativa española establecida en el Real Decreto 929/2020 del 27 de octubre. La cual define un procedimiento técnico para determinar los niveles de protección necesarios en los cruces a nivel de la red ferroviaria española. Con base en esto, desarrollaremos un procedimiento técnico adaptado a la realidad de la red ferroviaria colombiana, que permitirá definir y evaluar de manera precisa el nivel de protección requerido en cada uno de los pasos a nivel.

En segundo lugar, se determinará la urgencia con la que un administrador ferroviario deberá ejecutar las acciones necesarias para mejorar las condiciones de seguridad de un paso a nivel dentro de una red o línea ferroviaria específica. Para ello, se introducirá en nuestro trabajo el concepto de "criticidad", que definirá la urgencia con la que cada paso a nivel debe ser atendido para mejorar sus condiciones de seguridad actuales. Finalmente, se evaluará el nivel de riesgo asociado a cada paso a nivel. Este parámetro nos permitirá clasificar los distintos pasos a nivel que se analizarán, con el objetivo de proponer alternativas de solución que mejoren las condiciones de seguridad según el nivel de riesgo de cada paso a nivel.

Una vez establecido el procedimiento técnico para evaluar la seguridad de los pasos a nivel en la red ferroviaria colombiana, se procederá a su aplicación práctica en el proyecto del



Regiotram de Occidente, actualmente en fase constructiva. Este proyecto contempla múltiples cruces a nivel con carreteras a lo largo de su recorrido. En particular, se analizará la aplicación de la metodología desarrollada en el tramo del proyecto ubicado en la ciudad de Bogotá. El objetivo es formular medidas de solución concretas que incrementen la seguridad en los cruces a nivel, mediante la identificación y mitigación de riesgos específicos asociados a estos puntos críticos. Estas medidas no solo buscarán mejorar la seguridad, sino también contribuir al éxito y sostenibilidad de la reactivación del transporte ferroviario en Colombia, proporcionando un modelo replicable para futuras intervenciones en la red ferroviaria nacional.

2. Objetivo

Considerando la información previamente expuesta, el propósito de este estudio es proponer e implementar una metodología que permita definir los niveles mínimos de seguridad necesarios para los cruces a nivel en la red ferroviaria colombiana. Además, se busca establecer la criticidad de cada paso a nivel analizado, lo que permitirá a los diferentes administradores ferroviarios desarrollar un plan integral de mejora para estos cruces. Este enfoque permitirá priorizar esfuerzos y recursos en los pasos a nivel que requieran medidas de mejora con mayor urgencia.

La metodología propuesta incluirá una evaluación detallada de los parámetros asociados a la operación cada paso a nivel, utilizando criterios cuantitativos para determinar la urgencia de las intervenciones necesarias. Se establecerá una clasificación de los pasos a nivel basada en el nivel de riesgo de accidentes, lo que permitirá identificar las soluciones más efectivas y adecuadas para mejorar la seguridad.

El resultado esperado es un conjunto de recomendaciones y un marco de referencia que los administradores ferroviarios puedan utilizar para optimizar la seguridad de los pasos a nivel en sus respectivas líneas ferroviarias, contribuyendo así a la reducción de accidentes y al mejoramiento general de la seguridad ferroviaria en Colombia.

Como objetivo final del presente trabajo de fin de máster, se llevará a cabo la implementación de la metodología definida en el caso específico del corredor ferroviario del Regiotram de Occidente. Esta aplicación se realizará mediante el empleo de herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica), análisis de la información de estructuración del

proyecto y evaluación de las condiciones del tráfico vehicular, peatonal y ferroviario previsto en el proyecto. Este enfoque técnico garantizará una evaluación integral de los cruces a nivel, considerando factores geoespaciales, ambientales, técnicos y de operación relevantes con el fin de determinar acciones que mejoren las condiciones de seguridad de los cruces a nivel que pertenecen al proyecto antes mencionado.

El resultado de este enfoque integral será la identificación de acciones específicas y efectivas para mejorar las condiciones de seguridad de los cruces a nivel en el proyecto del Regiotram de Occidente. Estas acciones podrán incluir desde simples mejoras en las condiciones de visibilidad de cada paso a nivel hasta la proyección de nuevas infraestructuras que permitan la supresión de los pasos a nivel con mayor nivel de riesgo. En última instancia, este trabajo contribuirá a la seguridad y eficiencia del transporte ferroviario en la región, apoyando la reactivación y sostenibilidad del sistema ferroviario en Colombia.

3. Marco teórico.

En el presente capítulo, presentaremos conceptos fundamentales para desarrollar el presente trabajo y que a su vez nos permitirán estructurar una metodología rigurosa para la evaluación de los niveles de seguridad de los cruces a nivel ferroviarios, para la red Colombiana. Estos son:

Paso a nivel en plena vía: Es el situado en la zona comprendida entre las señales de entrada de dos estaciones ferroviarias colaterales. (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020)

Paso a nivel en estación: Es el situado en la zona de vía comprendida entre las señales de entrada en una estación ferroviaria. (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020)

Paso a nivel activo: Es el que protege a los usuarios del paso o les avisa de la aproximación del tren, mediante la activación de dispositivos físicos situados en el paso, que le informan de cuando no es seguro cruzar este. Dichos dispositivos pueden ser (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020):

- De aviso: Visibles (luces) y acústicos (Acústicos: Campanas, bocinas, claxon, etc.

- De protección: Semi barrera o barreras completas, Portones o cadenas.

Intensidad media diaria (IMD): Número de vehículos o usuarios que pasan por un punto específico de la carretera o vía ferroviaria durante el día. (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020)

Momento de Circulación (AxT): Producto de las intensidades medias diarias de vehículos (A) y de trenes (T) que atraviesan el paso a nivel a lo largo 1 año. Es un parámetro característico y representativo de un día medio del año. (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020)

Momento de circulación peatonal (PxT): Producto de las intensidades medias diarias de usuarios (P) y de trenes (T) que atraviesan el paso a nivel a lo largo de 1 año. (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020)

Visibilidad técnica (Dtv o Dtp): Distancia en metros que recorre un tren a su velocidad máxima permitida, durante el tiempo que tarda en cruzar el vehículo de carretera o peatón de un lado al otro del paso a nivel. (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020)

Visibilidad real (Drv o Drp): Distancia medida a lo largo del eje de vía, que existe entre el punto de intersección de los ejes del ferrocarril y la carretera o itinerario peatonal, y el punto donde se encuentra el tren que se dirige hacia el paso, en el preciso momento en que dicho tren comienza a divisarse desde el punto donde está situado el usuario del paso. (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020)

4. Situación actual

4.1. Descripción del problema

El transporte ferroviario en Colombia enfrenta un desafío fundamental: su prolongado período de inactividad, que es el resultado histórico de la priorización de otros medios de transporte, especialmente el sistema carretero. A lo largo de los años, el ferrocarril ha sido relegado, lo que ha llevado a un estado de abandono y deterioro de su infraestructura. A

pesar de este panorama desafiante, el gobierno Nacional de Colombia ha puesto en marcha proyectos para reactivar este medio de transporte, reconociendo su potencial para contribuir a la movilidad sostenible y la eficiencia logística del país. Sin embargo, este proceso de reactivación se ve obstaculizado por el estado actual de la red ferroviaria y la obsolescencia de las normativas que regulan el transporte ferroviario en Colombia. Por lo tanto, la necesidad de actualizar estas normativas y modernizar la infraestructura se convierte en un paso crucial para garantizar el éxito y la seguridad de la reactivación del transporte ferroviario en el país.

La red ferroviaria colombiana se configura en varios bloques de tramos. En primer lugar, se tienen los tramos concesionados por la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI). El segundo bloque abarca los tramos bajo la administración de la ANI, destinados a futuros procesos de concesionamiento. El tercer bloque incluye dos tramos de carácter privado, mientras que el cuarto bloque, gestionado por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), completa la estructura. Es relevante señalar que, fuera de estos bloques mencionados, existen tramos ferroviarios totalmente inactivos, en su mayoría abandonados y con un estado significativamente degradado. A continuación, en la siguiente imagen mostraremos el inventario de la red ferroviaria obtenido a partir de las fuentes consultadas.(BID, 2016)

Red férrea inactiva a cargo de INVÍAS	km	Red férrea concesionada a cargo de la ANI	km
Facatativá - Neiva	310	Red Férrea del Pacífico	
Espinal - Picalañe	47	Buenaventura - Cali	174
Facatativá - La Dorada	162	Cali - Cartago	173
La Dorada - Buenos Aires	177	Cartago - La Felisa	111
Soacha - Alicachín	7	Zarzal - Tebaida	40
Zipaquirá - Lenguazaque	57	Subtotal red del Pacífico	498
Lenguazaque - Barbosa	117	Red Férrea del Atlántico	
Puerto Wilchez - Bucaramanga	118	Chiriguana - La Loma - Ciénaga	207
Cartago - Manizales	111	Ciénaga - Santa Marta	38
La Tebaida - Pereira	74	Subtotal red del Atlántico	245
Cali - Popayán	159	Total	743
La Felisa - Alejandro López	47		
Alejandro López - Envigado	136	Tramos por concesionar (administrados por la ANI)	km
Cabañas - Envigado	167	Bogota - Belencito	257
Total	1.689	La Caro - Zipaquirá	19
		Facatativá - Bogotá	40
Red férrea privada	km	Bogotá - Soacha	18
Cerrejón	150	La Dorada - Chiriguaná	522
Paz de Río	39	Grecia - Cabañas	34
Total	189	Ramal Capulco	4
		Total	894
		Total red a cargo de la ANI	1.637
Total red férrea nacional			3.515

Figura 1. Inventario de la red ferroviaria Colombiana. Fuente: (BID, 2016)



Figura 2. Red ferroviaria de Colombia. Fuente: (BID, 2016)

Considerando la información previa, la red ferroviaria colombiana se extiende a lo largo de 3,515 kilómetros, destacándose por su relación sinérgica con los modos de transporte carretero y fluvial. A pesar de las potenciales ventajas del transporte ferroviario, la red enfrenta desafíos significativos en términos de articulación, especialmente en segmentos de gran longitud, debido a la falta de mantenimiento, rehabilitación y mejora, sobre todo en tramos inactivos. Estos problemas derivan de los bajos niveles de inversión y de un modelo de transporte que, en las últimas décadas, ha priorizado predominantemente el transporte por carretera como se mencionó anteriormente. La necesidad de revitalizar y modernizar la red ferroviaria colombiana se presenta como una tarea imperativa para superar estos desafíos y mejorar la eficiencia del sistema de transporte en su conjunto. (BID, 2016)

Como se mencionó al inicio de este documento, el gobierno Colombiano viene adelantando gestiones para la reactivación de la operación ferroviaria en el país, teniendo como horizonte la construcción de nuevos corredores ferroviarios o la reactivación de corredores existentes. Esto traerá consigo retos no solo en materia de operación y explotación ferroviaria, sino también en la seguridad ferroviaria en general. Uno de los puntos críticos

que se deben abordar y gestionar de manera técnica es el tratamiento que se le dará a los distintos cruces a nivel que hoy en día se encuentran a lo largo de la red ferroviaria colombiana, los cuales representarán un peligro en términos de accidentalidad una vez se reactive la operación ferroviaria por dichos corredores.

A nivel mundial, los pasos a nivel se encuentran en un proceso de disminución gradual, sin embargo, en el contexto colombiano, donde se está impulsando la reactivación del transporte ferroviario con el objetivo de aprovechar gran parte de la infraestructura existente, incluyendo las características geométricas de los diferentes cruces a nivel, la situación es distinta. Es crucial tener en cuenta que los pasos a nivel representan intersecciones entre vías de naturaleza muy diferente, lo que los convierte en puntos críticos en los que se producen accidentes mortales con regularidad. Tomando como referencia el caso de España, país líder en operación y normativa ferroviaria, se observa que entre 2017 y 2021 se registraron 29 fallecimientos y 37 accidentes significativos en pasos a nivel, según datos de la Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria (AESF). (DGT, 2022) . Este contexto pone de manifiesto la importancia de abordar de manera integral la seguridad en los cruces a nivel en Colombia, adoptando medidas efectivas para prevenir accidentes y garantizar la seguridad tanto de los usuarios del ferrocarril como de los demás usuarios de la vía.

4.2. Legislación existente en Colombia sobre Cruces a Nivel (Manual de Normativa Ferroviaria de Colombia).

En el ámbito del transporte ferroviario en Colombia, la normativa vigente se encuentra establecida en el Manual de Normativa Ferroviaria del año 2013, el cual está dividido en dos partes distintas (Parte I y Parte II). (D. Castillo & Alvarez, Eduardo, 2013), En el contexto de este trabajo, nos centraremos específicamente en el análisis de la Parte II de esta normativa, con un enfoque particular en el capítulo 3, titulado 'Especificaciones de Seguridad Ferroviaria', y dentro de este, en su subcapítulo 3.2, que aborda las 'Especificaciones Mínimas para Pasos a Nivel'. Hasta la fecha, este manual representa el único documento regulatorio en materia de seguridad ferroviaria disponible en el país. Es importante destacar que esta normativa establece los estándares y requisitos fundamentales que deben cumplir los pasos a nivel en Colombia.

Al revisar detenidamente la normativa ferroviaria, se presenta inicialmente una definición precisa de lo que constituye un paso a nivel. Se describe como un cruce a la misma altura entre una línea ferroviaria y una vía destinada al tráfico rodado y/o peatonal. Es importante destacar que no se consideran como cruces a nivel aquellos adscritos al servicio ferroviario, como los cruces entre andenes. Asimismo, se establece que los cruces de líneas de tranvía no se clasifican como pasos a nivel según esta normativa. Esta definición es fundamental para delimitar claramente qué infraestructuras entran en la categoría de pasos a nivel y cuáles quedan excluidas, lo cual es esencial para la aplicación efectiva de las regulaciones de seguridad y operación en el contexto ferroviario. (D. E. A. Castillo, 2013)

La normativa establece dos requisitos mínimos para los pasos a nivel:

1. En el caso de nuevas infraestructuras ferroviarias, se evitará en la medida de lo posible la construcción de nuevos pasos a nivel, debido al riesgo inherente de accidentes que representan. Esta medida busca priorizar la seguridad de los usuarios y minimizar la probabilidad de incidentes en estos puntos de cruce.
2. Se promueve activamente la supresión o sustitución de los pasos a nivel existentes por pasos a distinto nivel siempre que sea factible y se cuente con el presupuesto necesario. Esta acción se llevará a cabo especialmente en aquellos pasos a nivel donde la intensidad de circulación supere los 2000 vehículos, ya que se considera que un tráfico elevado aumenta el riesgo de accidentes y puede comprometer la fluidez del tráfico tanto ferroviario como rodado.

Continuando con el análisis de Manual de Normatividad Férrea de Colombia (D. E. A. Castillo, 2013) , este nos define las clases de protección para los pasos a nivel, los cuales son :

- Clase I: Sin barreras, únicamente señales fijas.
- Clase II: Semi barreras, únicamente señales fijas.
- Clase III: Semi barreras y similares, con guardería de pie de paso, y señales fijas
- Clase IV: Con pasos peatonales, con señales luminosas y acústicas.

Una vez que se han definido las distintas clases de protección, el Manual de Normatividad Ferroviaria establece recomendaciones específicas. En este sentido, para los pasos a nivel cuyo momento de circulación supere los 1.500 vehículos, se sugiere implementar una protección mínima de clase III.

4.3. Análisis Real Decreto 929/2020 de 27 de octubre, sobre Seguridad Operacional e Interoperabilidad Ferroviarias.

Tal y como mencionamos anteriormente, para la elaboración del presente estudio, tomaremos como referencia lo especificado por la normativa española en cuanto a seguridad operacional ferroviaria, específicamente en todo lo relacionado con los pasos a nivel. La normativa española define al paso a nivel como cualquier intersección a nivel entre una carretera o camino y una línea férrea, reconocida por un administrador de infraestructura y abierta a usuarios públicos o privados, considerándose dentro del paso a nivel los quince metros del camino existente a ambos lados de la vía ferroviaria. (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020). Adicional a la definición propia de los pasos a nivel, el real decreto nos clasifica los pasos a nivel dependiendo de:

Su titularidad:

- Públicos
- Particulares

Según su vida útil:

- Permanentes
- Provisionales

Según su uso específico:

- De vehículos
- De peatones
- De peatones y ganado

Un aspecto importante a señalar, es que en el artículo 47 de la citada norma se establece que, en caso de presentarse nuevos cruces de carreteras con líneas férreas por el establecimiento o modificación de cualquiera de ellas, estas intersecciones se realizarán a distinto nivel.

De igual forma se exige a cada administrador de infraestructuras mantener un inventario de todos los pasos a nivel existentes en las líneas ferroviarias que administren, tanto si son de titularidad pública o privada, dichos inventarios deberán incluir la siguiente información. (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020)

- a) Ubicación
- b) Tipo de carretera o camino atravesado por el ferrocarril, denominación y titularidad.
- c) Uso o usos específicos del paso a nivel. Entendiéndose como uso específico aquel para el paso a nivel dispone un itinerario de paso y un sistema de protección exclusivo a un determinado tipo de usuario.
- d) Clase de protección asociada a cada uso específico.
- e) Intensidad media diaria de vehículos (A) que atraviesan el paso a nivel o intersección por la carretera o camino, cuando sea de uso específico de vehículos.
- f) Número medio de peatones (P) que atraviesan el paso a nivel o intersección, cuando tenga uso específico de peatones o de peatones y ganado, aun siendo específico de vehículos, se haya medido, por encontrarse en zona urbana o asimilada en la que se estime un uso peatonal relevante.
- g) Número medio de circulaciones ferroviarias (T)
- h) Velocidad máxima permitida del tren a la altura del paso a nivel o intersección (V_m)
- i) Número de vías existentes en el paso a nivel o intersección (n)
- j) Visibilidad técnica (Dtv, Dtp) y real (Drv, Drp) asociadas a cada uso específico, según se define en el Anexo VII. En pasos a nivel o intersecciones con más de un uso específico se podrá suponer que $Drp = Drv$.
- k) Datos de siniestralidad del paso a nivel
- l) Temporalidad del paso: Provisional o permanente.

Es importante mencionar, que dicha norma establece que, a la hora de caracterizar pasos a nivel o intersecciones con más de un uso específico, si las clases de protección asociadas a cada uno fueran diferentes, la clase determinante será la correspondiente al uso de vehículos.

5. Metodología

En este apartado se describe la metodología propuesta en este trabajo de fin de máster, cuyo objetivo como comentamos anteriormente es establecer una metodología que permita realizar una evaluación integral de la seguridad en los pasos a nivel de la red ferroviaria colombiana. Inicialmente se buscará establecer un procedimiento sistemático para determinar el nivel de protección necesario en los cruces a nivel de la red ferroviaria colombiana. Este procedimiento se basa en un análisis exhaustivo de cada cruce, conforme

a los niveles de protección definidos en el Real Decreto 929/2020, de 27 de octubre, sobre seguridad operacional e interoperabilidad ferroviaria de España. Se establecerán los elementos de protección requeridos para cada cruce, en función del nivel de protección determinado.

Adicional a lo anterior, esta metodología busca determinar la criticidad de cada cruce, con el fin de definir un procedimiento que permita a un equipo técnico identificar el nivel de urgencia para llevar a cabo acciones específicas de mejora de seguridad en cada uno de los pasos a nivel. Para finalmente mediante el análisis del nivel de riesgo asociado a cada paso a nivel, determinar acciones específicas dirigidas a reducir el nivel de riesgo y mejorar la seguridad de los cruces a nivel analizados, contribuyendo así a la prevención de accidentes.

5.1. Metodología para la determinación del nivel de protección de los cruces a nivel.

En primera instancia y como se mencionó anteriormente se desarrollará un procedimiento que permita la evaluación de los niveles de seguridad requeridos en los cruces a nivel de la red ferroviaria colombiana. Dicha evaluación propondrá los criterios que deberán ser analizados para determinar el nivel de protección adecuado para los diferentes pasos a nivel existentes en las distintas redes ferroviarias de Colombia, a partir del análisis de factores técnicos, sociales y humanos que permitan correlacionar las características actuales del cruce a nivel, las condiciones de la interacción entre la operación ferroviaria y vehicular con los niveles de protección establecidos en la Normatividad Española, a través del Real Decreto 929/2020, de 27 de octubre, sobre seguridad operacional e interoperabilidad ferroviarias, con esta correlación la metodología propuesta tiene como objetivo inicial determinar el nivel de protección que deberá tener cada paso a nivel de la red ferroviaria Colombiana.

Basándonos en lo expuesto y siguiendo las directrices del Anexo VII del Real Decreto 929/2020 (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020), el primer paso a seguir implica llevar a cabo una inspección detallada en el terreno o mediante el uso de herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica) que nos permitan recabar los

parámetros técnicos necesarios para determinar la clase de protección requerida en los cruces a nivel. Estos parámetros, definidos por el Real Decreto 929/2020, abarcan:

- **Visibilidad:** Este aspecto engloba la capacidad de los conductores de trenes y vehículos de detectar y reaccionar ante la presencia de otros usuarios en el cruce a nivel, asegurando condiciones óptimas de seguridad.
- **Momento de Circulación Peatonal y Vehicular:** Se refiere al análisis de los patrones de tráfico de peatones y vehículos en el cruce a lo largo del día, lo cual permite identificar los momentos de mayor flujo y, por ende, de mayor riesgo de accidentes.

Estos parámetros constituyen elementos fundamentales para la evaluación de la seguridad en los cruces a nivel, ya que proporcionan información clave sobre las condiciones operativas y ambientales que influyen en la seguridad de dichos puntos de intersección. Mediante la recopilación y análisis de estos datos, se podrá determinar de manera precisa la clase de protección necesaria para cada cruce, así como identificar posibles medidas de mejora para garantizar la seguridad de los usuarios del ferrocarril y de las vías adyacentes.

5.1.1. Visibilidad

La visibilidad entre vehículos y trenes en un cruce a nivel se refiere a la capacidad de conductores de trenes y vehículos para detectar y visualizar claramente la presencia de otros usuarios en el cruce ferroviario. Saber la capacidad de visibilidad en el cruce es de suma importancia para garantizar una adecuada anticipación y reacción ante posibles situaciones de riesgo, permitiendo así evitar colisiones y accidentes. La evaluación de la visibilidad entre vehículos y trenes abarca aspectos como la distancia de visión disponible, la presencia de obstáculos visuales y la señalización adecuada, todos los cuales influyen en la seguridad operativa del cruce a nivel.

Para determinar el grado de visibilidad en cada cruce a nivel bajo análisis, se procederá al cálculo de la visibilidad técnica y visibilidad real, siguiendo las pautas establecidas en el Anexo VII del Real Decreto 929/2020. Este enfoque permitirá evaluar de manera integral la capacidad de observación tanto teórica como efectiva de la presencia de trenes y otros vehículos en el cruce, siendo esencial para comprender la idoneidad y eficacia de las medidas de seguridad implementadas y para identificar áreas de mejora en términos de visibilidad y seguridad operativa.

5.1.1.1. Visibilidad técnica

Como se mencionó en el capítulo 3 del presente documento, la visibilidad técnica, responde a la distancia en metros que recorre un tren a la velocidad máxima permitida, durante el tiempo que tarda en cruzar vehículo de carretera de un lado a otro el paso a nivel. (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020). Para el cálculo de la misma se utilizará las siguientes expresiones dependiendo del uso o itinerarios presentes en los distintos cruces a nivel:

Ecuación 1. Ecuación para la determinación de la visibilidad técnica de los cruces a nivel de itinerario vehicular. Fuente: (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020)

$$D_{tv} = 1.1 * V_m * \sqrt{6.25 + n}$$

Ecuación 2. Ecuación para la determinación de la visibilidad técnica de los cruces a nivel de itinerario Peatonal. Fuente: (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020)

$$D_{tp} = 0.28 * V_m * (1.43 + (5.72 * n))$$

Donde:

D_{tv}, D_{tp}: Las distancias de visibilidad técnica del paso a nivel, para cada uso específico, en m.

V_m: Velocidad máxima permitida del tren a la altura del paso a nivel, Km/h

n: Número de vías existentes en el paso a nivel.

Considerando lo anterior, para calcular la visibilidad técnica, es fundamental que el equipo técnico a cargo del estudio esté plenamente informado sobre las condiciones operativas del ferrocarril en la zona del cruce a nivel. Esto implica tener acceso a datos relevantes, como la velocidad de los trenes que transitan por la zona y el número de vías ferroviarias presentes en el cruce.

5.1.1.2. Distancia de visibilidad Real

La distancia de visibilidad Real es la distancia, medida a lo largo del eje de la vía, que existe entre el punto de intersección de los ejes del ferrocarril y la carretera o itinerario peatonal, y el punto donde se encuentra el tren que se dirige hacia el paso, en el preciso momento en que dicho tren comienza a divisarse desde el punto donde está situado el usuario del paso. (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020)

Para calcular la visibilidad real, es necesario llevar a cabo una inspección en el terreno o utilizar herramientas GIS para explorar el entorno del cruce a nivel. Esto permite definir lo que se denomina como el "triángulo de visibilidad", que es el área despejada de obstáculos que permite a conductores o peatones que se acercan a un paso a nivel visualizar la proximidad del tren y la intersección. Esta visibilidad debe ser suficiente para que puedan tomar medidas evasivas y prevenir una posible colisión. (Lascano & Orlando, 2013)

Siguiendo la definición presentada anteriormente, en la presente metodología se definió un paso a paso para conseguir la obtención del triángulo de visibilidad y consigo obtener la distancia de visibilidad real del cruce a nivel:

Paso 1: Este paso implica inspeccionar cuidadosamente el área del cruce a nivel y analizar las vías que se cruzan con la vía ferroviaria, con el objetivo de identificar la esquina que obstaculiza más la visión del conductor en relación con la posición del tren.

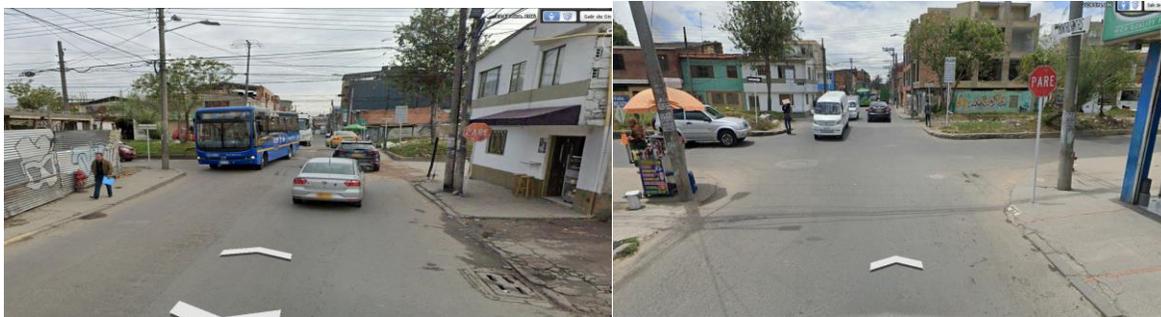


Figura 3. Inspección de cruces a nivel para determinar la esquina con mayor porcentaje de obstaculización en la visibilidad del tren desde la carretera o itinerario vehicular perteneciente al cruce a nivel.

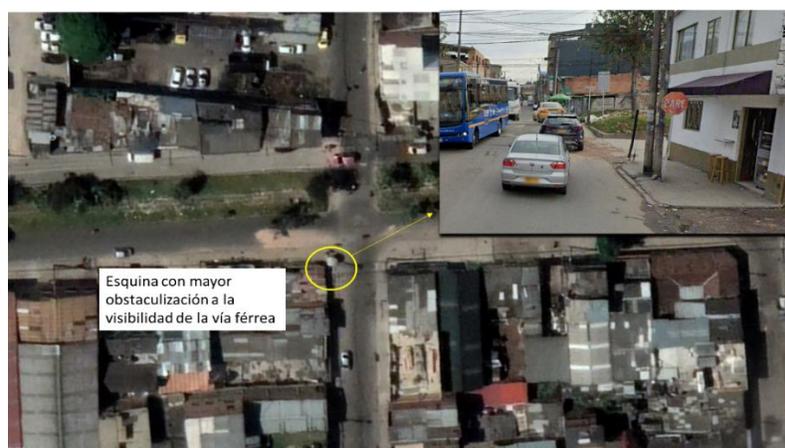


Figura 4. Elección de esquina con peor visibilidad de la vía férrea. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Paso 2: Después de identificar la esquina que representa la mayor obstrucción para el usuario en relación con la vía férrea, trazaremos la Línea de Visibilidad desde el eje del carril o vía, partiendo desde la línea de parada del vehículo. En el caso de que no haya una línea de parada designada, se considerará una distancia de 5 metros desde el carril más cercano a la vía. Esta línea se dibujará tangencial a la esquina identificada y se extenderá hasta el punto donde se intercepte con el eje del ferrocarril.



Figura 5. Establecimiento de línea de visibilidad. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Paso 3: Establecer el punto de intersección entre el eje de la vía del ferrocarril con el eje de la vía vehicular.



Figura 6. Establecimiento de la intersección entre el eje de la carretera y el eje de la vía del ferrocarril. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Paso 4: En este paso, una vez que hemos definido la línea de visibilidad y la intersección del eje de la vía del ferrocarril con el eje de la carretera, procederemos a conformar el triángulo de visibilidad. Este triángulo estará formado por la línea de visibilidad, que actuará como la hipotenusa del triángulo, y la línea trazada desde el punto de intersección de los ejes de la vía férrea y la carretera hasta su intersección con la línea de visibilidad. Con esto, determinaremos la distancia de visibilidad real, que corresponderá a la distancia medida sobre el eje del ferrocarril desde la intersección de los ejes de la carretera y la vía férrea hasta el punto donde la línea de visibilidad se cruza con el eje del ferrocarril.



Figura 7. Establecimiento del triángulo de visibilidad y hallazgo de la distancia de visibilidad real. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

5.1.2. Transito promedio diario (TPD)

El transito promedio diario (TPD) corresponde al número de vehículos o peatones según sea el caso de estudio, que pasan durante un periodo de tiempo determinado durante un periodo de tiempo determinado igual o menor a un año y mayor a un día, dividido por el número de días del periodo completo.(Granda et al., 2016). En nuestro caso de estudio se utilizará el transito promedio diario que pasa por el paso a nivel proveniente de todas las vías que en el confluyan.

Para obtener el tránsito promedio diario (TPD), se pueden emplear diversos métodos, como conteos manuales o aforos, que permiten determinar el número de vehículos que pasan por el paso a nivel. También se pueden utilizar datos históricos provenientes de estudios de tránsito en las áreas que se pretenden analizar, abarcando el área del paso a nivel. Además, se puede recurrir al registro proporcionado por dispositivos electrónicos, como espiras

magnéticas u otros elementos, que permiten contabilizar el número de vehículos que cruzan el paso a nivel.

5.1.3. Momento de circulación

5.1.3.1. Momento de circulación vehicular (AxT)

Como se mencionó en el capítulo 3 del presente documento el momento de circulación es el producto de las intensidades media diarias de vehículos (A) y de trenes (T) que atraviesan el paso a nivel a lo largo de un año. Es un parámetro característico y representativo de un día medio del año. (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020).

En nuestra metodología, el momento de circulación se define como el producto del tránsito promedio diario (TPD), que representa el número de vehículos que cruzan el paso a nivel en un día, multiplicado por el número de trenes que circulan por el mismo paso a nivel en un día promedio. Esta medida es fundamental para evaluar el nivel de interacción entre el tráfico vehicular y ferroviario en un cruce a nivel. Para determinar el número de trenes que atraviesan el paso a nivel, se recurre a información suministrada por el operador ferroviario. Esta información se obtiene a partir del análisis de un diagrama de mallas, el cual ofrece una representación visual de la operación ferroviaria, identificando las líneas férreas que atraviesan las vías en cuestión y proporcionando datos sobre la frecuencia y horarios de circulación de los trenes.

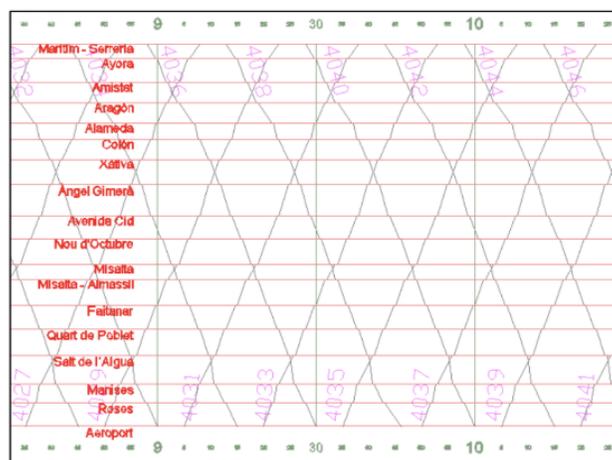


Figura 8. Ejemplo malla de explotación ferroviaria línea 5 Maritim-Aeroport de Metro Valencia. Fuente:(Alvarez & Eduardo, 2020).

Ecuación 3. Ecuación para el hallazgo del momento de circulación vehicular.

$$(AxT) = TPD * Ntd$$

Donde:

AxT: Momento de circulación vehicular

TPD: Transito promedio diario de vehículos que cruzan por el paso a nivel

Ntd: Número de trenes que atraviesan diariamente el cruce a nivel.

5.1.3.2. Momento de circulación peatonal (PxT)

De igual manera como explicamos en el capítulo del marco teórico del presente documento, el momento de circulación peatonal (PxT) se define como el producto de las intensidades medias diarias de usuarios o peatones (P) y de trenes (T) que atraviesan el paso a nivel a lo largo de 1 año. Es un parámetro característico y representativo de un día medio del año. (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020)

En esta metodología, el cálculo del momento de circulación peatonal se realizará únicamente si el paso a nivel cuenta con un itinerario peatonal definido. Este momento se define como el producto del número de peatones que atraviesan el paso a nivel diariamente por el número de trenes que circulan por el mismo paso a nivel en un día. Este enfoque permite considerar la interacción entre los peatones y los trenes en el cruce a nivel, lo cual es crucial para evaluar la seguridad y tomar medidas adecuadas de gestión del riesgo.

Ecuación 4. Ecuación para el hallazgo del momento de circulación peatonal.

$$(PxT) = TPDp * Ntd$$

Donde:

PxT: Momento de circulación peatonal

TPDp: Transito promedio diario de peatones que cruzan por el paso a nivel

Ntd: Número de trenes que atraviesan diariamente el cruce a nivel.

5.1.4. Determinación del nivel de protección de los pasos a nivel.

Para la determinación del nivel de protección requerido en los distintos pasos a nivel que se pretendan analizar, se realizará la aplicación del anexo VII del Real Decreto 929/2020. En este Anexo se especifica los criterios para definir el nivel de protección que se debe asociar a cada paso a nivel dependiendo el momento de circulación y su tránsito promedio diario.

El Anexo VII. Nos presenta dos tipos de clase de protección para los pasos a nivel, los cuales son:

- Clase P: Corresponden a pasos a nivel que carecen de cualquier sistema de aviso o protección para alertar al usuario (ya sea conductor o peatón) sobre la llegada del tren. En estos pasos a nivel, en el lado de la carretera o camino sólo existe señalización horizontal y vertical, que advierte de la proximidad del paso a nivel sin barrera. (Agencia Nacional de Seguridad Ferroviaria, 2024)
- Clase A: Estos pasos a nivel están dotados de sistemas de alerta y/o protección que notifican a los usuarios sobre la cercanía de un tren. A través de la activación de dispositivos físicos instalados en el cruce, se indica al usuario cuando no es seguro proceder con el cruce. Los pasos a nivel con protección activa son comúnmente empleados en áreas urbanas con un alto tráfico tanto de trenes como de vehículos, como estaciones o tramos de vía muy transitados. (Agencia Nacional de Seguridad Ferroviaria, 2024). Esta categoría se subdivide en:
 - **Clase A1 (Protección manual):** El aviso o la protección al usuario son activados manualmente por el personal ferroviario, siguiendo las instrucciones del administrador de la infraestructura. Además de la señalización correspondiente al paso a nivel clase P, éste contará con un agente ferroviario que se encontrará a pie de paso, responsable de activar el aviso y/o la protección al usuario.
 - **Clase A2 (Protección automática con aviso al usuario):** El aviso al usuario se activa automáticamente mediante el tren que se aproxima o cuando se establece un itinerario que afecta al paso. Además de la señalización requerida para un paso a nivel clase P, este estará equipado con señalización luminosa. Esta constará de un par de focos rojos horizontales intermitentes de forma

alternativa, ubicados en el lado derecho de la carretera o camino, según la dirección del tráfico. Además, contará con una señalización acústica integrada en la señalización luminosa.

- **Clase A3 (Protección automática con protección al usuario):** La protección al usuario se activa automáticamente por la aproximación del tren o la configuración de un itinerario que impacte en el paso. Esta clase incluye dispositivos de aviso para el usuario, además de la protección. Al igual que en la clase A2 contará con señalización horizontal y vertical y señalización luminosa y acústica. Y, además, con semi barreras o barreras móviles, para cortar el acceso de los vehículos desde la carretera a las vías del ferrocarril. (Agencia Nacional de Seguridad Ferroviaria, 2024).
- **Clase A4 (Protección automática con protección al lado de la vía):** Una señal o sistema de protección de los trenes solo permite pasar al tren si el paso a nivel está completamente protegido por el lado del usuario y está libre de obstáculos. Este sistema es similar al de protección de clase A3 e incluye un detector de obstáculos en la vía. Este detector informa a través de la señal del paso a nivel sobre la posible presencia de vehículos en el cruce.

TIPO	CLASE	NOMBRE	MEDIDAS DE SEGURIDAD
PASIVO	P	PN sin protección	Señales fijas
	A2	PN protegido con señalización luminosa y acústica	Semáforo con aviso sonoro Señales fijas
ACTIVO	A3	PN protegido con barrera y señalización luminosa y acústica (automático)	Barrera Semáforo con aviso sonoro Señales fijas
	A4	PN protegido con barrera y señalización luminosa y acústica (automático)	Barrera Semáforo con aviso sonoro Señales fijas Detector obstáculos vía

Figura 9. Cuadro resumen de los tipos o clases de pasos a nivel junto con las medidas de seguridad o protección que tienen. Fuente: (Agencia Nacional de Seguridad Ferroviaria, 2024)

Dada la consideración anterior, en esta metodología se propone definir la clase de protección mínima asociada a cada paso a nivel bajo estudio, teniendo en cuenta las

características mencionadas, como el número de vehículos (TPD), el número de peatones (TPDp) y las distancias de visibilidad del paso a nivel. Para lograrlo, se aplicarán los criterios de clasificación establecidos en el Real Decreto 929/2020. Estos criterios se detallan en la tabla siguiente:

Tabla 1. Criterios para aplicación de las clases de protección a los pasos a nivel. Fuente: (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020)

Uso específico	Velocidad máxima del tren en el paso a nivel (Km/h)	Ubicación	AxT	A	Visibilidad real (Drv)	Clase de protección mínima	
Vehículos	<= 40				>= Dtv (Suficiente)	P	
					<= Dtv (Insuficiente)	A2 (1)	
	40 < Vm < 160	Plena vía		< 1000		>= Dtv (Suficiente)	P
						<= Dtv (Insuficiente)	A2 (1)
				1000 < AxT < 1500	<100		
					>= 100		
	>= 160	Estación					A3
							Cruce a distinto nivel
	Paso a nivel provisional						A1
	Pasos a nivel que requieran completa protección del lado del usuario, así como detección de obstáculos durante la activación de la protección						A4
Uso específico	Velocidad máxima del tren en el paso a nivel (Km/h)	Ubicación	Visibilidad real (Drp)	PxT	P	Clase de protección mínima	
Peatones, con o sin ganado (2)	<= 40		>= Dtp (Suficiente)			P	
			<= Dtp (Insuficiente)			A2	
	40 < Vm < 160	Plena vía			<1000	<100	P
					>= 1000	>= 100	P(3)
			>= Dtp (Suficiente)	>= 1000	<100	P	
				<= Dtp (Insuficiente)		>= 100	A2

Uso específico	Velocidad máxima del tren en el paso a nivel (Km/h)	Ubicación	AxT	A	Visibilidad real (Drv)	Clase de protección mínima
		Estación				
	>= 160					Cruces a distinto nivel.

Dado lo anterior, al conocer los momentos de circulación vehicular y peatonal, así como las distancias de visibilidad, podemos determinar con precisión el nivel de protección mínimo requerido para cada paso a nivel. Esta información nos permitirá establecer directrices claras y específicas para garantizar una operación segura en toda la red ferroviaria. Con esta metodología, no solo identificamos los criterios para definir el nivel de protección adecuado, sino que también proporcionamos una base sólida para implementar medidas de mejora y mitigación del riesgo en los cruces a nivel.

5.1.5. Consideraciones de aplicación.

A continuación, se expondrán consideraciones fundamentales que todo administrador de infraestructura debe tener en cuenta para la aplicación efectiva de la metodología propuesta, la cual busca determinar el nivel mínimo de protección de los pasos a nivel objeto de estudio. Estas consideraciones son esenciales para asegurar la correcta implementación y la obtención de resultados precisos y útiles.

- Es fundamental destacar que el transporte ferroviario en Colombia debe cumplir con los estándares de seguridad más exigentes a nivel mundial. Por consiguiente, no se debe permitir la creación de nuevos pasos a nivel debido al riesgo inherente que representan. El propósito de esta metodología es proporcionar una herramienta que permita establecer el nivel mínimo de protección necesario para garantizar la seguridad de todos los participantes en el transporte en los pasos a nivel ya existentes en las distintas vías ferroviarias del país.
- Esta metodología y su aplicación debe ir acompañada de un estudio por parte del administrador de la infraestructura ferroviaria que permita determinar acciones para mejorar las condiciones de seguridad del paso a nivel.

- Se aceptará nivel de protección A1 para aquellos cruces a nivel que presenten un momento $AxT < 100$ y circulación de máximo dos trenes por día. (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020)
- Para pasos a nivel con más de un uso específico (Peatones y vehículos), se dotará al itinerario peatonal de un nivel de protección activa A2 siempre y cuando el itinerario vehicular tenga un nivel de protección A2, A3 o A4. (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020)
- Para pasos a nivel que se encuentren dentro de una zona urbana consolidada y que cuente con momentos de circulación $AxT > 2000$ se deberá instalar nivel de protección A4. (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020)

5.2. Procedimiento para determinar la criticidad de los cruces a nivel.

Como se mencionó en la sección 5.1.5. del presente documento, la determinación del nivel mínimo de protección de pasos a nivel no debe considerarse como la única acción de estudio o mejora que debe realizar un administrador de infraestructura ferroviaria. Más bien, la evaluación del nivel de protección debe ir acompañada de un estudio adicional que permita determinar la probabilidad de ocurrencia de accidentes en los pasos a nivel, la urgencia o necesidad de acciones de mejora específicas para cada paso, y la identificación de acciones de mejora adecuadas en función de las condiciones actuales de cada paso en estudio.

Para ello, la presente metodología propone la incorporación del concepto de criticidad de los pasos a nivel, el cual se refiere a la urgencia de abordar un paso a nivel específico debido al riesgo de ocurrencia de un accidente entre los diferentes tipos de tráfico que circulan por él. En otras palabras, la criticidad determina el grado de necesidad de implementar medidas que mejoren la seguridad en un paso a nivel en comparación con otros pasos a nivel dentro de la misma ruta de circulación.

Para realizar la evaluación de la criticidad de cada cruce a nivel, se realizará un análisis detallado de diversos conjuntos de parámetros. Estos conjuntos abarcan una amplia gama de factores técnicos y de explotación, sociales, climatológicos y geométricos que influyen en la seguridad y el riesgo de cada cruce. Al considerar estos parámetros, podremos

calcular un coeficiente de criticidad que refleje la urgencia y la importancia de abordar las mejoras necesarias en cada cruce. Los parámetros clave que serán evaluados incluyen:

- **Parámetros técnicos y de explotación:**
 - Distancia de visibilidad real
 - Distancia de visibilidad técnica
 - Transito promedio diario vehicular
 - Transito promedio peatonal
 - Distancia al cruce a nivel próximo.
- **Parámetros sociales:**
 - Índice de siniestralidad
- **Parámetros climatológicos:**
 - Precipitaciones anuales
- **Parámetros geométricos:**
 - Pendiente de aproximación
 - Número de carriles vehiculares
 - Ancho del cruce a nivel

La presente metodología propone calificar cada parámetro en una escala de 0 a 10, donde 10 representa la calificación más crítica y 0 la menos crítica. Esta escala permite una evaluación detallada de cada factor, asignándole un grado de importancia relativa en función de su impacto en la seguridad del cruce a nivel. Para determinar esta calificación, se considerarán diversos criterios técnicos, operativos y de seguridad, los cuales serán analizados en detalle para cada parámetro. Esta escala numérica facilitará la comparación y priorización de los factores según su nivel de criticidad, lo que permitirá identificar áreas de mejora y tomar decisiones informadas para mitigar los riesgos asociados a cada cruce ferroviario.

Es fundamental destacar que esta evaluación está diseñada para su aplicación en el conjunto de pasos a nivel que componen un tramo, red o línea ferroviaria. La presente metodología propone un método de evaluación comparativa de cada uno de los parámetros mencionados anteriormente, con el objetivo de determinar el grado de urgencia de las acciones de mejora necesarias en determinados cruces a nivel en comparación con otros presentes en la misma línea férrea.

Este enfoque comparativo permite identificar de manera precisa cuáles son los cruces a nivel que requieren atención prioritaria en términos de seguridad y eficiencia operativa. Al analizar cada parámetro en relación con los demás cruces a nivel dentro de la misma línea ferroviaria, se pueden establecer jerarquías de criticidad que orienten la asignación de recursos y la planificación de intervenciones.

Además, esta metodología no solo evalúa la situación de cada cruce a nivel de manera aislada, sino que también considera su contexto dentro del sistema ferroviario más amplio. Esto permite una gestión más integral de la seguridad y una optimización de los recursos disponibles para mejorar la infraestructura ferroviaria en su conjunto.

A continuación, se procederá a explicar detalladamente cada uno de los grupos de factores y cómo se correlacionarán entre sí para determinar la criticidad de cada paso a nivel. Este análisis exhaustivo nos permitirá comprender mejor cómo interactúan estos factores y cómo contribuyen al nivel de riesgo y seguridad de cada cruce ferroviario.

5.2.1. Parámetros técnicos y de explotación.

Los parámetros técnicos y de explotación son fundamentales para definir las condiciones de seguridad en un cruce a nivel. Estos parámetros abarcan aspectos técnicos relacionados con la infraestructura y el funcionamiento del cruce, así como consideraciones operativas que afectan su seguridad. Estos factores incluyen características como la visibilidad del cruce, la velocidad máxima permitida de los trenes, la frecuencia de paso de los trenes, la configuración de la vía, entre otros aspectos. En conjunto, estos parámetros proporcionan información crucial para evaluar y garantizar la seguridad del cruce a nivel en su entorno operativo y garantizar la protección tanto de los usuarios como de los vehículos que transitan por él. Los parámetros técnicos que se estudian dentro del estudio de criticidad propuesto por la presente metodología serán: La Distancia de visibilidad real del cruce, La distancia de visibilidad técnica, tránsito promedio diario vehicular y peatonal y la distancia del paso a nivel a analizar hasta el próximo cruce más cercano.

5.2.1.1. Distancia de visibilidad real.

Para calcular el coeficiente de criticidad asociado a la distancia de visibilidad real, nos referimos nuevamente al concepto definido en el capítulo 3 y subcapítulo 5.1.1. de este

documento. Esta distancia indica la longitud a lo largo del eje de la vía desde el punto de intersección de los ejes del ferrocarril y la carretera o ruta peatonal hasta el punto donde el tren, dirigido hacia el cruce, comienza a ser visible desde la perspectiva del usuario en el momento en que el tren se vuelve visible desde su posición. (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020)

El cálculo de la distancia de visibilidad real sigue el mismo procedimiento detallado en el subcapítulo 5.1.1.2. Por lo tanto, al aplicar esta metodología después de realizar el estudio para determinar el nivel mínimo de protección del paso a nivel, ya tendremos este dato. Posteriormente, correlacionaremos este valor con el concepto de criticidad para evaluar qué tan peligroso es actualmente el paso a nivel.

Al analizar la definición de la distancia de visibilidad real, podemos inferir que esta es inversamente proporcional a la criticidad. A mayor visibilidad real, condiciones de cruce más seguras y, por ende, menor criticidad. Así, la criticidad disminuye con la visibilidad real. Para calificar la distancia de visibilidad en relación con la escala propuesta y garantizar que esta calificación sea proporcional a la criticidad, proponemos la siguiente expresión:

Ecuación 5. Fórmula para determinar la criticidad asociada a la distancia de visibilidad real.

$$PC_{dvr} = 10 - \left(10 * \left(\frac{DVR_i - DVR_{\min}}{DVR_{\max} - DVR_{\min}} \right) \right)$$

Donde:

PC_{dvr} = Coeficiente de criticidad asociado a la distancia de visibilidad real.

DVR_i = Distancia de visibilidad real de cruce a nivel i.

DVR_{min} = Distancia mínima de visibilidad real en un cruce a nivel específico dentro de la red o línea ferroviaria bajo análisis.

DVR_{máx} = Distancia máxima de visibilidad real en un cruce a nivel específico dentro de la red o línea ferroviaria bajo análisis.

5.2.1.2. Distancia de visibilidad técnica

Para calcular la distancia de visibilidad técnica, aplicaremos el mismo método descrito en el capítulo 5.1.1. de este documento, utilizando la ecuación 1 proporcionada por el Real Decreto 929 de 2020. Esta ecuación nos permite incorporar en nuestro análisis tanto la velocidad máxima permitida para los trenes en las cercanías del paso a nivel como el número de vías ferroviarias presentes en los pasos a nivel bajo estudio. De esta manera, podremos determinar con precisión la distancia de visibilidad técnica necesaria para garantizar una circulación segura en los cruces a nivel y correlacionar factores importantes de la operación ferroviaria como lo son la velocidad máxima del material rodante ferroviario y el número de vías.

Al examinar la definición de la distancia de visibilidad técnica, como hemos revisado previamente en el capítulo 5.1.1. y que se encuentra en el Real Decreto 929 de 2020, observamos que esta hace referencia a la distancia que un tren recorre a la velocidad máxima permitida mientras un vehículo de carretera cruza el paso a nivel de un lado a otro. Según esta definición, se puede inferir que la criticidad está directamente vinculada con la distancia de visibilidad técnica. Esto se debe a que cuanto mayor sea la velocidad máxima permitida para la circulación del tren y el número de vías presentes en el cruce a nivel, mayor será el riesgo de ocurrencia de accidentes. Por lo tanto, podemos establecer una correlación entre la distancia de visibilidad técnica y el coeficiente de criticidad. Utilizando la misma escala de calificación de 0 a 10 que se emplea para evaluar la distancia de visibilidad real, obtenemos la siguiente expresión:

Ecuación 6. Expresión para calcular la criticidad asociada a la Distancia de visibilidad técnica.

$$PC_{dvt} = \left(\frac{Dvt_i - Dvt_{min}}{Dvt_{máx} - Dvt_{min}} \right) * 10$$

Donde:

PC_{dvt} = Coeficiente de criticidad asociado a la distancia de visibilidad técnica.

DVT_i = Distancia de visibilidad técnica del cruce a nivel i.

DVT_{min} = Distancia mínima de visibilidad técnica en un cruce a nivel específico dentro de la red o línea ferroviaria bajo análisis.

DVT_{máx} = Distancia máxima de visibilidad técnica en un cruce a nivel específico dentro de la red o línea ferroviaria bajo análisis.

5.2.1.3. Transito promedio diario de vehículos y peatones

El tránsito promedio diario (TPD) de vehículos y peatones constituye otro factor determinante al evaluar o cuantificar la criticidad de un cruce a nivel. Para obtener el TPD, el administrador de la infraestructura ferroviaria debe llevar a cabo estudios de tráfico que incluyan aforos en la zona del cruce. Estos estudios permitirán obtener una cuantificación precisa del volumen vehicular que transita diariamente por el paso a nivel. Es crucial considerar, al analizar los tránsitos promedios diarios de los pasos a nivel, una proyección del crecimiento en los volúmenes de tráfico, influenciado tanto por las dinámicas propias de la ciudad o área donde se encuentra el paso a nivel, como por los futuros planes de expansión u ordenación urbana que puedan estar en marcha.

A la hora de establecer una relación entre el tránsito promedio diario de vehículos y peatones en un cruce a nivel con la criticidad, podemos identificar una relación directa. A medida que aumenta la cantidad de usuarios (ya sean vehículos o peatones) que circulan por el paso a nivel, aumenta la probabilidad de ocurrencia de un accidente. En consecuencia, podemos establecer una escala de valoración, donde el valor 0 corresponde a cruces a nivel con niveles más bajos de TPDs y el valor 10 a aquellos con mayor TPD. Esto nos permite obtener una expresión que correlaciona la criticidad con el tránsito promedio diario. Es fundamental considerar tanto el volumen de vehículos como de peatones al evaluar la criticidad de un cruce a nivel siempre y cuando el cruce a nivel tenga itinerarios definidos para cada tipo de tránsito, ya que ambos contribuyen significativamente a la seguridad y operación del mismo.

Ecuación 7. Ecuación para determinar la criticidad de un cruce a nivel en relación con el transito promedio diario de vehículos y peatones.

$$PC_{tpd} = \left(\frac{TPD_i - TPD_{min}}{TPD_{máx} - TPD_{min}} \right) * 10$$

Donde:

PCtpd = Coeficiente de criticidad asociado al TPD ya sea de peatones o vehículos.

TPDi = Transito promedio diario de vehículos o peatones del cruce a nivel i.

TPDmin = Transito promedio diario de vehículos o peatones más bajo perteneciente de un cruce nivel específico dentro de la red o línea ferroviaria bajo análisis .

TPDmáx = Mayor tránsito promedio diario de vehículos o peatones perteneciente a un cruce nivel específico dentro de la red o línea ferroviaria bajo análisis .

5.2.1.4. Distancia entre cruces a nivel próximos.

Otro factor relevante a tener en cuenta en la metodología propuesta es la distancia entre el cruce a nivel en estudio y otros pasos a nivel cercanos que forman parte de la misma red o línea ferroviaria. Este aspecto se fundamenta en el Real Decreto 929/2020, el cual establece que en tramos de línea férrea donde la distancia entre pasos a nivel sea igual o inferior a 500 metros, medida a lo largo de la vía entre los ejes de la carretera o camino de cada paso a nivel, se deberá considerar su concentración en un único paso, siempre que las disponibilidades presupuestarias lo permitan. Esta concentración implica enlazar los pasos a nivel entre sí mediante caminos paralelos a la vía férrea, en función de la seguridad y eficiencia del sistema ferroviario. Este enfoque busca optimizar la infraestructura ferroviaria y reducir los riesgos asociados a la proximidad de múltiples cruces a nivel en un mismo tramo de vía. (Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, 2020)

En la presente metodología se sugiere ampliar la distancia mínima para la concentración de pasos a nivel, proponiendo en este estudio una distancia igual o inferior a 1000 metros. Esta decisión se basa en el hecho de que una distancia de 1 kilómetro implicaría un desvío de apenas 5 minutos en promedio para los usuarios en sus tiempos de viaje. Este incremento insignificante en los tiempos de viaje no representaría una carga significativa para los usuarios, pero permitiría que la metodología abarque un espectro más amplio al considerar la concentración de pasos a nivel. Ampliar esta distancia mínima brindaría flexibilidad en la planificación y optimización de la infraestructura ferroviaria, al tiempo que garantizaría una mayor seguridad y eficiencia en el sistema de transporte.

Dado lo anterior se relacionará la distancia entre pasos a nivel con la criticidad de la siguiente forma:

- Para los pasos a nivel con distancias inferior a 1000 metros se utilizará la siguiente expresión para hallar el coeficiente de criticidad

Ecuación 8. Fórmula para halla la criticidad correlacionada a la distancia entre cruces a nivel consecutivos cuando la distancia es menor o igual a 1000 m

$$PCx = 10 + \left(10 * \frac{X_I - X_c}{X_{max} - X_{mín}}\right)$$

Donde:

PCx = Coeficiente de criticidad asociado a la distancia entre cruces a nivel.

X_I = Distancia en metros del cruce a nivel en estudio hasta el próximo más cercano.

X_c = Distancia máxima para considerar concentración de pasos a nivel (1000 m)

X_{max} = Distancia máxima entre pasos a nivel consecutivos de la misma red o línea ferroviaria.

X_{mín} = Distancia mínima entre pasos a nivel consecutivos pertenecientes a la misma red o línea ferroviaria.

- Para los pasos a nivel con distancias inferior a 1000 metros se utilizará la siguiente expresión para hallar el coeficiente de criticidad.

-

Ecuación 9. Fórmula para halla la criticidad correlacionada a la distancia entre cruces a nivel consecutivos cuando la distancia es mayor a 1000 m

$$PCx = \left(10 * \frac{X_I - X_{mín}}{X_{max} - X_{mín}}\right)$$

Donde:

PCx = Coeficiente de criticidad asociado a la distancia entre cruces a nivel.

X_I = Distancia en metros del cruce a nivel en estudio hasta el próximo más cercano.

X_{max} = Distancia máxima entre pasos a nivel consecutivos de la misma red o línea ferroviaria.

Xmín = Distancia mínima entre pasos a nivel consecutivos pertenecientes a la misma red o línea ferroviaria.

5.2.1.5. Ponderación Parámetros técnicos y de explotación

Una vez identificados todos los parámetros técnicos y de explotación relevantes, se llevará a cabo un proceso de ponderación con el objetivo de obtener un único valor asociado a estos parámetros. Este proceso implica asignar un peso específico a cada factor, donde el peso o porcentaje asignado refleja la importancia de cada factor en la determinación de la criticidad de las condiciones técnicas del paso a nivel. Es decir, se considerará cuán críticas son estas condiciones y cómo influyen en la probabilidad de ocurrencia de accidentes. Este enfoque ponderado garantiza una evaluación exhaustiva y precisa de los aspectos técnicos y operativos del paso a nivel, permitiendo una toma de decisiones informada y efectiva en cuanto a medidas de seguridad y mejoras necesarias. Dado lo anterior se le asignará los siguientes pesos a cada factor considerado anteriormente.

Tabla 2. Ponderación de factores técnicos y de explotación. Fuente: Elaboración propia.

Factor técnico y de explotación	Peso dentro de la ponderación
Distancia de visibilidad técnica y real	35%
TPD vehicular	35%
TPD Peatonal	20%
Distancia entre cruces a nivel contiguos	10%

Dado lo anterior la expresión resultante que nos permitirá hallar la criticidad relacionada con los parámetros técnicos y de explotación será la siguiente expresión:

Ecuación 10. Cálculo del coeficiente de criticidad integrada de los parámetros técnicos y de explotación.

$$PC_{Tec} = (0.35 * (0.5 * PC_{dvt} + 0.5 * PC_{dvr})) + (0.35 * PC_{tpdveh}) + (0.20 * PC_{tpdp}) + (0.1 * PC_x)$$

Donde:

PCtec = Criticidad asociada a los parámetros técnicos y de explotación.

PCdvt= Coeficiente de criticidad asociado a la distancia de visibilidad técnica.

PCdvr = Coeficiente de criticidad asociado a la distancia de visibilidad real.

Pctpdveh = Coeficiente de criticidad asociado al TPD de vehículos.

PCtpdp = Coeficiente de criticidad asociado al TPD de peatones.

PCx = Coeficiente de criticidad asociado a la distancia entre cruces a nivel.

5.2.2. Parámetros sociales.

5.2.2.1. Accidentalidad.

Los factores sociales desempeñan un papel fundamental en la seguridad y operación de los pasos a nivel ferroviarios. Dentro de este grupo de factores nos centraremos en estudiar la accidentalidad en los cruces a nivel, debido a que esta refleja la interacción entre los usuarios de la vía y el entorno ferroviario. La accidentalidad en los pasos a nivel no solo afecta la seguridad de los usuarios y del sistema ferroviario en general, sino que también refleja las dinámicas sociales, culturales y económicas de la comunidad circundante. Comprender y abordar estos factores sociales es esencial para desarrollar estrategias efectivas de prevención de accidentes y promover una convivencia segura entre el tráfico vehicular, peatonal y ferroviario en estas áreas de intersección. En este sentido, el análisis de la accidentalidad en los pasos a nivel constituye un elemento fundamental dentro de la metodología propuesta, permitiendo identificar patrones, causas subyacentes y áreas de intervención para mejorar la seguridad y reducir los riesgos asociados a estas infraestructuras.

Para llevar a cabo el análisis de la accidentalidad en los pasos a nivel seleccionados para el estudio, es fundamental contar con datos precisos y actualizados sobre los accidentes ocurridos en estas ubicaciones. Con este fin, se requerirá acceder a bases de datos que registren de manera detallada el número y características de los accidentes ocurridos en cada paso a nivel objeto de análisis. Este proceso implica establecer una colaboración estrecha con las autoridades de tránsito de los respectivos municipios o jurisdicciones donde se encuentran ubicados los pasos a nivel en estudio. Además, el administrador de la infraestructura ferroviaria deberá disponer de su propia base de datos que contenga información específica sobre los accidentes ocurridos en los cruces a nivel bajo su responsabilidad. Es esencial que estas bases de datos estén debidamente identificadas y

organizadas para facilitar su acceso y consulta durante el análisis de la accidentalidad.

Entre los datos clave que se deben identificar en estas bases se encuentran:

- **Accidente de tráfico con víctimas:** Accidentes de tráfico con, al menos, una o varias personas fallecidas o con heridas.
- **Accidente de tráfico mortal:** Accidentes de tráfico con al menos una persona fallecida. (López, 2023)
- **Accidente de tráfico grave:** Accidente de tráfico con, al menos un herido grave y sin fallecidos. (López, 2023)
- **Accidentes con solo daños materiales:** Accidente de tráfico sin víctimas. (López, 2023)

En nuestra metodología, además de considerar las diferentes tipologías de accidentes previamente mencionados, se incorpora otro concepto fundamental: la exposición al riesgo. En el contexto de esta metodología, la exposición al riesgo se refiere específicamente a la cantidad de vehículos que atraviesan un cruce a nivel, o “nudo”, a lo largo de un año calendario completo. Este número representa la cantidad de vehículos que están potencialmente expuestos a situaciones de riesgo, como colisiones con trenes u otros vehículos en la infraestructura ferroviaria.

La exposición al riesgo se calcula tomando en cuenta el tránsito promedio diario (TPD) que cruza el paso a nivel durante los 365 días del año. Este cálculo proporciona una medida cuantitativa de la frecuencia con la que los usuarios de la vía están expuestos a posibles accidentes en el cruce a nivel. Este enfoque nos permite evaluar de manera más precisa el nivel de riesgo asociado con cada cruce a nivel analizado en la metodología. (López, 2023)

De acuerdo a lo anterior podemos definir a la exposición al riesgo con la siguiente expresión:

Ecuación 11. Cálculo de la exposición al riesgo de los pasos a nivel.

$$TT = \text{TPDi} \times 365 \text{ (Unidades } 10^6 \text{ Veh.)}$$

Donde:

TT = Exposición del riesgo del cruce o paso a nivel.

TPDi = Tránsito promedio diario que circula por el paso a nivel.

Ahora bien, una vez que hemos identificado la tipología de accidentes ocurridos en los pasos a nivel, procederemos a calcular el índice de peligrosidad. Para introducir este

concepto, nos basamos en las notas de clase elaboradas por la docente Griselda López Maldonado de la Universitat Politècnica de València. En estas notas, se define el índice de siniestralidad como la suma de los accidentes mortales, los accidentes con daños materiales y los accidentes de tráfico grave, todo ello en relación con la exposición al riesgo. (López, 2023)

Ecuación 12. Índice de siniestralidad

$$IS = \frac{AM + ADM + ATG}{TT} * 10^9$$

Donde:

IS = Índice de siniestralidad

AM = Número de accidentes mortales

ADM = Número de accidentes con solo daños materiales

ATG = Número de Accidentes de tráfico grave

Este índice nos permite evaluar de manera integral la peligrosidad de un cruce a nivel al considerar tanto los accidentes con consecuencias graves para la vida humana como aquellos que resultan en daños materiales significativos. Al tener en cuenta la exposición al riesgo, podemos obtener una medida más precisa del nivel de peligro asociado con cada cruce a nivel, lo que resulta fundamental para la implementación de medidas preventivas y la mejora de la seguridad en estas áreas.

Una vez calculado el índice de siniestralidad, pasaremos a relacionar este con la criticidad utilizando de igual forma a como se hizo con los parámetros técnicos la escala de calificación de 0 a 10, dando el valor de 0 a aquel paso a nivel dentro de la línea o red ferroviaria analizada que cuente con el menor índice de peligrosidad y 10 aquel que tenga el mayor índice de siniestralidad, de acuerdo a esto correlacionaremos la criticidad con el índice de peligrosidad utilizando la siguiente expresión:

Para correlacionar la criticidad con el índice de siniestralidad, emplearemos la siguiente expresión:

Ecuación 13. Coeficiente de criticidad asociada al Índice de peligrosidad de accidentes en los cruces a nivel.

$$PC_{soc} = \left(\frac{IS_i - IS_{mín}}{IS_{max} - IS_{mín}} \right) * 10$$

Donde:

PC_{soc} = Coeficiente de criticidad asociado a los parámetros sociales

IS_i = Índice de siniestralidad del cruce a nivel en estudio.

$IS_{mín}$ = Menor índice de siniestralidad asociado a un cruce a nivel dentro de la red o línea ferroviaria a analizar.

IS_{max} = Mayor índice de siniestralidad asociado a un cruce a nivel dentro de la red o línea ferroviaria a analizar.

Esta expresión permitirá establecer una relación clara entre la criticidad y el índice de siniestralidad de cada cruce a nivel, lo que será fundamental para priorizar acciones de mejora y reforzar la seguridad en aquellos puntos más críticos.

5.2.3. Parámetros ambientales y climatológicos

Además de los aspectos técnicos y sociales, también resulta fundamental considerar los factores ambientales o climatológicos al analizar la seguridad de la infraestructura. Colombia, siendo un país tropical con una gran diversidad climática en sus distintas regiones, presenta una variedad de condiciones meteorológicas que pueden influir en la seguridad de los pasos a nivel.

En esta metodología, se destaca como un factor relevante el clima de la región donde se ubica el cruce a nivel en estudio. Específicamente, se presta especial atención a los días de lluvia, los cuales pueden tener un impacto significativo en la seguridad vial y ferroviaria. Considerar estos aspectos climáticos nos permitirá evaluar de manera más completa y precisa la seguridad de los pasos a nivel en diferentes condiciones ambientales.

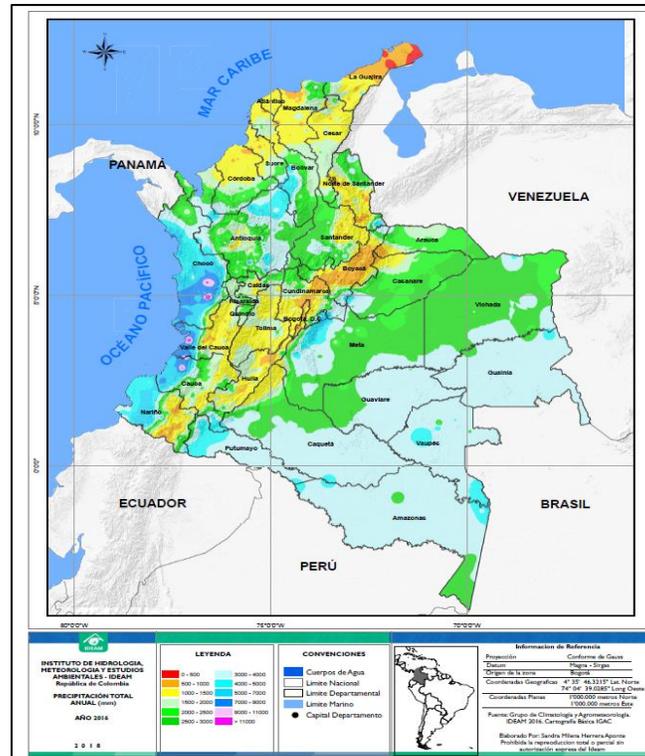


Figura 10. Mapa de precipitaciones anuales Colombia año 2016. Fuente: Mapa obtenido a partir de la galería de mapas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (IDEAM, 2016).

De acuerdo a lo anteriormente expresado, en esta metodología, se busca realizar un análisis para correlacionar el nivel de precipitación, según los valores anuales obtenidos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), con el panorama actual y futuro del transporte ferroviario en Colombia. Como se mencionó en el apartado 4.1. del presente documento, y se puede observar en las figuras 1 y 2, el desarrollo ferroviario del país está centrado en conectar la región Caribe con la región Andina. (Agencia Nacional de Infraestructuras (ANI), 2020). Ambas regiones, siendo las más industrializadas del país, presentan una climatología diversa, lo que nos permite sentar las bases de la metodología para determinar la criticidad de los pasos a nivel según los niveles de precipitación de acuerdo a la zona geográfica.

Con el objetivo de establecer nodos climatológicos representativos, se analizarán tanto el trazado de las líneas ferroviarias actuales y que se encuentren en uso como el de los futuros proyectos o líneas ferroviarias que plantee del Gobierno de Colombia dentro de su Plan Maestro Ferroviario. Dado lo anterior se seleccionarán dos nodos, uno para representar las

redes y líneas ferroviarias presente en la parte norte del país propiamente en la región Caribe y otro nodo para representar la región Andina.

Para la región Caribe, se utilizará como medida la precipitación anual de la ciudad de Riohacha, ubicada en el departamento de La Guajira, en el extremo norte del país. Esta región se caracteriza por tener zonas desérticas en gran parte de su territorio, con una precipitación media anual de 541 mm. Estos datos han sido obtenidos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (IDEAM, 2023)

En cuanto a la región Andina, se seleccionará como nodo climatológico la ciudad de Medellín, la segunda ciudad más importante del país después de Bogotá. La razón de elegir Medellín radica en que el departamento de Antioquia, donde se encuentra esta ciudad, es uno de los más pluviosos de Colombia. Además, Antioquia es uno de los departamentos que conecta la capital con el norte del país, aunque este último presenta un clima cálido y seco similar al de la región Caribe. También es relevante mencionar que Antioquia tiene una alta pluviosidad, lo que permite representar a la región pacífica del país, donde se encuentra el puerto de Buenaventura, uno de los principales objetivos de conexión ferroviaria para el gobierno colombiano.

Por lo tanto, para el estudio de la presente metodología, se ha optado por la ciudad de Medellín como el nodo climatológico que nos permitirá definir la pluviosidad de la región Andina de Colombia, con niveles de lluvia anuales de 2301 mm. (IDEAM, 2023)

Considerando lo expuesto anteriormente y siguiendo la escala de calificación empleada para los parámetros anteriores, se establecerá una base de calificación asignando un coeficiente de criticidad igual a 0 para aquellas regiones con precipitaciones iguales o inferiores a 541 mm al año, y un valor de 10 para aquellas zonas que presenten niveles de precipitación iguales o superiores a 2301 mm al año. Esta escala nos permitirá evaluar el riesgo asociado a las condiciones climáticas en cada área, reconociendo que las regiones con altos niveles de precipitación pueden experimentar mayores desafíos en términos de seguridad ferroviaria debido a la posible incidencia de eventos climáticos extremos como inundaciones, deslizamientos y condiciones ambientales que dificulten la visibilidad del paso a nivel.

Dado esto se propone la siguiente expresión para correlacionar los niveles de precipitación con la criticidad:

Ecuación 14. Coeficiente criticidad asociado a las condiciones climatológicas de la zona donde se encuentra ubicado el paso a nivel.

$$PCcli = \left(\frac{Ppi - 541}{1760} \right) * 10$$

Donde:

Pccli= Coeficiente de criticidad asociada a los factores climatológicos en la zona donde se ubique el cruce a nivel

Ppi= Precipitación media anual de la zona donde se encuentra el paso a nivel

5.2.4. Parámetros geométricos.

Los parámetros geométricos juegan un papel importante en la evaluación de la seguridad y eficiencia de los cruces a nivel en las redes ferroviarias. Estos elementos no solo determinan la configuración física de la intersección, sino que también influyen en la visibilidad, la capacidad de cruce y la velocidad de aproximación de los vehículos. Es de suma importancia comprender cómo estos factores impactan en la seguridad operativa y en la experiencia de los usuarios al atravesar estos puntos de intersección.

Dentro de esta metodología, se considerarán varios parámetros geométricos fundamentales para evaluar la seguridad de los cruces a nivel. Entre ellos se incluyen la pendiente de aproximación al cruce a nivel, que influye en la visibilidad y en la capacidad de frenado de los vehículos; el número de carriles vehiculares de los viales que cruzan el paso a nivel, que afecta la fluidez del tráfico y la probabilidad de colisiones; y el ancho del cruce a nivel, que determina la amplitud del espacio disponible para vehículos y peatones. Estos parámetros serán analizados en detalle para identificar su impacto en la seguridad y proponer medidas de mejora que contribuyan a reducir los riesgos asociados con estos cruces.

5.2.4.1. Pendiente de aproximación

La pendiente de aproximación es un parámetro geométrico fundamental en la evaluación de la seguridad en los cruces a nivel. Se refiere a la inclinación del terreno o de la vía justo antes de llegar al cruce ferroviario. Esta pendiente influye directamente en la visibilidad de

los conductores y peatones que se acercan al cruce, así como en la capacidad de frenado de los vehículos. Una pendiente pronunciada puede dificultar la visión de los trenes y aumentar el tiempo de reacción de los conductores, lo que incrementa el riesgo de colisiones. Por lo tanto, comprender el impacto de la pendiente de aproximación es esencial para diseñar medidas de seguridad efectivas y mejorar la operatividad de estos puntos de intersección.

Dado que el diseño geométrico de las vías férreas es inherentemente más riguroso y restrictivo en comparación con el diseño de carreteras, es fundamental garantizar una transición fluida y segura en los cruces a nivel entre vías férreas y carreteras. En este sentido, en el presente estudio estableceremos como principio básico que, en caso de modificar las condiciones de pendiente en estos cruces, se deben adoptar medidas para ajustar o mejorar la pendiente de la carretera de manera que se alinee con la cota en la que se encuentra el eje de la vía ferroviaria en el cruce.

Esta disposición se fundamenta en la necesidad de garantizar la seguridad y la eficiencia en la circulación vehicular, así como en la prevención de posibles accidentes en los cruces a nivel. Al alinear las pendientes de las carreteras con las vías férreas, se minimiza las pérdidas de visibilidad tanto del tren como de los vehículos automotores, asegurando una transición suave y sin sobresaltos para los vehículos que atraviesan estos puntos de intersección.

En el contexto de nuestra metodología, tomando como base estudios investigativos sobre el diseño geométrico de intersecciones urbanas y la Normativa de protección de Pasos a Nivel de Uruguay, hemos establecido criterios específicos para las pendientes en los alrededores de los cruces a nivel. Definiendo que en un tramo de 8 metros adyacentes al cruce sobre las carreteras que lo atraviesan, se permitirá una pendiente máxima de aproximación del 4%. Esta medida busca garantizar una inclinación segura y manejable para los conductores, que a su vez asegure unos niveles de visibilidad óptimo tanto para el maquinista del tren como para los conductores de los vehículos. (Dirección Nacional de Transporte Ferroviario de Uruguay, 2020) (Correa Montoya, 2021)

Además, se ha considerado la importancia del drenaje adecuado en la infraestructura vial. Por lo tanto, se requerirá que la pendiente mínima de la carretera sea del 0,5%, lo que facilitará el flujo de agua y contribuirá a prevenir problemas de inundación y erosión en los alrededores del cruce a nivel. (Correa Montoya, 2021)

Con estas disposiciones buscamos asegurar la integridad estructural de las vías, la seguridad de los usuarios y la eficiencia en la circulación vehicular en los cruces a nivel, contribuyendo así a evaluar las condiciones de seguridad de los cruces a nivel.

En consonancia con lo anteriormente expuesto y siguiendo el enfoque de evaluación de la criticidad propuesto en este estudio, se empleará un método específico para determinar el nivel de criticidad de un cruce a nivel en función de la pendiente de aproximación de las vías que convergen en él. Este método implica la medición de la pendiente en una distancia de 8 metros a lo largo del eje de la carretera.

Para asignar una calificación de criticidad, se establecerá un criterio que considere las diferentes pendientes de aproximación. Se asignará un valor de 10 (indicando una situación más crítica) a las pendientes superiores al 4%, lo que indica un mayor riesgo y dificultad de visibilidad para los conductores al aproximarse al cruce. Por otro lado, se asignará un valor de 0 (indicando una situación menos crítica) a las pendientes iguales al 0,5%, lo que sugiere una pendiente mínima que no representa un obstáculo significativo para la circulación vehicular.

Este enfoque permite clasificar de manera objetiva y sistemática el grado de criticidad de los cruces a nivel en función de su pendiente de aproximación, obteniendo así la siguiente expresión que nos permitirá evaluar la criticidad del paso a nivel:

Ecuación 15. Criticidad de un cruce a nivel asociada a la pendiente de aproximación de los viales que en él convergen.

$$PC_{pend} = \left(\frac{P_i - P_{mín}}{P_{máx} - P_{mín}} \right) * 10$$

Donde:

PC_{pend} = Coeficiente de criticidad asociado a la pendiente de aproximación

P_i = Pendiente de aproximación máxima de uno de los lados de los viales que convergen en el paso a nivel en estudio

$P_{mín}$ = Pendiente mínima aceptada por la presente metodología en los 8 metros próximos al paso a nivel (0.5%)

$P_{máx}$ = Pendiente máxima aceptada por la presente metodología en los 8 metros próximos al paso a nivel (4%)

5.2.4.2. Número de carriles vehiculares

El número de carriles de las vías que convergen en un paso a nivel es un parámetro geométrico fundamental que influye significativamente en la seguridad y eficiencia de dicha infraestructura. Este aspecto adquiere una relevancia crucial en el diseño y la operación de los cruces a nivel, ya que la configuración vial determina en gran medida la complejidad del cruce y el nivel de interacción entre los distintos flujos de tráfico. La cantidad de carriles no solo impacta en la capacidad de la vía y la fluidez del tráfico, sino que también incide en la facilidad de maniobra de los vehículos, la visibilidad de los conductores y, por ende, en la reducción de potenciales riesgos de colisión. En este contexto, es imperativo comprender en detalle cómo el número de carriles afecta la seguridad y funcionalidad de los pasos a nivel, así como identificar las mejores prácticas y criterios de diseño para optimizar su operación y minimizar posibles conflictos viales.

Partiendo de lo anterior, la metodología propuesta en este estudio aborda un análisis exhaustivo de cada línea o red ferroviaria, evaluando detalladamente cada uno de los cruces a nivel que la componen. Se establece como criterio principal la consideración de la cantidad de carriles vehiculares que convergen en cada paso a nivel, dado que este factor tiene una influencia significativa en la seguridad y funcionalidad de la infraestructura. Como se ha mencionado previamente, a medida que aumenta el número de carriles en un cruce a nivel, se incrementa la complejidad del cruce y, por ende, el riesgo de incidentes.

Un cruce a nivel con una mayor cantidad de carriles vehiculares representa un indicador de un mayor volumen de tráfico, lo que conlleva una probabilidad aumentada de colisiones y conflictos viales. Además, la presencia de múltiples carriles puede afectar negativamente la visibilidad tanto para los conductores como para los operadores del tren, lo que aumenta el riesgo de accidentes. Asimismo, la presencia de numerosos carriles dificulta las maniobras de los vehículos, lo que puede generar situaciones peligrosas durante el cruce.

Por el contrario, al inspeccionar los cruces a nivel que conforman la línea ferroviaria en estudio, se identificarán aquellos pasos a nivel con menor cantidad de carriles vehiculares como menos críticos. Esto se debe a que una menor cantidad de carriles implica un menor volumen de tráfico y, por lo tanto, una reducción en la probabilidad de incidentes y una mayor facilidad para la visibilidad y las maniobras de los usuarios. De acuerdo a esto y

siguiendo con el método de calificación de 0 a 10 de la criticidad propuesto en la presente metodología, se establece la siguiente expresión para el cálculo del coeficiente de criticidad del cruce a nivel:

Ecuación 16. Coeficiente de criticidad asociado al número de carriles vehiculares que convergen en un paso a nivel.

$$PCnc = \left(\frac{NCi - NCmín}{NCmáx - NCmín} \right) * 10$$

Donde:

PCnc = Criticidad asociada al cruce a nivel en estudio.

Nci = Número de carriles que confluyen en el cruce a nivel en estudio.

Ncmín = Número de carriles presentes en el cruce a nivel con menos convergencia de carriles vehiculares dentro de la red ferroviaria.

Ncmax = Número de carriles presentes en el cruce a nivel con mayor convergencia de carriles vehiculares dentro de la red ferroviaria.

5.2.4.3. Ancho del cruce a nivel

En el presente apartado, exploraremos la relevancia del ancho del cruce a nivel como un componente esencial en la evaluación de la seguridad y criticidad de los pasos a nivel ferroviarios. La configuración geométrica de un cruce a nivel se caracteriza por dos dimensiones fundamentales en su plano: la longitud, determinada por el número de vías a cruzar, y el ancho, influenciado por las particularidades de la carretera adyacente. Nos enfocaremos específicamente en el análisis del ancho, que desempeña un papel fundamental en la capacidad de tránsito seguro tanto para vehículos como para peatones. Exploraremos cómo el ancho adecuado no solo facilita el flujo fluido del tráfico, sino que también contribuye significativamente a la visibilidad, maniobrabilidad y capacidad de respuesta ante situaciones de emergencia en estos puntos de intersección entre carreteras y vías férreas. (Normativa técnica superficie de rodadura entre carriles de vía, 2017)

Para determinar el ancho óptimo de los cruces a nivel en las redes ferroviarias de Colombia, nos apoyaremos en los parámetros geométricos establecidos por el manual de diseño geométrico del país, especialmente en lo que respecta a los anchos mínimos exigidos para

las carreteras intermunicipales o nacionales. Según este manual, se especifica que el ancho mínimo para una carretera convencional debe ser de 3,65 metros, además de requerir bermas o arcenes con un ancho mínimo de 1,5 metros para las carreteras nacionales. (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2008)

En cuanto al análisis de los anchos mínimos necesarios para las carreteras urbanas, nos basaremos en el trabajo investigativo realizado por la Ingeniera Mariana Correa, titulado “Manual de diseño de Vías Urbanas”. En este documento se establece que un ancho de carril recomendado para garantizar las condiciones de seguridad de los usuarios es de 3,5 metros, acompañado de un arcén que puede variar entre 0,5 metros a 2,5 metros, dependiendo de las condiciones específicas de la vía y el entorno urbano. (Correa Montoya, 2021).

Con base en lo anterior, en la presente metodología se propondrán las siguientes medidas de anchos recomendadas para los cruces a nivel, teniendo en cuenta el número de carriles y la configuración geométrica de las vías que convergen en el paso a nivel:

Tabla 3. Anchos recomendados de carril y bermas para carreteras que confluyen en un cruce a nivel. Fuente: Elaboración propia.

Vía Nacional o Carretera Intermunicipal	Ancho recomendado del carril (m)	3.65
	Ancho de berma recomendado (m)	1.5
Vía Urbana	Ancho recomendado del carril (m)	3.5
	Ancho de berma recomendado (m)	1

De acuerdo con los valores expresados en la anterior tabla, se obtienen estos anchos recomendados para carreteras nacionales o vías urbanas en función del número de carriles:

Tabla 4. Anchos recomendados para cruces a nivel con vías nacionales o urbanas. Fuente: Elaboración propia.

Número de Carriles	Ancho recomendado para un cruce a nivel de una Carretera Nacional en metros (Xr)	Ancho recomendado para un cruce a nivel una Vía urbana en metros (Xr)
1	6.65	5.5
2	10.3	9
3	13.95	12.5
4	17.6	16
6	26.4	23
8	33.7	30

Nota: Para carreteras nacionales o urbanas con 4 o más carriles se deberá analizar, si presentan configuración de doble calzada y considerar el ancho de la mediana en el análisis de los anchos recomendados para evaluar la criticidad del paso a nivel.

Una vez definidos los anchos que, según nuestra metodología, recomendaremos para los cruces a nivel con el fin de garantizar condiciones seguras de circulación, procederemos a correlacionar estos con el coeficiente de criticidad. Para ello, primero se debe identificar el tipo de carretera que converge en el cruce a nivel (nacional o urbana), cuantificar el número de carriles y determinar la criticidad mediante las siguientes expresiones:

Ecuación 17. Criticidad asociada al ancho de los cruces a nivel.

$$PCxc = \left[\left(\frac{XC_i - Xr}{Xr} \right) \right] * 10$$

Donde:

PCxc = Criticidad del paso a nivel asociada al ancho del mismo

Xci = Ancho en metros del cruce a nivel a evaluar

Xr = Ancho recomendado en metros por la presente metodología de acuerdo al número de carriles que confluyen en el cruce.

Es fundamental destacar que, en caso de que se encuentren cruces a nivel con anchos superiores a los recomendados en esta metodología, se les asignará automáticamente un valor de criticidad de 0. Esto se debe a que estos cruces poseen anchos mayores a los recomendados, lo cual asegura que el ancho del paso a nivel cumple con las condiciones de seguridad para la circulación establecidas por la normativa y los estudios colombianos pertinentes.

5.2.4.4. Ponderación Parámetros geométricos

Una vez obtenidos y analizados todos los parámetros geométricos que determinan la criticidad de un cruce a nivel, según lo establecido en este estudio, se procederá a ponderar sus coeficientes de criticidad con el fin de obtener un único coeficiente general que correlacione la criticidad con todos los parámetros geométricos mencionados anteriormente. Para ello, se ha definido un porcentaje de ponderación en función de la importancia que cada parámetro representa en la determinación de la criticidad de un cruce a nivel. A continuación, se presentan los valores definidos:

Tabla 5. Coeficientes de ponderación para determinar la criticidad general de los parámetros geométricos. Fuente: Elaboración propia.

Ponderación parámetros Geométricos	
Criticidad Número de Carriles (PCnc)	30%
Criticidad Ancho del cruce a nivel (PCxc)	30%
Criticidad Pendiente de aproximación (Pcpend)	40%

Tras analizar detenidamente los coeficientes de ponderación presentados en la tabla anterior, se ha llegado a la determinación de asignar un peso considerablemente mayor al coeficiente de criticidad asociado a la pendiente de aproximación en los cruces a nivel. Esta decisión se fundamenta en que una pendiente más pronunciada conlleva condiciones considerablemente más inseguras y restrictivas para la operatividad del cruce. Es importante destacar que esta elección se ve respaldada por la diversidad orográfica de Colombia, especialmente en la región andina, donde predomina un terreno montañoso. En este contexto, es común encontrar carreteras con pendientes pronunciadas, lo cual podría aumentar significativamente la criticidad de los cruces a nivel entre estas carreteras y las líneas ferroviarias. Además, es importante considerar que las pendientes elevadas pueden ser necesarias para reducir el volumen de tierra requerido durante la construcción de los cruces a nivel, lo que podría aumentar aún más su criticidad.

Asimismo, durante el análisis se ha observado una estrecha relación entre la criticidad asociada al número de carriles y al ancho del cruce a nivel. Esta relación sugiere que la interacción entre estos parámetros puede influir significativamente en la seguridad y la eficiencia del cruce. Por lo tanto, al priorizar el coeficiente de criticidad de la pendiente, se busca abordar de manera más efectiva los posibles riesgos y desafíos que pueden surgir en la intersección ferroviaria, especialmente en un contexto topográfico variado como el de Colombia. En resumen, esta decisión busca garantizar una evaluación integral y precisa de la criticidad de los cruces a nivel, priorizando aquellos aspectos que tienen un mayor impacto en la seguridad y la operatividad de estas infraestructuras vitales. Dado lo anterior se obtendrá la siguiente ecuación final para hallar la criticidad general de los parámetros Geométricos:

Ecuación 18. Ponderación para hallar la criticidad general de los parámetros geométricos.

$$PC_{geo} = (0,3 * PC_{nc}) + (0,3 * PC_{xc}) + (0,4 * PC_{pend})$$

Donde:

Pcgeo = Criticidad asociada a los parámetros geométricos del cruce a nivel en estudio.

5.2.5. Determinación de la criticidad general del paso a nivel

Una vez se ha determinado la criticidad de cada uno de los grupos de parámetros propuestos dentro de la presente metodología de trabajo para cada paso a nivel que conforma la línea o red ferroviaria en análisis, se procede a ponderar los valores de criticidad de cada grupo (Técnicos y de explotación, Sociales, Ambientales y Climatológicos, y Geométricos). Este proceso busca asignar un peso relativo a cada grupo de parámetros en la evaluación final, considerando su impacto en la seguridad del cruce a nivel.

En este estudio, se han establecido porcentajes de ponderación para cada grupo de parámetros, con el fin de reflejar adecuadamente su importancia en la evaluación integral de la seguridad del cruce a nivel. Estos porcentajes se han definido cuidadosamente en función de la relevancia técnica y operativa de cada grupo de parámetros en el contexto ferroviario.

Tabla 6. Parámetros de ponderación para hallar la criticidad de un cruce a nivel. Fuente: Elaboración propia.

Panel de ponderación	
Parámetros técnicos y de explotación	40%
Parámetros sociales	15%
Parámetros climatológicos	15%
Parámetros geométricos	30%

La tabla 6 se detallan los porcentajes asignados a cada grupo de parámetros para llevar a cabo la ponderación final y determinación de la criticidad del paso a nivel. En el presente procedimiento, se ha decidido otorgar un peso del 40% a los parámetros técnicos y de explotación debido a su considerable influencia en las condiciones operativas y de seguridad del cruce a nivel. Estos parámetros abarcan una variedad de aspectos, incluido el flujo de tráfico de vehículos y peatones, así como elementos relacionados con la operación ferroviaria, como la velocidad de operación del tren y la visibilidad de la vía. Dada la complejidad y la dinámica del tráfico, la gestión eficaz de estos factores representa un desafío para los administradores ferroviarios. Además, estos parámetros actúan como determinantes fundamentales que influyen en el comportamiento y desempeño de otros parámetros, lo que subraya su importancia crítica en la evaluación de la seguridad y operatividad del cruce a nivel. Asimismo, es esencial considerar las proyecciones de crecimiento del tráfico vehicular y peatonal a futuro, lo que implica una planificación anticipada y estratégica para garantizar condiciones de circulación seguras y eficientes.

Por otro lado, se ha asignado un peso del 30% a las condiciones geométricas. Estas variables juegan un papel crucial en la seguridad y funcionalidad del cruce a nivel. Entre estos aspectos se incluyen la longitud y anchura del cruce, así como la inclinación de las pendientes adyacentes. Aunque estos parámetros son fundamentales, su efectividad está estrechamente ligada al flujo de tráfico que atraviesa el paso a nivel. Por lo tanto, su evaluación debe tener en cuenta no solo las características geométricas en sí, sino también cómo interactúan con el tráfico circundante y cómo pueden afectar la seguridad y fluidez de la operación ferroviaria.

En cuanto a los parámetros climáticos y sociales, se les ha asignado un peso del 15% cada uno. Los parámetros climáticos, como la exposición a condiciones meteorológicas adversas, son inherentemente parte del entorno del cruce a nivel y pueden influir

significativamente en su seguridad. Aunque no se pueden cambiar directamente, se pueden tomar medidas de diseño para adaptar la infraestructura y mitigar su impacto. Por otro lado, los parámetros sociales, que incluyen la base histórica de accidentes en el cruce a nivel, ofrecen información valiosa sobre las tendencias de seguridad y áreas de mejora. Analizar estos datos permite identificar patrones de accidentes y tomar medidas proactivas para reducir su frecuencia y gravedad en el futuro.

Dado lo anterior finalmente se obtiene la criticidad de un cruce a nivel a partir de la siguiente expresión:

Ecuación 19. Criticidad de un paso a nivel.

$$Criticidad = ((0.4 * PCtec) + (0.3 * PCgeo) + (0.15 * PCsoc) + (0.15 + PCcli)) * 10$$

Una vez calculada la criticidad de cada cruce a nivel mediante nuestra metodología, es fundamental realizar un análisis comparativo de estos valores. Este análisis nos permite identificar los cruces que presentan una mayor criticidad y, por lo tanto, requieren una atención prioritaria en términos de mejoras y acciones correctivas. Al comparar los valores de criticidad obtenidos para cada cruce, podemos determinar la urgencia relativa de implementar medidas de mitigación y seguridad en aquellos cruces que representan mayores riesgos para la circulación vehicular y ferroviaria. Esta evaluación comparativa proporciona una base sólida para la toma de decisiones por parte de los responsables de la gestión y mantenimiento de la infraestructura ferroviaria, permitiéndoles asignar recursos de manera eficiente y priorizar las intervenciones que maximicen el impacto en la seguridad y eficiencia del sistema de transporte.

5.3. Determinación del nivel de riesgo de los pasos a nivel.

La última etapa de la metodología propuesta en este estudio implica el cálculo del nivel de riesgo, el cual se define de la siguiente manera:

Ecuación 20. Cálculo del nivel de riesgo del cruce a nivel.

$$NR = [AxT] * Criticidad$$

Donde:

NR = Nivel de riesgo

[AxT] = Momento de circulación del paso a nivel en estudio

Criticidad = Coeficiente de criticidad asociado al paso a nivel en estudio.

El cálculo del nivel de riesgo se basa en la necesidad de obtener un factor que permita clasificar en rangos los parámetros evaluados dentro del cálculo de la criticidad. Este factor se relaciona con la circulación vehicular y ferroviaria para obtener rangos que determinen un conjunto de acciones de mejora acorde al nivel de riesgo presente en el cruce a nivel.

Con base en lo anterior, se han establecido cuatro niveles de riesgo que permiten clasificar los cruces a nivel de acuerdo al valor obtenido en este factor de la siguiente forma:

Tabla 7. Categorías del Nivel de Riesgo.

			
Nivel de Riesgo 1	Nivel de Riesgo 2	Nivel de Riesgo 3	Nivel de Riesgo 4
NR<12000	12000<NR<50000	50000<NR<150000	NR>150000

NR1: Correspondiente a aquellos cruces que presentan un nivel de riesgo mínimo. Estos cruces requieren intervenciones menores y pueden estar asociados a parámetros que no representan una amenaza significativa para la seguridad vial y ferroviaria.

Para los Pasos a Nivel (PPNN) clasificados con Nivel de Riesgo 1, se recomienda la implementación e instalación de elementos de seguridad correspondientes al nivel mínimo de protección determinado en la metodología actual. Este procedimiento se ajustará de acuerdo con las directrices establecidas en el apartado 5.1 del presente documento, el cual detalla el proceso para la selección, diseño e instalación de los elementos de protección necesarios en los cruces a nivel.

Los Pasos a Nivel (PPNN) clasificados con un Nivel de Riesgo 1 se caracterizan por presentar riesgos menores y no representar una amenaza significativa para la seguridad vial y ferroviaria. A pesar de ello, es esencial que el administrador ferroviario lleve a cabo una vigilancia constante para monitorear las condiciones de operación del cruce a nivel. En caso de detectar alguna irregularidad o potencial riesgo, se deben ejecutar acciones preventivas simples para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente del paso a nivel.

Entre las acciones preventivas recomendadas se incluyen la poda de arbustos que puedan obstaculizar la visibilidad de los conductores y usuarios del cruce. Además, se pueden realizar movilizaciones de obstáculos que puedan representar un riesgo para la circulación vehicular y ferroviaria. Asimismo, se sugiere reforzar la señalización tanto horizontal como vertical de la vía, asegurando que los usuarios del cruce a nivel cuenten con la información necesaria para transitar de manera segura.

Estas acciones preventivas, aunque simples, son cruciales para mantener la seguridad y funcionalidad de los PPNN con un Nivel de Riesgo 1, contribuyendo así a la prevención de accidentes y al buen funcionamiento del sistema de transporte ferroviario y vial.

NR2: Engloba a los cruces que muestran un nivel de riesgo medio. Requieren intervenciones y medidas de seguridad adicionales para mitigar posibles riesgos y mejorar las condiciones de circulación.

Para los Pasos a Nivel (PPNN) clasificados con un Nivel de Riesgo 2, y cuyo nivel de protección mínimo sea A1, A2 o A3, se recomienda elevar el nivel de protección al inmediatamente superior y llevar a cabo acciones de mejora en la señalización vial existente.

Elevar el nivel de protección implica implementar medidas adicionales de seguridad que mitiguen los riesgos asociados al cruce a nivel. Estas medidas pueden incluir la instalación de barreras automáticas, la mejora de la iluminación en el área del cruce, o la implementación de sistemas de detección de vehículos y trenes para prevenir colisiones.

Además, es importante mejorar la señalización vial existente para brindar una mejor orientación a los conductores y usuarios del cruce a nivel. Esto puede implicar la instalación de señales luminosas intermitentes, señales de advertencia avanzada que alerten sobre la proximidad del cruce a nivel, o la colocación de señales de stop para regular el tráfico en el cruce.

Es importante destacar que estas acciones deben ser planificadas y ejecutadas por el administrador ferroviario en coordinación con las autoridades locales de transporte y seguridad vial. Además, se deben cumplir con las normativas y estándares de seguridad

establecidos por los organismos reguladores pertinentes para garantizar la efectividad y legalidad de las mejoras realizadas en el cruce a nivel.

NR3: Incluye a los cruces con un nivel de riesgo significativo, que pueden representar una amenaza considerable para la seguridad. Estos cruces necesitan intervenciones inmediatas y medidas de seguridad intensivas para reducir los riesgos asociados.

Para los cruces a nivel clasificados con este nivel de riesgo, es imperativo aplicar de manera inmediata el nivel de protección máxima establecido, que en el contexto de la presente metodología corresponde al nivel A4.

Además de esta medida, se requiere llevar a cabo un análisis exhaustivo de las condiciones circundantes y la relación con otros pasos a nivel cercanos. Es importante estudiar la viabilidad de suprimir el cruce a nivel mediante la concentración de pasos a nivel a través de caminos auxiliares.

La implementación del nivel de protección máximo implica la instalación de dispositivos y sistemas de seguridad de alta eficacia, como barreras automáticas de cruce, señalización avanzada, sistemas de detección de vehículos y trenes, entre otros. Estas medidas son fundamentales para reducir al mínimo el riesgo de colisiones y accidentes en el cruce a nivel.

Por otro lado, el análisis de las condiciones circundantes y la posibilidad de suprimir el cruce a nivel mediante la concentración de pasos a nivel a través de caminos auxiliares requiere un estudio detallado de la infraestructura vial y ferroviaria existente, así como la evaluación de factores como el volumen de tráfico, la topografía del terreno y la accesibilidad para los usuarios.

NR4: Los cruces clasificados en el nivel de riesgo 4 representan la categoría de mayor preocupación, ya que constituyen una amenaza inminente para la seguridad vial y ferroviaria. Estos puntos críticos requieren intervenciones urgentes y prioritarias para prevenir posibles accidentes graves y mejorar la operatividad de la infraestructura ferroviaria.

Dentro de esta categoría de riesgo, la única opción viable es considerar la implementación de cruces a distinto nivel, que implican la construcción de pasos inferiores o elevados. Estos pasos deben ser evaluados minuciosamente, teniendo en cuenta el volumen de tráfico y la disponibilidad de espacio para la construcción de las rampas necesarias.

En el caso de los pasos elevados, se debe realizar un estudio detallado para determinar si la línea ferroviaria es electrificada o no. En el caso de líneas electrificadas, se debe garantizar un galibo mínimo de 7,6 metros para permitir la correcta instalación y funcionamiento del sistema de electrificación. Por otro lado, para líneas ferroviarias que funcionan con combustibles fósiles, se establece un galibo mínimo de 5.5 metros, conforme a la normativa ferroviaria colombiana del año 2013. (D. E. A. Castillo, 2013). Las pendientes máximas permitidas se rigen por el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras del INVIAS del año 2008, que establece un límite del 7%. En casos excepcionales, se puede considerar una pendiente del 10%.(Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2008)

Por otro lado, los pasos inferiores con galibo restringido son una alternativa en la que la vía vehicular circula por debajo de las líneas del ferrocarril, con un galibo mínimo de 3,5 metros. Sin embargo, estos pasos solo son adecuados para cruces a nivel donde no se esperan pasos de vehículos pesados. Se aplicarán las mismas restricciones de pendiente que para los pasos elevados.

Finalmente, los pasos inferiores son cruces en los que la carretera se diseña para pasar por debajo de la vía férrea, con un galibo mínimo de 5,6 metros para permitir el tránsito de vehículos pesados. Las pendientes máximas permitidas y las excepcionales son las mismas que para los pasos elevados y los pasos inferiores con galibo restringido.

En resumen, la implementación de pasos a distinto nivel en los cruces clasificados en el nivel de riesgo 4 representa una medida crucial para reducir los riesgos y garantizar la seguridad en la intersección entre la vía férrea y las carreteras.

6. Aplicación práctica de la Metodología para evaluación de la seguridad de pasos a nivel (PPNN) en el Proyecto del Regiotram de Occidente Bogotá.

En los apartados anteriores de este trabajo, se ha desarrollado de manera teórica la metodología propuesta para evaluar la seguridad de los cruces a nivel en las redes ferroviarias de Colombia. Desde el establecimiento del nivel mínimo de protección conforme a lo estipulado por la normativa española en el Real Decreto 929 de 2020, hasta la determinación de la criticidad de cada cruce a nivel para establecer un orden de prioridad en las mejoras operativas y de seguridad, la metodología ha sido detalladamente delineada.

Además, se ha definido un nivel de riesgo que permite clasificar los cruces a nivel en función de sus parámetros más relevantes, que incluyen aspectos operacionales, geométricos, sociales y climáticos, todos ellos vinculados con el factor de criticidad y el momento de circulación de cada cruce.

El propósito de los capítulos y subcapítulos siguientes es aplicar esta metodología al Proyecto Ferroviario del Regiotram de Occidente en Bogotá, Colombia. Para ello, hemos establecido contacto directo con los responsables del proyecto, quienes generosamente han facilitado información clave que servirá como base para la implementación de nuestra metodología. Esta aplicación práctica nos permitirá poner a prueba la efectividad de nuestra metodología en un entorno real y proporcionar recomendaciones concretas para mejorar la seguridad y operatividad de los cruces a nivel en este proyecto específico.

A continuación, proporcionaremos una visión general del objeto del proyecto y demostraremos la aplicación de nuestra metodología, destacando los resultados obtenidos en el análisis de seguridad de los cruces a nivel del mencionado proyecto. Este análisis detallado nos ayudará a identificar áreas de mejora específicas y desarrollar estrategias efectivas para mitigar los riesgos asociados con los cruces a nivel en el Proyecto Ferroviario del Regiotram de Occidente.

6.1. Situación actual proyecto y generalidades del Proyecto Regiotram de Occidente.

El presente capítulo, tiene como objetivo presentar de forma concisa los antecedentes y rasgos esenciales del proyecto Regiotram de Occidente, proporcionado una visión general del proyecto antes de aplicar la metodología para evaluar la seguridad en los pasos pertenecientes al corredor férreo.

Es relevante señalar que el Proyecto Regiotram de Occidente inició su fase de construcción en junio de 2020, marcando el comienzo de una fase preliminar que se extendió hasta 2023. Durante este período, se llevaron a cabo importantes trabajos, incluida la construcción de los patios talleres ANI y Corzo. La construcción del corredor ferroviario se inició en abril de 2023 y se espera terminar en octubre de 2025, en un lapso de 30 meses. Posteriormente, se realizarán pruebas y se pondrán en funcionamiento las instalaciones, con un período previsto de seis meses, lo que indica que la operación debería comenzar en abril de 2026. Una vez entregado, se prevé un período de operación y mantenimiento de 22 años, con la

primera revisión programada para octubre de 2047. Esta revisión tendría una duración aproximada de seis meses, finalizando en abril de 2048, momento en el que concluiría la concesión.(El Nuevo Siglo, 2024).

Basándonos en lo anterior, en este capítulo exploraremos las generalidades del proyecto Regiotram de Occidente con el objetivo de comprender sus características principales. Esto nos permitirá realizar un estudio detallado del proyecto para aplicar correctamente la metodología propuesta en este documento. Comenzaremos con una descripción general del proyecto, resaltando sus objetivos y alcance, así como también detallaremos las características principales del corredor ferroviario, como su extensión, ubicación geográfica y puntos de conexión clave.

Además, profundizaremos en los aspectos fundamentales del diseño geométrico y de la superestructura de la vía. Analizaremos las especificaciones técnicas utilizadas en la planificación y construcción de la infraestructura ferroviaria, detallando el tipo de vías, travesías y otros elementos estructurales relevantes. También proporcionaremos una visión general del material rodante que se empleará en el proyecto, describiendo las características técnicas y funcionales de los trenes y otros vehículos ferroviarios previstos para su implementación en el sistema.

6.1.1. Antecedentes.

La idea del proyecto del Regiotram de Occidente surge por el análisis del panorama de movilidad que enfrenta la ciudad de Bogotá D.C. , donde se revela varios problemas significativos en materia de transporte. Entre ellos, se destaca el tiempo requerido para los desplazamientos, la obsolescencia del plan de movilidad regional, el estado deteriorado de la infraestructura vial y el crecimiento en la demanda de transporte. Datos recopilados por la Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá entre 2011 y 2015 muestran cambios en las preferencias de transporte, con una disminución en el uso del transporte público colectivo y un aumento en la utilización de vehículos particulares. Este cambio de preferencias se atribuye al deterioro en las condiciones del transporte público, con una reducción en la velocidad promedio y un aumento en el tiempo de desplazamiento.(Izaquita, 2020).

En cuanto al estado de los corredores viales, el corredor de la Calle 13 se destaca como un eje crucial de conexión entre Bogotá y los municipios del borde occidental. Sin embargo, presenta problemas de congestión debido al alto tráfico de vehículos de carga y transporte

público, así como a la falta de infraestructura adecuada. La demanda de transporte por este corredor es significativa, representando aproximadamente el 25% de la población de la capital. La velocidad promedio en horas pico es considerablemente más baja que la deseada, lo que resulta en tiempos de viaje prolongados y pérdidas de productividad significativas para la sociedad.(Izaquita, 2020).

Los problemas del corredor también se atribuyen a la ineficiencia en la planificación de las rutas de transporte público existentes, que están dispersas y tienen una capacidad limitada. Además, la obsolescencia del sistema de transporte público y la alta informalidad contribuyen a la falta de eficiencia y a la insatisfacción de los usuarios. Estos problemas subrayan la necesidad urgente de intervenciones para mejorar la movilidad en la región y justifican la implementación del proyecto RegioTram de Occidente como una medida para abordar estos desafíos.

6.1.2. Descripción general del proyecto

El Proyecto del Regiotram de Occidente se presenta como una iniciativa estratégica en el ámbito de la movilidad, destinada a establecer un vínculo eficaz entre Bogotá y la Sabana de Occidente. En su fase inicial, el trazado planificado abarca una longitud de 39,64 km, con vías dobles de ancho estándar (1435 mm). Esta infraestructura se divide en 25,04 km en zonas suburbanas y 14,7 km en áreas urbanas, y se prevé la construcción y operación de ocho estaciones en la zona suburbana y nueve en el área urbana de Bogotá.

El sistema del Regiotram de Occidente se configura como un sistema Tren-Tram, adoptando un comportamiento tipo tranviario en el centro de Bogotá y un comportamiento tipo cercanías en las zonas suburbanas. (EGIS et al., 2019).

El objetivo primordial del proyecto es facilitar la movilidad de aproximadamente 125.690 pasajeros diarios al momento de su entrada en operación. Este sistema de transporte ferroviario se desempeñará como un tren de cercanías en las zonas suburbanas y como un tranvía en las áreas urbanas. Por consiguiente, el equipo rodante ha sido diseñado y clasificado específicamente como un tren-tram, adaptado para satisfacer las necesidades y condiciones particulares de ambas áreas de operación.(EGIS et al., 2019)

6.1.3. Ubicación geográfica del proyecto

El proyecto se desplegará a lo largo del corredor existente del tren de occidente, abarcando una longitud total de 39,64 km, con el objetivo de establecer una conexión directa entre la ciudad de Bogotá y los municipios de Funza, Mosquera, Madrid y, finalmente, Facatativá. Este trayecto, alineado de manera paralela a las calles 26 y 13 que atraviesan la urbe de Bogotá de oriente a occidente, se designará como el corredor principal o central. Esta ruta capitalizará la infraestructura ferroviaria existente, que se extiende desde el PK0+900 al PK39+553.(EGIS et al., 2019).

Asimismo, se contempla la edificación de un ramal que conectará con el futuro Metro de la ciudad, un proyecto actualmente en curso. Este ramal se proyecta para partir del corredor ferroviario existente, ubicado en proximidades de la Diagonal 19ª y la Carrera 19, y se extenderá hasta enlazarse con la estación de la primera línea del metro de Bogotá, situada cerca de la intersección de la Calle 26 con la Avenida Caracas. Este ramal aprovechará el espacio disponible en las vías existentes entre estos dos puntos. En la siguiente figura, se presenta el trazado detallado del proyecto del Regiotram de Occidente, abarcando los municipios del occidente de la Sabana de Bogotá y el Distrito Capital.(EGIS et al., 2019).

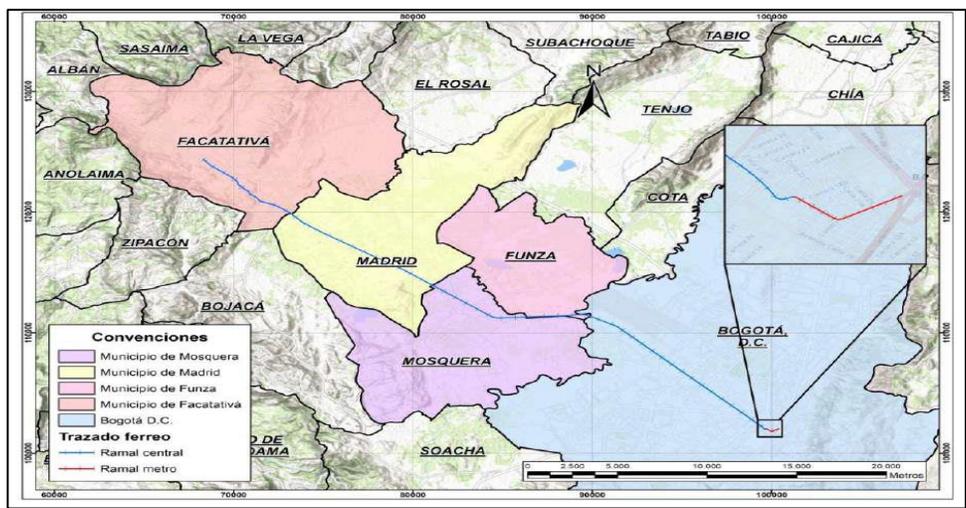


Figura 11. Ubicación geográfica del trazado ferroviario del Proyecto Regiotram de Occidente. Fuente: (EGIS et al., 2019)

6.1.4. Caracterización del corredor.

El corredor del proyecto se divide en dos tramos, como se mencionó anteriormente. El primero es el Ramal Metro, que comienza en la Carrera 17, en la intersección con la calle

25, marcado como PK0+000. Desde este punto, sigue por las vías del barrio de Santa Fe hasta que finalmente se une al otro tramo del proyecto, conocido como Corredor Principal. Este último se inicia en la Diagonal 19, en la intersección con la Carrera 19. A partir de este punto, el corredor continúa por la franja existente del antiguo Tren de Occidente, extendiéndose hasta llegar al Municipio de Facatativá, situado en el PK 39+660.(EGIS et al., 2019)

6.1.4.1. Ramal Metro

Dentro de las ordenanzas dispuestas por la Alcaldía (Ayuntamiento) de Bogotá en el año 2017, se estableció la importancia de fomentar la integración entre el proyecto del Regiotram de Occidente y el Sistema Integrado de Transporte Público de la ciudad, especialmente con la Primera Línea del Metro de Bogotá (PLMB). Esta integración permitirá que los pasajeros utilicen este medio de transporte para desplazarse masivamente desde el centro de la ciudad hasta los municipios de Funza, Mosquera, Madrid y Facatativá, y viceversa, promoviendo así la conectividad de pasajeros entre la Sabana de Occidente y el Distrito Capital.(EGIS et al., 2019).

El ramal hacia el Metro cumple la función de conectar el corredor Principal desde la intersección de la Avenida del Ferrocarril (Diagonal 19^a) con la Carrera 19 hasta la zona de integración de la futura estación del Metro en la PLMB, propuesta en la Carrera 17 con la Calle 25. La longitud de este ramal es de 1,03 km, lo que representa el 2,6% del total del trayecto del proyecto.(EGIS et al., 2019).

El trazado propuesto para este ramal se ha definido como una vía férrea que cumple con las condiciones de un tranvía urbano en cuanto a dimensiones de secciones y radios de curvatura necesarios para su implementación y operación. Esto garantiza que cumple con las recomendaciones técnicas en términos de tráfico y movilidad establecidas por la Secretaría de Movilidad de la ciudad de Bogotá.(EGIS et al., 2019).



Figura 12. Trazado Ramal Metro. Fuente: (EGIS et al., 2019)

6.1.4.2. Corredor Principal

El trazado del Corredor Principal comienza en la intersección de la Calle 22 (Av. Ferrocarril) con la Carrera 19, en el barrio Santa Fe, y atraviesa la ciudad de Oriente a Occidente hasta alcanzar el límite de la ciudad. A lo largo de su recorrido, cruza varias localidades, incluyendo Los Mártires, Puente Aranda, Teusaquillo y Fontibón. A continuación, se presentarán figuras que ilustran cómo la intervención del proyecto coincide exactamente con la franja de las antiguas vías del Tren de Occidente.



Figura 13. Situación actual de las antiguas vías del Tren de Occidente. Fuente: (EGIS et al., 2019)



Figura 14. Empalme del corredor principal con el Ramal Metro. Fuente: (EGIS et al., 2019).

El corredor discurre en general por el separador central de la Avenida del Ferrocarril, donde se contempla que la sección vial según el Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá (POT). (Pimentel Irigoyen, 2023), presente una configuración una avenida tipo V2 con 60 m de ancho, la cual destina una franja amplia para el sistema férreo, tal como se muestra en la siguiente figura:

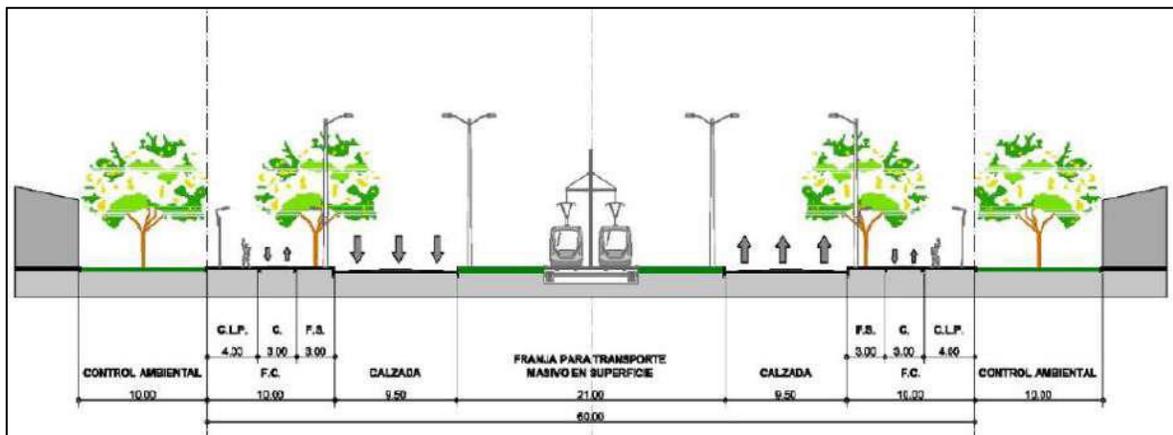


Figura 15. Sección transversal tipo del corredor Principal del Regiotram de Occidente. Fuente: (EGIS et al., 2019)

El corredor del antiguo tren de occidente cuenta con un ancho de vía de 914 mm y era de uso bidireccional. En su época de funcionamiento, este tren, utilizado tanto para el transporte de carga como de pasajeros, mayormente operaba sobre vías de balasto. El proyecto del Regiotram de Occidente tiene como objetivo aprovechar la franja destinada al transporte ferroviario conservada desde la operación del antiguo sistema del tren de occidente, pero con una renovación completa de las antiguas vías. Esto incluye el cambio

del ancho de vía, que pasará a ser de ancho internacional, es decir, 1435 mm. Además, se contempla utilizar módulos de caucho entre los carriles y rieles para los cruces a nivel.

6.1.5. Plan de operación

6.1.5.1. Velocidades de operación

El proyecto Regiotram de Occidente ha establecido las velocidades máximas permitidas en función de las características geométricas de la vía y el entorno de los tramos. Para lograr esto, los estructuradores del proyecto han realizado esta clasificación con base a la evaluación de diversos factores como curvas, pendientes, áreas urbanas y rurales, entre otros. En base a estos análisis, el proyecto se ha estructurado con las siguientes velocidades(EGIS et al., 2019):

- **Ramal Metro:**
 - Alineamientos rectos: 50 km/h
 - Curvas cerradas (Radio entre 30 a 40 m): 15 km/h
 - Cruces semafóricos: 30 km/h
- **Zona Bogotá (Cuando el proyecto se ubica sobre el derecho de la vía existente con implantación segregada):**
 - Velocidad máxima: Entre 50 a 70 km/h
 - En los cruces a nivel: Velocidad máxima permitida de 50 km/h
- **Zona de la Sabana:**
 - Velocidad máxima: Entre 50 a 70 km/h
 - En los cruces a nivel: Velocidad máxima permitida de 50 km/h

6.1.6. Diseño geométrico del corredor

6.1.6.1. Parámetros del diseño geométrico.

En el presente apartado, se proporciona un breve resumen de los parámetros de diseño utilizados por el estructurador del proyecto Regiotram de Occidente para el diseño geométrico del corredor ferroviario. Estos parámetros han sido definidos con el propósito de garantizar un alto nivel de seguridad y comodidad para los pasajeros, y sirven como base para el diseño integral del proyecto. Además, permiten establecer la velocidad máxima de circulación teórica y dimensionar las curvas de transición/acuerdos tanto en planta como

en alzado. La información presentada se ha obtenido del Documento de Estructuración Técnica del Proyecto Regiotram de Occidente. (EGIS et al., 2019).

A continuación, se mostrará los parámetros obtenidos del Documento de Estructuración Técnica del Proyecto:

Parámetro	Unidad	Valor			
		General	En placa	En balasto	Taller, etc.
Parámetros generales					
Ancho de vía	mm	1435			
Velocidad máxima en entorno urbano	km/h	70			
Velocidad máxima en entorno interurbano	km/h	100			
Insuficiencia de peralte máxima	mm	100			
Aceleración transversal sin compensar correspondiente	m/s ²	65			
Sobre aceleración máxima	m/s ³	0.4			
Rampa de peralte deseable	mm/m	2			
Rampa de peralte excepcional	mm/m	3			
Trazado en planta					
Radio mínimo deseable	m		30	350	30
Radio mínimo excepcional	m		25		25
Longitud mínima de alineación recta entre dos radios de curvatura contraria, con radios < 200m	m		10		
Longitud mínima de alineación recta (V en km/h)				V/2	
Longitud mínima de clotoide deseable	m		12	20	0
Longitud mínima de clotoide excepcional	m		7	15	
Peralte máximo (en acuerdo con el drenaje y la topografía)	mm		60	100	0
Peralte máximo en cruce (en acuerdo con el drenaje)	mm	30			
Trazado en alzado					
Aceleración vertical	m/s ²	0.22			
Radio vertical mínimo deseable (cresta y valle)	m	500			
Pendiente máxima	%		5	4	4
Máxima pendiente en 100 m	%		6		
Pendiente equivalente P pendiente (%), con R Radio en planta (m) y Pmax pendiente máxima (%)	%	P+80/R < Pmax			

Figura 16. Parámetros del diseño del trazado en planta y alzado. Fuente: (EGIS et al., 2019)

Parámetro	Unidad	Valor			
		General	En placa	En balasto	Taller, etc.
Parámetros en estaciones					
Longitud de plataforma	m	120			
Distancia eje-borde de plataforma	m	1.375			
Altura de plataforma	mm	300			
Radio mínimo en plataforma	m	700			
Acuerdo vertical mínimo (radio parabólico)	m	3000			
Pendiente máxima de la rampa de acceso a la plataforma*	%	10			
Pendiente excepcional de la rampa de acceso a la plataforma*	%	12			

Figura 17. Parámetros de diseño de estaciones del Proyecto Regiotram de Occidente. Fuente:(EGIS et al., 2019).

6.1.6.2. Gálidos y secciones transversales.

La definición de los gálidos del proyecto se ha realizado considerando la selección del material móvil y sus características, como el ancho de la caja, longitud, número de coches y otras variables relevantes. Es importante destacar que la información proporcionada en este documento se deriva del Documento de Estructuración Técnica del Proyecto Regiotram de Occidente. Es importante señalar que, al momento de la elaboración de dicho documento, aún no se ha definido el tipo de material móvil específico que se utilizará en el proyecto. En este contexto, se ha establecido un envolvente geométrico con los gálidos de vehículos tipo tren ligero como referencia inicial. (EGIS et al., 2019)

Este enfoque permite una planificación preliminar del diseño geométrico del corredor ferroviario, brindando una base sólida para la futura integración del material móvil seleccionado. Asimismo, facilita la evaluación de la viabilidad técnica y operativa del proyecto, al tiempo que se garantiza el cumplimiento de los estándares de seguridad y comodidad para los usuarios.

- **Gálidos en recta:**

El proyecto contempla **un gálibo estático (ancho) de 2,65 m**. A partir de las dimensiones y tablas de gálidos dinámicos de los materiales móviles tipo tren ligero que pueden adaptarse al proyecto se establece un **gálibo dinámico (GD) de 2.95 m** y a partir de este gálibo dinámico, se obtiene un gálibo libre de obstáculos (GLO) añadiendo determinados sobreanchos. (EGIS et al., 2019). A continuación, se muestra en la siguiente figura los gálidos del material móvil en recta:

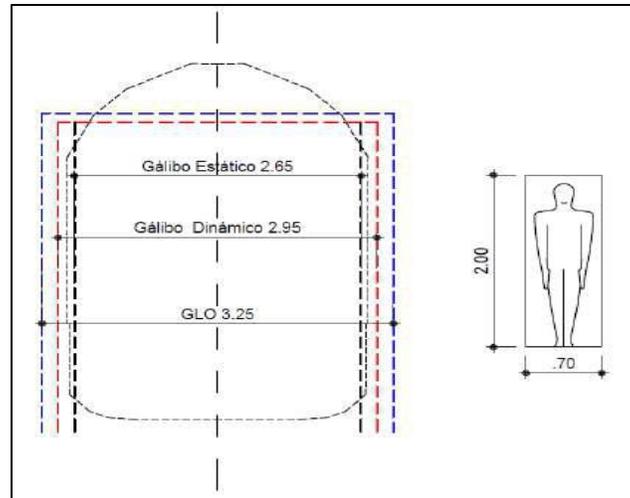


Figura 18. Gálibos en recta. Fuente:(EGIS et al., 2019)

- **Gálibos dinámicos en curva:**

El Proyecto Regiotram de Occidente ha definido los gálibos dinámicos en curva basándose en las fórmulas geométricas especificadas en el documento UIC 505-1, teniendo en cuenta el desgaste máximo de los rieles y las ruedas, así como los juegos laterales máximos. Sin embargo, es importante señalar que el análisis realizado por el Estructurador del proyecto no contempló los efectos del viento ni los esfuerzos laterales en relación con los gálibos. Además, se han considerado las tolerancias de la caja, el movimiento lateral y la posición asimétrica de la vía como parte integral de este proceso de definición de gálibos dinámicos en curva.(EGIS et al., 2019).

A continuación, se presenta en la siguiente tabla obtenida del Documento de Estructuración Técnica del Proyecto Regiotram de Occidente los gálibos dinámicos envolvente en curva, considerados en la estructuración del proyecto:

Tabla 8. Gálidos dinámicos en curva Proyecto Regiotram de Occidente. Fuente:(EGIS et al., 2019)

Radio en planta (m)	Gálido dinámico interior (mm)	Gálido dinámico exterior (mm)
25	2238	2005
30	1984	1900
35	1910	1781
40	1855	1765
50	1779	1729
60	1728	1707
70	1692	1691
80	1664	1678
90	1643	1669
100	1626	1661
150	1576	1638
200	1551	1617
300	1526	1587
400	1513	1561
500	1505	1564
1000	1490	1552
2000	1483	1548
recta	1475	1475

- **Sobreanchos y gálidos límite de obstáculos**

En este apartado, presentaremos el cálculo del entre eje necesario y el ancho mínimo total proyectado para cada radio, tomando en consideración una lámina de aire de 150 mm obtenido del “Documento de Estructuración Técnica del Proyecto Regiotram de Occidente”. En dicho documento se establece el entre eje necesario para cada radio, así como el ancho total proyectado, particularmente en secciones con poste de catenaria central. En este último caso, el Estructurador incluye la anchura del poste de 400 mm en el cálculo del entre eje y del ancho total. Además, se presenta la restricción de instalación de postes centrales en curvas de radio inferior a 120 m. En la siguiente tabla presentará los resultados obtenidos en el Documento de Estructuración Técnica.(EGIS et al., 2019).

Tabla 9. Gálidos de acuerdo a radio de curva Proyecto Regiotram de Occidente. Fuente:(EGIS et al., 2019)

Radio (m)	Gálido dinámico (mm)		Poste catenaria central (mm)	Lámina de aire (mm)	Gálido libre de Obstaculo (GLO) (mm)		Mínimo intereje (mm)	Mínimo gálido libre de obstáculo via doble (mm)
	Interior	Exterior			Interior	Exterior		
25	2 238	2 005	no postes centrales	150	2 388	2 155	4 543	9 086
30	1 984	1 900		150	2 134	2 050	4 184	8 368
35	1 910	1 781		150	2 060	1 931	3 991	7 982
40	1 855	1 765		150	2 005	1 915	3 920	7 840
50	1 779	1 729		150	1 929	1 879	3 808	7 616
60	1 728	1 707		150	1 878	1 857	3 735	7 470
70	1 692	1 691		150	1 842	1 841	3 683	7 366
80	1 664	1 678		150	1 814	1 828	3 642	7 284
90	1 643	1 669		150	1 793	1 819	3 612	7 224
100	1 626	1 661		150	1 776	1 811	3 587	7 174
con poste central								
150	1 576	1 638	400	150	1 726	1 788	3 914	7 428
200	1 551	1 617	400	150	1 701	1 767	3 868	7 336
300	1 526	1 587	400	150	1 676	1 737	3 813	7 226
400	1 513	1 561	400	150	1 663	1 711	3 774	7 148
500	1 505	1 564	400	150	1 655	1 714	3 769	7 138
1 000	1 490	1 552	400	150	1 640	1 702	3 742	7 084
2 000	1 483	1 548	400	150	1 633	1 698	3 731	7 062
Recta	1 475	1 475	400	150	1 625	1 625	3 650	6 900

- **Gálido vertical**

Basándonos en los datos proporcionados por el Documento de Estructuración Técnica del Proyecto Regiotram de Occidente, se definió un gálido vertical de 6,5 metros desde el nivel del carril. La determinación del gálido vertical se ajusta a las diversas condiciones presentes en la red, considerando especialmente la altura necesaria para la catenaria. Este parámetro es fundamental para garantizar el adecuado espacio vertical disponible a lo largo de la infraestructura ferroviaria, asegurando así el correcto funcionamiento del sistema eléctrico y la seguridad de la operación. (EGIS et al., 2019)

6.1.6.3. Secciones transversales tipo.

En este apartado, se expondrán las secciones tipo obtenidas del Documento de Estructuración Técnica del Proyecto Regiotram de Occidente. Aquí se detallarán los gálidos previamente descritos, así como también se presentarán la plataforma ferroviaria y la superestructura de la vía.

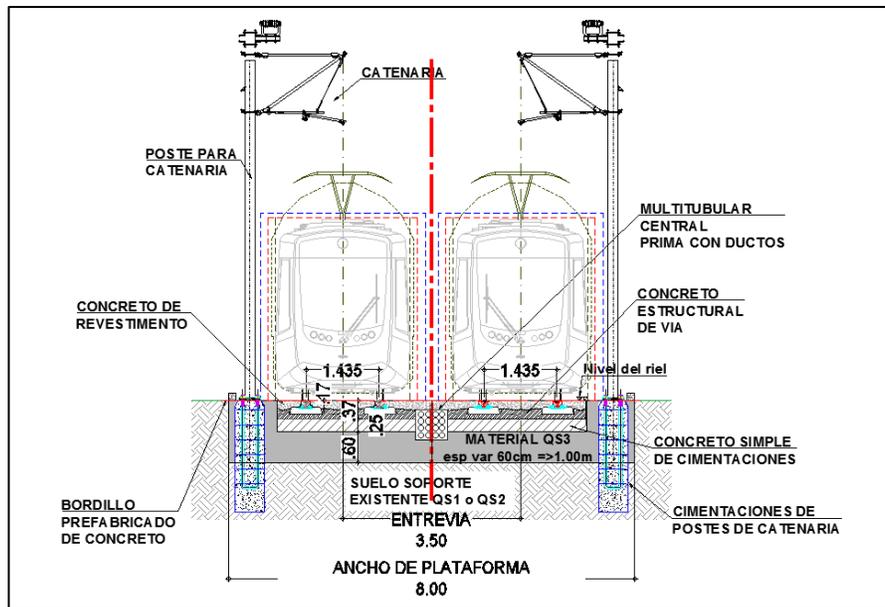


Figura 19. Sección tipo de vía doble en placa. Fuente: (EGIS et al., 2019)

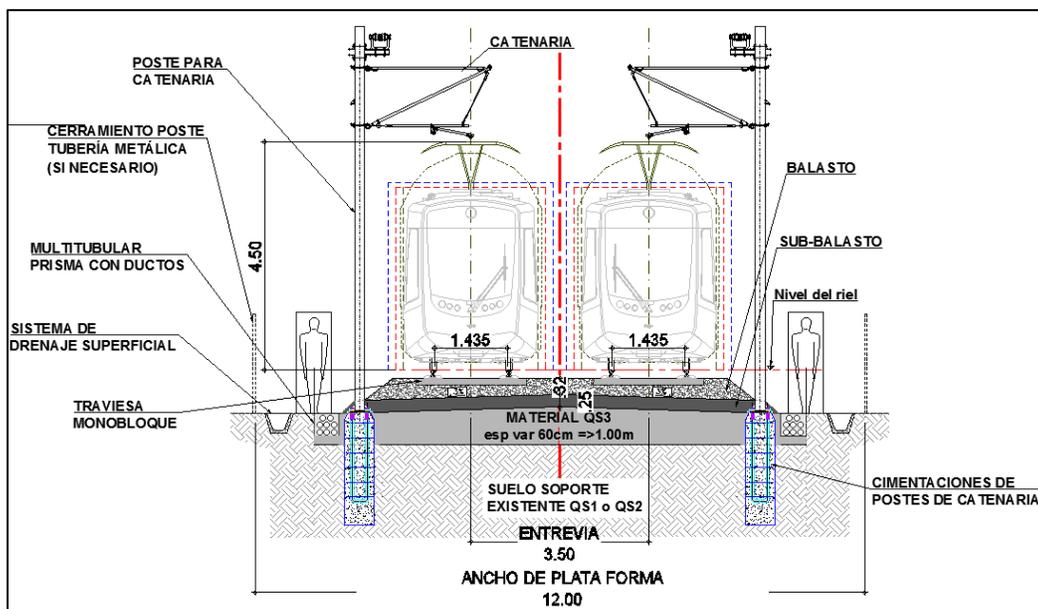


Figura 20. Sección tipo vía doble sobre balasto. Fuente:(EGIS et al., 2019)

6.1.7. Diseño general Superestructura de vía

De acuerdo con lo expuesto en el proyecto de rehabilitación de la infraestructura ferroviaria del Regiotram de Occidente ha identificado una necesidad urgente de sustituir por completo la superestructura existente de la vía sencilla, incluyendo rieles, travesías y balasto, así como las camadas de plataforma o suelo soporte por debajo de la vía actual perteneciente al antiguo Ferrocarril de Occidente. Esta decisión se fundamenta en el deterioro significativo

de la infraestructura existente, confirmado tanto por el originador del proyecto como por un estudio específico de geotecnia mostrado en el documento base de la presente información “Documento de Estructuración Técnica del Regiotram de Occidente”. (EGIS et al., 2019).



Figura 21. Estado actual vías del antiguo Ferrocarril de Occidente: Fuente:(EGIS et al., 2019)

De acuerdo a lo establecido el corredor presentará dos tipologías de superestructura de vías las cuales son:

- Vía en placa
- Vía sobre balasto

A continuación, explicaremos de forma resumida los principales aspectos de cada tipología:

6.1.7.1. Vía en placa

El diseño de la vía en placa para el proyecto del Regiotram de Occidente se basa en la utilización de travesías de bloque en concreto postensado, las cuales brindan una alta resistencia para soportar las cargas generadas por el paso de los trenes. Estas travesías están enclavadas en una capa de concreto simple de alta resistencia, que varía entre 35 y 40 Mpa, para absorber y distribuir eficientemente los esfuerzos transmitidos. Esta estructura se apoya a su vez en una capa de cimentaciones de concreto de baja resistencia, aproximadamente entre 20 y 25 Mpa, que transfiere las cargas hacia la plataforma de soporte.(EGIS et al., 2019)

Para garantizar la capacidad portante adecuada de la plataforma, el material de relleno QS3 debe ser compactado para lograr un valor de resistencia a la compresión (EV2) de al menos 30 Mpa. En cuanto a la vía en placa, se especifica el uso de carriles del tipo 41GP13 o Ri54G2, así como traviesas de bloque en concreto armado pretensado, con una altura reducida para optimizar los espesores de concreto en las capas de soporte. Estas traviesas están pre-equipadas con insertos para la instalación de tornillos de ajuste altimétrico y tiras para el ajuste del trazado, lo que facilita la corrección y mantenimiento de la geometría de la vía.(EGIS et al., 2019)

6.1.7.2. Vía sobre balasto.

La vía en balasto para el proyecto del Regiotram de Occidente se caracteriza por la utilización de traviesas monobloque de concreto armado pretensado para soportar los rieles. Estas traviesas se asientan sobre una capa de balasto que cumple la función de absorber y distribuir los esfuerzos generados por el paso de los trenes, transmitiéndolos posteriormente a la plataforma compactada.(EGIS et al., 2019)

El espesor del balasto bajo las traviesas varía según la carga por eje de los trenes y la velocidad de operación, adaptándose para garantizar una adecuada capacidad portante. Esta capa de balasto se apoya a su vez en una plataforma compactada, compuesta por sub-balasto y una capa de forma, la cual está nivelada con una pendiente transversal para facilitar el drenaje superficial y prevenir acumulaciones de agua.(EGIS et al., 2019)

Las especificaciones técnicas para la vía en balasto se encuentran detalladas en el documento “Manual Férreo de Especificaciones Técnicas – Parte 1 – Versión 0”, emitido por el Ministerio de Transporte a través de la Dirección de Infraestructura. (D. Castillo & Alvarez, Eduardo, 2013). Entre las consideraciones para esta vía se incluye el uso del perfil de riel 50E6, clase R260, así como la recomendación de utilizar traviesas monobloque de concreto pretensado, evitando el uso de durmientes bloques debido al desgaste acelerado que pueden ocasionar en el balasto.(EGIS et al., 2019).

6.1.8. Material Rodante

A continuación, se presentará las principales características del material rodante, las cuales fueron obtenidas del Capítulo 4.6 del “Documento de Estructuración Técnica del Proyecto Regiotram de Occidente”, las cuales fueron definidas a partir de las necesidades de la demanda y características propias del proyecto.(EGIS et al., 2019). Dado lo anterior se mostrarán las características principales del material rodante en la siguiente tabla:

Tabla 10. Características principales del Material Rodante. Elaboración propia a partir de (EGIS et al., 2019)

Gálibo	MR de 2,65 m de ancho
Longitud	50 m
Unidades posibles	UM2
Nivel de tensión de tracción	1500Vcc
Velocidad máxima permitida	Entre 70 y 100 Km/h
Capacidad	884 pasajeros en su configuración máxima (EL6)
Bogíes	Pivotantes
NMV<2.5	En todas condiciones de carga
El cambio al peralte	4 por millas
Perfil de ruedas y rieles	Según normas europeas
Distancia entre ruedas	Al interior 1380 mm
Suspensión	Suspensiones primaria y secundaria
Jerk	Según normas europeas
Piso bajo	Al mínimo a 70%
Radio mínimo de curvas	25 m
Peralte no compensado	Máximo 1 m/s ² y en servicio normal 0,65 m/s ²
Aceleración máxima	1.1 m/s ²
Aceleración media 0-100 km/h	0,6 m/s ²
Número de puertas	> 1/10 m de vehículo
Longitud puertas	> 150 cm/10 m de vehículo
Porcentaje de asientos/capacidad total	> 15%

6.1.9. Cruces a nivel del Proyecto Regiotram de Occidente

En este subcapítulo, se expondrá el análisis de los cruces a nivel realizado por el equipo estructurador del proyecto del Regiotram de Occidente en el Documento de Estructuración Técnica del mismo. Esta información es de suma importancia, debido a que nos permitirá

identificar los pasos a nivel incluidos en el corredor ferroviario, comprender sus principales características geométricas y estudiar el enfoque que se les dará al entrar en operación el servicio ferroviario.

La recopilación detallada de datos sobre los cruces a nivel proporcionará la base inicial para la aplicación de la metodología desarrollada en este documento. Esto nos permitirá obtener un conocimiento específico de cada uno de los cruces a nivel del proyecto y llevar a cabo un análisis crítico sobre las medidas de seguridad y protección que se pretenden implementar en ellos.

A continuación, se presenta en la siguiente tabla un listado de los cruces o pasos a nivel contemplados dentro del Proyecto Constructivo del Regiotram de Occidente. En esta tabla se detallarán aspectos fundamentales, tales como el propósito de uso de cada cruce, la velocidad de operación del tren en dichos pasos, las condiciones de estructuración y el tipo de protección a ser implementado.

Tabla 11. Inventario de pasos a nivel (PPNN) considerados dentro de la estructuración del Proyecto Constructivo del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia a partir de (EGIS et al., 2019)

PR	DIRECCIÓN	CONDICIONES ACTUALES	CONDICIONES ESTRUCTURACIÓN	SISTEMA DE PROTECCIÓN	VELOCIDAD (KM/H)
00+000	ESTACIÓN CALLE 26	-			30
00+100	ESTACIÓN CALLE 26	-			30
00+160	CR17xCI24	NIVEL	ABIERTO	SEMAFORO	30
00+450	CR17XCL22	NIVEL	ABIERTO	SEMAFORO	30
00+830	CR19XCL22	NIVEL	ABIERTO	SEMAFORO	30
00+940	CR19AXDG19A	NIVEL	ABIERTO	SEMAFORO	30
01+190	CR22XDG.19 ^a	NIVEL	ABIERTO	SEMAFORO	30
01+450	CL22XCR27	NIVEL	ABIERTO	SEMIBARRERA	50
01+540	ESTACIÓN NQS (CR30)	-			35
01+680	ESTACIÓN NQS (CR30)	-			35
01+843	PUENTE (PASO A DESNIVEL AV. CARRERA 30)	-			50
01+917	PUENTE (PASO A DESNIVEL AV. CARRERA 30)	-			50
02+180	CIL22 X TV32C	NIVEL	ABIERTO	SEMIBARRERA	50
02+584	PUENTE (PASO A DESNIVEL,AMERICAS)	-			70

PR	DIRECCIÓN	CONDICIONES ACTUALES	CONDICIONES ESTRUCTURACIÓN	SISTEMA DE PROTECCIÓN	VELOCIDAD (KM/H)
02+765	PUENTE (PASO A DESNIVEL, AMERICAS)	-			70
03+230	CL22XCR40	NIVEL	ABIERTO	SEMIBARRERA	50
03+260	ESTACIÓN CR 40	-			35
03+400	ESTACIÓN CR 40	-			35
03+835	ESTACIÓN CR 50	-			35
03+975	ESTACIÓN CR 50	-			35
04+170	CL22XCR50	NIVEL	ABIERTO	BARRERAS	70
04+590	CL22XCR56	NIVEL	ABIERTO	BARRERAS	70
05+180	ESTACIÓN CR68	-			35
05+360	ESTACIÓN CR 68	-			35
05+654	PUENTE (PASO A DESNIVEL, AV CARRERA 68)	-			60
05+705	PUENTE (PASO A DESNIVEL, AV CARRERA 68)	-			60
06+315	CL22XCR68D	NIVEL	ABIERTO	BARRERAS	70
06+916	ESTACIÓN AV BOYACÁ	-			35
07+085	ESTACIÓN AV BOYACÁ	-			35
07+293	PUENTE (PASO A DESNIVEL, AV. BOYACÁ)	-			70
07+369	PUENTE (PASO A DESNIVEL, AV. BOYACÁ)	-			70
08+340	CL22 XCR81BIS	PEATONAL	ABIERTO	SEMAFORO	50
08+530	ESTACIÓN AV CALI	-			35
08+670	ESTACIÓN AV CALI	-			50
08+880	CL22XAV CALI	NIVEL	ABIERTO	SEMIBARRERA	50
09+180	CL22XCR89	PEATONAL	ABIERTO	SEMAFORO	50
09+440	CL22XCR93	NIVEL	ABIERTO	SEMIBARRERA	50
09+830	CL22XCR96C	NIVEL	ABIERTO	SEMIBARRERA	50
10+080	ESTACIÓN FONTIBON	-			35
10+220	ESTACIÓN FONTIBON	-			35
10+270	CL22 X CR97	NIVEL	ABIERTO	SEMIBARRERA	50
10+540	CL22XCR100	NIVEL	ABIERTO	SEMIBARRERA	50
10+770	CL22XCR103A	NIVEL	ABIERTO	SEMIBARRERA	50
11+130	CL22XCR106	NIVEL	ABIERTO	SEMIBARRERA	50
11+295	CL22XCR108	NIVEL	ABIERTO	SEMIBARRERA	50
11+630	CL22XCR111A	NIVEL	ABIERTO	SEMIBARRERA	50

PR	DIRECCI3N	CONDICIONES ACTUALES	CONDICIONES ESTRUCTURACI3N	SISTEMA DE PROTECCI3N	VELOCIDAD (KM/H)
11+640	ESTACI3N CATAM	-			35
11+800	ESTACI3N CATAM	-			35
12+080	CL22XCR116	NIVEL	ABIERTO	BARRERAS	70
13+430	CL22XCR129	NIVEL	ABIERTO	BARRERAS	70
14+440	CL22XCR138A	NIVEL	ABIERTO	BARRERAS	70
15+960	VIA LA FLORIDA	NIVEL	ABIERTO	BARRERAS	100
16+100	ESTACI3N FUNZA 2 LA RAMADA	-			35
16+240	ESTACI3N FUNZA 2 LA RAMADA	-			35
16+830	PARQUE EMPRESARIAL DE OCCIDENTE	NIVEL	ABIERTO	BARRERAS	100
17+260	CL 25 FUNZA	NIVEL	ABIERTO	BARRERAS	100
17+515	ACCESO PARQUE INDUSTRIAL SAN CARLOS 2	NIVEL	ABIERTO	BARRERAS	100
18+000	ESTACI3N FUNZA	-			35
18+140	ESTACI3N FUNZA	-			35
18+190	CL 15 FUNZA	NIVEL	ABIERTO	SEMIBARRERA	50
19+120	ACCESO CLUB DEPORTIVO LA ESTANCIA	NIVEL	ABIERTO	BARRERAS	70
19+610	ACCESO A CIUDADELA RESIDENCIAL	NIVEL	ABIERTO	BARRERAS	100
20+820	ESTACI3N MOSQUERA CR 5 ESTE	-			35
20+960	ESTACI3N MOSQUERA CR 5 ESTE	-			35
20+980	VIA FUNZA	NIVEL	ABIERTO	SEMIBARRERA	50
21+590	CR 3	NIVEL	ABIERTO	SEMIBARRERA	50
21+675	ESTACI3N MOSQUERA	-			35
21+815	ESTACI3N MOSQUERA	-			35
21+825	CR5	NIVEL	ABIERTO	SEMIBARRERA	50
22+615	ACCESO A BODEGAS	NIVEL	ABIERTO	BARRERAS	100
24+350	ACCESO A CIUDADELA RESIDENCIAL	NIVEL	ABIERTO	BARRERAS	100
24+770	ESTACI3N MADRID 2	-			35

PR	DIRECCIÓN	CONDICIONES ACTUALES	CONDICIONES ESTRUCTURACIÓN	SISTEMA DE PROTECCIÓN	VELOCIDAD (KM/H)
24+910	ESTACIÓN MADRID 2	-			35
25+320	CR 2E	NIVEL	ABIERTO	SEMIBARRERA	50
25+730	CR 1	NIVEL	ABIERTO	SEMIBARRERA	50
26+160	CR5	PEATONAL	ABIERTO	SEMAFORO	30
26+320	CR6	NIVEL	ABIERTO	SEMAFORO	30
26+340	ESTACIÓN MADRID	-			35
26+480	ESTACIÓN MADRID	-			35
26+870	CR 11	NIVEL	ABIERTO	BARRERAS	100
28+720	CRUCE ENTRE PREDIOS	NIVEL	ABIERTO	BARRERAS	100
30+110	CRUCE ENTRE PREDIOS	NIVEL	ABIERTO	BARRERAS	100
30+860	CRUCE ENTRE PREDIOS	NIVEL	ABIERTO	BARRERAS	100
31+320	CRUCE ENTRE PREDIOS	NIVEL	ABIERTO	BARRERAS	100
32+250	CRUCE ENTRE PREDIOS	NIVEL	ABIERTO	BARRERAS	100
34+570	ACCESO A PREDIO	NIVEL	ABIERTO	BARRERAS	100
35+530	ACCESO A PREDIO	NIVEL	ABIERTO	BARRERAS	100
35+800	ESTACIÓN EL CORZO	-			35
35+940	ESTACIÓN EL CORZO	-			35
35+960	VÍA FACATATIVÁ-ZIPACÓN	NIVEL	ABIERTO	SEMAFORO	30
36+130	PEATONAL	PEATONAL	ABIERTO	SEMAFORO	30
36+460	CL3S	NIVEL	ABIERTO	SEMAFORO	30
36+660	CL5S	NIVEL	ABIERTO	SEMAFORO	30
36+860	-	NIVEL	ABIERTO	SEMAFORO	30
37+240	-	NIVEL	ABIERTO	SEMAFORO	30
37+800	ESTRUCTURA CAMINO (VEHICULOS)	-			70
39+040	CL1 ESTE	NIVEL	ABIERTO	BARRERAS	70
39+500	ESTACIÓN FACTATIVÁ	-			35
39+660	ESTACIÓN FACTATIVÁ	-			35

6.2. Implementación de la Metodología para la determinación del nivel de seguridad en los pasos a nivel (PPNN)

Una vez que hemos establecido en el capítulo 6.1 las características principales del Proyecto Regiotram De Occidente, lo que nos ha proporcionado un conocimiento general del proyecto en cuanto a sus atributos principales, procederemos a desarrollar en los siguientes apartados la aplicación práctica de la metodología desarrollada en el capítulo 5 de este escrito. El objetivo es llevar a cabo un análisis objetivo y técnico de los cruces a nivel proyectados dentro del corredor ferroviario para determinar el nivel mínimo de protección requerido, evaluar la criticidad de cada uno de los pasos a nivel, determinar su nivel de peligrosidad y, con base en estos hallazgos, identificar posibles acciones de mejora para cada uno de ellos.

6.2.1. Identificación de los pasos a nivel a analizar.

El Proyecto Constructivo del Corredor Ferroviario del Regiotram de Occidente contempla la operación ferroviaria en conjunción con múltiples pasos a nivel a lo largo de su recorrido, como se detalla en la tabla 11 del presente trabajo. Dada la extensión del corredor desde Bogotá hasta el municipio de Facatativá, Cundinamarca, resulta esencial entablar comunicación con los respectivos ayuntamientos o alcaldías de los municipios atravesados por el corredor para recopilar información pertinente, como registros de accidentes y estudios de tráfico en los cruces.

Inicialmente, se intentó contactar con los ayuntamientos de Facatativá, Mosquera, Madrid y Funza, sin embargo, no se logró obtener información sobre volúmenes de tráfico y registros de accidentes en los pasos a nivel. Sin embargo, gracias a la colaboración de la Empresa Férrea Regional S.A.S., encargada del proyecto, se accedió a las Memorias y Anexos del Proyecto Constructivo del Regiotram, así como a datos abiertos para la ciudadanía. Además, se obtuvo información relevante a través de la Secretaría Distrital de Movilidad de la ciudad de Bogotá, que proporcionó el estudio de movilidad realizado para el proyecto del Regiotram de Occidente, detallando volúmenes de tráfico, características geométricas de los pasos a nivel, historial de accidentes y medidas de mejora para la circulación vehicular y peatonal en las intersecciones.

Por consiguiente, este documento se centrará en aplicar la metodología desarrollada en los pasos a nivel ubicados dentro del Distrito de la Ciudad de Bogotá. Se excluyen del análisis

los cruces a nivel del ramal metro, que tienen una configuración tranviaria, y aquellos pasos a nivel donde se ha planteado su supresión y la construcción posterior de cruces a diferente nivel según el documento de estructuración técnica.

Tabla 12. Inventario de PPNN ubicados dentro de la ciudad de Bogotá. Fuente Elaboración propia a partir de (EGIS et al., 2019)

Ubicación cruces a nivel		Tipo de control	Clasificación estudio de tránsito	Estructuras de cruces a des nivel contempladas en el proyecto de REGIOTRAM
Carrera	Calle			
Carrera 138 ^a	Calle 22	No tiene señalización del corredor férreo	Cruce a nivel	
Carrera 19 ^a	Diagonal 19 ^a	No tiene señalización del corredor férreo	Cruce a nivel	
Carrera 19 ^a	Calle 22	No tiene señalización del corredor férreo	Cruce a nivel	
Carrera 116	Calle 22	Señal de pare y peligro	Cruce a nivel	
Carrera 111 ^a	Calle 22	Señal de pare y peligro	Cruce a nivel	
Carrera 103 ^a	Calle 22	Señal de pare y peligro	Cruce a nivel	
Carrera 56	Calle 22	Señal de pare y peligro	Cruce a nivel	
Carrera 106	Calle 22	Señal de peligro	Cruce a nivel	
Carrera 87 ^a	Calle 22	Señal de peligro	Cruce a nivel	
Carrera 27	Calle 22	Señal de pare	Cruce a nivel	
Carrera 129	Calle 22	Semibarrera y caseta	Cruce a nivel	
Carrera 68d	Calle 22	Semibarrera y caseta	Cruce a nivel	
Carrera 40	Calle 22	Semibarrera y caseta	Cruce a nivel	
Transversa 32c	Calle 22	Semibarrera y caseta	Cruce a nivel	
Avenida Boyacá		Barrera y caseta	Cruce a nivel	Puente férreo sobre vial
Avenida 68		Barrera y caseta	Cruce a nivel	Puente férreo sobre vial
Avenida NQS		Barrera y caseta	Cruce a nivel	Puente férreo sobre vial
Carrera 17	Calle 24	Semáforo	Semaforizada	
Carrera 17	Calle 23	Semáforo	Semaforizada	
Carrera 17	Calle 22	Semáforo	Semaforizada	
Carrera 93	Calle 22	Semáforo	Semaforizada	
Carrera 100	Calle 22	Semáforo	Semaforizada	
Carrera 22	Diagonal 19 ^a	Semáforo, semibarrera y caseta	Semaforizada	

Ubicación cruces a nivel		Tipo de control	Clasificación estudio de tránsito	Estructuras de cruces a des nivel contempladas en el proyecto de REGIOTRAM
Carrera	Calle			
Avenida Américas	Calle 22	Semáforo, semibarrera y caseta	Semaforizada	Puente férreo sobre vial
Carrera 50	Calle 22	Semáforo, semibarrera y caseta	Semaforizada	
Avenida Cali	Calle 22	Semáforo, semibarrera y caseta	Semaforizada	
Carrera 96c	Calle 22	Semáforo-Señal de pare y peligro	Semaforizada	
Carrera 97	Calle 22	Semáforo-Señal de peligro	Semaforizada	

Como se puede observar en la tabla 12, se han excluido del análisis actual los pasos a nivel situados en la intersección de la Avenida Caracas con la Calle 22, Avenida NQS, Avenida Boyacá y Avenida 68. Esta exclusión se justifica por el hecho de que en el estudio de estructuración del proyecto ya se ha abordado la gestión de estas intersecciones mediante cruces a diferente nivel. Esto se debe principalmente a la importancia del tráfico vehicular que circula por estas avenidas, las cuales son vías primarias que facilitan una comunicación vital entre el norte y sur de la ciudad. Además, estas vías son parte del sistema BRT, que actualmente constituye el principal medio de transporte público de la ciudad.



Figura 22. Imagen ilustrativa paso a nivel de la Avenida NQS.

De acuerdo a lo anterior, a continuación, se presenta el inventario de cruces a nivel que serán objeto de aplicación práctica de la metodología desarrollada en este trabajo.

Tabla 13. Identificación de pasos a nivel para aplicación de la metodología propuesta. Fuente: Elaboración propia a partir de (EGIS et al., 2019)

ID	Ubicación del Cruce a nivel	Tramo	Tipo de control	Clasificación estudio de tránsito
1	Carrera 138ª/Calle 22	Corredor Principal	No tiene señalización del corredor férreo	Cruce a nivel
2	Carrera 129/Calle 22	Corredor Principal	Semibarrera y caseta	Cruce a nivel
3	Carrera 116/Calle 22	Corredor Principal	Señal de pare y peligro	Cruce a nivel
4	Carrera 111ª/Calle 22	Corredor Principal	Señal de pare y peligro	Cruce a nivel
5	Carrera 106/Calle 22	Corredor Principal	Señal de peligro	Cruce a nivel
6	Carrera 103ª/Calle 22	Corredor Principal	Señal de pare y peligro	Cruce a nivel
7	Carrera 100/Calle 22	Corredor Principal	Semáforo, semibarrera y caseta	Cruce a nivel
8	Carrera 97 /Calle 22	Corredor Principal	Semáforo-Señal de peligro	Semaforizada
9	Carrera 96c/Calle 22	Corredor Principal	Semáforo-Señal de pare y peligro	Semaforizada
10	Carrera 93/Calle 22	Corredor Principal	Semáforo	Semaforizada
11	Carrera 87ª/Calle 22	Corredor Principal	Semibarrera y caseta	Cruce a nivel
12	Avenida Cali/Calle 22	Corredor Principal	Semáforo, semibarrera y caseta	Semaforizada
13	Carrera 68d/Calle 22	Corredor Principal	Semibarrera y caseta	Cruce a nivel
14	Carrera 56/Calle 22	Corredor Principal	Semibarrera y caseta	Cruce a nivel

ID	Ubicación del Cruce a nivel	Tramo	Tipo de control	Clasificación estudio de tránsito
15	Carrera 50/Calle 22	Corredor Principal	Semáforo, semibarrera y caseta	Semaforizada
16	Carrera 40/Calle 22	Corredor Principal	Semibarrera y caseta	Cruce a nivel
17	Transversa 32c/Calle 22	Corredor Principal	Semibarrera y caseta	Cruce a nivel
18	Carrera 27/Calle 22	Corredor Principal	Semáforo, semibarrera y caseta	Cruce a nivel
19	Carrera 22/Diagonal al 19ª	Corredor Principal	Semáforo, semibarrera y caseta	Semaforizada
20	Carrera 19ª/Diagonal al 19ª	Ramal metro	No tiene señalización del corredor férreo	Cruce a nivel
21	Carrera 19ª/Calle 22	Ramal metro	Semáforo	Cruce a nivel
22	Carrera 17/Calle 22	Ramal metro	Semáforo	Semaforizada
23	Carrera 17/Calle 24	Ramal metro	Semáforo	Semaforizada

Según se detalla en la tabla 13 de este documento, los Pasos a Nivel (PPNN) que serán objeto de análisis en este estudio están identificados del 1 al 19. Estos pasos a nivel fueron señalados en el Documento de Estructuración Técnica del Proyecto como tales y están situados a lo largo del corredor principal. Este corredor, como se mencionó anteriormente, se desarrollará utilizando la actual franja de vía férrea del antiguo tren de occidente. A continuación, se presentará la ubicación geográfica de cada uno de estos pasos a nivel.

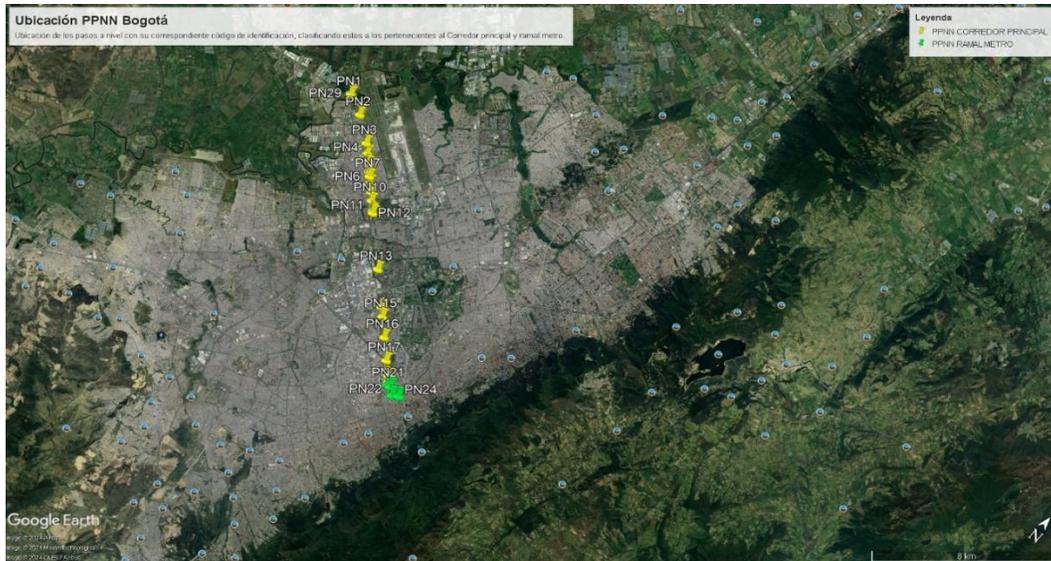


Figura 23. Ubicación geográfica de los PPNN dentro de la ciudad de Bogotá. Fuente: Elaboración propia a partir del uso de la herramienta Google Earth.

6.2.2. Determinación de las distancias de visibilidad técnica y real de los pasos a nivel del Corredor Ferroviario del Proyecto Regiotram de Occidente.

Aplicando lo descrito en el apartado 5.1.1. del presente documento, se procederá a calcular las distancias de visibilidad técnica y real de los 19 pasos a nivel del Proyecto del Regiotram de Occidente que serán objeto de análisis.

6.2.2.1. Distancia de visibilidad técnica (DVT)

Para calcular la distancia de visibilidad técnica (DVT), nos basaremos en las ecuaciones 1 y 2 detalladas en el subcapítulo 5.1.1.1 de este informe. Estas ecuaciones requieren información precisa sobre la velocidad máxima autorizada del tren y el número de vías ferroviarias en el cruce a nivel correspondiente.

Para determinar las velocidades de operación del tren en los cruces a nivel bajo estudio, nos apoyaremos en el análisis del Tráfico de Oferta y Demanda del Proyecto Regiotram de Occidente (AECOM Colombia, 2022). En particular, nos referiremos al Capítulo 12.1 de dicho estudio, titulado “Características de la operación férrea”, donde encontramos la Tabla 51 que detalla las velocidades máximas de operación en cada uno de los cruces a nivel. A

continuación, presentaremos las velocidades de operación específicas para los cruces a nivel según lo establecido en el estudio de tráfico del proyecto.

Tramo	Ubicación	Tipo Tramo	Limitación por tramo (km/h)	Prioridad Tramo	Vel. Max (km/h)
T1	Cra 17/Calle 24	Urbano Tranviario	30	75%	30
T1	Cra 17/Calle 22	Urbano Tranviario	30	75%	15
T1	Cra 19/ Calle 22	Urbano Tranviario	30	75%	15
T1	Cra 19/ Dg 19A	Urbano Tranviario	30	75%	15
T1	Cra 22 /Dg 19A	Urbano Tranviario	30	85%	50
T1	CII 22/Cra 27	Urbano Tranviario	50	85%	50
T1	Av. Calle 22/Cra 30 (NQS)	Urbano	50	100%	60
T2	CII 22/ Tr 32c	Urbano	50	85%	60
T2	Av. Américas	Urbano	70	100%	35
T2	CII 22/ Cra 40	Urbano	50	85%	60
T3	CII 22/ Cra 50	Semi-Urbano	70	85%	60
T3	CII 22/ Cra 56	Semi-Urbano	70	85%	60
T3	Av. CR 68	Semi-Urbano	60	100%	35
T3	CII 22/ Cra 68d	Semi-Urbano	70	85%	60
T3	Av. CII 22/Av. Cra 72 (Boyacá)	Semi-Urbano	70	100%	60
T4	Av. CII 22/Av. Cra 86 (Cali)	Urbano	50	85%	50
T4	CII 22/ Cra 89	Urbano	50	85%	50
T5	CII 22/ Cra 93	Urbano	50	85%	50
T5	CII 22/ Cra 96c	Urbano	50	85%	50
T5	CII 22/ Cra 97	Urbano	50	85%	50
T5	CII 22/ Cra 100	Urbano	50	85%	50
T5	CII 22/ Cra 103a	Urbano	50	85%	50

Figura 24. Velocidades de operación en los cruces a nivel del Regiotram de Occidente. Fuente: (AECOM Colombia, 2022).

Para determinar el número de vías férreas que atraviesan cada paso a nivel, nos referiremos al apartado 6.1.4 de este informe, donde se aborda la caracterización del corredor ferroviario según lo especificado en el Documento de Estructuración Técnica (EGIS et al., 2019). Según este documento, se proyecta la construcción de vía doble a lo largo de toda la extensión del proyecto, aprovechando la franja ferroviaria del antiguo Tren de Occidente. Por consiguiente, podemos inferir que cada paso a nivel estará compuesto por dos vías férreas, en consonancia con esta planificación.

Considerando lo expuesto anteriormente y aplicando las ecuaciones 1 y 2, se calculan los valores correspondientes de visibilidad técnica obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 14. Valores de visibilidad técnica para los PPNN objeto de estudio dentro del Corredor Ferroviario del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia a partir de (AECOM Colombia, 2022)

ID	Cruce a nivel	Tramo	Velocidad máxima tren (Km/h)	Número de vías	Uso	DVT	DVTp
1	Carrera 138ª/Calle 22	Corredor Principal	60	2	Vehicular/Peatonal	189.57	216.22
2	Carrera 129/Calle 22	Corredor Principal	60	2	Vehicular/Peatonal	189.57	216.22
3	Carrera 116/Calle 22	Corredor Principal	60	2	Vehicular/Peatonal	189.57	216.22
4	Carrera 111ª/Calle 22	Corredor Principal	50	2	Vehicular/Peatonal	157.98	180.18
5	Carrera 106/Calle 22	Corredor Principal	50	2	Vehicular/Peatonal	157.98	180.18
6	Carrera 103ª/Calle 22	Corredor Principal	50	2	Vehicular/Peatonal	157.98	180.18
7	Carrera 100/Calle 22	Corredor Principal	50	2	Vehicular/Peatonal	157.98	180.18
8	Carrera 97 /Calle 22	Corredor Principal	50	2	Vehicular/Peatonal	157.98	180.18
9	Carrera 96c/Calle 22	Corredor Principal	50	2	Vehicular/Peatonal	157.98	180.18
10	Carrera 93/Calle 22	Corredor Principal	50	2	Vehicular/Peatonal	157.98	180.18
11	Carrera 87ª/Calle 22	Corredor Principal	50	2	Vehicular/Peatonal	157.98	180.18
12	Avenida Cali/Calle 22	Corredor Principal	50	2	Vehicular/Peatonal	157.98	180.18
13	Carrera 68d/Calle 22	Corredor Principal	60	2	Vehicular/Peatonal	189.57	216.22
14	Carrera 56/Calle 22	Corredor Principal	60	2	Vehicular/Peatonal	189.57	216.22

ID	Cruce a nivel	Tramo	Velocidad máxima tren (Km/h)	Número de vías	Uso	DVT	DVTp
15	Carrera 50/Calle 22	Corredor Principal	60	2	Vehicular/Peatonal	189.57	216.22
16	Carrera 40/Calle 22	Corredor Principal	60	2	Vehicular/Peatonal	189.57	216.22
17	Transversa 32c/Calle 22	Corredor Principal	60	2	Vehicular/Peatonal	189.57	216.22
18	Carrera 27/Calle 22	Corredor Principal	50	2	Vehicular/Peatonal	157.98	180.18
19	Carrera 22/Diagonal 19ª	Corredor Principal	50	2	Vehicular/Peatonal	157.98	180.18

6.2.2.2. Distancia de Visibilidad Real (DVR)

A través del procedimiento detallado en el capítulo 5.1.1.2 de este informe, el cual proporciona una guía técnica para calcular la Distancia de Visibilidad Real (DVR) en los pasos a nivel, nos disponemos a aplicar esta metodología para evaluar los 19 pasos a nivel que forman parte del objeto de estudio en el presente trabajo sobre el Corredor Ferroviario del Regiotram de Occidente. Para obtener las mediciones y datos requeridos para el análisis y aplicación de la metodología de obtención de la DVR, en este caso práctico utilizaremos la herramienta Google Earth. Esta herramienta nos permitirá realizar un análisis geoespacial detallado de cada paso a nivel.

Sin embargo, es importante mencionar que se recurre a esta herramienta debido a la imposibilidad de estar en la zona del proyecto y realizar mediciones precisas mediante herramientas topográficas. Estas permitirían obtener las medidas necesarias de manera más precisa. No obstante, dadas las circunstancias del caso de estudio y considerando que el objetivo del presente trabajo es netamente académico, la herramienta Google Earth nos brindará una alternativa viable para obtener medidas con un grado de precisión adecuado que se alinea con los objetivos del estudio.

Al aplicar esta metodología, nuestro objetivo es identificar de manera precisa los puntos críticos de visibilidad en cada cruce, así como establecer los ejes tanto de las carreteras como de las vías férreas. Estos datos nos permitirán formar el triángulo de visibilidad

necesario para calcular la DVR, conforme a los pasos delineados en el mencionado capítulo 5.1.1.2 de este documento.

A continuación, presentaremos una imagen representativa con los elementos identificados en el estudio para determinar la Distancia de Visibilidad Real de un paso a nivel. En esta imagen, podremos observar la identificación de la esquina que genera la mayor obstrucción para el usuario de la carretera en relación con la vía ferroviaria. También se muestra el trazado de la línea de visibilidad desde el eje del viario, la cual interseca con la esquina de mayor obstrucción y se extiende hasta el eje del corredor ferroviario. Además, se señala la intersección de los ejes de la carretera y el eje de la vía del ferrocarril. Finalmente, se indica la distancia de visibilidad real, la cual es medida desde la intersección de los ejes de la carretera y la vía férrea hasta el punto donde la línea de visibilidad cruza el eje del corredor ferroviario.

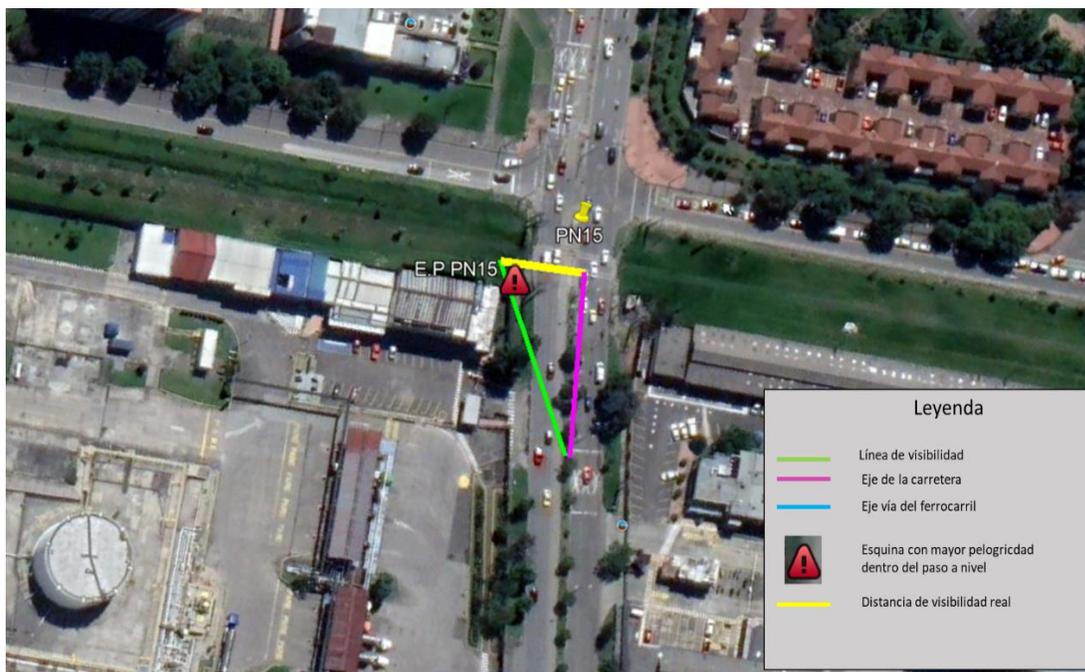


Figura 25. Ejemplo de la conformación del triángulo de visibilidad para uno de PPNN del Regiotram de Occidente.
Fuente: Elaboración propia

Basado en este enfoque metodológico, en la tabla siguiente se presentan en detalle los resultados obtenidos. En el Anejo 01: Distancia de Visibilidad Real en Pasos a Nivel del Regiotram de Occidente, se muestra la configuración específica del triángulo de visibilidad para cada paso a nivel, junto con los valores correspondientes de la Distancia de Visibilidad Real (DVR).

Tabla 15. Resultados Distancias de Visibilidad Real PPNN Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia mediante el uso de la herramienta informática de Google Earth

PPNN (ID)	PK	Cruce a nivel	Distancia de Visibilidad real (DVR)
1	14+440	Carrera 138A/Calle 22	15.3
2	13+430	Carrera 129/Calle 22	20.8
3	12+080	Carrera 116/Calle 22	22.1
4	11+630	Carrera 111A/Calle 22	9.98
5	11+130	Carrera 106/Calle 22	27.7
6	10+770	Carrera 103a/Calle 22	17.07
7	10+540	Carrera 100/Calle 22	22.8
8	10+270	Carrera 97 /Calle 22	23.9
9	09+830	Carrera 96c/Calle 22	26.2
10	09+440	Carrera 93/Calle 22	4
12	08+880	Avenida Cali/Calle 22	36.8
13	06+315	Carrera 68d/Calle 22	10.8
14	04+590	Carrera 56/Calle 22	11.8
15	04+170	Carrera 50/Calle 22	26.2
16	03+230	Carrera 40/Calle 22	9.55
17	02+180	Transversa 32c/Calle 22	9.69
18	01+450	Carrera 27/Calle 22	43.1
19	01+190	Carrera 22/Diagonal 19a	23.3

6.2.3. Análisis de las intensidades de tráfico vehiculares y peatonales en los pasos a nivel

6.2.3.1. Tránsito vehicular

Para determinar los volúmenes vehiculares que circulan diariamente por los actuales pasos a nivel, hemos utilizado la información del “Estudio de Tránsito Oferta y Demanda del Proyecto Regiotram de Occidente” (AECOM Colombia, 2022), proporcionada por la Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá. Este estudio, realizado por AECOM Sucursal

Colombia, se basa en datos recopilados por la Secretaría de Movilidad hasta el año 2019, complementados con aforos vehiculares y peatonales llevados a cabo por AECOM en 2020.

En este apartado, explicaremos de forma resumida la metodología utilizada en el Estudio de Tránsito y presentaremos los resultados obtenidos, mostrando el Tránsito Promedio Diario (TPD) para cada paso a nivel. Además, aplicaremos un factor de crecimiento del tráfico para el periodo comprendido entre los años 2024-2027. Estos volúmenes vehiculares serán utilizados en la aplicación práctica de nuestra metodología.

Para analizar las condiciones actuales del tránsito en los pasos a nivel de la zona del proyecto, la empresa AECOM implementó una metodología para capturar información primaria. Esta metodología permite determinar la composición y distribución horaria del tráfico mediante la realización de aforos vehiculares y peatonales, ubicándose en cada intersección o paso a nivel con el mayor número de actores viales.(AECOM Colombia, 2022). A continuación, presentaremos una imagen que ilustra el procedimiento empleado en el estudio para la recolección de esta información primaria.



Figura 26. Procedimiento para la identificación y toma de la información primaria en el Estudio de Tránsito y Demanda del Regiotram de Occidente. Fuente: (AECOM Colombia, 2022).

Después de obtener la información primaria, el Estudio de Tránsito procede con el procesamiento de la información secundaria, la cual comprende los volúmenes vehiculares proporcionados por la Secretaría Distrital de Movilidad en el año 2019. La metodología utilizada para tratar estos datos incluyó la depuración y revisión de archivos, identificando aquellos que, por su temporalidad y tipo de información, fueran adecuados para generar una base de análisis en el área de influencia del proyecto.(AECOM Colombia, 2022).

A partir de la información secundaria de los años 2017, 2018 y 2019, junto con la información primaria del año 2020, recopilada durante la elaboración del Estudio de Tránsito

en el cual se basa este documento, se determinaron los volúmenes de tránsito utilizados en la Estructuración Técnica del Proyecto Constructivo del Regiotram de Occidente. Esta información fue proyectada al año base 2019. Para la proyección de los datos al año base, en dicho estudio se empleó la siguiente expresión:

Ecuación 21. Ecuación utilizada en el Estudio de Tránsito y Demanda del Regiotram de Occidente para la proyección de los volúmenes vehiculares. Fuente: (AECOM Colombia, 2022)

$$P_t = P_o (1 + r)^t$$

Donde:

- P_t = Valor del volumen en el año base del proyecto 2019
- P_o = Valor del año a proyectar
- r = Tasa de crecimiento por localidad

Para realizar el cálculo de la proyección al año base del proyecto, se utilizó la Ecuación 20 del Estudio de Tránsito. Este cálculo tomó en cuenta las tasas de crecimiento oficiales proporcionadas por la Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá. Las tasas de crecimiento se dividieron en dos categorías: vehículos particulares (incluyendo todos los vehículos livianos y camiones) y vehículos de transporte (buses, camiones y vehículos especiales). A continuación, se presenta una imagen que muestra las tasas de crecimiento determinadas por el Estudio de Tránsito y Demanda del Regiotram de Occidente.

LOCALIDAD	PARTICULARES				CAMIONES			
	Período				Período			
	2013-2017	2018-2022	2023-2027	2028-2032	2013-2017	2018-2022	2023-2027	2028-2032
FONTIBÓN	2,76%	2,46%	2,23%	2,06%	4,02%	3,87%	3,17%	4,02%
TEUSAQUILLO	2,61%	2,32%	2,11%	1,95%	3,91%	3,76%	3,07%	3,94%
LOS MÁRTIRES	3,04%	2,99%	2,80%	2,66%	4,24%	4,28%	3,61%	4,49%
PUENTE ARANDA	2,73%	2,51%	2,32%	2,18%	4,00%	3,91%	3,24%	4,11%
Promedio Localidades	2,85%	2,66%	2,45%	2,28%	4,10%	4,04%	3,35%	4,21%

Figura 27. Tasas de crecimiento para los tráficos vehiculares Fuente: (AECOM Colombia, 2022)

En nuestro estudio, hemos utilizado la información contenida en el Estudio de Tránsito del Proyecto Regiotram de Occidente para determinar los tránsitos promedios diarios (TPD) de los pasos a nivel. Para ello, nos basamos en el Anexo O: Tránsito Promedio Anual de dicho estudio, el cual presenta el tránsito promedio anual de 2019 para cada uno de los pasos a nivel. Utilizando las bases de datos de este anexo, que detallan los volúmenes de tráfico

por tipo de vehículo (automóviles, motocicletas, buses y camiones), calculamos el porcentaje que representan los vehículos livianos y camiones dentro del TPD anual.

Posteriormente, aplicamos las tasas de crecimiento para el período comprendido entre los años 2023 y 2027 presentadas en la figura 26. Para obtener el TPD anual para este lapso de tiempo. Dividimos este TPD (2023-2027) entre los 365 días del año para calcular el Tránsito Promedio Diario (TPD). Para el cálculo del TPD utilizaremos la siguiente expresión:

Ecuación 22. Cálculo del TPD anual para el periodo 2023-2027

$$TPD_{(2023-2027)i} = (TPD_{liv2019} + (TPD_{liv2019} * r_{liv})) + (TPD_{Cam2019} + (TPD_{Cam2019} * r_{Cam}))$$

Donde:

$TPD_{(2023-2027)i}$ = TPD anual proyectado al periodo entre los años 2023-2027 del paso a nivel i

$TPD_{liv2019}$ = TPD anual de vehículos livianos en el año 2019 del cruce a nivel i

r_{liv} = Tasa de crecimiento de vehículos livianos para el periodo comprendido entre los años 2023-2027 presentado en la figura 26.

$TPD_{Cam2019}$ = TPD anual de camiones en el año 2019 del cruce a nivel i

r_{Cam} = Tasa de crecimiento de vehículos pesados para el periodo comprendido entre los años 2023-2027 presentado en la figura 26.

En la siguiente tabla, presentamos los resultados de nuestro análisis, mostrando el TPD por cada paso a nivel, el cual será utilizado en la presente metodología.

Tabla 16. Tránsitos promedios diarios en los PPNN objeto de estudio. Fuente: Elaboración propia. A partir de (AECOM Colombia, 2022).

Cruce a nivel	Tramo	TPD AÑO 2019(Veh/año)	Número de vehículos livianos (Veh/año)	% representación Veh. Livianos	Número de Camiones (Veh/año)	% representación Veh. Camiones	TPD ANUAL (2024-2027) (Veh/año)	TPD (2024-2027) (Veh/año)
Carrera 138ª/Calle 22	Corredor Principal	79	28	35%	52	66%	135.00	0.37

Cruce a nivel	Tramo	TPD AÑO 2019(Veh/año)	Número de vehículos livianos (Veh/año)	% representación Veh. Livianos	Número de Camiones (Veh/año)	% representación Veh. Camiones	TPD ANUAL (2024-2027) (Veh/año)	TPD (2024-2027) (Veh/año)
Carrera 129/Calle 22	Corredor Principal	76336	27232	36%	49104	64%	128,955.00	353.30
Carrera 116/Calle 22	Corredor Principal	45617	15706	34%	29911	66%	77,648.00	212.73
Carrera 111ª/Calle 22	Corredor Principal	48081	20293	42%	27788	58%	77,978.00	213.64
Carrera 106/Calle 22	Corredor Principal	50178	20179	40%	29999	60%	82,411.00	225.78
Carrera 103ª/Calle 22	Corredor Principal	20844	9143	44%	11701	56%	33,448.00	91.64
Carrera 100/Calle 22	Corredor Principal	95713	35128	37%	60585	63%	160,673.00	440.20
Carrera 97 /Calle 22	Corredor Principal	97456	35663	37%	61793	63%	163,707.00	448.51
Carrera 96c/Calle 22	Corredor Principal	107317	40988	38%	66329	62%	178,497.00	489.03
Carrera 93/Calle 22	Corredor Principal	90099	36086	40%	54013	60%	148,129.00	405.83
Carrera 87ª/Calle 22	Corredor Principal	1584	713	45%	871	55%	2,523.00	6.91
Avenida Cali/Calle 22	Corredor Principal	376044	142181	38%	233863	62%	626,954.00	1,717.68
Carrera 68d/Calle 22	Corredor Principal	248148	83186	34%	164962	66%	424,716.00	1,163.61
Carrera 56/Calle 22	Corredor Principal	20504	9763	48%	10741	52%	32,107.00	87.96
Carrera 50/Calle 22	Corredor Principal	265000	102187	39%	162813	61%	439,760.00	1,204.82
Carrera 40/Calle 22	Corredor Principal	132647	47861	36%	84786	64%	223,523.00	612.39

Cruce a nivel	Tramo	TPD AÑO 2019(Veh/año)	Número de vehículos livianos (Veh/año)	% representación Veh. Livianos	Número de Camiones (Veh/año)	% representación Veh. Camiones	TPD ANUAL (2024-2027) (Veh/año)	TPD (2024-2027) (Veh/año)
Transversa 32c/Calle 22	Corredor Principal	2416	675	28%	1741	72%	4,275.00	11.71
Carrera 27/Calle 22	Corredor Principal	24660	9636	39%	15024	61%	40,791.00	111.76
Carrera 22/Diagonal 19ª	Corredor Principal	16891	6999	41%	9892	59%	27,528.00	75.42

6.2.4. Cálculo del Momento de Circulación [AxT]

Como definimos en el capítulo 5.1.3. del presente documento, el momento de circulación se define como el producto entre el número de trenes diarios que circulan por un Paso a Nivel y el Transito Promedio Diario de Vehículos o Peatones que de igual forma circulen por el paso a nivel.

Con base a lo anterior y como mostramos en el anterior capítulo 6.2.3, ya conocemos los volúmenes tanto de peatones como de vehículos que circulan por los distintos pasos a nivel objeto de estudio del presente trabajo, sin embargo, aún no se conoce el número de trenes que circularán diariamente por el corredor ferroviario. Para conocer dicho valor haremos uso del Anexo J. Parámetros de Operación del Estudio de Tránsito y Demanda del Regiotram de Occidente. (AECOM Colombia, 2022)

En dicho Anexo se nos presentan características importantes de la operación ferroviaria, como lo son el horario de servicio, frecuencia de los trenes, tiempos de paso en las estaciones, velocidad máxima de operación del tren y aceleración máxima. Con estos datos de partida se estructuró la malla de circulación del proyecto Regiotram de Occidente con la cual podremos determinar el número de trenes que circularán diariamente por cada paso a nivel. A continuación, mostraremos el Diagrama de Malla de Operación del Proyecto y por consiguiente los cálculos realizados a partir de ella para la obtención del número de trenes que circulan diariamente:

Como se definió en el capítulo 5.1.3 de este documento, el momento de circulación se calcula como el producto del número de trenes diarios que circulan por un paso a nivel y el

Tránsito Promedio Diario (TPD) de vehículos o peatones que también cruzan por dicho paso.

En el capítulo 6.2.3, presentamos los volúmenes tanto de peatones como de vehículos que transitan por los distintos pasos a nivel objeto de estudio. Sin embargo, aún necesitamos determinar el número de trenes que circularán diariamente por el corredor ferroviario para poder hallar el Momento de Circulación [A_xT] de cada paso a nivel. Para obtener esta información, recurriremos al Anexo J: Parámetros de Operación del Estudio de Tránsito y Demanda del Regiotram de Occidente.(AECOM Colombia, 2022)

Este anexo proporciona detalles característicos sobre la operación ferroviaria, incluyendo el horario de servicio, la frecuencia de los trenes, los tiempos de paso en las estaciones, la velocidad máxima de operación del tren y la aceleración máxima. Con estos datos, el redactor del estudio estructuró la malla de circulación del proyecto Regiotram de Occidente, lo que nos permitirá calcular el número de trenes que circularán diariamente por cada paso a nivel.

A continuación, presentaremos el Diagrama de Malla de Operación del Proyecto y los cálculos derivados de este para determinar el número de trenes que circularán diariamente. Esta información es esencial para completar el análisis del momento de circulación y evaluar adecuadamente los niveles de seguridad en los pasos a nivel.

DÍA LABORABLE		SÁBADO		DOMINGO	
Pico mañana	6:00 - 8:00	Pico mañana	5:00 - 7:00	Máxima demanda	6:00 - 17:00
Pico tarde	17:00 - 18:00	Pico tarde	13:00 - 19:00		
Horario Servicio	4:00 - 23:00	Horario Servicio	4:00 - 23:00	Horario Servicio	5:00 - 22:00

Figura 28. Horarios de servicio. Fuente: (AECOM Colombia, 2022).

Tabla 17. Datos de partida para la estructuración de la Malla de Operación. Fuente: (AECOM Colombia, 2022)

Velocidad máxima (km/h)	70
Longitud típica cantón (m)	150
Aceleración máxima (m/s ²)	1.1
Deceleración máxima (m/s ²)	1.3
Performance (%)	93
Frecuencia (min)	12
Tiempo de parada en estación (s)	30
Tiempo de parada en término (s)	240

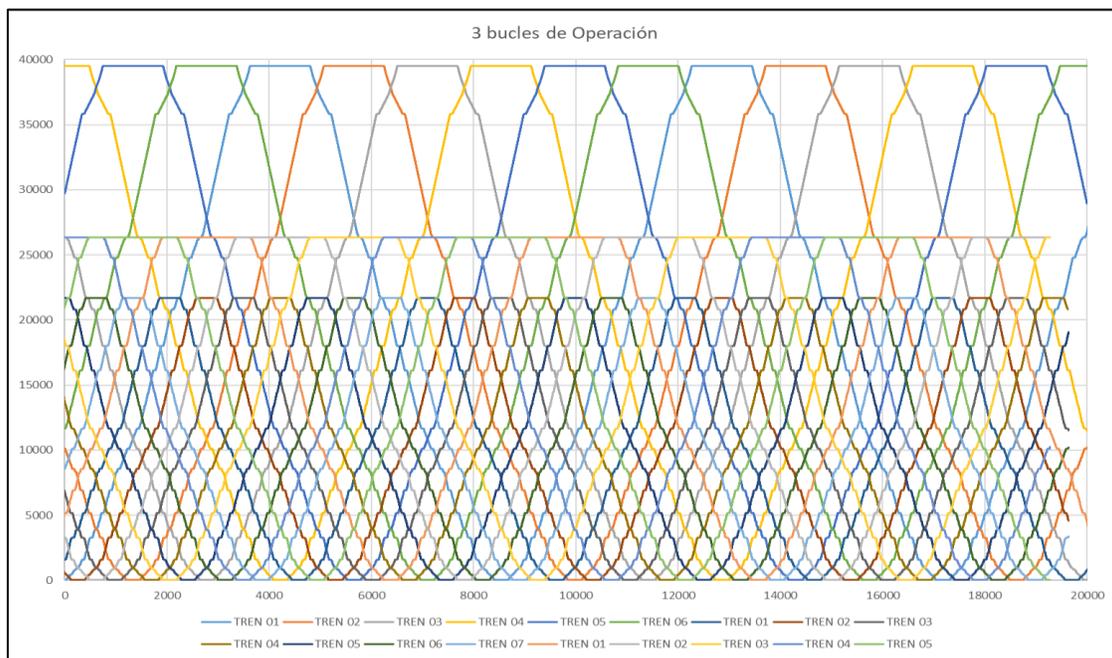


Figura 29. Malla de Operación Regiotram de Occidente. Fuente: (AECOM Colombia, 2022)

Basándonos en la Malla de Operación presentada anteriormente, podemos observar que el eje de las ordenadas del gráfico representa la distancia recorrida por el tren o los diferentes PKs que recorre, mientras que el eje de las abscisas corresponde al horario de circulación, que, como se muestra en la figura 27, abarca desde las 4:00 hasta las 23:00. Conociendo los PKs exactos de cada paso a nivel, procederemos a ubicarlos dentro de la malla de operación y contabilizaremos el número de trenes que pasan por cada PK.

Este proceso nos permitirá determinar con precisión la frecuencia de trenes en cada uno de los pasos a nivel, lo cual es fundamental para evaluar la interacción entre el tráfico ferroviario y el tráfico vehicular y peatonal, y así poder aplicar adecuadamente la metodología de cálculo del momento de circulación definida en el capítulo 5.1.3 de este documento.

Tabla 18. Pasos a nivel con su PK correspondiente dentro del abscisado del Corredor Ferroviario. Fuente: Elaboración propia a partir del (EGIS et al., 2019).

ID	Cruce a nivel	PK
1	Carrera 138ª/Calle 22	14+438
2	Carrera 129/Calle 22	13+428
3	Carrera 116/Calle 22	12+080
4	Carrera 111ª/Calle 22	11+631
5	Carrera 106/Calle 22	11+130
6	Carrera 103ª/Calle 22	10+770
7	Carrera 100/Calle 22	10+540
8	Carrera 97 /Calle 22	10+330
9	Carrera 96c/Calle 22	9+830
10	Carrera 93/Calle 22	9+438
11	Carrera 87ª/Calle 22	9+230
12	Avenida Cali/Calle 22	8+920
13	Carrera 68d/Calle 22	6+312
14	Carrera 56/Calle 22	4+600
15	Carrera 50/Calle 22	4+163
16	Carrera 40/Calle 22	3+229
17	Transversa 32c/Calle 22	2+176
18	Carrera 27/Calle 22	1+500
19	Carrera 22/Diagonal 19ª	1+200

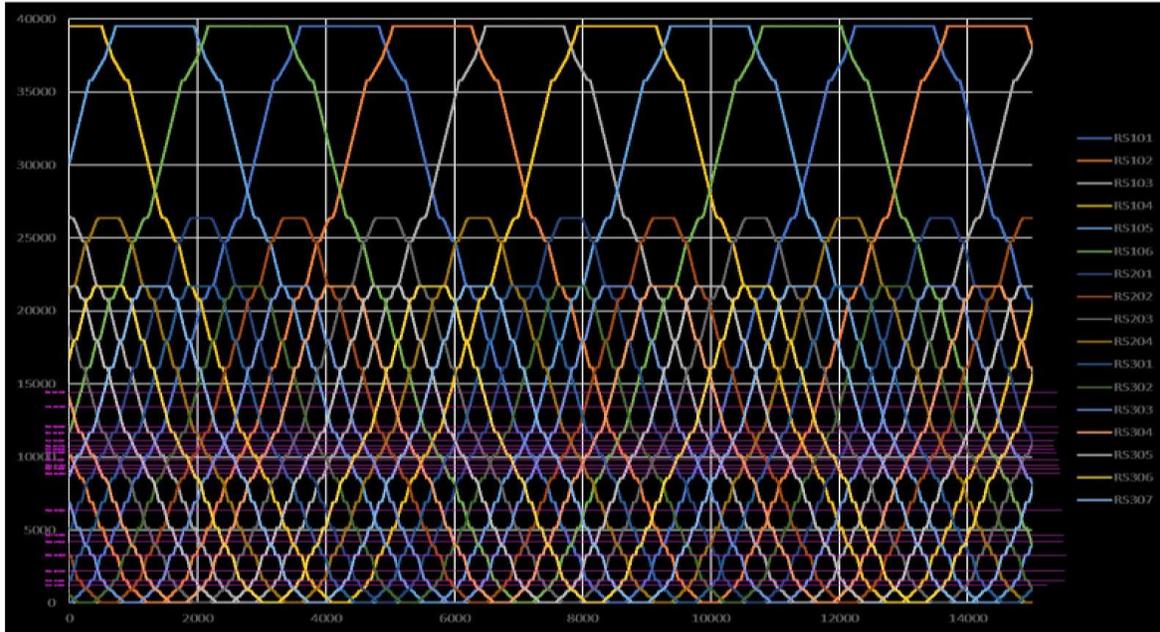


Figura 30. Malla de operación identificando cada PPNN dentro de ella. Fuente: Elaboración propia a partir de (AECOM Colombia, 2022).

En la figura 29 se presenta la malla de operación, en la cual se han identificado los PK correspondientes a cada uno de los 19 pasos a nivel objeto del presente estudio. A partir de esta identificación, se han calculado los siguientes resultados en cuanto al número de trenes que circulan por cada uno de estos pasos a nivel:

Tabla 19. Número de trenes que circulan por cada paso a nivel. Fuente: Elaboración propia a partir de (AECOM Colombia, 2022).

ID	Cruce a nivel	PK	Numero de trenes (T/día)
1	Carrera 138ª/Calle 22	14+438	83
2	Carrera 129/Calle 22	13+428	84
3	Carrera 116/Calle 22	12+080	84
4	Carrera 111ª/Calle 22	11+631	84
5	Carrera 106/Calle 22	11+130	83
6	Carrera 103ª/Calle 22	10+770	83
7	Carrera 100/Calle 22	10+540	83
8	Carrera 97 /Calle 22	10+330	84
9	Carrera 96c/Calle 22	9+830	84
10	Carrera 93/Calle 22	9+438	84
11	Carrera 87ª/Calle 22	9+230	84

ID	Cruce a nivel	PK	Numero de trenes (T/día)
12	Avenida Cali/Calle 22	8+920	84
13	Carrera 68d/Calle 22	6+312	84
14	Carrera 56/Calle 22	4+600	83
15	Carrera 50/Calle 22	4+163	83
16	Carrera 40/Calle 22	3+229	84
17	Transversa 32c/Calle 22	2+176	82
18	Carrera 27/Calle 22	1+500	84
19	Carrera 22/Diagonal 19 ^a	1+200	86

Una vez conocidos el número de trenes y los TPD (Tránsito Promedio Diario) vehiculares y peatonales, procederemos a calcular el Momento de Circulación Vehicular [AxT] y el Momento de Circulación Peatonal [PxT]. A continuación, en la siguiente tabla, presentaremos los resultados obtenidos.

Tabla 20. Momentos de circulación para cada PPNN.

ID	Cruce a nivel	PK	AxT	PxT
1	Carrera 138 ^a /Calle 22	14+438	30.69	332
2	Carrera 129/Calle 22	13+428	29677.31	14448
3	Carrera 116/Calle 22	12+080	17869.68	20076
4	Carrera 111 ^a /Calle 22	11+631	17945.62	40824
5	Carrera 106/Calle 22	11+130	18740.04	24651
6	Carrera 103 ^a /Calle 22	10+770	7605.98	24651
7	Carrera 100/Calle 22	10+540	36536.6	316313
8	Carrera 97 /Calle 22	10+330	37675.03	34272
9	Carrera 96c/Calle 22	9+830	41078.76	18060
10	Carrera 93/Calle 22	9+438	34089.96	18060
11	Carrera 87 ^a /Calle 22	9+230	580.63	24024
12	Avenida Cali/Calle 22	8+920	144285.30	43512
13	Carrera 68d/Calle 22	6+312	97742.86	6132
14	Carrera 56/Calle 22	4+600	7301.04	3652
15	Carrera 50/Calle 22	4+163	100000.21	13446
16	Carrera 40/Calle 22	3+229	51440.90	17388
17	Transversa 32c/Calle 22	2+176	960.41	3280
18	Carrera 27/Calle 22	1+500	9387.51	83832
19	Carrera 22/Diagonal 19 ^a	1+200	6486.04	26574

6.2.5. Determinación del Nivel de Protección de los pasos a nivel (PPNN) del Regiotram de Occidente.

Una vez conocidos todos los parámetros necesarios (Distancia de Visibilidad Técnica (DVT), Distancia de Visibilidad Real (DVR), TPD vehicular, TPD peatonal y los Momentos de Circulación), procederemos a calcular el Nivel de Protección Mínimo de cada paso a nivel según lo especificado en el capítulo 5.1.4. de este documento. Este cálculo se basa en el Real Decreto 929/2020 sobre seguridad e interoperabilidad en España. Para determinar el nivel de protección, aplicaremos los criterios especificados en la Tabla 1 de este documento.

Primero, se revisará la velocidad máxima de circulación del tren en cada paso a nivel para determinar en qué rango se encuentra según lo establecido por la normativa. A continuación, se realizará un análisis comparativo entre los valores de DVT y DVR para asegurarse de que cumplan con los requisitos mínimos de visibilidad establecidos, determinando que un cruce a nivel cuenta con visibilidad suficiente cuando la Distancia de Visibilidad Real (DVR) es superior a la Distancia de Visibilidad Técnica (DVT). Posteriormente, se analizarán los momentos de circulación, que, como se mencionó anteriormente, relacionan los TPD y el número de trenes que circulan por el paso a nivel.

Con estos datos, se procederá a revisar y determinar en qué categoría de protección se encuentra cada paso a nivel, según lo especificado en la Tabla 1 del presente documento. Esta revisión permitirá identificar las medidas de seguridad necesarias para cada caso específico.

A continuación, presentaremos una tabla resumen con los resultados del Nivel de Protección Mínimo calculado para cada uno de los 19 pasos a nivel objeto de estudio en el corredor ferroviario del Regiotram de Occidente.

Tabla 21. Nivel de Protección Mínimo para los PPNN del Regiotram de Occidente de acuerdo al Real Decreto 929/2020.

ID	Cruce a nivel	Nivel de protección Mínima RD (Veh)	Nivel de protección recomendada
1	Carrera 138ª/Calle 22	A2	A4
2	Carrera 129/Calle 22	A3	A4
3	Carrera 116/Calle 22	A3	A4
4	Carrera 111ª/Calle 22	A3	A4
5	Carrera 106/Calle 22	A3	A4

ID	Cruce a nivel	Nivel de protección Mínima RD (Veh)	Nivel de protección recomendada
6	Carrera 103ª/Calle 22	A3	A4
7	Carrera 100/Calle 22	A3	A4
8	Carrera 97 /Calle 22	A3	A4
9	Carrera 96c/Calle 22	A3	A4
10	Carrera 93/Calle 22	A3	A4
11	Carrera 87ª/Calle 22	A2	A4
12	Avenida Cali/Calle 22	A3	A4
13	Carrera 68d/Calle 22	A3	A4
14	Carrera 56/Calle 22	A3	A4
15	Carrera 50/Calle 22	A3	A4
16	Carrera 40/Calle 22	A3	A4
17	Transversa 32c/Calle 22	A2	A4
18	Carrera 27/Calle 22	A3	A4
19	Carrera 22/Diagonal 19ª	A3	A4

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los valores mostrados en la tabla 22, podemos concluir que, debido a la gran cantidad de volumen vehicular que circula por cada paso a nivel, la velocidad máxima de operación del tren y el hecho de que en la totalidad de los pasos la DVT es superior a la DVR, es necesario implantar niveles de seguridad A3. Sin embargo, dada la importancia del proyecto, el entorno en el que se desarrolla y los altos volúmenes de tráfico en los pasos a nivel, se hace necesario complementar este nivel A3 con un sistema de detección de obstáculos en la vía, por lo que se recomienda automáticamente implementar un nivel de protección A4.

Para los pasos a nivel 1, 11 y 17, que presentan menores volúmenes de tráfico, sería posible optar por un nivel de protección A2 según lo exigido por el Real Decreto 929/2020. No obstante, con el fin de mantener la homogeneidad en el proyecto, se recomienda igualmente instalar un nivel de protección A3 o A4 en estos pasos.

6.3. Determinación de la criticidad de los Pasos a Nivel en el Regiotram de Occidente.

Siguiendo la metodología propuesta en el capítulo 5 del presente trabajo, el siguiente paso será determinar la criticidad de cada paso a nivel (PNN) objeto de estudio dentro del corredor ferroviario del Regiotram de Occidente. Para ello, procederemos al cálculo y obtención de cada uno de los parámetros técnicos, sociales, ambientales, climatológicos y geométricos descritos en nuestra metodología.

Los parámetros técnicos incluyen aspectos como el volumen de tráfico vehicular y peatonal, la velocidad de operación del tren, y la distancia de visibilidad técnica (DVT) y real (DVR). Los parámetros sociales abarcarán factores como la siniestralidad en los cruces a nivel. Los parámetros ambientales y climatológicos incluirán datos sobre condiciones meteorológicas que puedan afectar la visibilidad y seguridad en los PNN. Finalmente, los parámetros geométricos evaluarán la configuración física y las características del terreno en cada cruce.

Es importante recordar que nuestra metodología adopta un enfoque integral, realizando un análisis comparativo de los coeficientes de criticidad asociados a cada parámetro en estudio para todos los pasos a nivel de una red o línea ferroviaria completa. En nuestro caso de estudio, nos enfocaremos en analizar los 19 pasos a nivel definidos dentro del corredor ferroviario perteneciente al Proyecto del Regiotram de Occidente. Esta aproximación nos permitirá identificar y priorizar las áreas que requieren intervenciones de seguridad más urgentes, basándonos en un análisis exhaustivo y comparativo de cada paso a nivel en el contexto del corredor.

A continuación, en los siguientes subcapítulos, se detallará el proceso de obtención y cálculo de cada uno de estos parámetros. Una vez reunida esta información, procederemos con el cálculo de la criticidad de cada cruce a nivel, lo que permitirá establecer prioridades de intervención y medidas de seguridad adecuadas para cada uno de ellos.

6.3.1. Determinación de la Criticidad asociada a los parámetros técnicos y de explotación.

Siguiendo el procedimiento detallado en nuestra metodología, en el presente capítulo describiremos el cálculo y la determinación de los parámetros técnicos y operativos definidos. Estos parámetros incluyen la Distancia de Visibilidad Real (DVR), la Distancia de Visibilidad Técnica (DVT), el Tránsito Promedio Diario de Vehículos (TPDv) y Peatones (TPDp), y la distancia entre cruces a nivel próximos (X).

Una vez conocidos los valores de cada uno de estos parámetros, se procederá a determinar el coeficiente de criticidad para cada parámetro y para cada paso a nivel en estudio, utilizando las fórmulas de criticidad explicadas en el capítulo 5.2.1 del presente documento.

6.3.1.1. Coeficiente de criticidad asociado a la Distancia de Visibilidad Real (PCdvr).

Dado que en el capítulo 6.2 del presente documento, durante la determinación del nivel mínimo de seguridad de los cruces a nivel, calculamos las distancias de visibilidad real (DVR) de cada cruce dentro del corredor ferroviario en estudio, procederemos ahora a aplicar la Ecuación 5 definida en el subcapítulo 5.2.1.1. Utilizando los valores de DVR presentados en la tabla 15, obtendremos los resultados correspondientes a los coeficientes de criticidad asociados a la visibilidad de cada cruce a nivel.

Para la aplicación de la fórmula 5, deberemos extraer de la tabla 15, los valores de la Distancia de visibilidad real mínima de los 19 pasos a nivel (DVRmín), la distancia de visibilidad máxima de los 19 pasos a nivel (DVRmáx) y conocer la Distancia de visibilidad real asociada al paso a nivel en estudio. A continuación, presentaremos los valores de DVRmín y DVRmáx:

Tabla 22. Valores de las Distancias de Visibilidad Real mínima y máxima dentro del análisis integral del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia.

	PPNN	DVR
DVRmáx	18	43.1
DVRmín	10	4

De acuerdo con los valores mostrados en la tabla anterior, se puede concluir que el cruce a nivel con mayor Distancia de Visibilidad Real (DVR) es el PPNN 18. Recordando el análisis hecho en el capítulo 5.2.1.1, donde explicamos que la DVR es inversamente proporcional a la criticidad, es decir, a mayor DVR, mayor seguridad del paso a nivel, se espera que el coeficiente de criticidad asociado al PPNN 18 sea 0. En contraste, el PPNN 10, que cuenta con la DVR mínima, será el más crítico en cuanto al análisis de la distancia de visibilidad real.

A continuación, en la siguiente tabla se detallan estos resultados de los 19 pasos a nivel en estudio:

Tabla 23. Coeficientes de Criticidad asociados a la Distancia de Visibilidad Real en los cruces del Regiotram de Occidente.

Fuente: Elaboración propia

ID	Cruce a nivel	DVR	PCdvr
1	Carrera 138ª/Calle 22	15.30	7.11
2	Carrera 129/Calle 22	20.80	5.70
3	Carrera 116/Calle 22	22.10	5.37
4	Carrera 111ª/Calle 22	9.98	8.47
5	Carrera 106/Calle 22	27.70	3.94
6	Carrera 103ª/Calle 22	17.07	6.66
7	Carrera 100/Calle 22	22.80	5.19
8	Carrera 97 /Calle 22	23.90	4.91
9	Carrera 96c/Calle 22	26.20	4.32
10	Carrera 93/Calle 22	4.00	10.00
11	Carrera 87ª/Calle 22	4.20	9.95
12	Avenida Cali/Calle 22	36.80	1.61
13	Carrera 68d/Calle 22	10.80	8.26
14	Carrera 56/Calle 22	11.80	8.01
15	Carrera 50/Calle 22	26.20	4.32
16	Carrera 40/Calle 22	9.55	8.58
17	Transversa 32c/Calle 22	9.69	8.54
18	Carrera 27/Calle 22	43.10	0.00
19	Carrera 22/Diagonal 19ª	23.30	5.06

6.3.1.2. Coeficiente de Criticidad asociado a la Distancia de Visibilidad Técnica (PCdvt).

Para calcular el Coeficiente de Criticidad asociado a la Distancia de Visibilidad Técnica (PCdvt), procederemos de manera similar al cálculo del PCdvr. Aprovecharemos los cálculos de la Distancia de Visibilidad Técnica realizados para la determinación del Nivel de Protección mínimo, explicados en el capítulo 6.2.2.1 de este documento.

En primer lugar, utilizaremos los resultados obtenidos y presentados en la tabla 14 del presente trabajo. Analizaremos los valores mínimos y máximos hallados de la Distancia de Visibilidad Técnica para el tránsito de vehículos. A partir de estos valores, aplicaremos la ecuación 6, explicada en el capítulo 5.2.1.2 de este informe. Esta ecuación nos permitirá correlacionar los valores de la DVT con la criticidad de los cruces a nivel del proyecto del Regiotram de Occidente.

La ecuación 6 se utiliza para normalizar los valores de la DVT y calcular su coeficiente de criticidad. Al normalizar estos valores, podemos comparar de manera efectiva la seguridad relativa de cada cruce a nivel en función de su distancia de visibilidad técnica. Esto es importante, ya que una menor DVT indica una mayor criticidad y, por lo tanto, un mayor riesgo potencial para los usuarios del cruce a nivel.

A continuación, procederemos con los cálculos necesarios para determinar el PCdvt de cada cruce a nivel, asegurando que todos los parámetros sean coherentes y reflejen la situación real del corredor ferroviario del Regiotram de Occidente. Los resultados obtenidos proporcionarán una base sólida para evaluar y mejorar las medidas de seguridad en estos cruces, contribuyendo a la optimización del proyecto.

Tabla 24. DVT_{máx} y DVT_{mín} en el Proyecto Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia

	PPNN	DVT
DVT _{máx}	1,2,3,13,14,15,16,17	189.57
DVT _{mín}	4,5,6,7,8,9,10,11,12,18,19	157.98

En la tabla 25 se presentan los resultados correspondientes a la DVT_{máx} y DVT_{mín}, los cuales nos permitirán emplear la ecuación 6 mencionada anteriormente. En esta tabla se

observa que obtuvimos dos valores de Distancia de Visibilidad Técnica (DVT), distribuidos de la siguiente manera: el 58% de los pasos a nivel tienen DVT_{mín} y el 42% tienen DVT_{máx}. Esto se debe a que, para calcular esta distancia, utilizamos la Ecuación 1 explicada en el capítulo 5.1.1.1 de este informe, la cual se basa en el Real Decreto 929/2020 de la Normativa Española. Esta norma nos permite hallar la DVT en función del número de vías del ferrocarril y la velocidad máxima de aproximación del tren al paso a nivel.

Como se muestra en la tabla 14, las velocidades de aproximación en los pasos a nivel serán de 50 km/h y 60 km/h. Además, de acuerdo con lo mencionado en el capítulo 6.1.4 sobre la Caracterización del Corredor, se indicó que todo el proyecto estaba concebido para una doble vía, una por sentido. Esto implica que cada paso a nivel en estudio cuenta con dos vías férreas.

Dado que la única variación se presenta en las velocidades de aproximación, podemos concluir que aquellos cruces con una velocidad de 50 km/h tendrán un coeficiente de criticidad de 0 en función de la DVT. Por otro lado, aquellos cruces donde la velocidad máxima de aproximación al paso a nivel sea de 60 km/h tendrán un coeficiente de criticidad máximo.

A continuación, presentamos los Coeficientes de Criticidad asociados a la DVT (PCdvt) para cada paso a nivel:

Tabla 25. Coeficiente de Criticidad asociado a la Distancia de Visibilidad Técnica (PCdvt). Fuente: Elaboración propia.

ID	Cruce a nivel	DVT	PCdvt
1	Carrera 138ª/Calle 22	189.57	10.00
2	Carrera 129/Calle 22	189.57	10.00
3	Carrera 116/Calle 22	189.57	10.00
4	Carrera 111ª/Calle 22	157.98	0.00
5	Carrera 106/Calle 22	157.98	0.00
6	Carrera 103ª/Calle 22	157.98	0.00
7	Carrera 100/Calle 22	157.98	0.00
8	Carrera 97 /Calle 22	157.98	0.00
9	Carrera 96c/Calle 22	157.98	0.00
10	Carrera 93/Calle 22	157.98	0.00
11	Carrera 87ª/Calle 22	157.98	0.00
12	Avenida Cali/Calle 22	157.98	0.00
13	Carrera 68d/Calle 22	189.57	10.00

ID	Cruce a nivel	DVT	PCdvt
14	Carrera 56/Calle 22	189.57	10.00
15	Carrera 50/Calle 22	189.57	10.00
16	Carrera 40/Calle 22	189.57	10.00
17	Transversa 32c/Calle 22	189.57	10.00
18	Carrera 27/Calle 22	157.98	0.00
19	Carrera 22/Diagonal 19ª	157.98	0.00

6.3.1.3. Coeficiente de criticidad asociado al Tránsito Promedio de vehículos y peatones (PCtpd).

En este paso, procederemos a calcular el coeficiente de criticidad asociado al tránsito promedio diario (TPD) de peatones y vehículos. Nos basaremos en los valores de TPD tanto para vehículos como para peatones, obtenidos durante el cálculo del Nivel de Protección de los pasos a nivel en el capítulo 6.2.3., específicamente en los valores consignados en las tablas 16 y 17 del presente documento.

Para ello, primero determinaremos los TPD_{mín} y TPD_{máx} tanto para vehículos como para peatones. Estos valores representan los extremos del tránsito promedio diario en los diferentes pasos a nivel. Una vez obtenidos estos valores, aplicaremos la Ecuación 7, explicada en el capítulo 5.2.1.3. Esta ecuación nos permitirá calcular los coeficientes de criticidad (PC_{tpd} para vehículos y PC_{tpdp} para peatones) en función de los TPD de cada paso a nivel. De acuerdo a lo anterior procederemos a mostrar el análisis realizado:

Tabla 26. TPD vehiculares y peatonales mínimos y máximos dentro de los pasos a nivel analizados en el corredor del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia

	PPNN	TPD
Max TPD	12	1717.68
Mín TPD	1	0.37
Max TPDp	7	3811
Mín TPDp	1	4

Tabla 27. Cálculo de los coeficientes de criticidad asociados a los TPD. Fuente: Elaboración propia

ID	Cruce a nivel	TPD (Veh/día)	PCtpd	HMDP (Hora/Peaton)	PCtpdp
1	Carrera 138ª/Calle 22	0.37	0.00	4	0.00
2	Carrera 129/Calle 22	353.30	2.06	172	0.44
3	Carrera 116/Calle 22	212.73	1.24	239	0.62
4	Carrera 111ª/Calle 22	213.64	1.24	486	1.27
5	Carrera 106/Calle 22	225.79	1.31	297	0.77
6	Carrera 103ª/Calle 22	91.64	0.53	297	0.77
7	Carrera 100/Calle 22	440.2	2.56	3811	10.00
8	Carrera 97 /Calle 22	448.51	2.61	408	1.06
9	Carrera 96c/Calle 22	489.03	2.85	215	0.55
10	Carrera 93/Calle 22	405.83	2.36	215	0.55
11	Carrera 87ª/Calle 22	6.91	0.04	286	0.74
12	Avenida Cali/Calle 22	1717.68	10.00	518	1.35
13	Carrera 68d/Calle 22	1163.60	6.77	73	0.18
14	Carrera 56/Calle 22	87.96	0.51	44	0.11
15	Carrera 50/Calle 22	1204.82	7.01	162	0.42
16	Carrera 40/Calle 22	612.39	3.56	207	0.53
17	Transversa 32c/Calle 22	11.71	0.07	40	0.09
18	Carrera 27/Calle 22	111.75	0.65	998	2.61
19	Carrera 22/Diagonal 19ª	75.41	0.44	309	0.80

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla anterior, el cálculo del coeficiente de criticidad es de suma importancia, ya que el TPD es un indicador directo de la intensidad de uso de los pasos a nivel. Una correcta evaluación de este indicador es fundamental para establecer medidas de seguridad adecuadas. Los coeficientes de criticidad derivados de esta evaluación permiten priorizar los pasos a nivel que requieren intervenciones más urgentes o específicas, con el objetivo de mejorar la seguridad y la eficiencia del tráfico ferroviario y peatonal en el corredor del Regiotram de Occidente.

Los resultados indican que los pasos a nivel más críticos, en función de los tránsitos promedios diarios de vehículos y peatones, son el paso a nivel 12 y el paso a nivel 7, respectivamente. Estos pasos a nivel deben ser objeto de atención prioritaria para la implementación de medidas de seguridad y optimización del flujo vehicular y peatonal.

6.3.1.4. Coeficiente de criticidad asociado a la distancia entre los pasos a nivel próximos.

Para calcular el coeficiente de criticidad asociado a la distancia entre pasos a nivel próximos, se utilizó la herramienta Google Earth. Esta herramienta nos permitió medir con precisión la distancia aproximada entre cada paso a nivel y el siguiente paso a nivel más próximo. Para asegurar la exactitud de estos datos, las mediciones obtenidas con Google Earth fueron contrastadas con los PK (Puntos Kilométricos) de cada paso a nivel, según el abscisado proporcionado en el Documento de Estructuración Técnica del proyecto. A continuación, se presentan las distancias obtenidas entre los pasos a nivel, las cuales son fundamentales para evaluar la criticidad y planificar las medidas de seguridad correspondientes.

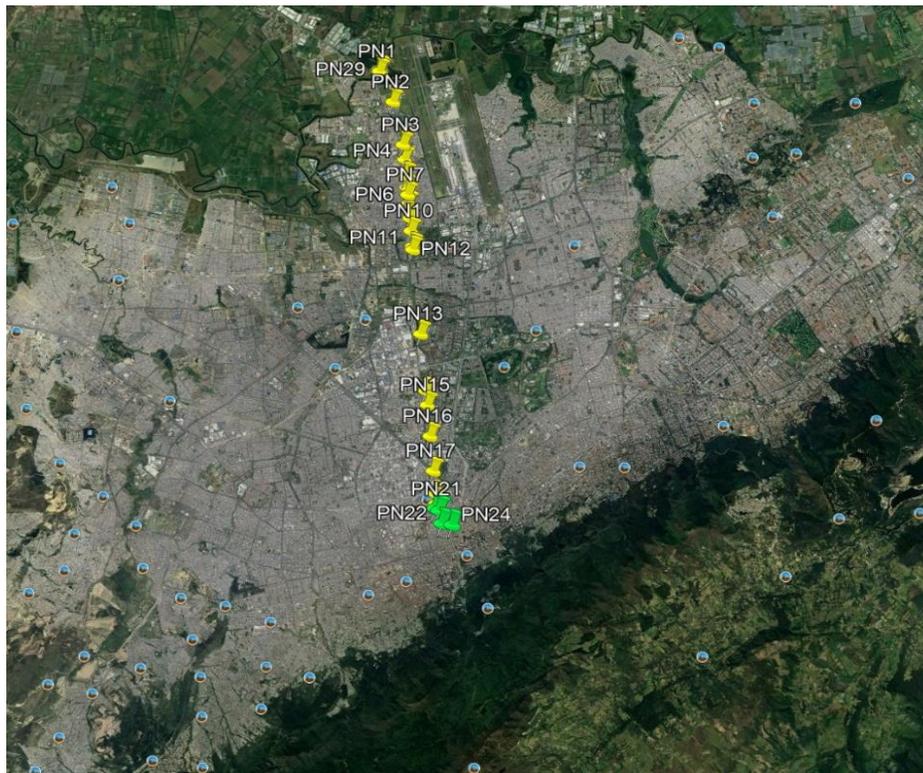


Figura 31. Ubicación geográfica PPNN corredor del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Tabla 28. Distancia al paso a nivel más próximo. Fuente: Elaboración propia.

ID	Cruce a nivel	Distancia al próximo cruce a nivel (m)
1	Carrera 138ª/Calle 22	1009
2	Carrera 129/Calle 22	1369
3	Carrera 116/Calle 22	447
4	Carrera 111ª/Calle 22	447
5	Carrera 106/Calle 22	362
6	Carrera 103ª/Calle 22	225
7	Carrera 100/Calle 22	225
8	Carrera 97 /Calle 22	274
9	Carrera 96c/Calle 22	401
10	Carrera 93/Calle 22	408
11	Carrera 87ª/Calle 22	102
12	Avenida Cali/Calle 22	102
13	Carrera 68d/Calle 22	1704
14	Carrera 56/Calle 22	436
15	Carrera 50/Calle 22	436
16	Carrera 40/Calle 22	978
17	Transversa 32c/Calle 22	665
18	Carrera 27/Calle 22	318
19	Carrera 22/Diagonal 19ª	318

De acuerdo a los valores de las distancias obtenidos y mostrados en la anterior tabla procederemos a aplicar las Ecuaciones 8 y 9 especificadas en el capítulo 5.2.1.4 del presente informe, obteniendo los siguientes coeficientes de criticidad asociado a la distancia entre pasos a nivel próximos (PCx).

Tabla 29. Coeficientes de criticidad asociado a la distancia entre pasos a nivel. Fuente: Elaboración propia

ID	Cruce a nivel	Distancia al próximo cruce a nivel (m)	PCx
1	Carrera 138ª/Calle 22	1009	5.66
2	Carrera 129/Calle 22	1369	7.91
3	Carrera 116/Calle 22	447	6.55
4	Carrera 111ª/Calle 22	447	6.55
5	Carrera 106/Calle 22	362	6.02
6	Carrera 103ª/Calle 22	225	5.16
7	Carrera 100/Calle 22	225	5.16

ID	Cruce a nivel	Distancia al próximo cruce a nivel (m)	PCx
8	Carrera 97 /Calle 22	274	5.47
9	Carrera 96c/Calle 22	401	6.26
10	Carrera 93/Calle 22	408	6.30
11	Carrera 87ª/Calle 22	102	4.39
12	Avenida Cali/Calle 22	102	4.39
13	Carrera 68d/Calle 22	1704	10.00
14	Carrera 56/Calle 22	436	6.48
15	Carrera 50/Calle 22	436	6.48
16	Carrera 40/Calle 22	978	9.86
17	Transversa 32c/Calle 22	665	7.91
18	Carrera 27/Calle 22	318	5.74
19	Carrera 22/Diagonal 19ª	318	5.74

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla anterior, se concluye que el paso a nivel 13 es el más crítico en función de la distancia al siguiente paso a nivel, ya que tiene una separación de 1704 m. Esta gran distancia dificulta la posibilidad de consolidar o concentrar este paso a nivel con otro cercano, debido a la considerable distancia de separación. En contraste, los pasos a nivel menos críticos en cuanto a este parámetro son los PPNN 11 y 12, que están separados entre sí por apenas 102 m. Esta corta distancia facilita la implementación de medidas de seguridad compartidas y una gestión más eficiente del tráfico, reduciendo así la criticidad de estos pasos a nivel en comparación con otros que están más distantes entre sí.

Además, es importante resaltar que las distancias entre pasos a nivel influyen significativamente en la planificación de la seguridad ferroviaria. Pasos a nivel con grandes separaciones, como el PPNN 13, pueden requerir soluciones de seguridad independientes y más robustas, mientras que pasos a nivel más cercanos pueden beneficiarse de sistemas de seguridad integrados. La correcta identificación y análisis de estas distancias permiten priorizar las intervenciones necesarias y optimizar los recursos para mejorar la seguridad y eficiencia del tráfico ferroviario y peatonal en el corredor del Regiotram de Occidente.

6.3.1.5. Criticidad integrada de los parámetros técnicos y de explotación (Pctec).

Una vez hallados todos los coeficientes de criticidad exigidos por nuestra metodología procederemos a hacer uso de la Ecuación 10, la cual nos permite correlacionar cada parámetro de técnico hallado anteriormente. Esta expresión está basada en la tabla 2 del presente documento la cual nos presenta los coeficientes de ponderación, los cuales nos permitirá hacer un análisis adecuado de acuerdo a la importancia que juega cada parámetro técnico y de explotación dentro de la seguridad general del paso a nivel, de acuerdo a lo anterior y haciendo uso de la Ecuación 10 obtuvimos los siguientes resultados:

Una vez obtenidos todos los coeficientes de criticidad exigidos por nuestra metodología, procederemos a utilizar la Ecuación 10, la cual nos permite correlacionar cada parámetro técnico identificado previamente. Esta expresión se basa en la tabla 2 del presente documento, que presenta los coeficientes de ponderación necesarios para realizar un análisis adecuado, considerando la importancia de cada parámetro técnico y de explotación en la seguridad general del paso a nivel.

Al aplicar la Ecuación 10, que integra estos coeficientes de ponderación, podemos evaluar de manera integral la criticidad de cada paso a nivel en función de los parámetros técnicos y de explotación. A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de esta ecuación, reflejando una visión holística de la seguridad en los pasos a nivel del corredor ferroviario del Regiotram de Occidente.

*Tabla 30. Coeficiente de criticidad asociada a los parámetros técnicos y de explotación del Regiotram de Occidente.
Fuente: Elaboración propia.*

ID	Cruce a nivel	Pctec
1	Carrera 138ª/Calle 22	3.56
2	Carrera 129/Calle 22	4.35
3	Carrera 116/Calle 22	3.90
4	Carrera 111ª/Calle 22	2.83
5	Carrera 106/Calle 22	1.90
6	Carrera 103ª/Calle 22	2.02
7	Carrera 100/Calle 22	4.32
8	Carrera 97 /Calle 22	2.53
9	Carrera 96c/Calle 22	2.49
10	Carrera 93/Calle 22	3.32

ID	Cruce a nivel	Pctec
11	Carrera 87ª/Calle 22	2.34
12	Avenida Cali/Calle 22	4.49
13	Carrera 68d/Calle 22	6.60
14	Carrera 56/Calle 22	4.00
15	Carrera 50/Calle 22	5.69
16	Carrera 40/Calle 22	5.59
17	Transversa 32c/Calle 22	4.08
18	Carrera 27/Calle 22	1.32
19	Carrera 22/Diagonal 19ª	1.77

6.3.2. Determinación del Coeficiente de Criticidad asociado a los parámetros sociales.

De acuerdo con nuestra metodología, los parámetros sociales juegan un papel fundamental en el análisis de la criticidad de los pasos a nivel. Dentro de estos parámetros, se destaca la importancia de examinar los reportes históricos de accidentes en los cruces a nivel. La revisión de estas series históricas nos permite identificar aquellos pasos a nivel que presentan una mayor propensión a la ocurrencia de accidentes, especialmente aquellos derivados de la interacción entre conductores, peatones y trenes.

Para realizar el análisis de los parámetros sociales, es fundamental comprender la siniestralidad que se ha presentado en los pasos a nivel del corredor del Regiotram de Occidente. Para ello, nos apoyaremos en el Anexo B del “Estudio de tránsito oferta y demanda del Regiotram de Occidente” (AECOM Colombia, 2022), que proporciona un detallado análisis de la siniestralidad en cada una de las intersecciones correspondientes a los pasos a nivel.

Este análisis ofrece información detallada sobre el historial de accidentes ocurridos en el período comprendido entre los años 2007 y 2019. Se categorizan los accidentes según su gravedad, dividiéndolos en accidentes con heridos leves, accidentes con daños materiales y accidentes con víctimas fatales. Esta clasificación detallada permite una comprensión más profunda de la naturaleza y la frecuencia de los incidentes en cada paso a nivel.

A continuación, se presenta un resumen de la información recopilada de dicho Anexo, que servirá de base para el análisis de criticidad exigido por nuestra metodología.

Tabla 31. Base histórica de accidentes en el periodo comprendido entre el año 2007-2019 de los pasos a nivel del Corredor del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de accidentalidad reposados en (AECOM Colombia, 2022).

ID	Cruce a nivel	Tipo de control	Nº Accidentes registrados	Accidentes con muertos	Accidentes con heridos	Accidentes con solo daños
1	Carrera 138ª/Calle 22	No tiene señalización del corredor férreo	0	0	0	0
2	Carrera 129/Calle 22	Semibarrera y caseta	16	0	8	8
3	Carrera 116/Calle 22	Señal de pare y peligro	20	0	9	11
4	Carrera 111ª/Calle 22	Señal de pare y peligro	12	0	3	9
5	Carrera 106/Calle 22	Señal de peligro	43	1	15	27
6	Carrera 103ª/Calle 22	Señal de pare y peligro	26	0	5	21
7	Carrera 100/Calle 22	Semáforo, semibarrera y caseta	101	0	36	65
8	Carrera 97 /Calle 22	Semáforo-Señal de peligro	32	0	10	22
9	Carrera 96c/Calle 22	Semáforo-Señal de pare y peligro	84	0	8	76
10	Carrera 93/Calle 22	Semáforo	36	0	16	20
11	Carrera 87ª/Calle 22	Semibarrera y caseta	12	1	3	8
12	Avenida Cali/Calle 22	Semáforo, semibarrera y caseta	557	0	114	443
13	Carrera 68d/Calle 22	Semibarrera y caseta	36	0	5	31
14	Carrera 56/Calle 22	Semibarrera y caseta	23	0	6	17
15	Carrera 50/Calle 22	Semáforo, semibarrera y caseta	295	1	43	251
16	Carrera 40/Calle 22	Semibarrera y caseta	50	0	8	42
17	Transversa 32c/Calle 22	Semibarrera y caseta	2	0	0	2

ID	Cruce a nivel	Tipo de control	Nº Accidentes registrados	Accidentes con muertos	Accidentes con heridos	Accidentes con solo daños
18	Carrera 27/Calle 22	Semáforo, semibarrera y caseta	70	2	8	60
19	Carrera 22/Diagonal 19ª	Semáforo, semibarrera y caseta	59	1	13	45

Una vez conocida la base histórica de los accidentes ocurridos en cada paso a nivel y su clasificación de acuerdo a la gravedad de los mismos y también conociendo la exposición al riesgo que tal como lo definimos en el capítulo 5.2.2. y en la Ecuación 11 del presente documento es igual al tránsito promedio anual, el cual ya disponemos en este informe de acuerdo a lo descrito igualmente en el capítulo 6.2.3. donde obtuvimos el TPD anual del año 2019 a través del Estudio de tránsito oferta y demanda del Regiotram (AECOM Colombia, 2022), pero realizamos una proyección de este TPD anual base al año 2027 utilizando las tasas de crecimiento igualmente dadas en dicho estudio. Ahora bien, conociendo el número de accidentes y clasificado por su gravedad de acuerdo a lo presentado en la tabla 32 procederemos a realizar el cálculo del Índice de siniestralidad (IS) utilizando la Ecuación 12, descrita en el capítulo 5.2.2. de este documento.

Una vez hemos analizado el historial de accidentes en cada paso a nivel y los hemos clasificado según su gravedad, es importante considerar la exposición al riesgo. Esta exposición, como definimos en el capítulo 5.2.2. y en la Ecuación 11 del presente documento, se correlaciona directamente con el tránsito promedio anual. Este dato ya está disponible en nuestro informe, como se detalló en el capítulo 6.2.3., donde obtuvimos el TPD anual del año 2019 a través del Estudio de Tránsito Oferta y Demanda del Regiotram (AECOM Colombia, 2022). Y como, además, hemos proyectado este TPD anual base al año 2027 utilizando las tasas de crecimiento proporcionadas en dicho estudio. Este proceso nos permite comprender mejor la dinámica del tránsito y su evolución a lo largo del tiempo, lo cual es fundamental para evaluar la seguridad en los pasos a nivel.

Con esta información a mano, procederemos a calcular el Índice de Siniestralidad (IS). Este cálculo se realizará utilizando la Ecuación 12, detallada en el capítulo 5.2.2. del presente documento y la cual correlaciona los accidentes según su gravedad y la Exposición al Riesgo (TT). Para ello, emplearemos el número de accidentes clasificados por su gravedad,

tal como se presenta en la tabla 32. Este índice nos permitirá evaluar la relación entre la cantidad de accidentes ocurridos y la exposición al riesgo, proporcionando una medida objetiva de la seguridad en cada paso a nivel y la cual nos permita posteriormente realizar un análisis de la criticidad de cada paso a nivel. A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos de nuestro análisis.

Tabla 32. Índice de siniestralidad de los Pasos a Nivel del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia

ID	Cruce a nivel	Nº Accidentes registrados	Accidentes con muertos	Accidentes con heridos	Accidentes con solo daños	Exposición al riesgo	índice de siniestralidad (IS)
1	Carrera 138ª/Calle 22	0	0	0	0	79	0.00
2	Carrera 129/Calle 22	16	0	8	8	76336	20.96
3	Carrera 116/Calle 22	20	0	9	11	45617	43.84
4	Carrera 111ª/Calle 22	12	0	3	9	48081	24.96
5	Carrera 106/Calle 22	43	1	15	27	50178	85.69
6	Carrera 103ª/Calle 22	26	0	5	21	20844	124.74
7	Carrera 100/Calle 22	101	0	36	65	95713	105.52
8	Carrera 97 /Calle 22	32	0	10	22	97456	32.84
9	Carrera 96c/Calle 22	84	0	8	76	107317	78.27
10	Carrera 93/Calle 22	36	0	16	20	90099	39.96
11	Carrera 87ª/Calle 22	12	1	3	8	1584	757.58
12	Avenida Cali/Calle 22	557	0	114	443	376044	148.12
13	Carrera 68d/Calle 22	36	0	5	31	248148	14.51
14	Carrera 56/Calle 22	23	0	6	17	20504	112.17
15	Carrera 50/Calle 22	295	1	43	251	265000	111.32
16	Carrera 40/Calle 22	50	0	8	42	132647	37.69
17	Transversal 32c/Calle 22	2	0	0	2	2416	82.78

ID	Cruce a nivel	Nº Accidentes registrados	Accidentes con muertos	Accidentes con heridos	Accidentes con solo daños	Exposición al riesgo	Índice de siniestralidad (IS)
18	Carrera 27/Calle 22	70	2	8	60	24660	283.86
19	Carrera 22/Diagonal 19ª	59	1	13	45	16891	349.30

Una vez hayamos calculado el índice de siniestralidad (IS) para cada paso a nivel en estudio, procederemos a identificar tanto el índice de siniestralidad mínimo como el máximo dentro de los 19 pasos analizados en el corredor ferroviario del Regiotram de Occidente. Esto nos permitirá aplicar la Ecuación 13, detallada en el capítulo 5.2.2.1 del presente documento. Dicha ecuación nos facilitará la determinación de la criticidad de cada paso a nivel en función del índice de siniestralidad, el cual a su vez representa la criticidad asociada a los parámetros sociales.

Tabla 33. Cálculo de la criticidad asociada a los parámetros sociales (Pcsoc). Fuente: Elaboración propia

ID	Cruce a nivel	Parámetros sociales	
		Índice de siniestralidad	Pcsoc
1	Carrera 138ª/Calle 22	0.00	0.00
2	Carrera 129/Calle 22	20.96	0.28
3	Carrera 116/Calle 22	43.84	0.58
4	Carrera 111ª/Calle 22	24.96	0.33
5	Carrera 106/Calle 22	85.69	1.13
6	Carrera 103ª/Calle 22	124.74	1.65
7	Carrera 100/Calle 22	105.52	1.39
8	Carrera 97 /Calle 22	32.84	0.43
9	Carrera 96c/Calle 22	78.27	1.03
10	Carrera 93/Calle 22	39.96	0.53
11	Carrera 87ª/Calle 22	757.58	10.00
12	Avenida Cali/Calle 22	148.12	1.96
13	Carrera 68d/Calle 22	14.51	0.19
14	Carrera 56/Calle 22	112.17	1.48
15	Carrera 50/Calle 22	111.32	1.47
16	Carrera 40/Calle 22	37.69	0.50
17	Transversa 32c/Calle 22	82.78	1.09
18	Carrera 27/Calle 22	283.86	3.75

ID	Cruce a nivel	Parámetros sociales	
		Índice de siniestralidad	Pcsoc
19	Carrera 22/Diagonal 19ª	349.30	4.61

6.3.3. Determinación de Coeficiente de Criticidad asociado a los Parámetros Ambientales y Climatológicos.

De acuerdo con lo estipulado en el capítulo 5.2.3 del presente documento, la evaluación de la criticidad de un paso a nivel en función de los parámetros ambientales y climatológicos se centra principalmente en la afección que la lluvia tiene sobre las condiciones de circulación y seguridad para trenes, vehículos y peatones. La lluvia impacta directamente la visibilidad de todos los actores viales, afecta las distancias de frenado de coches y trenes, reduce la fricción entre el carril y la rueda en el caso de los trenes, y entre la calzada y las llantas en el caso de los vehículos. Estos factores combinados pueden aumentar significativamente el riesgo de accidentes en los pasos a nivel.

Dado lo anterior, y siguiendo lo especificado en el capítulo mencionado, debemos investigar las precipitaciones anuales en la zona donde se ubica el proyecto en estudio. En nuestro caso específico, el Proyecto Regiotram de Occidente se encuentra geográficamente en el departamento de Cundinamarca, abarcando desde la Ciudad de Bogotá D.C. hasta el municipio de Facatativá. Sin embargo, para este trabajo nos centraremos en 19 pasos a nivel, todos ubicados dentro del perímetro distrital de la ciudad de Bogotá.

El primer paso para la aplicación de nuestra metodología será obtener datos precisos sobre las precipitaciones anuales en la ciudad de Bogotá. Para la obtención de estos datos consultaremos a el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) de Colombia, que proporciona información detallada sobre las precipitaciones mensuales y anuales. Además, es importante considerar las variaciones estacionales y la frecuencia de eventos de lluvias intensas, ya que estas condiciones específicas pueden tener un impacto considerable en la seguridad de los pasos a nivel. De acuerdo a lo anterior se ha consultado al IDEAM, donde hemos tenido acceso al Documento de Características Climatológicas de las Ciudades principales y municipios turísticos de Colombia del año 2023 (IDEAM, 2023),

que servirá como base para obtener la información necesaria para desarrollar nuestro estudio, proporcionando los siguientes datos:

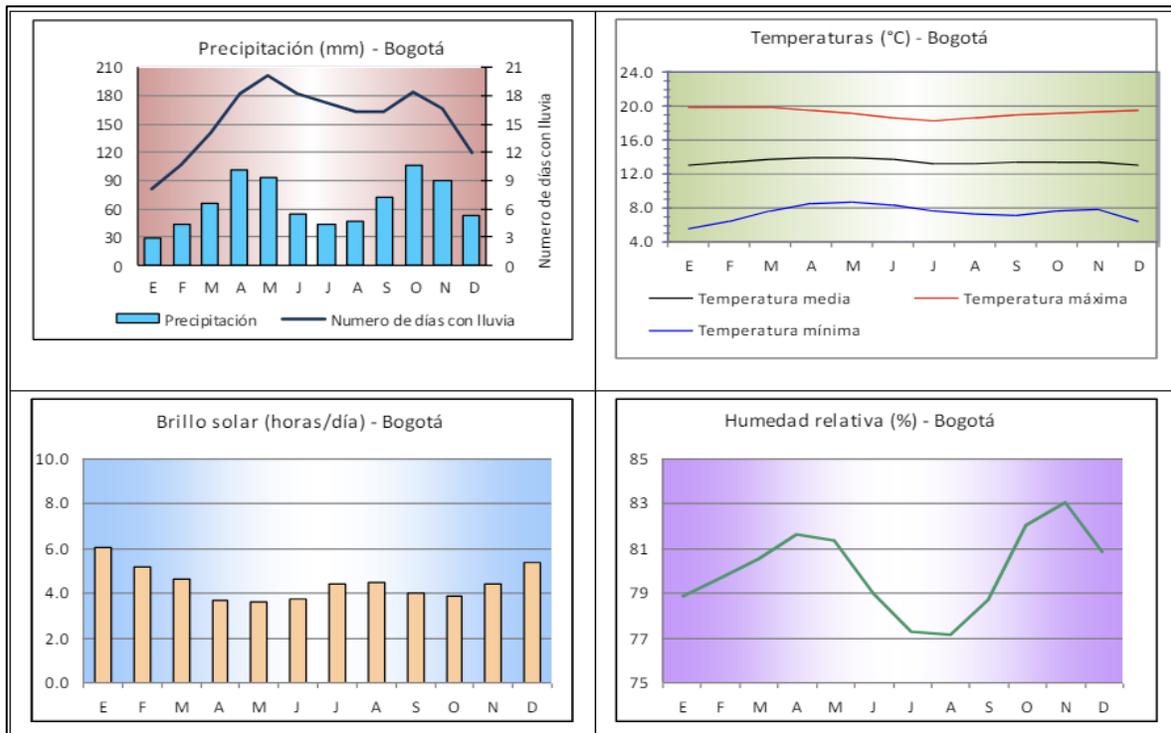


Figura 32. Características climatológicas de la ciudad de Bogotá. Fuente: Gráficos obtenidos de (IDEAM, 2023).

De acuerdo a lo anterior y lo escrito en el Documento Características Climatológicas de las ciudades principales y municipios turísticos de Colombia, se obtuvo que la precipitación promedio anual en la ciudad de Bogotá es de 797 mm al año, presentando un clima frio y muy seco. (IDEAM, 2023).

Con esta información, podremos aplicar la Ecuación 14 descrita en el capítulo 5.2.3.1 del presente documento, la cual nos permitirá cuantificar la criticidad de cada paso a nivel en función de los parámetros climatológicos. Este análisis nos ayudará a identificar los pasos a nivel que requieren medidas adicionales de seguridad debido a las condiciones ambientales adversas, mejorando así la seguridad global del corredor ferroviario del Regiotram de Occidente.

Tabla 34. Coeficiente de criticidad en función de los Parámetros Ambientales y Climatológicos. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos de (IDEAM, 2023).

ID	Cruce a nivel	Precipitaciones anuales (mm)	Pccli
1	Carrera 138ª/Calle 22	797.00	1.45
2	Carrera 129/Calle 22	797.00	1.45
3	Carrera 116/Calle 22	797.00	1.45
4	Carrera 111ª/Calle 22	797.00	1.45
5	Carrera 106/Calle 22	797.00	1.45
6	Carrera 103ª/Calle 22	797.00	1.45
7	Carrera 100/Calle 22	797.00	1.45
8	Carrera 97 /Calle 22	797.00	1.45
9	Carrera 96c/Calle 22	797.00	1.45
10	Carrera 93/Calle 22	797.00	1.45
11	Carrera 87ª/Calle 22	797.00	1.45
12	Avenida Cali/Calle 22	797.00	1.45
13	Carrera 68d/Calle 22	797.00	1.45
14	Carrera 56/Calle 22	797.00	1.45
15	Carrera 50/Calle 22	797.00	1.45
16	Carrera 40/Calle 22	797.00	1.45
17	Transversa 32c/Calle 22	797.00	1.45
18	Carrera 27/Calle 22	797.00	1.45
19	Carrera 22/Diagonal 19ª	797.00	1.45

Dado que todos los pasos a nivel en estudio se encuentran en la misma zona geográfica, todos compartirán el mismo Coeficiente de Criticidad asociado a los parámetros climatológicos. Como se muestra en la tabla anterior, el coeficiente de criticidad es de 1,45, lo cual es relativamente bajo. Esto se debe a la baja precipitación anual en la ciudad de Bogotá en comparación con la precipitación máxima del nodo representativo, que es Medellín, con una precipitación anual de 2030 mm, según se indicó en el capítulo 5.2.3 del presente documento.

Es importante mencionar que el análisis de la criticidad de los parámetros climatológicos en esta metodología cobra mayor relevancia cuando se analizan líneas más largas que contengan pasos a nivel ubicados a distancias significativas y en regiones o ciudades distintas dentro de la geografía colombiana. En tales casos, las variaciones climáticas

pueden tener un impacto mucho más pronunciado en la seguridad y operación de los pasos a nivel, requiriendo medidas de mitigación específicas para cada contexto regional.

6.3.4. Determinación del Coeficiente de Criticidad asociado a Parámetros Geométricos de los pasos a nivel del Regiotram de Occidente.

En este capítulo, calcularemos los coeficientes de criticidad asociados a los parámetros geométricos para cada uno de los pasos a nivel pertenecientes al tramo de estudio del Proyecto Regiotram de Occidente. Para ello, nos basaremos en lo descrito en el capítulo 5.2.4 y sus correspondientes subcapítulos del presente documento. Realizaremos un análisis detallado de cada parámetro geométrico, siguiendo rigurosamente las exigencias de nuestra metodología. Este enfoque nos permitirá evaluar con precisión la criticidad de cada paso a nivel en función de sus características geométricas, asegurando así una evaluación detallada de dichos parámetros.

6.3.4.1. Criticidad en función de la pendiente de aproximación (P_{cpend}).

Siguiendo lo descrito en el capítulo 5.2.4.1 del presente documento, se detalla el procedimiento para evaluar la criticidad en función de la pendiente de aproximación. Según lo establecido en dicho capítulo, se aceptará una pendiente máxima de aproximación del 4% en las vías que intercepten con el corredor ferroviario. Esto es para garantizar adecuadas condiciones de visibilidad y mejorar la percepción de seguridad al circular por el paso a nivel. Además, se evaluará que el paso a nivel tenga una pendiente mínima del 0,5% para asegurar el drenaje eficiente del agua superficial sobre la calzada.

Para el desarrollo de este análisis, se midió la pendiente longitudinal de las vías que acceden a los distintos cruces a nivel utilizando la herramienta de Perfil de Elevación del software Google Earth. Es importante reconocer que esta forma de obtención de las pendientes tiene limitaciones de precisión, ya que Google Earth presenta un modelo de elevación con detalles limitados. No obstante, dado que el presente informe tiene fines académicos, la información extraída de este software nos permite realizar un análisis representativo de las condiciones de los pasos a nivel en función de las pendientes de aproximación de las vías que los conforman.

A continuación, mostraremos el paso para determinar las pendientes de aproximación mediante el uso de Google Earth:

Tabla 35. Procedimiento para la obtención de la pendiente de aproximación. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Paso	Descripción	Registro
1	Traza una ruta que comience en el eje de las vías ferroviarias y continúe por el eje de la carretera adyacente al corredor ferroviario utilizando la herramienta de medición del programa. Luego, verifica la diferencia de elevación desde el punto de inicio hasta los 8 metros siguientes	
2	Traza otra ruta a lo largo del eje de la carretera en el lado opuesto del corredor ferroviario y determina la diferencia de elevación entre el corredor férreo y la carretera a los 8 metros de distancia.	
3	Se realiza un análisis comparativo y se selecciona la pendiente mayor entre las dos, ya que esta será la más crítica en términos de seguridad para el paso a nivel.	

De acuerdo a lo anterior y analizando de esta manera cada uno de los pasos a nivel objeto del presente estudio se obtuvieron los siguientes valores con respecto a la pendiente de aproximación:

Tabla 36. Pendientes de aproximación de los pasos a nivel pertenecientes al Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia

ID	Cruce a nivel	Pendiente de aproximación (%)
1	Carrera 138ª/Calle 22	0.50%
2	Carrera 129/Calle 22	0.50%
3	Carrera 116/Calle 22	0.50%
4	Carrera 111ª/Calle 22	2.00%
5	Carrera 106/Calle 22	0.50%
6	Carrera 103ª/Calle 22	2.00%
7	Carrera 100/Calle 22	0.50%
8	Carrera 97 /Calle 22	0.50%
9	Carrera 96c/Calle 22	0.50%
10	Carrera 93/Calle 22	1.00%
11	Carrera 87ª/Calle 22	1.00%
12	Avenida Cali/Calle 22	0.50%
13	Carrera 68d/Calle 22	0.50%
14	Carrera 56/Calle 22	0.50%
15	Carrera 50/Calle 22	1.50%
16	Carrera 40/Calle 22	0.50%
17	Transversa 32c/Calle 22	0.50%
18	Carrera 27/Calle 22	0.50%
19	Carrera 22/Diagonal 19ª	0.50%

De acuerdo a los valores obtenidos y mostrados en la tabla 37, procederemos a hallar el Coeficiente de Criticidad en función de la Pendiente de Aproximación (P_{cpend}) mediante la ecuación 15. Explicada en el capítulo 5.2.4.1 del presente informe.

Tabla 37. Coeficiente de criticidad en función de la pendiente de aproximación (P_{cpend}) para los pasos a nivel pertenecientes al corredor del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia

ID	Cruce a nivel	Pendiente de aproximación (%)	P_{cpend}
1	Carrera 138ª/Calle 22	0.50%	0.00
2	Carrera 129/Calle 22	0.50%	0.00
3	Carrera 116/Calle 22	0.50%	0.00
4	Carrera 111ª/Calle 22	2.00%	5.00
5	Carrera 106/Calle 22	0.50%	0.00

ID	Cruce a nivel	Pendiente de aproximación (%)	Pcpend
6	Carrera 103ª/Calle 22	2.00%	5.00
7	Carrera 100/Calle 22	0.50%	0.00
8	Carrera 97 /Calle 22	0.50%	0.00
9	Carrera 96c/Calle 22	0.50%	0.00
10	Carrera 93/Calle 22	1.00%	1.67
11	Carrera 87ª/Calle 22	1.00%	1.67
12	Avenida Cali/Calle 22	0.50%	0.00
13	Carrera 68d/Calle 22	0.50%	0.00
14	Carrera 56/Calle 22	0.50%	0.00
15	Carrera 50/Calle 22	1.50%	3.33
16	Carrera 40/Calle 22	0.50%	0.00
17	Transversa 32c/Calle 22	0.50%	0.00
18	Carrera 27/Calle 22	0.50%	0.00
19	Carrera 22/Diagonal 19ª	0.50%	0.00

Dado lo anterior podemos decir que actualmente las vías que pertenecen a cada uno de los pasos a nivel en estudio tienen pendientes aptas que garantizan en principio una adecuada visibilidad y circulación por cada uno de los pasos a nivel en estudio.

6.3.4.2. Criticidad en función del número de carriles vehiculares que transitan por los pasos a nivel del Regiotram de Occidente.

Para calcular el coeficiente de criticidad en relación con el número de carriles vehiculares que atraviesan cada paso a nivel en estudio, llevaremos a cabo una inspección visual utilizando Google Earth. El propósito de esta inspección es contar y registrar el número de carriles que convergen en cada paso a nivel. A partir de este análisis, identificaremos el paso a nivel con el menor y el mayor número de carriles dentro del tramo del Regiotram que estamos investigando. A continuación, presentaremos los resultados obtenidos tras nuestra inspección.

Tabla 38. Número de Carriles vehiculares que convergen en los distintos PPNN. Fuente: Elaboración propia.

ID	Cruce a nivel	Número de Carriles vehiculares.
1	Carrera 138ª/Calle 22	1.00
2	Carrera 129/Calle 22	2.00
3	Carrera 116/Calle 22	3.00
4	Carrera 111ª/Calle 22	2.00
5	Carrera 106/Calle 22	2.00
6	Carrera 103ª/Calle 22	2.00
7	Carrera 100/Calle 22	4.00
8	Carrera 97 /Calle 22	2.00
9	Carrera 96c/Calle 22	2.00
10	Carrera 93/Calle 22	2.00
11	Carrera 87ª/Calle 22	1.00
12	Avenida Cali/Calle 22	6.00
13	Carrera 68d/Calle 22	4.00
14	Carrera 56/Calle 22	2.00
15	Carrera 50/Calle 22	6.00
16	Carrera 40/Calle 22	4.00
17	Transversa 32c/Calle 22	2.00
18	Carrera 27/Calle 22	6.00
19	Carrera 22/Diagonal 19ª	4.00

Con los datos obtenidos y expuestos en la tabla 39, procederemos a aplicar la ecuación 16 de nuestra metodología, la cual nos permitirá correlacionar el número de carriles que convergen en cada uno de los pasos a nivel en estudio con el coeficiente de criticidad (PCnc). Obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 39. Coeficiente de Criticidad en función del número de carriles que convergen en los pasos a nivel. Fuente: Elaboración propia

ID	Cruce a nivel	Número de Carriles vehiculares.	PCnc
1	Carrera 138ª/Calle 22	1.00	0.00
2	Carrera 129/Calle 22	2.00	2.00
3	Carrera 116/Calle 22	3.00	4.00
4	Carrera 111ª/Calle 22	2.00	2.00
5	Carrera 106/Calle 22	2.00	2.00
6	Carrera 103ª/Calle 22	2.00	2.00

ID	Cruce a nivel	Número de Carriles vehiculares.	PCnc
7	Carrera 100/Calle 22	4.00	6.00
8	Carrera 97 /Calle 22	2.00	2.00
9	Carrera 96c/Calle 22	2.00	2.00
10	Carrera 93/Calle 22	2.00	2.00
11	Carrera 87ª/Calle 22	1.00	0.00
12	Avenida Cali/Calle 22	6.00	10.00
13	Carrera 68d/Calle 22	4.00	6.00
14	Carrera 56/Calle 22	2.00	2.00
15	Carrera 50/Calle 22	6.00	10.00
16	Carrera 40/Calle 22	4.00	6.00
17	Transversa 32c/Calle 22	2.00	2.00
18	Carrera 27/Calle 22	6.00	10.00
19	Carrera 22/Diagonal 19ª	4.00	6.00

De acuerdo con los datos presentados en la tabla anterior, se puede inferir que los cruces más críticos en términos del número de carriles que convergen en el paso a nivel son los PPNN 15 y 18, cada uno con una configuración de 6 carriles vehiculares. Esta configuración plantea un riesgo significativo debido a la capacidad de estos pasos para soportar volúmenes vehiculares elevados, lo que aumenta la probabilidad de accidentes. Es crucial abordar rápidamente estas situaciones para mitigar el riesgo de accidentes graves en el corredor ferroviario.

Además, es importante considerar que la presencia de un mayor número de carriles no solo implica una mayor capacidad para el tráfico vehicular, sino también una mayor complejidad en la gestión del flujo de vehículos y peatones en el cruce. Esto puede requerir la implementación de medidas adicionales de seguridad y control de tráfico, como señalización mejorada, dispositivos de alerta temprana, sistemas de control de acceso o la propia supresión del paso a nivel para garantizar la seguridad de todos los usuarios.

6.3.4.3. Criticidad en función del ancho de los pasos a nivel del Regiotram de Occidente.

Para determinar el coeficiente de criticidad asociado al ancho de cada paso a nivel, nos referimos a lo establecido en el capítulo 5.2.4.3 de este documento. En las tablas 3 y 4 se presentan los anchos recomendados de acuerdo al tipo de vía que converja al paso a nivel (urbana o nacional), teniendo en cuenta el número de carriles, como se estudió en el capítulo anterior, y los condicionantes geométricos establecidos por el Manual de Diseño de Carreteras de Colombia. Para el caso de estudio, todas las vías que convergen en los distintos pasos a nivel del Regiotram de Occidente son de carácter urbano por lo que se medirán con respecto a los parámetros exigidos para este tipo de vías.

Para implementar la metodología propuesta procedemos a medir los anchos actuales de cada paso a nivel para realizar un análisis comparativo con los anchos recomendados por nuestra metodología. Esta comparación nos permitirá evaluar si los anchos actuales cumplen con los estándares de seguridad establecidos y determinar la criticidad de cada paso a nivel en función de esta variable. A continuación, se presenta los anchos de cada paso a nivel en estudio.

Tabla 40. Ancho de los PPNN del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia.

ID	Cruce a nivel	Ancho del cruce a nivel (m)
1	Carrera 138ª/Calle 22	8.32
2	Carrera 129/Calle 22	8.99
3	Carrera 116/Calle 22	12.48
4	Carrera 111ª/Calle 22	8.11
5	Carrera 106/Calle 22	9.11
6	Carrera 103ª/Calle 22	7.10
7	Carrera 100/Calle 22	16.74
8	Carrera 97 /Calle 22	7.66
9	Carrera 96c/Calle 22	11.02
10	Carrera 93/Calle 22	10.55
11	Carrera 87ª/Calle 22	8.76
12	Avenida Cali/Calle 22	26.70
13	Carrera 68d/Calle 22	13.86
14	Carrera 56/Calle 22	8.31
15	Carrera 50/Calle 22	21.27
16	Carrera 40/Calle 22	15.64

ID	Cruce a nivel	Ancho del cruce a nivel (m)
17	Transversa 32c/Calle 22	7.99
18	Carrera 27/Calle 22	19.54
19	Carrera 22/Diagonal 19ª	16.68

Basándonos en los datos presentados en la tabla anterior, procederemos a utilizar la ecuación 17. Esta ecuación nos permitirá establecer una correlación entre los anchos medidos y el coeficiente de criticidad, considerando los anchos recomendados por nuestra metodología. A continuación, se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 41. Coeficiente de criticidad asociado al ancho de los pasos a nivel (PCxc). Fuente: Elaboración propia.

ID	Cruce a nivel	Ancho del cruce a nivel (m)	PCxc
1	Carrera 138ª/Calle 22	8.32	0.00
2	Carrera 129/Calle 22	8.99	0.01
3	Carrera 116/Calle 22	12.48	0.02
4	Carrera 111ª/Calle 22	8.11	0.99
5	Carrera 106/Calle 22	9.11	0.00
6	Carrera 103ª/Calle 22	7.10	2.12
7	Carrera 100/Calle 22	16.74	0.70
8	Carrera 97 /Calle 22	7.66	1.49
9	Carrera 96c/Calle 22	11.02	0.00
10	Carrera 93/Calle 22	10.55	0.00
11	Carrera 87ª/Calle 22	8.76	0.00
12	Avenida Cali/Calle 22	26.70	0.00
13	Carrera 68d/Calle 22	13.86	2.30
14	Carrera 56/Calle 22	8.31	0.77
15	Carrera 50/Calle 22	21.27	1.49
16	Carrera 40/Calle 22	15.64	1.31
17	Transversa 32c/Calle 22	7.99	1.12
18	Carrera 27/Calle 22	19.54	2.18
19	Carrera 22/Diagonal 19ª	16.68	0.73

Basándonos en los valores obtenidos en la tabla 42, se puede concluir que los niveles de criticidad asociados a los anchos de los pasos a nivel no son significativamente altos. Esto

sugiere que los anchos de los pasos a nivel están en consonancia con las dimensiones de las infraestructuras viales que confluyen sobre ellos, lo que indica una adecuada adecuación a las necesidades de circulación vehicular y peatonal en la zona. Esta correlación entre los anchos medidos y los recomendados por nuestra metodología refleja una planificación y diseño apropiados de los pasos a nivel, contribuyendo a la seguridad y eficiencia del tráfico en el corredor ferroviario.

6.3.4.4. Criticidad integrada de los parámetros geométricos evaluados en los pasos a nivel pertenecientes al corredor ferroviario del Regiotram de Occidente.

Siguiendo lo establecido por la metodología propuesta, el siguiente paso será determinar el coeficiente de criticidad asociado a la integración de los parámetros geométricos evaluados anteriormente. Para ello, utilizaremos los coeficientes de ponderación establecidos en la tabla 5 del presente documento y aplicaremos la Ecuación 18. Esta ecuación nos permitirá correlacionar y ponderar los coeficientes de criticidad de los distintos parámetros geométricos de acuerdo con los valores de la tabla mencionada. El objetivo es encontrar un valor integral que represente de manera holística la criticidad asociada a la geometría de los diferentes pasos a nivel del corredor ferroviario del Regiotram de Occidente.

A continuación, procederemos a mostrar los resultados obtenidos.

Tabla 42. Coeficiente de criticidad asociada a los parámetros geométricos. Fuente: Elaboración propia.

ID	Cruce a nivel	Pcgeo
1	Carrera 138ª/Calle 22	0.00
2	Carrera 129/Calle 22	0.60
3	Carrera 116/Calle 22	1.20
4	Carrera 111ª/Calle 22	2.90
5	Carrera 106/Calle 22	0.60
6	Carrera 103ª/Calle 22	3.23
7	Carrera 100/Calle 22	2.01
8	Carrera 97 /Calle 22	1.05
9	Carrera 96c/Calle 22	0.60
10	Carrera 93/Calle 22	1.27
11	Carrera 87ª/Calle 22	0.67

ID	Cruce a nivel	Pcgeo
12	Avenida Cali/Calle 22	3.00
13	Carrera 68d/Calle 22	2.49
14	Carrera 56/Calle 22	0.83
15	Carrera 50/Calle 22	4.78
16	Carrera 40/Calle 22	2.19
17	Transversa 32c/Calle 22	0.94
18	Carrera 27/Calle 22	3.66
19	Carrera 22/Diagonal 19 ^a	2.02

De la tabla 43, observamos que el coeficiente de criticidad asociado a los parámetros geométricos es relativamente bajo, con el valor más alto siendo 4,78 en el PPNN 15. Esto indica que, en general, los pasos a nivel cuentan con un buen diseño geométrico de las vías que convergen en ellos. Un diseño geométrico adecuado contribuye significativamente a la reducción de los coeficientes de criticidad, ya que mejora las condiciones de visibilidad, facilita la circulación y disminuye el riesgo de accidentes.

Sin embargo, aunque los valores de criticidad son bajos, es de suma importancia que el administrador de la infraestructura vial preste especial atención a aquellos cruces con criticidades superiores a 3. Aunque estos valores no son extremadamente altos, todavía representan un grado de peligrosidad que podría repercutir en la ocurrencia de accidentes. Para estos casos, se recomienda realizar un análisis más detallado y considerar posibles medidas de mitigación, tales como mejorar la señalización, ajustar el diseño geométrico o implementar tecnologías de alerta temprana.

6.3.5. Criticidad general de los Pasos a Nivel en estudio dentro del Regiotram de Occidente.

El paso final para determinar la criticidad general de nuestros pasos a nivel consistirá en la ponderación de los parámetros técnicos y de explotación, sociales, ambientales y climatológicos, así como los parámetros geométricos. Este proceso sigue las pautas

establecidas en nuestra metodología, detalladas en el capítulo 5.2.5 del presente documento. Para llevar a cabo esta ponderación, nos apoyaremos en el panel de ponderación delineado en la tabla 6 del mismo documento y utilizaremos la ecuación 19, explicada en este mismo capítulo. Esta ecuación nos permitirá correlacionar los diversos coeficientes de criticidad con el objetivo de determinar la criticidad general de los distintos pasos a nivel sujetos a este análisis.

A continuación, mostraremos los resultados de criticidad general obtenido luego de la aplicación de la ecuación antes mencionada.

Tabla 43. Criticidad general de los PPNN objeto de estudio dentro del Proyecto Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia.

ID	Cruce a nivel	Parámetros técnicos y de explotación	Parámetros sociales	Factores climatológicos	Parámetros geométricos	Criticidad
		Pctec	Pcis	Pcli	Pcgeo	
1	Carrera 138ª/Calle 22	3.56	0.00	1.45	0.00	16.42
2	Carrera 129/Calle 22	4.35	0.28	1.45	0.60	21.79
3	Carrera 116/Calle 22	3.90	0.58	1.45	1.20	22.27
4	Carrera 111ª/Calle 22	2.83	0.33	1.45	2.90	22.66
5	Carrera 106/Calle 22	1.90	1.13	1.45	0.60	13.28
6	Carrera 103ª/Calle 22	2.02	1.65	1.45	3.23	22.44
7	Carrera 100/Calle 22	4.32	1.39	1.45	2.01	27.57
8	Carrera 97 /Calle 22	2.53	0.43	1.45	1.05	16.09
9	Carrera 96c/Calle 22	2.49	1.03	1.45	0.60	15.48

ID	Cruce a nivel	Parámetros técnicos y de explotación	Parámetros sociales	Factores climatológicos	Parámetros geométricos	Críticidad
		Pctec	Pcis	Pcli	Pcgeo	
10	Carrera 93/Calle 22	3.32	0.53	1.45	1.27	20.04
11	Carrera 87ª/Calle 22	2.34	10.00	1.45	0.67	28.55
12	Avenida Cali/Calle 22	4.49	1.96	1.45	3.00	32.08
13	Carrera 68d/Calle 22	6.60	0.19	1.45	2.49	36.33
14	Carrera 56/Calle 22	4.00	1.48	1.45	0.83	22.89
15	Carrera 50/Calle 22	5.69	1.47	1.45	4.78	41.49
16	Carrera 40/Calle 22	5.59	0.50	1.45	2.19	31.86
17	Transversal 32c/Calle 22	4.08	1.09	1.45	0.94	22.93
18	Carrera 27/Calle 22	1.32	3.75	1.45	3.66	24.06
19	Carrera 22/Diagonal 19ª	1.77	4.61	1.45	2.02	22.25

A continuación, presentaremos un cuadro resumen de las criticidades obtenidas y expuestas en la tabla anterior, clasificándolas mediante una escala de colores. Aquellos pasos a nivel con menor coeficiente de criticidad general se destacarán en verde, mientras que los más críticos se resaltarán en rojo.

Tabla 44. Cuadro resumen y clasificación por color de los PPNN en función de su criticidad. Fuente: Elaboración propia.

ID	Cruce a nivel (PPNN)	Críticidad
1	Carrera 138ª/Calle 22	16.42
2	Carrera 129/Calle 22	21.79
3	Carrera 116/Calle 22	22.27

ID	Cruce a nivel (PPNN)	Criticidad
4	Carrera 111ª/Calle 22	22.66
5	Carrera 106/Calle 22	13.28
6	Carrera 103ª/Calle 22	22.44
7	Carrera 100/Calle 22	27.57
8	Carrera 97 /Calle 22	16.09
9	Carrera 96c/Calle 22	15.48
10	Carrera 93/Calle 22	20.04
11	Carrera 87ª/Calle 22	28.55
12	Avenida Cali/Calle 22	32.08
13	Carrera 68d/Calle 22	36.33
14	Carrera 56/Calle 22	22.89
15	Carrera 50/Calle 22	41.49
16	Carrera 40/Calle 22	31.86
17	Transversa 32c/Calle 22	22.93
18	Carrera 27/Calle 22	24.06
19	Carrera 22/Diagonal 19ª	22.25

De acuerdo con la tabla 45, se puede observar que el paso más crítico entre los 19 pasos a nivel analizados es el PPNN 15, correspondiente al cruce ubicado en la Carrera 50 con Calle 22. La alta criticidad de este paso se explica por varios factores.

En primer lugar, los altos volúmenes de tráfico, proyectados en 1205 vehículos diarios para el periodo 2023-2027, volumen que si analizamos corresponde a un tránsito promedio diario muy elevado y que se debe a que el paso a nivel se encuentra ubicado en la Carrera 50, una de las arterias principales de la ciudad de Bogotá que conecta el norte y el sur de la ciudad. Este elevado tráfico vehicular aumenta la probabilidad de incidentes y congestiones, afectando la seguridad y eficiencia del cruce.

En segundo lugar, su configuración geométrica contribuye significativamente a su criticidad. Se trata de un paso a nivel donde el corredor ferroviario se cruza con una vía de doble calzada, cada una con tres carriles de circulación por sentido. Esta disposición geométrica complica la gestión del tráfico y aumenta el riesgo de colisiones, ya que los conductores y peatones deben interactuar con múltiples flujos de tráfico en ambos sentidos.

Además, la interacción entre vehículos, peatones y trenes en este cruce específico añade un nivel adicional de complejidad. La visibilidad puede ser comprometida debido a la densidad de tráfico y las posibles obstrucciones visuales, lo que exige un diseño óptimo y medidas de seguridad rigurosas para mitigar los riesgos.



Figura 33. Vista aérea en plante y sección transversal en la actualidad del PPNN15. Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

Por otro lado, podemos determinar que el paso a nivel menos crítico es el PPNN 5, situado sobre la carrera 106 con Calle 22. Esto se debe a que la carrera 106 es una vía local que principalmente sirve para el acceso a las localidades y barrios circundantes, lo que resulta en un volumen de tráfico relativamente bajo en comparación con otras vías que cruzan el corredor ferroviario en distintos pasos a nivel. Se proyecta un tráfico para 2027 de 225 vehículos por día. Además, al analizar los resultados de sus otros coeficientes de criticidad, observamos que el paso a nivel cuenta con una sección geométrica amplia, un ancho adecuado y pendientes muy aptas para el tránsito. Por lo tanto, podemos concluir que su nivel de criticidad es acorde a las condiciones actuales de circulación.

De acuerdo en lo anterior, en la presente tabla presentaremos los pasos a nivel analizados organizados de acuerdo a su necesidad y prioridad de intervención:

Tabla 45. Orden de prioridad de intervención sobre los PPNN objeto de estudio pertenecientes al Proyecto del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia.

Orden de prioridad	ID	Cruce a nivel (PPNN)	Criticidad
1	15	Carrera 50/Calle 22	41.49
2	13	Carrera 68d/Calle 22	36.33
3	12	Avenida Cali/Calle 22	32.08

Orden de prioridad	ID	Cruce a nivel (PPNN)	Criticidad
4	16	Carrera 40/Calle 22	31.86
5	11	Carrera 87ª/Calle 22	28.55
6	7	Carrera 100/Calle 22	27.57
7	18	Carrera 27/Calle 22	24.06
8	17	Transversa 32c/Calle 22	22.93
9	14	Carrera 56/Calle 22	22.89
10	4	Carrera 111ª/Calle 22	22.66
11	6	Carrera 103ª/Calle 22	22.44
12	3	Carrera 116/Calle 22	22.27
13	19	Carrera 22/Diagonal 19ª	22.25
14	2	Carrera 129/Calle 22	21.79
15	10	Carrera 93/Calle 22	20.04
16	1	Carrera 138ª/Calle 22	16.42
17	8	Carrera 97 /Calle 22	16.09
18	9	Carrera 96c/Calle 22	15.48
19	5	Carrera 106/Calle 22	13.28

La tabla anterior se ha generado organizando los Pasos a Nivel (PPNN) según su nivel de criticidad, desde el más crítico hasta el menos crítico. Esta clasificación se basa en la definición de criticidad establecida en el capítulo 5.2 del presente informe, donde se describe como “la urgencia de abordar un paso a nivel específico debido al riesgo de ocurrencia de un accidente entre los diferentes tipos de tráfico que circulan por él”. En otras palabras, la criticidad determina la necesidad prioritaria de implementar medidas para mejorar la seguridad en un paso a nivel en comparación con otros en la misma ruta de circulación.

La tabla proporciona una visión clara que será de gran utilidad para el Administrador ferroviario del Regiotram de Occidente para elaborar un plan de intervención destinado a mejorar la seguridad en los Pasos a Nivel de la ciudad de Bogotá. Esto ayudaría a optimizar recursos financieros y técnicos para abordar prioritariamente los PPNN con mayor criticidad, los cuales representan un riesgo más alto de accidentes en el corredor ferroviario. La información presentada en la tabla servirá como guía para la toma de decisiones estratégicas y la asignación eficiente de recursos con el objetivo de reducir los riesgos y mejorar la seguridad vial en la red de Pasos a Nivel.

6.4. Determinación del Nivel de Riesgo de los pasos a nivel objeto de estudio dentro del corredor ferroviario del Regiotram de Occidente (NR).

En este capítulo, llevaremos a cabo el último paso según lo descrito en nuestra metodología, que consiste en determinar el Nivel de Riesgo (NR) de cada uno de los pasos a nivel. Como se explicó en el capítulo 5.3 de este informe, el NR es un índice que nos permite clasificar los pasos a nivel en cuatro categorías de rango de riesgo. Desde NR1, que es la clasificación más baja, indicando aquellos pasos a nivel con una baja probabilidad de ocurrencia de accidentes y que cuentan con un nivel de protección adecuado según sus características operativas, hasta NR4, que representa un Nivel de Riesgo intolerable. En este caso, se requiere considerar medidas drásticas, como la supresión del paso a nivel y la construcción de un cruce a distinto nivel. Esto garantiza la separación entre el tráfico ferroviario, vehicular y peatonal, asegurando así la seguridad en la circulación.

De acuerdo con lo anterior, y dado que el Nivel de Riesgo (NR) se define como el producto entre el momento de circulación $[AxT]$ y la Criticidad, tal como se estableció en el capítulo 5.3 mediante la ecuación 20, procederemos a calcular el NR utilizando dicha expresión. Posteriormente, asignaremos el nivel de riesgo correspondiente según la clasificación establecida en la tabla 7 de este documento. Obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 46. Valor y clasificación de los pasos a nivel de acuerdo al Nivel de Riesgo (NR). Fuente: Elaboración propia.

ID	Cruce a nivel	AxT	Criticidad	Valor NR	Clasificación	
1	Carrera 138A/Calle 22	30.7	16.42	50.40	NR1	
2	Carrera 129/Calle 22	29677.3	21.79	64670.57	NR3	
3	Carrera 116/Calle 22	17869.7	22.27	39795.10	NR2	
4	Carrera 111A/Calle 22	17945.6	22.66	40673.08	NR2	
5	Carrera 106/Calle 22	18740.0	13.28	24896.12	NR2	
6	Carrera 103a/Calle 22	7606.0	22.44	17067.61	NR2	
7	Carrera 100/Calle 22	36536.6	27.57	100736.04	NR3	
8	Carrera 97 /Calle 22	37675.0	16.09	60616.37	NR3	
9	Carrera 96c/Calle 22	41078.8	15.48	63583.23	NR3	
10	Carrera 93/Calle 22	34090.0	20.04	68315.76	NR3	
11	Carrera 87A/Calle 22	580.6	28.55	1657.70	NR1	
12	Avenida Cali/Calle 22	144285.3	32.08	462864.41	NR4	
13	Carrera 68d/Calle 22	97742.9	36.33	355138.91	NR4	
14	Carrera 56/Calle 22	7301.0	22.89	16709.72	NR2	
15	Carrera 50/Calle 22	100000.2	41.49	414864.51	NR4	
16	Carrera 40/Calle 22	51440.9	31.86	163911.67	NR4	
17	Transversa 32c/Calle 22	960.4	22.93	2202.18	NR1	
18	Carrera 27/Calle 22	9387.5	24.06	22587.05	NR2	
19	Carrera 22/Diagonal 19a	6486.0	22.25	14428.30	NR2	

Basándonos en la tabla anterior y en las soluciones recomendadas por nuestra metodología según la clasificación del nivel de riesgo, se puede afirmar que:

- **PPNN (1,11,17):** Se encuentran clasificados bajo el Nivel de Riesgo 1 (NR1), lo que significa que estos pasos a nivel presentan el riesgo más bajo. La implementación del nivel mínimo de protección definido en el capítulo 6.2 de este documento será suficiente para garantizar unas condiciones de circulación adecuadas. Esta clasificación indica que,

aunque el riesgo es mínimo, es crucial mantener las medidas de protección establecidas para asegurar que se mantengan seguras y operativas en todo momento.

- **PPNN (3,4,5,6,14,18,19):** Se encuentran bajo el Nivel de Riesgo 2 (NR2), lo que indica que estos cruces presentan un riesgo medio y, por lo tanto, requieren intervenciones y medidas de seguridad adicionales para mitigar posibles riesgos y mejorar las condiciones de circulación. Nuestra metodología establece que, para estos cruces, se debe aumentar el nivel de protección al siguiente nivel inmediatamente superior. En el capítulo 6.2, se recomienda la instalación de un nivel de protección A4 para todos los cruces, con el fin de homogenizar el corredor y satisfacer las exigencias operacionales de la ciudad de Bogotá. Implementar esta medida sería suficiente para mitigar el nivel de riesgo presente en estos pasos a nivel.

- **PPNN (2,7,8,9,10):** Los cruces que se encuentran bajo el Nivel de Riesgo 3 (NR3) presentan un riesgo significativo y pueden representar una amenaza considerable para la seguridad. Estos cruces requieren intervenciones inmediatas y medidas de seguridad intensivas para reducir los riesgos asociados. Según nuestra metodología, los pasos a nivel clasificados como NR3 deben automáticamente recibir el Nivel de Protección máximo, es decir, un nivel A4. Esta recomendación ya se ha implementado desde la etapa de establecimiento del nivel de protección.

Sin embargo, nuestra metodología también sugiere estudiar la viabilidad de suprimir algunos de estos pasos a nivel mediante la consolidación de varios cruces en uno solo. Por esta razón, se recomienda al Administrador ferroviario del Regiotram de Occidente analizar las condiciones específicas de cada paso a nivel clasificado en este nivel de riesgo, su proximidad a otros PPNN, y evaluar la viabilidad técnica y económica de consolidar varios PPNN en uno solo. Esta estrategia no solo mejoraría la seguridad, sino que también optimizaría los recursos disponibles.

-**PPNN (12,13,15,16):** Los cruces a nivel clasificados con NR4 presentan un nivel de riesgo intolerable, constituyendo una amenaza inminente para la seguridad vial y ferroviaria. Estos puntos críticos requieren intervenciones urgentes y prioritarias para prevenir posibles accidentes graves y mejorar la operatividad de la infraestructura ferroviaria. Según las recomendaciones de nuestra metodología para los PPNN clasificados en esta categoría de riesgo, la única solución viable para mitigar dicho riesgo es suprimir el paso a nivel y reemplazarlo por un cruce a distinto nivel.

Tabla 47. Porcentaje de representación de los niveles de riesgo dentro del tramo analizado en el corredor del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia

Nivel de Riesgo	Cantidad	%
NR1	3	16%
NR2	7	37%
NR3	5	26%
NR4	4	21%

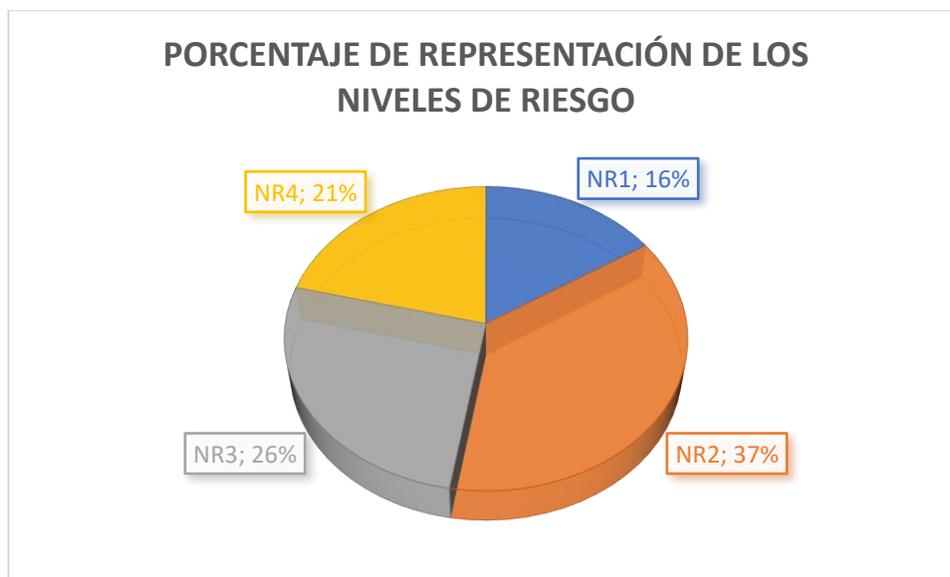


Figura 34. Gráfico de Representación de los niveles de Riesgo dentro del Corredor ferroviario del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia

De la figura anterior se puede concluir que, de los 19 PPNN analizados en nuestro estudio, la mayoría de los pasos a nivel presentan un NR2, representando el 37% de los casos. Le siguen los pasos a nivel con NR3, que constituyen el 26%, los PPNN con NR4 con un 21% y, finalmente, los pasos a nivel con NR1, que representan el 16%.

Un análisis más profundo revela que el 47% de los PPNN analizados, correspondientes a los pasos a nivel ubicados en la zona distrital de la ciudad de Bogotá, tienen un nivel de riesgo alto. Esto implica que se deben priorizar los esfuerzos en atender estos PPNN para mejorar la seguridad y reducir la probabilidad de accidentes. Mientras tanto, el 53% restante tiene niveles de riesgo bajo e intermedio. Para estos, la implementación de los niveles de

protección recomendados, como se estableció en nuestra metodología, será suficiente para mitigar significativamente la probabilidad de accidentes en estos cruces.

7. Análisis de soluciones para mitigar el riesgo de accidentes en los Pasos a Nivel en función de la Criticidad y el Nivel de Riesgo

En esta sección, nos dedicaremos a explorar posibles soluciones para algunos de los pasos a nivel analizados en nuestro trabajo, considerando su nivel de criticidad y las recomendaciones de solución según su nivel de riesgo. Para esto, seleccionaremos dos pasos a nivel de los 19 analizados en total. El primero será aquel con el coeficiente de criticidad más alto, lo que indica que requiere una intervención prioritaria según nuestro análisis. Luego, elegiremos otro paso a nivel que presente un nivel de riesgo bajo o intermedio. Esta selección nos permitirá examinar pasos a nivel que sugieren diferentes tipos de soluciones: desde aquellas más complejas, adecuadas para el paso más crítico, hasta soluciones más simples, aplicables a pasos con un nivel de riesgo NR1 o NR2.

De acuerdo a lo anterior dentro de nuestro análisis de soluciones nos enfocaremos en brindar alternativas de mejora de la seguridad para los pasos a nivel 3 y 15, a continuación, presentaremos una tabla resumen de su criticidad y nivel de riesgo:

Tabla 48. Resumen de las características de los PPNN 3 y 15. Fuente: Elaboración propia.

ID	Cruce a nivel	PK	Nivel de protección recomendada	Criticidad	Valor NR	Clasificación	
3	Carrera 116/Calle 22	12+080	A4	23.99	39795.10	NR2	
15	Carrera 50/Calle 22	4+163	A4	41.50	414864.51	NR4	

7.1. Alternativa de mejora de la seguridad para el paso a nivel 3 (PPNN3) del corredor Regiotram de Occidente.

En este capítulo, pretenderemos analizar posibles alternativas para mejorar el nivel de seguridad del PPNN 3 ubicado en la Carrera 116 con Calle 22 en el PK 12+080 del corredor ferroviario del Regiotram de Occidente. Para ellos enfocaremos nuestro análisis de la siguiente manera:

1. Analizar el Nivel de Riesgo y, con base en este, establecer las alternativas de intervención según nuestra metodología. En este caso particular, y de acuerdo con la tabla 49, sabemos que el PPNN 3 presenta un Nivel de Riesgo 2 y una criticidad de 22.27, lo que lo ubica en la duodécima posición en orden de prioridad para recibir mejoras de seguridad. Esto indica que se trata de un paso a nivel con un riesgo medio y no muy crítico. Siguiendo los lineamientos de nuestra metodología, al implementar un nivel de protección A4, lograríamos garantizar un nivel de seguridad adecuado para la circulación tanto de trenes como de vehículos y peatones.

2. De acuerdo con nuestra metodología, para pasos a nivel intermedios, el administrador ferroviario puede emprender acciones adicionales que mejoren el nivel de seguridad. En este sentido, realizaremos inspecciones visuales del cruce para identificar elementos que actualmente obstruyen la visibilidad y que puedan ser retirados para mejorar las condiciones del paso a nivel. En el caso práctico de este trabajo, realizaremos una inspección a través de Google Earth, herramienta que nos permitirá hacer un recorrido virtual sobre el paso a nivel y evaluar sus condiciones actuales. De acuerdo a lo anterior, pudimos identificar lo siguiente:



Figura 35. Inspección virtual del PPNN 3

En la figura 35, se identifican dos zonas clave. La primera, en el costado occidental del paso a nivel, está delimitada por un rectángulo rojo y presenta diversos obstáculos y barreras que dificultan la visibilidad de los usuarios. Estos obstáculos incluyen árboles, cartelería, señalización ubicada en la franja de vía del corredor ferroviario, y cerramientos de parcela que impiden o empeoran la visual de los usuarios. Por otro lado, la zona delimitada por un rectángulo verde, ubicada en el costado este del paso a nivel, se encuentra despejada y sin obstrucciones. Para esta zona, se recomienda mantener un nivel adecuado de la vegetación en los costados de la vía férrea para que, con el tiempo, no se conviertan en obstáculos que afecten la visibilidad de los usuarios. La siguiente imagen detalla lo anteriormente descrito:

- **Costado occidental (rectángulo rojo): Obstáculos y barreras identificados, como árboles, cartelería, señalización, y cerramientos de parcela.**



Figura 36. Detalle de obstáculos que empeoran la visibilidad de los usuarios en el PPNN3.

Como se puede observar en la figura 36, se presentan obstáculos como vegetación, postes de alumbrado y de conducción eléctrica, así como vallados o cerramientos de parcelas. Dado esto, es crucial que, al momento de entrar en operación el servicio ferroviario, se retiren estos elementos de las zonas próximas al cruce a nivel para despejar la línea de visión de los usuarios. Esto mejorará significativamente las condiciones de visibilidad tanto para el tren como para los vehículos que circulan por dicho paso a nivel, aumentando así la seguridad y reduciendo el riesgo de accidentes.

- **Costado este (rectángulo verde): Zona despejada sin obstrucciones, recomendándose el mantenimiento adecuado de la vegetación circundante.**



Figura 37. Detalle zona este del paso inferior 3.

3. Por último, analizamos la relación y proximidad del paso a nivel 3 con los pasos a nivel próximos. Observamos que el PPNN 3 tiene una distancia de separación de 448 m respecto al PPNN 4, ubicado en la Carrera 111a con Calle 22. Esta distancia invita a considerar la posibilidad de consolidar ambos pasos a nivel en uno solo, ya que la separación es menor a 1 km y cumple con lo establecido en nuestra metodología en el capítulo 5.2.1.4. De acuerdo a lo anterior se realiza el siguiente análisis.

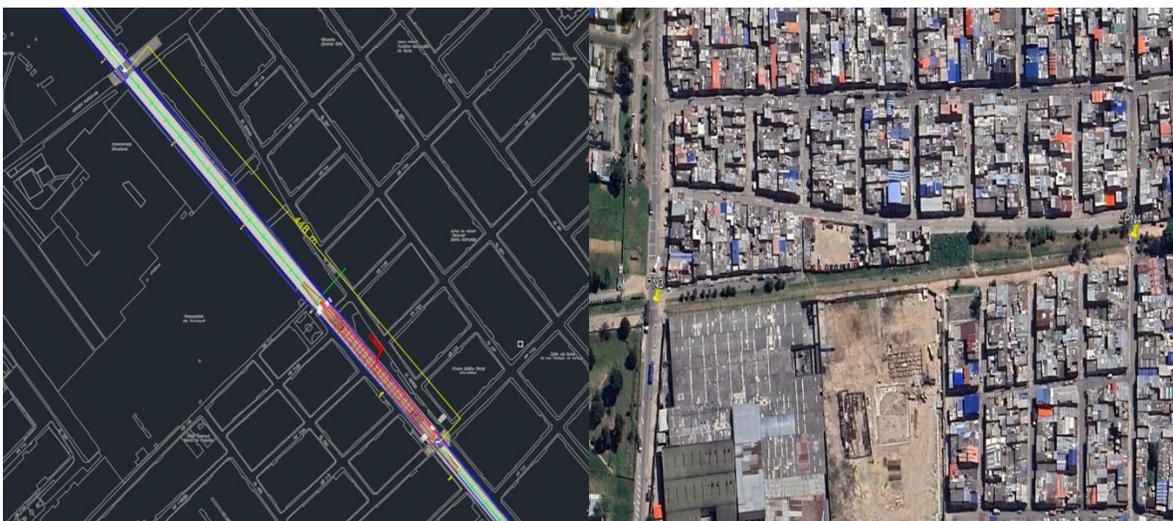


Figura 38. Distancia de separación entre el PPNN3 y el PPNN4. Fuente: Elaboración propia.

Se ha realizado un análisis comparativo entre ambos pasos a nivel. Evaluamos el Tráfico Promedio Diario (TPD) de cada paso, el ancho de la calzada, los sentidos de circulación vehicular, la criticidad y el nivel de riesgo, con el objetivo de determinar cuál de los dos pasos sería más adecuado suprimir y consolidar los tráficos en un solo paso a nivel. A continuación, se presenta una tabla comparativa que resume las características de ambos pasos.

Tabla 49. Comparación características técnicas y geométricas de los PPNN 3 y 4. Fuente: Elaboración propia

PPNN	TPD (2023-2027)	Ancho del paso a nivel (m)	Número de Carriles	Sentidos viales	Criticidad	NR
3	212	12.48	3	Bidireccional	22.27	39795.1
4	214	8.11	2	Bidireccional	22.66	40673.08

Dado lo anterior, y considerando que el PPNN 3 presenta una menor intensidad de tráfico y cuenta con tres carriles de circulación en comparación con el PPNN 4, que tiene una menor sección viaria, pero intensidades de tráfico más altas, podemos concluir que sería viable suprimir el paso a nivel 4 y redirigir el tráfico al PPNN 3. El PPNN 3, con su menor intensidad de tráfico actual y mayor capacidad de circulación, estaría en condiciones de absorber el incremento de vehículos resultante del cierre del PPNN 4. Su mayor sección viaria, que incluye tres carriles de circulación (2 en sentido norte-sur y un solo carril en sentido sur-norte), proporciona una capacidad adicional para gestionar el aumento del flujo vehicular.

Además, el análisis de criticidad y nivel de riesgo muestra que el PPNN 3 tiene valores intermedios en ambos indicadores. Por lo tanto, la propuesta de consolidar el tráfico de ambos pasos a nivel en el PPNN 3 no solo es viable desde una perspectiva operativa, sino también factible desde un punto de vista de seguridad. Esta viabilidad se mantiene siempre y cuando el aumento del tráfico inducido por el cierre del PPNN 4 no represente un aumento drástico tanto en la criticidad como en el nivel de riesgo del PPNN 3.

De acuerdo con esta propuesta, se realizará un análisis para evaluar cómo varía la criticidad del PPNN 3 bajo la suposición de que todo el tráfico que actualmente circula por el PPNN 4 utilizará el paso a nivel 3 para continuar con su recorrido. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de este análisis.

Tabla 50. Análisis de la criticidad del PPNN3 al incrementar su TPD bajo la hipótesis de que recibirá todo el tráfico del PPNN4. Fuente: Elaboración propia

ID	Cruce a nivel	Parámetros técnicos y de explotación			Parámetros sociales	Factores climatológicos	Parámetros geométricos	Criticidad
		TPD (Veh/día)	PCtpd	PCtec	Pcis	PCcli	Pcgeo	
3	Carrera 116/Calle 22	426	2.48	4.34	0.58	1.45	1.20	24.01

De acuerdo con lo anterior, si comparamos la criticidad original del Paso a Nivel 3 con la nueva criticidad tras la supresión del PNN4 y el aumento de su TPD sumando el total del volumen vehicular que actualmente pasa por el PPNN4, observamos que ha aumentado en 1.74 puntos con respecto a la actual criticidad del paso a nivel 3 siendo un aumento poco significativo y que mantiene la criticidad en un nivel medio. Por lo tanto, el incremento no implica una necesidad significativa de establecer medidas de intervención urgente sobre el PPNN 3.

De acuerdo con lo anterior, si comparamos la criticidad original del Paso a Nivel 3 con la nueva criticidad tras la supresión del PPNN 4 y el aumento del TPD sumando el volumen vehicular que actualmente pasa por el PPNN 4, observamos un incremento de 1.74 puntos. Este aumento es poco significativo y mantiene la criticidad en un nivel medio. Por lo tanto, este incremento no implicaría una necesidad urgente de establecer medidas de intervención sobre el PPNN 3 bajo estas nuevas condiciones.

Tabla 51. Análisis del cambio del NR en función del aumento del TPD del PPNN3. Fuente: Elaboración propia

ID	Cruce a nivel	AxT	Criticidad	Valor NR	Clasificación	
3	Carrera 116/Calle 22	53676.0	24.01	85976.87	NR3	

Ahora bien, al analizar los resultados expuestos en la tabla 52, observamos que el aumento del TPD en el paso a nivel 3 ha provocado un cambio en su nivel de riesgo, pasando de un nivel de riesgo intermedio a un nivel de riesgo alto. Esto se explica porque el Nivel de Riesgo es muy sensible al volumen de tráfico vehicular; por lo tanto, incluso un pequeño incremento en este puede resultar en un aumento significativo del nivel de riesgo del paso a nivel.

Bajo estas circunstancias y de acuerdo con las recomendaciones de nuestra metodología, es imperativo implementar el nivel de protección A4 para niveles de riesgo 3. Este nivel de protección incluye la instalación de barreras automáticas, señalización luminosa y acústica, y sistemas de monitoreo continuo. Además, se deben estudiar medidas adicionales para mejorar la seguridad, como la eliminación de obstáculos de visibilidad y la mejora de la infraestructura circundante.

Como se mencionó anteriormente, estas medidas incluyen la remoción de vegetación, postes y otros elementos que obstruyen la visibilidad en el paso a nivel 3. Implementar estas mejoras no solo aumentaría la seguridad, sino que también permitiría la supresión del paso a nivel 4 y la consolidación de su tráfico en el paso a nivel 3. Esta consolidación sería viable dado que el paso a nivel 3, con su mayor sección viaria y su criticidad y nivel de riesgo intermedios, podría manejar el incremento del volumen vehicular sin un aumento significativo en su criticidad.

7.2. Alternativa de mejora de la seguridad para el paso a nivel 15 (PPNN15) del corredor Regiotram de Occidente.

Como se mostró en las tablas 47 y 49 de este documento, el Paso a Nivel 15 es el más crítico y con el mayor nivel de riesgo entre los 19 pasos a nivel analizados en la aplicación práctica de esta metodología. Según las recomendaciones de la metodología, el Paso a Nivel 15 se encuentra en un nivel de riesgo muy alto, lo que implica que la única solución viable es la supresión del actual paso a nivel y la proyección de un nuevo paso a distinto nivel para reemplazarlo.

Para la proyección de un paso a distinto nivel se han tenido en cuenta tres opciones, las cuales son:

-Paso elevado: consiste en la construcción de un puente vehicular o peatonal que permita canalizar el flujo del tráfico de vehículos o peatones por encima de las vías del ferrocarril.

-Paso inferior con gálibo restringido: La propuesta consiste en la construcción de una vía que pase por debajo de las vías del ferrocarril, garantizando diferentes itinerarios para el flujo del tránsito vehicular y peatonal. Sin embargo, se restringiría el gálibo a un máximo de 4,5 m debido a la imposibilidad de desarrollar rampas, dadas las condiciones de contorno

existentes. Esta limitación implicaría que solo los vehículos que cumplan con esta altura podrían utilizar el paso inferior.

-Paso inferior: La propuesta consiste en la construcción de una vía que pase por debajo de las vías del ferrocarril, garantizando itinerarios para el flujo del tránsito vehicular y peatonal. A diferencia de la opción de gálibo restringido, en esta alternativa no existen obstáculos para el desarrollo de rampas de acceso, lo cual permitiría manejar gálibos superiores a 4,5 m. Esto garantizaría que el paso inferior sea apto para el tránsito de todo tipo de vehículos.

De acuerdo a lo anterior procederemos a realizar un pequeño estudio de análisis de soluciones evaluando las condiciones de contorno y de acuerdo a esto escogiendo la alternativa de paso a nivel que mejor se adapte a ellas.

7.2.1. Estudio de alternativa de soluciones para el tráfico vehicular

Para determinar la alternativa con mayor viabilidad para la supresión del paso a nivel procederemos a hacer un análisis descriptivo de las condiciones del actual paso a nivel 15, donde detallaremos las condiciones de la calzada, movimientos vehiculares y accesos para el desarrollo de las rampas.



Figura 39. Vista aérea del paso a nivel 15 ubicado en la Carrera 50 con Calle 22.

De acuerdo con la figura 39, se observa que el paso a nivel implica la intersección del corredor ferroviario con una vía de doble calzada de 3 carriles por sentido de circulación (Carrera 50).

A continuación, se muestran los distintos sentidos de circulación vehicular y los movimientos permitidos en las carreteras que convergen en el paso inferior, así como también en las vías adyacentes que podrían verse afectadas por la implementación de la solución de un paso a distinto nivel.



Figura 40. Vista aérea PN15 con sentidos viales. Fuente:(EGIS et al., 2019).

Además de considerar los sentidos viales y la configuración geométrica de la Carrera 50, hemos identificado varios accesos a lo largo de esta vía que podrían afectar la implementación de las rampas de acceso al paso a distinto nivel. A continuación, en la imagen siguiente, se presentan los accesos identificados junto con las distancias correspondientes al corredor ferroviario.



Figura 41. Accesos identificados sobre la Carrera 50 en el PPNN 15. Fuente: Elaboración propia.

Considerando estas condiciones de contorno y tomando en cuenta las especificaciones del Manual de Diseño INVIAS 2015 (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2008) respecto a las pendientes máximas permitidas y los gálibos requeridos, hemos realizado el siguiente análisis para determinar el tipo de solución más adecuada para las condiciones actuales.

Tabla 52. Condicionantes geométricos para el desarrollo de pasos a distinto nivel. Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2008).

Pendiente máxima permitida	7%
Pendiente máxima permitida en casos excepcional	10%
Galibo restringido (m)	4.5
Gálibo paso inferior (m)	6.5
Gálibo paso elevado (m)	7

Es relevante señalar que los valores presentados en la tabla 53 se obtienen conforme a los criterios de diseño geométrico establecidos por el Manual INVIAS 2008, en lo que respecta a las pendientes máximas permitidas y los gálibos requeridos para los pasos inferiores. Por otro lado, el gálibo del paso elevado se determina según las especificaciones del documento de estructuración técnica (EGIS et al., 2019), el cual indica en su apartado 4.2.6.4 que el gálibo vertical mínimo, debido a la electrificación de la vía y la disposición de la catenaria, debe ser de 6,5 m. En este caso, hemos optado por trabajar con un gálibo de

7 m para garantizar una distancia de seguridad de 50 cm entre el posible paso elevado y la catenaria.

Considerando lo expuesto anteriormente y las distancias de los puntos de acceso expuestas en la figura 41 que determinarán el espacio disponible para la construcción de las rampas, es importante asegurar que las distancias necesarias para el desarrollo de las rampas sean inferiores a las de los accesos identificados. Esto garantizará que las rampas no interfieran con el acceso de los residentes o usuarios a los predios conectados a dichos accesos.

A continuación, mostraremos los resultados de los análisis, de acuerdo a los datos mostrados anteriormente.

7.2.1.1. Opción 1: Alternativas de soluciones para la construcción de pasos a distinto nivel respetando las condiciones de contorno actuales.

Se analizarán las diferentes alternativas para cada una de las calzadas que componen la carrera 50, teniendo en cuenta las distancias expuestas en la figura 41 y tabla 53 del presente documento.

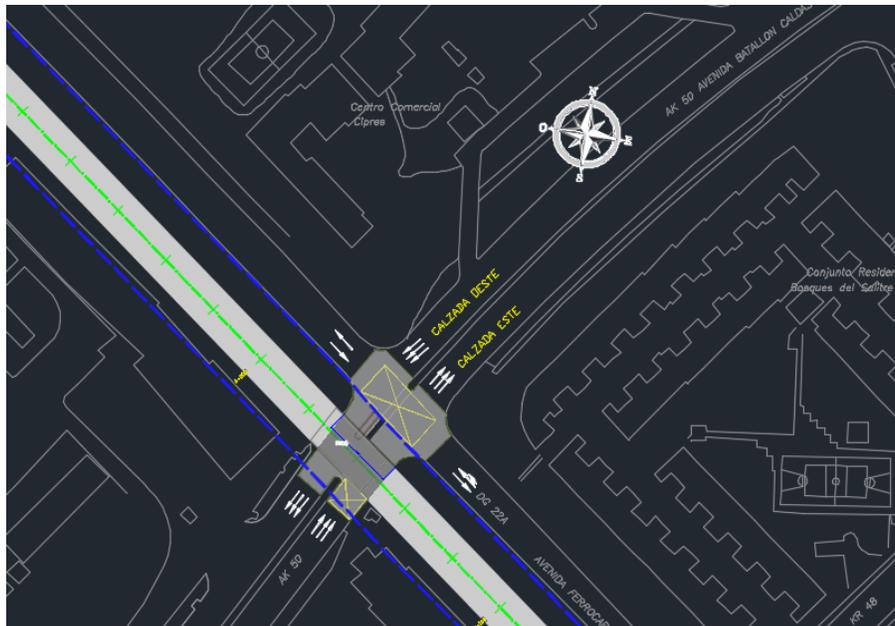


Figura 42. Identificación de calzadas de la Carrera 50. Fuente: (EGIS et al., 2019)

- Paso elevado:

Tabla 53. Comprobación geométrica para desarrollo de rampas del paso elevado. Fuente: Elaboración propia.

OPCIÓN 1	PASO ELEVADO CALZADA ESTE	
Gálibo necesario	7	
Pendiente recomendada	6%-7%	
Pendiente optada	7%	
Longitud de rampa requerida	100	Verificación
Longitud rampa norte PN (Disponible)	190	Cumple
Longitud rampa sur PN (Disponible)	61.4	No cumple

OPCIÓN 1	PASO ELEVADO CALZADA OESTE	
Gálibo necesario	7	
Pendiente recomendada	6%-7%	
Pendiente optada	7%	
Longitud de rampa requerida	100	Verificación
Longitud rampa norte PN (Disponible)	62.4	No cumple
Longitud rampa sur PN (Disponible)	29.6	No cumple

Al analizar la tabla anterior, se observa que la longitud requerida para construir una rampa que alcance un gálibo vertical de 7 metros sobre el carril de la vía férrea, con una distancia de resguardo de 50 cm entre el viaducto y la catenaria, es de 100 metros, utilizando la pendiente máxima permitida del 7%. Esta evaluación revela que solo sería factible cumplir con esta longitud en la calzada este, en el costado norte del paso a nivel 15. Por consiguiente, se concluye que no sería posible desarrollar rampas en los otros costados de las dos calzadas, ya que la construcción del paso superior interferiría con los accesos existentes.

-Paso inferior gálibo máximo.

Tabla 54. Comprobación geométrica para desarrollo de rampas del paso inferior. Fuente: Elaboración propia.

OPCIÓN 1	PASO INFERIOR CALZADA ESTE	
Gálibo necesario	6.5	
Pendiente recomendada	7%-10%	
Pendiente optada	10%	
Longitud de rampa requerida	65	Verificación
Longitud rampa norte PN (Disponible)	190	Cumple
Longitud rampa sur PN (Disponible)	61.4	No cumple

OPCIÓN 1	PASO INFERIOR CALZADA OESTE	
Gálibo necesario	6.5	
Pendiente recomendada	7%-10%	
Pendiente optada	10%	
Longitud de rampa requerida	65	Verificación
Longitud rampa norte PN (Disponible)	62.4	No cumple
Longitud rampa sur PN (Disponible)	29.6	No cumple

Basándonos en lo anteriormente expuesto, podemos deducir que la longitud de la rampa necesaria para alcanzar un gálibo de 6,5 metros en relación con la cota baja de la superestructura de la vía es de 65 metros, utilizando la pendiente máxima permitida. Al examinar esta distancia, encontramos que supera las distancias disponibles en todos los accesos, excepto nuevamente en el acceso ubicado en el costado norte de la calzada este. En este caso, con una distancia de 190 metros, se cumple adecuadamente con los requisitos para la construcción de las rampas del paso inferior. Por lo tanto, podemos concluir que la construcción de un paso inferior con un gálibo máximo es inviable dadas las condiciones de contorno actuales.

-Paso inferior de gálibo restringido:

Tabla 55. Comprobación geométrica para desarrollo de rampas del paso inferior con gálibo restringido. Fuente: Elaboración propia.

OPCIÓN 1	PASO INFERIOR DE GÁLIBO RESTRINGIDO CALZADA ESTE	
Gálibo necesario	4.5	
Pendiente recomendada	7%-10%	
Pendiente optada	10%	
Longitud de rampa requerida	45	Verificación
Longitud rampa norte PN (Disponible)	190	Cumple
Longitud rampa sur PN (Disponible)	61.4	Cumple

OPCIÓN 1	PASO INFERIOR DE GÁLIBO RESTRINGIDO CALZADA OESTE	
Gálibo necesario	4.5	
Pendiente recomendada	7%-10%	
Pendiente optada	10%	
Longitud de rampa requerida	45	Verificación
Longitud rampa norte PN (Disponible)	62.4	Cumple
Longitud rampa sur PN (Disponible)	29.6	No cumple

Según lo indicado en la tabla 56, la longitud de rampa requerida para un paso inferior con gálibo restringido es de 45 metros. Al comparar esta medida con las distancias disponibles en cada punto de acceso, observamos que es factible cumplir con este requisito en la mayoría de los accesos, excepto en el lado sur de la calzada oeste. Aquí, solo disponemos de una distancia de 29,6 metros hasta el acceso identificado. Esta situación implicaría que la construcción del paso inferior con gálibo restringido obstaculizaría el acceso de los usuarios a través de este punto al predio conectado.

De acuerdo a lo anterior podemos observar, que es imposible la construcción de un paso a distinto a nivel si se conservan las condiciones de contorno actuales que rodean el paso a nivel 15, es por ello que para la implantación de estas soluciones serán necesario hacer una modificación en los accesos encontrados mediante una posible reubicación de los mismos.

7.2.1.2. Opción 2: Alternativas de solución para la construcción de pasos a distinto nivel modificando las condiciones de contorno.

De acuerdo con lo expresado en el subcapítulo 7.2.1.1. del presente documento, se ha constatado la inviabilidad de validar la construcción de pasos a distinto nivel debido a las condiciones actuales de contorno. Estas condiciones imponen restricciones significativas en las distancias requeridas para el desarrollo de las rampas de acceso, dado el posicionamiento actual de los diferentes accesos a lo largo de la Carrera 50. En este sentido, se ha realizado un nuevo análisis en el siguiente apartado con el objetivo de encontrar una solución óptima. Se ha buscado una alternativa que permita modificar los accesos actuales para dotar al paso a nivel de distancias a estos accesos que, a su vez, posibiliten la construcción de las rampas necesarias.

De acuerdo a lo anterior se han establecido dos nuevos puntos de acceso para reubicar los actuales accesos ubicados sobre la calzada oeste de la carrera 50, a continuación, mostraremos a detalle el análisis realizado:

-Acceso Sur Calzada Oeste

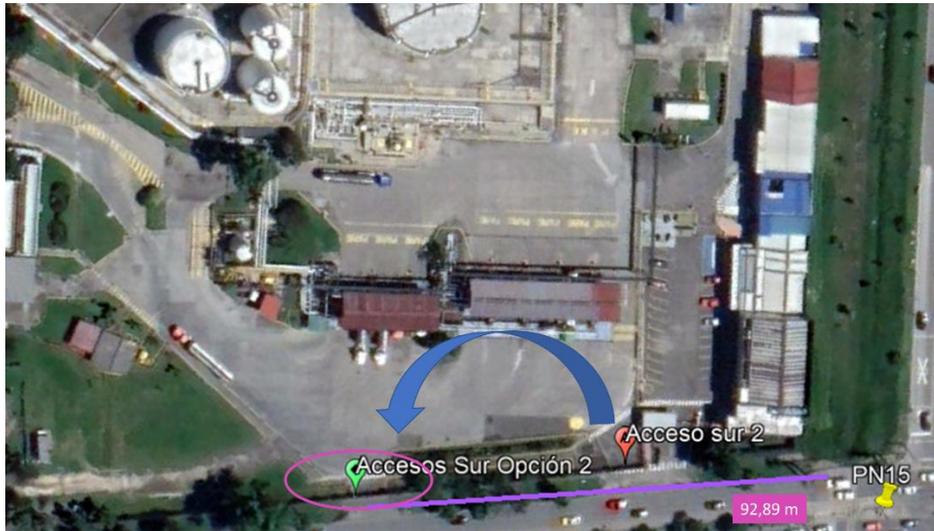


Figura 43. Reubicación acceso sur calzada oeste. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 56. Vista en la actualidad de los accesos en la calzada oeste costado sur.4

Acceso sur 2	Acceso sur Opción 2

De acuerdo con los datos presentados en la tabla 57 y la figura 43, se ha identificado un acceso adicional, ubicado al sur del acceso actual al predio situado al oeste de la intervención. Este nuevo acceso presenta una distancia hasta el corredor ferroviario de 92.89 m, lo que representa un incremento significativo en la distancia disponible para la construcción de rampas. Esta ampliación en la distancia disponible posibilitaría la viabilidad de la implementación de alguna de las tres opciones de paso a distinto nivel contempladas.

-Acceso norte calzada oeste:

Para el acceso norte de la calzada oeste de la Carrera 50, hemos identificado una amplia zona verde de aproximadamente 21 metros. Esta área ofrece una oportunidad significativa para redistribuir las vías existentes. Al utilizar una porción de esta zona verde, se puede proyectar una reconfiguración de los carriles, asegurando que los itinerarios de acceso y salida de los usuarios que deseen entrar o salir del centro comercial ubicado al occidente de la Carrera 50 no se vean afectados por la posible construcción del paso elevado, de esta manera podríamos reubicar el actual acceso y ampliar la distancia disponible para la construcción de la rampa. A continuación, mostramos la situación actual en la siguiente imagen:

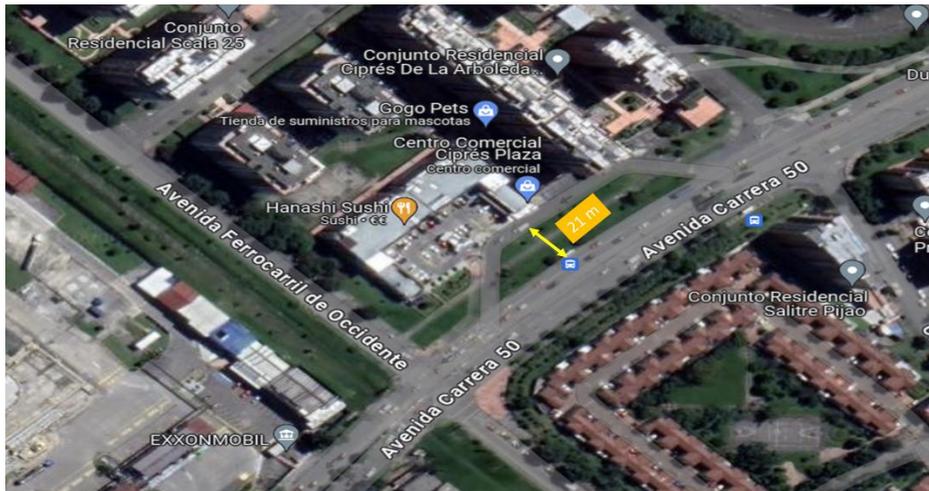


Figura 44. Situación actual calzada oeste costado norte de la Carrera 50.



Figura 45. Ubicación del nuevo acceso de la calzada oeste costado norte.

-Acceso sur calzada Este:

Para el acceso sur de la calzada este, observamos que esta es la entrada y salida principal de una planta petrolera, lo cual hace muy complejo reubicar el acceso actual debido a su importancia estratégica y operativa. Sin embargo, considerando que disponemos de un ancho total de calzada de 28 metros y además contamos con zonas verdes a ambos extremos de las calzadas, se pueden ocupar parcialmente estas áreas verdes para implementar una solución de cruce a distinto nivel.

Nuestro objetivo es realizar esta intervención sin afectar el acceso y la operatividad de la planta petrolera. Esta propuesta de reconfiguración considera tanto la seguridad vial como la eficiencia del tráfico, asegurando que la entrada y salida de vehículos pesados y de personal de la planta no se vea comprometida.

Más adelante, explicaremos con mayor detalle la reconfiguración geométrica proyectada, una vez se haya definido la solución técnica más adecuada para la supresión del actual paso a nivel. Esta solución incluirá estudios de impacto ambiental, análisis de flujo de tráfico y medidas de mitigación necesarias para minimizar cualquier perturbación durante la fase de construcción.

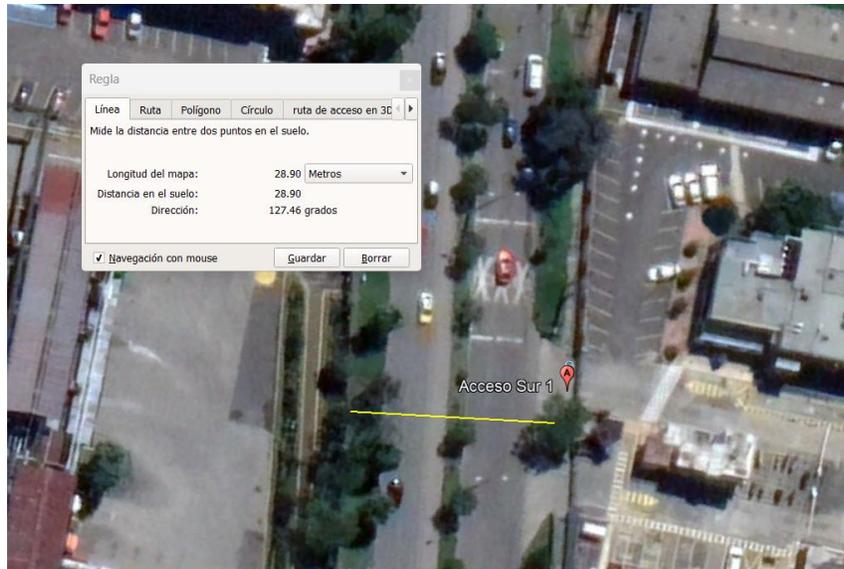


Figura 46. Sección disponible para la reconfiguración viaria necesaria para la implantación de un cruce a distinto nivel sobre la Carrera 50.

Ahora bien, conforme a las modificaciones de contorno planteadas anteriormente, reevaluaremos la disponibilidad y capacidad de las áreas con las nuevas condiciones de contorno para el desarrollo y construcción de las futuras rampas del paso a distinto nivel que se pretende proyectar.

- Paso elevado:

Tabla 57. Comprobación geométrica para desarrollo de rampas del paso elevado opción 2. Fuente: Elaboración propia.

OPCIÓN 2		PASO ELEVADO CALZADA ESTE	
Gálibo necesario		7	
Pendiente recomendada		6%-7%	
Pendiente optada		7%	
Longitud de rampa requerida		100	Verificación
Longitud rampa norte PN (Disponible)		190	Cumple
Longitud rampa sur PN (Disponible)		90.17	No cumple

OPCIÓN 2		PASO ELEVADO CALZADA OESTE	
Gálibo necesario		7	
Pendiente recomendada		6%-7%	
Pendiente optada		7%	
Longitud de rampa requerida		100	Verificación
Longitud rampa norte PN (Disponible)		107.22	Cumple
Longitud rampa sur PN (Disponible)		92.89	No cumple

Basándonos en la información presentada en la tabla anterior, incluso después de realizar la reconfiguración de las vías y la reubicación de los accesos, nos enfrentamos a la limitación de espacio que impide el desarrollo de un paso elevado para eliminar el paso a nivel 15. Esta limitación se debe a que el espacio disponible para las rampas al sur del paso a nivel es insuficiente para alojar la longitud necesaria de las rampas que permitirían alcanzar el galibo requerido. Por lo tanto, nos vemos obligados a descartar la opción del paso elevado.

-Paso inferior de galibo restringido:

Tabla 58. Comprobación geométrica para la construcción de un paso inferior con galibo restringido para las condiciones de contorno modificadas. Fuente: Elaboración propia.

OPCIÓN 2	PASO INFERIOR DE GÁLIBO RESTRINGIDO CALZADA ESTE	
Gálibo necesario	4.5	
Pendiente recomendada	7%-10%	
Pendiente optada	7%	
Longitud de rampa requerida	65	Verificación
Longitud rampa norte PN (Disponible)	190	Cumple
Longitud rampa sur PN (Disponible)	90.17	Cumple

OPCIÓN 2	PASO INFERIOR DE GÁLIBO RESTRINGIDO CALZADA OESTE	
Gálibo necesario	4.5	
Pendiente recomendada	7%-10%	
Pendiente optada	7%	
Longitud de rampa requerida	65	Verificación
Longitud rampa norte PN (Disponible)	107.22	Cumple
Longitud rampa sur PN (Disponible)	92.89	Cumple

Basándonos en los datos presentados en la tabla 59, llegamos a la conclusión de que, gracias a las nuevas condiciones de contorno proyectadas mediante la reubicación de los accesos identificados sobre la Carrera 50, tendríamos el espacio necesario disponible para desarrollar las rampas requeridas por un paso inferior de galibo restringido. Por lo tanto, esta opción emerge como una alternativa viable para proyectar un cruce a distinto nivel que permita la supresión del actual paso a nivel 15.

-Paso inferior gálibo máximo.

Tabla 59. Comprobación geométrica para la construcción de un paso inferior con gálibo máximo de acuerdo a la reconfiguración de las condiciones de contorno actuales del paso a nivel 15. Fuente: Elaboración propia.

OPCIÓN 2	PASO INFERIOR CALZADA ESTE	
Gálibo necesario	6.5	
Pendiente recomendada	7%-10%	
Pendiente optada	10%	
Longitud de rampa requerida	65	Verificación
Longitud rampa norte PN (Disponible)	190	Cumple
Longitud rampa sur PN (Disponible)	90.17	Cumple

OPCIÓN 2	PASO INFERIOR CALZADA OESTE	
Gálibo necesario	6.5	
Pendiente recomendada	7%-10%	
Pendiente optada	10%	
Longitud de rampa requerida	65	Verificación
Longitud rampa norte PN (Disponible)	107.22	Cumple
Longitud rampa sur PN (Disponible)	92.89	Cumple

Basándonos en lo expuesto anteriormente, podemos apreciar que, mediante la reconfiguración de las condiciones de contorno actuales, incluyendo la modificación de la ubicación de accesos y el diseño de una reconfiguración geométrica de la Carrera 50, sería factible crear un espacio adecuado para la construcción de rampas que permitan desarrollar la distancia requerida para un paso inferior de gálibo máximo.

Considerando estos factores y los resultados obtenidos para otras opciones de paso a distinto nivel, hemos decidido optar por la alternativa del paso de gálibo máximo. Aunque esta opción puede plantear mayores desafíos constructivos y costos más elevados en comparación con un paso inferior de gálibo restringido, el paso de gálibo máximo nos brindará una sección geométrica capaz de manejar el tráfico actualmente presente en la Carrera 50, así como la variedad de vehículos que circulan por ella.

Esta elección garantizará la permeabilidad total de los vehículos que se desplazan de sur a norte y viceversa por dicha avenida, proporcionando una solución integral que promueve la fluidez del tráfico y la seguridad vial en la zona.

7.2.2. Proyección de un paso inferior de gálibo máximo en el mismo punto kilométrico del paso a nivel 15.

El objetivo de este capítulo es presentar una propuesta de implantación geométrica para un paso inferior de gálibo máximo en la intersección de la Carrera 50 con la Avenida del Ferrocarril en la ciudad de Bogotá. Esta propuesta busca proyectar un cruce a distinto nivel que permita eliminar el actual paso a nivel, identificado en nuestro análisis como el número 15. Es importante destacar que esta propuesta es puramente esquemática y no incluye el diseño estructural de las diversas estructuras necesarias para la construcción del paso inferior, ni un diseño geométrico detallado de los viales proyectados aquí. La solución presentada es conceptual y busca satisfacer las demandas actuales de movilidad vehicular minimizando las afectaciones al tráfico.

7.2.2.1. Análisis de flujos vehiculares

Para lograr este objetivo, comenzaremos identificando los movimientos vehiculares actuales con el fin de analizar y proyectar una propuesta de paso inferior que asegure la continuidad de cada uno de estos movimientos una vez que se haya construido el paso inferior mencionado anteriormente.

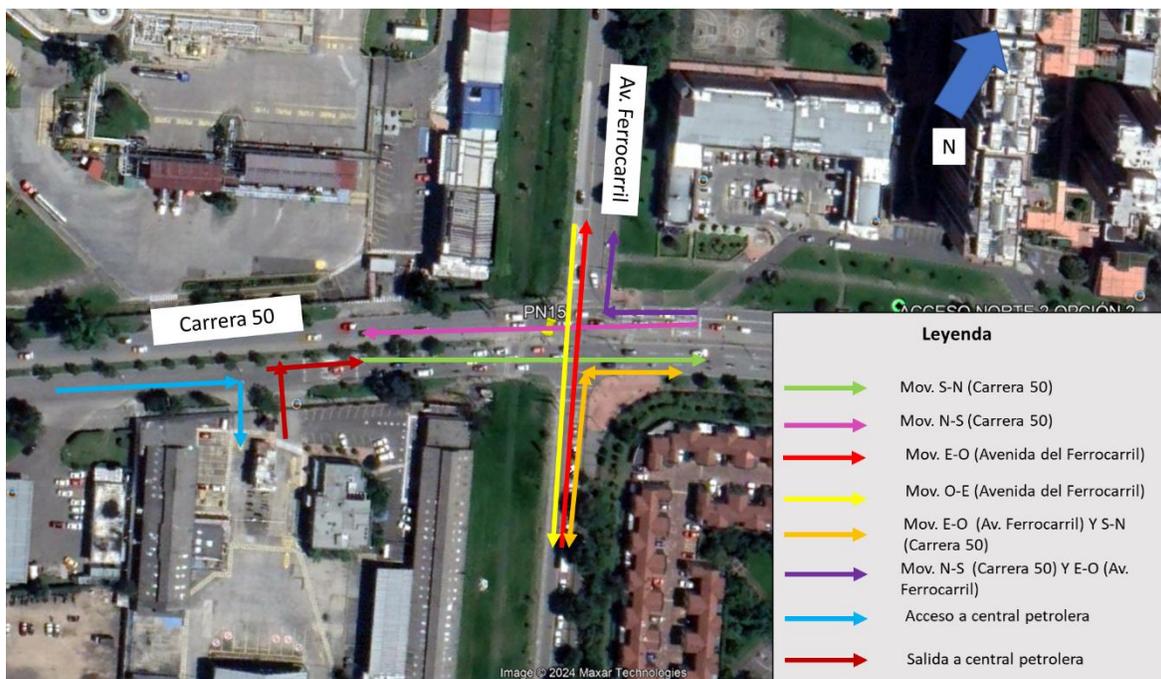


Figura 47. Movimientos vehiculares presentes en el paso a nivel 15 del Regiotram de Occidente. Fuente: Elaboración propia.

7.2.2.2. Definición de las características geométricas del paso inferior.

Una vez identificados los movimientos vehiculares, procederemos a analizar la sección transversal disponible tanto en el lado sur como en el lado norte del paso a nivel. El objetivo es determinar el espacio disponible para la construcción del paso inferior y la reconfiguración de los viales, asegurando la continuidad de todos los movimientos vehiculares actuales.

De acuerdo con este análisis, observamos que contamos con un ancho de faja de trabajo de 28 metros en el lado sur y de 35 metros en el lado norte del paso a nivel.



Figura 48. Sección transversal disponible para la construcción del paso inferior y reconfiguración de viales. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a lo anterior se propondrá un paso inferior de gálibo máximo con las siguientes características geométricas:

Tabla 60. Características geométricas de la sección transversal del paso inferior proyectado. Fuente: Elaboración propia

Calzada	Número de Carriles por calzada	Ancho de carril (m)	Ancho de muros de contención y Marco (m)	Numero de muros	Ancho arcén (m)	Cantidad de arcenes por calzada	Ancho por Calzada (m)	Ancho total necesario (m)
Oeste	3	3.1	0.9	2	0.25	2	10.9	21.80
Este	3	3.1	0.9	2	0.25	2	10.9	

Según lo indicado en la tabla 61, se propone la construcción de un paso inferior compuesto por dos calzadas, cada una con tres carriles de circulación. Cada carril tendría un ancho de 3,1 metros, y se incluirían arcones de 0,25 metros a ambos lados de cada calzada. Además, se contempla un ancho de muros de contención de 90 centímetros para garantizar la estabilidad del terreno durante la construcción del paso inferior.

Bajo la vía del ferrocarril, se proyecta la construcción de dos marcos contiguos, manteniendo las mismas dimensiones mencionadas en la tabla 61. Sobre estos marcos se apoyaría la vía del ferrocarril, lo que permitiría que el tráfico ferroviario circule por encima del tráfico rodado.

Esta opción nos permite mantener la configuración vial actual para la circulación en sentido Sur-Norte y Norte-Sur, que son los flujos de tráfico principales dentro de nuestro análisis, ya que representan los movimientos vehiculares predominantes a través del paso a nivel existente. Por lo tanto, podemos concluir que la vía no vería reducida su capacidad actual. De hecho, se mejorarían las condiciones de tráfico, dado que el paso inferior segregará el flujo de vehículos que actualmente acceden y salen de la planta petrolera ubicada en el costado este de la zona de intervención.

Además de lo mencionado anteriormente, y en línea con los resultados presentados en la tabla 60 del presente documento, se construirán rampas con una longitud de 65 metros y una pendiente máxima del 10% en casos excepcionales. Esta decisión se fundamenta en la búsqueda de minimizar la longitud de las rampas para garantizar los movimientos de acceso a los diferentes terrenos indicados en las figuras 43 y 45.

7.2.2.3. Uso de espacios adicionales para reconfiguración de viales

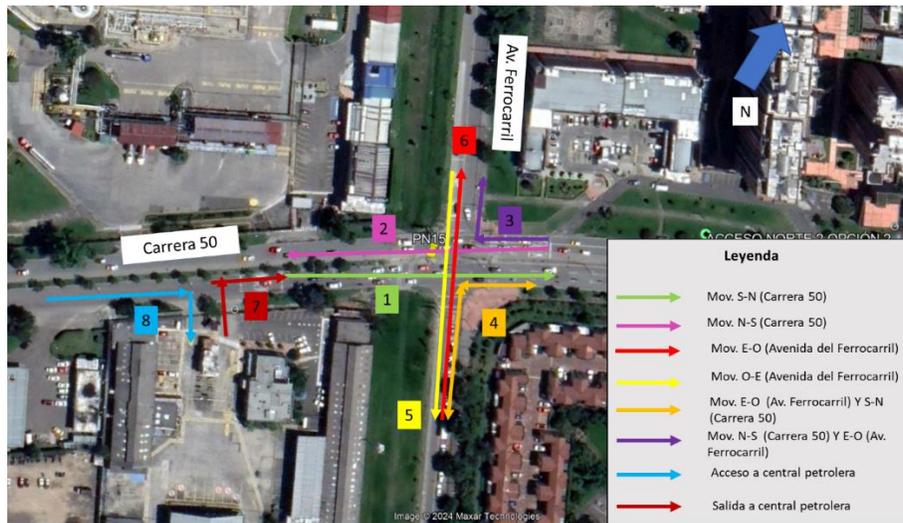


Figura 49. Numeración movimientos actuales presentes en el paso a nivel 15. Fuente: Elaboración propia.

Para explorar los espacios adicionales disponibles, es necesario reexaminar los flujos de tráfico actuales y determinar qué movimientos se resuelven con la construcción del paso inferior. Según lo expuesto previamente, observamos que el paso inferior solo aborda los movimientos 1 y 2, los cuales actualmente atraviesan el paso a nivel.

Basándonos en esto, debemos analizar el ancho de la faja disponible en el lado sur del paso inferior, que es de 28 metros. De estos, se requieren 21.8 metros para la construcción de las rampas sur, dejando 6.2 metros disponibles para proyectar vías de servicio que aborden los movimientos 7 y 8. Por otro lado, en el lado norte disponemos de una faja de terreno aprovechable de 35 metros, de los cuales también necesitaremos 21.8 metros para las rampas norte, dejando 13.2 metros disponibles para proyectar viales que resuelvan los movimientos 3 y 4.

En cuanto a los movimientos 5 y 6, será necesario considerar una extensión de la estructura del paso inferior para crear una infraestructura vial adicional que asegure la continuidad de estos flujos.

De acuerdo a lo anterior se generan las siguientes soluciones para los movimientos del 3 al 8:

Tabla 61. Soluciones para la continuidad de los movimientos vehiculares tras la construcción del paso inferior para la supresión del PPNN 15.

Movimiento	Solución
3	Se destinarán 4 metros de terreno, actualmente ocupados por la zona verde en el lado occidental de la calzada oeste, para crear un nuevo vial de 3 metros de ancho. Este vial proporcionará una conexión para los vehículos que circulan actualmente por la Carrera 50 y desean dirigirse hacia el oeste por la Avenida del Ferrocarril
4	Se utilizarán 4 metros de terreno actualmente ocupados por la zona verde en el lado oriental de la calzada este. Estos 4 metros se destinarán a la proyección de un vial de 3 metros de ancho. Este nuevo vial proporcionará una conexión para los vehículos que actualmente circulan por la Avenida del Ferrocarril y desean tomar la Carrera 50 en dirección norte
5	Para resolver los movimientos 5 y 6, se planea instalar un marco de hormigón sobre los muros pantalla que servirán de soporte para las rampas del paso inferior. Este marco estará al nivel del terreno actual y sobre él se construirá un vial con las mismas dimensiones que los carriles existentes en la Avenida del Ferrocarril. Esto permitirá mantener un flujo bidireccional continuo de tráfico de oriente a occidente
6	
7	Aprovechando los 6,2 metros restantes en el costado sur del paso inferior, utilizaremos este espacio para proyectar un vial de calzada sencilla con dos carriles, cada uno de 3 metros de ancho paralelos a la actual planta petrolera. Esto permitirá el ingreso y salida de los vehículos que acceden a la planta petrolera.
8	

7.2.2.4. Proyección en planta del paso inferior para la supresión del itinerario vehicular del paso a nivel 15.

Con base a lo expuesto en los anteriores apartados, se proyectó como solución para suprimir el paso a nivel 15, un paso inferior de gálibo máximo con las siguientes características:

Sección paso inferior: Se proyecta un paso inferior compuesto por dos calzadas vehiculares cada una de tres carriles por sentido. El paso inferior se desarrollará por medio de rampas de 10% de pendiente para alcanzar una cota en su punto más bajo que este por debajo del corredor ferroviario a 6.5 m, con la finalidad de dar cabida a dos marcos de

hormigón el cual puede ser fabricado in situ en el caso de que esta solución se lleve a cabo antes de la operación del regio tram de occidente y por consiguiente se pueda construir en sitio sin afectar la operación ferroviaria, de lo contrario en caso de emplearla después de poner en funcionamiento el servicio ferroviario, se recomienda utilizar el método de cajón prefabricado e hincado, esto con el objetivo de no afectar el tránsito ferroviario, cada marco prefabricado conducirá a través de sus tres carriles el tráfico que actualmente discurre por la Carrera 50 y atraviesa el actual paso a nivel de Norte a Sur y de Sur a Norte. Con la proyección de 3 carriles por sentidos se busca no afectar la capacidad de la vía ya que actualmente la carrera 50 maneja altos volúmenes vehiculares y se proyecta un TPD para el periodo entre 2023 a 2027 de 1200 vehículos al día. Para el pre dimensionamiento de la sección transversal del paso inferior se tuvo en cuenta muros de contención de una sección considerable 90 cm, sin embargo es importante recalcar que no es objeto del presente análisis el diseño estructural de dichos muros y de las estructuras que conforman el paso inferior, sin embargo se pre dimensiona de esta forma con el fin de tener en cuenta el ancho geométrico de estas estructuras a la hora de hacer las verificaciones geométricas para la implantación del paso inferior en el ancho de faja actual disponible.

Carrera 50: En el costado sur de la Carrera 50, se proyecta una modificación del eje actual, desplazándolo unos metros hacia el occidente para que coincida exactamente con el eje del nuevo paso inferior. Además, se ocuparán 6.4 metros de las actuales zonas verdes para crear un vial auxiliar paralelo al paso inferior proyectado. Este nuevo vial tendrá una calzada única con dos carriles, uno por cada sentido de circulación, cada uno de 3 metros, acompañados por arcones de 20 cm a ambos lados. El vial se extenderá a lo largo de toda la Carrera 50, conectando con la calle 21 al sur del paso inferior, para proporcionar acceso y salida a los vehículos que quieran ingresar o salir de la planta petrolera ubicada en el costado este de la Carrera 50.

En el costado norte, se propone utilizar dos fajas de terreno, cada una de 4 metros, para dotar a la Carrera 50 de dos carriles o vías auxiliares ubicadas paralelas al paso inferior. Esto permitirá brindar servicio a los usuarios que se movilizan en sentido norte-sur por la Carrera 50 y desean acceder a la avenida del Ferrocarril para dirigirse hacia el occidente de la ciudad, así como a los usuarios que salen del centro comercial Ciprés Plaza, ubicado al occidente.

El otro vial proyectado en el costado sur, al este del paso inferior, será de un único sentido y permitirá a los usuarios que actualmente transitan por la avenida del Ferrocarril en sentido este-oeste acceder a la Carrera 50 en sentido sur-norte.

Avenida del ferrocarril o Calle 22: En la Calle 22, que actualmente presta servicio a los usuarios que se movilizan de este a oeste y viceversa por la ciudad de Bogotá, se plantea la instalación de un marco de hormigón. Este marco se colocará sobre los muros de contención, permitiendo que sobre él se proyecte la actual Avenida del Ferrocarril. Con esta medida, se busca no afectar el flujo vehicular que actualmente circula por dicha avenida, garantizando así la continuidad del tráfico.

El objetivo es asegurar que el tránsito en la Avenida del Ferrocarril, una arteria importante para la movilidad de la ciudad de Bogotá y que comunica el occidente con el este de la ciudad no se vea comprometido por la implantación del paso inferior.

De esta forma se mostrará en la siguiente figura la planta de la solución proyectada, incluyendo el paso inferior y los viales auxiliares propuestos:



Figura 50. Vista en planta paso inferior en el actual punto kilométrico del Paso a Nivel 15. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con lo anterior, superpondremos los movimientos existentes en el paso a nivel 15, mostrados anteriormente en la figura 49, sobre la vista en planta de nuestra solución, mostrada en la figura 50. El objetivo es verificar que cada uno de los movimientos haya sido atendido de manera satisfactoria, asegurando que, una vez ejecutada nuestra propuesta, ninguno de los flujos actuales se vea afectado.



Figura 51. Solución a los movimientos vehiculares existente en el PPNN 15. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la figura anterior, podemos observar cómo cada movimiento que actualmente circula por el paso a nivel 15 es atendido, permitiendo que todos los usuarios puedan continuar con sus trayectos con pequeñas modificaciones a los movimientos actuales.

El movimiento que se ve más afectado es el movimiento 7, correspondiente a los vehículos que salen de la planta petrolera ubicada al este de la zona de actuación. Este movimiento, que antes se realizaba en la Carrera 50 en la calzada con dirección de flujo de sur a norte, se verá modificado una vez se construya nuestra propuesta. Con el paso inferior en funcionamiento, los vehículos deberán salir por el vial auxiliar proyectado, dirigiéndose hacia la Carrera 21, y desde allí tomar distintas vías que los llevarán hacia el norte de la ciudad, en caso de que su destino esté en esa dirección.

Para el resto de los movimientos, se logró encontrar una solución que no implica cambios en sus trayectos, minimizando así la afección a los usuarios actuales de la infraestructura vial.

7.2.3. Solución para el itinerario peatonal del paso a nivel 15.

Como se mencionó en el subcapítulo 6.2.3.2 y en la tabla 17 del presente documento, el actual paso a nivel tiene un volumen peatonal de 162 personas en su hora máxima de circulación. Por lo tanto, el tránsito peatonal representa un flujo importante que debe ser considerado al proponer la supresión del paso a nivel 15.

Para ello, hemos propuesto la construcción de una pasarela peatonal elevada que pase por encima de las vías ferroviarias del Regiotram de Occidente. Para la construcción de esta pasarela peatonal, se utilizarán las zonas verdes ubicadas a ambos costados de las vías del Regiotram, lo cual permitirá proyectar la pasarela sin mayores problemas de espacio para su emplazamiento. En la siguiente imagen se muestran los lugares proyectados para la construcción de dicha pasarela.



Figura 52. Áreas para posible desarrollo de rampa peatonal.

Como observamos en la figura 52, contamos con áreas amplias que nos permitirán proyectar un paso peatonal elevado con rampas, manteniendo y mejorando la permeabilidad peatonal en la zona. Para la elaboración de esta propuesta, nos hemos basado en las exigencias descritas en la Guía Práctica de la Movilidad Urbana de la Alcaldía de Bogotá en su capítulo “3.3.8. Puentes Peatonales”(Alcaldía de Bogotá, 2020) . De

acuerdo con este documento, se han tomado los siguientes parámetros geométricos para el diseño de la rampa peatonal:

- Anchura de la rampa: Para garantizar un flujo peatonal cómodo y seguro, se ha considerado una anchura mínima de 2.5 metros, cumpliendo con lo especificado en dicho documento donde se nos menciona que el ancho mínimo de la pasarela peatonal será de 2,4 m sobre vías principales.
- Pendiente de la rampa: La pendiente máxima permitida es del 8%, asegurando accesibilidad para personas con movilidad reducida.
- Altura libre: La altura libre mínima debe ser de 2.2 metros para permitir el paso seguro de los peatones.
- Descansos intermedios: Se han incluido descansos intermedios cada 9 metros para proporcionar zonas de descanso y facilitar el uso de la rampa. Estos descansos serán de 1,5 m en el sentido del flujo peatonal
- Barandillas y protecciones: Se instalarán barandillas a ambos lados de la rampa con una altura mínima de 1.5 metros para la seguridad de los usuarios.
- Gálibo vertical: Se alcanzará un gálibo de 7,0 m con respecto a la parte inferior de la pasarela y el nivel de terreno, esto con la finalidad de no afectar la catenaria proyectada para el corredor ferroviario.

Bajo el uso de estos criterios se obtiene y desarrolla la siguiente propuesta para el puente peatonal.

Tabla 62. Parámetros generales para la proyección en planta de la pasarela peatonal.

Ancho (m)	2,5
Pendiente (%)	8%
Long Descanso (m)	1.5
Altura máxima (m)	7



Figura 53. Vista en Planta Pasarela Peatonal. Fuente: Elaboración propia.

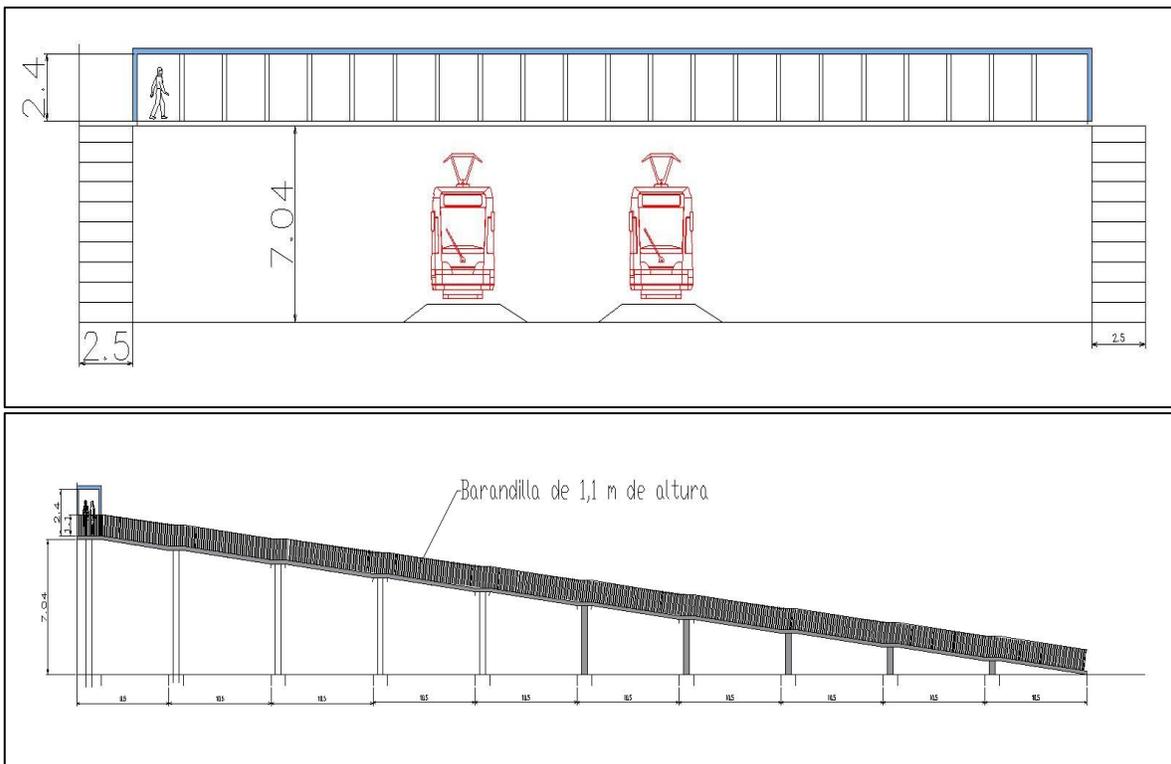


Figura 54. Vista frontal y lateral Pasarela Peatonal.

La propuesta de la pasarela peatonal debe complementarse con un sistema de circuito cerrado de televisión, con el objetivo de brindar una mayor seguridad a los peatones que la

utilicen. Además, se instalará una iluminación interna tanto en la rampa como en la pasarela que atraviesa las vías del ferrocarril. Esta iluminación no solo mejorará la visibilidad durante las horas nocturnas, sino que también incrementará la sensación de seguridad para los usuarios. Lo anteriormente expuesto en consonancia con lo exigido por en la Guía Práctica de la Movilidad Urbana de la Alcaldía de Bogotá (Alcaldía de Bogotá, 2020)

Para proteger a los peatones de las condiciones climáticas adversas, como la lluvia o el sol intenso, ambas estructuras estarán recubiertas con una marquesina. Este diseño garantizará que los usuarios puedan transitar cómodamente en cualquier condición meteorológica. Además, como se mencionó anteriormente se ha considerado la accesibilidad para personas con movilidad reducida, asegurando que la rampa cumpla con los parámetros exigidos por la Guía de Práctica de Movilidad Urbana, donde se nos presenta los criterios vigentes en cuanto a pendientes y anchos mínimos, y que la pasarela disponga de elementos como barandillas y superficies antideslizantes. Este enfoque inclusivo garantizará que la infraestructura sea accesible y segura para todos los usuarios, independientemente de sus capacidades físicas.

Es importante mencionar que, en el Anexo 5: Detalles de Rampa y Pasarela Peatonal, se proporcionarán los cálculos detallados de las pendientes y alturas de la rampa. Este anexo también incluirá los planos detallados de la propuesta proyectada, asegurando que todos los aspectos técnicos y de diseño sean claros y comprensibles para su correcta implementación.

8. Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo a la elaboración del presente trabajo de fin de máster, se establecieron las siguientes conclusiones:

-De acuerdo con el Documento de Estructuración Técnica del Proyecto, donde se establece que las velocidades en los pasos a nivel serán de 50 km/h al iniciar la operación del sistema, se recomienda establecer una velocidad inicial de operación en las intersecciones de 30 km/h. Esta recomendación tiene como objetivo minimizar la probabilidad de accidentes al integrar las unidades ferroviarias en circulación, proporcionando así un margen de seguridad adicional durante la fase inicial de operación.

-Según lo establecido en el subcapítulo 6.1.2 del presente documento, el Proyecto Regiotram de Occidente es un macroproyecto en materia de transporte que busca movilizar a 125.690 pasajeros diarios. Si realizamos un análisis comparativo con otros sistemas de transporte masivo, como Metrovalencia, observamos que este último mueve una media diaria de 173.593 usuarios en promedio entre 9 de sus 10 líneas actuales (incluyendo las líneas tranviarias). Esto implica que el Regiotram de Occidente, con una sola línea, movilizará el 72% de los usuarios diarios que actualmente mueve Metrovalencia.

Es importante recordar que el Regiotram de Occidente está concebido como un sistema Tren-Tram, donde las unidades móviles serán vehículos tren ligero tipo tranvía. De acuerdo con el gráfico obtenido de (Argente, 2023), que presenta la tipología de sistemas ferroviarios en función de los pasajeros movilizados y la distancia entre estaciones, se puede inferir que el sistema debería haber sido planteado como un Metro Ligero con unidades móviles pesadas tipo metro o tren de cercanías. Esto permitiría ofrecer a los usuarios un mayor confort al utilizar el sistema.

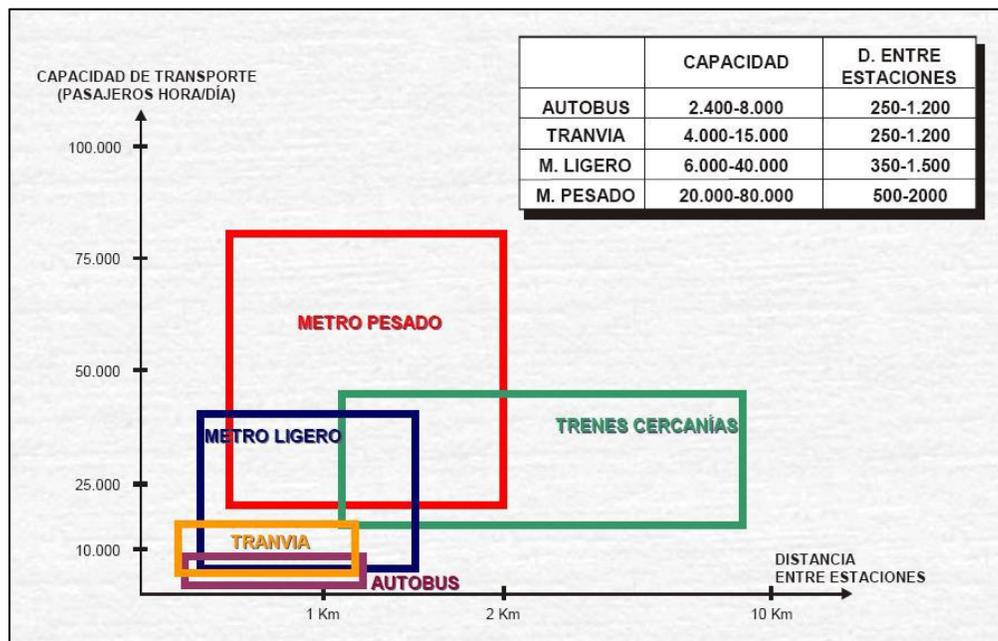


Figura 55. Capacidad de transporte por tipología de sistema. Fuente:(Argente, 2023)

La implementación de unidades móviles más pesadas y con características de metro o tren de cercanías mejoraría la capacidad y la calidad del servicio, alineándose con las necesidades de un sistema que moviliza un volumen significativo de pasajeros diariamente.

-Tras el análisis del Proyecto Regiotram de Occidente, se recomienda que la empresa promotora del proyecto adopte un enfoque adicional para el manejo de los pasos a nivel. El documento actual propone, en muchos casos, simplemente la protección con barreras o semi barreras, como se observa en la tabla 11 presentada en este trabajo de fin de máster, obtenida de (EGIS et al., 2019). Sin embargo, según los resultados obtenidos en este estudio, esta solución no es viable dadas las condiciones de los volúmenes vehiculares presentes en la ciudad de Bogotá.

En los pasos a nivel con mayor volumen vehicular y considerando la frecuencia de operación prevista del sistema, se generarían congestiones significativas en las principales vías que intersecan el corredor ferroviario. Por ello, desde la perspectiva de estructuración de este trabajo de fin de máster, se recomienda que en todos los cruces con vías principales se desarrollen proyectos para la construcción de pasos a distinto nivel entre estos corredores viales y el corredor férreo.

Esta solución mitigaría las congestiones vehiculares y mejoraría la eficiencia operativa del Regiotram de Occidente, asegurando una integración más fluida y segura del sistema ferroviario con la infraestructura vial existente. Además, proporcionaría un mayor nivel de seguridad tanto para los usuarios del sistema ferroviario como para los conductores en la ciudad.

- Una vez analizada la actual Normativa Ferroviaria de Colombia en cuanto a materia de seguridad y protección de los pasos a nivel, podemos concluir la necesidad urgente de actualizar dicha normativa. Esta actualización deberá proporcionar a los administradores ferroviarios las herramientas necesarias para realizar un análisis exhaustivo de los pasos a nivel. Este análisis debe considerar parámetros técnicos como la visibilidad, tanto real como técnica, los volúmenes vehiculares y peatonales, la frecuencia y velocidad de los trenes, las condiciones geométricas del paso a nivel (incluyendo la pendiente, el ángulo de cruce y la señalización), y las condiciones climáticas de la zona, tales como la incidencia de niebla, o lluvia.

Además, la normativa deberá establecer criterios claros en la clasificación de los niveles de protección en función de las condiciones mencionadas anteriormente y definir las medidas de protección correspondientes. Estas medidas podrían incluir la instalación de barreras automáticas, semi barreras, sistemas de alerta temprana, iluminación adecuada,

señalización horizontal y vertical, y dispositivos de advertencia sonora. Asimismo, se deberá considerar la implementación de tecnologías avanzadas como sensores de ocupación, cámaras de vigilancia y sistemas de control remoto para mejorar la seguridad operativa

Este enfoque integral permitirá establecer niveles de protección adecuados y acciones específicas para mejorar la seguridad de la operación ferroviaria, reduciendo significativamente el riesgo de accidentes y garantizando una interacción segura entre el tráfico ferroviario y el vehicular/peatonal.

-En relación a los resultados obtenidos mediante la presente metodología, se puede concluir que se ajustan de manera coherente a las condiciones actuales en las que operaría el sistema del Regiotram de Occidente. Sin embargo, al aplicar esta metodología a casos profesionales, será necesario realizar mediciones en campo con el acompañamiento de equipos topográficos. Esto permitirá obtener medidas precisas del terreno, la geometría y otros componentes físicos del paso a nivel.

Además, será importante contar con bases actualizadas de estudios de tráfico y accidentabilidad de la zona. Esta información complementaria garantizará que los resultados obtenidos por nuestra metodología sean más precisos y eficientes a la hora de mejorar la seguridad de distintos pasos a nivel.

-A nivel mundial, se están implementando políticas y proyectos para la eliminación de pasos a nivel en las redes ferroviarias que presentan estas intersecciones. En muchos países europeos, no se permite la construcción de nuevas líneas ferroviarias con pasos a nivel. Es esencial considerar estas normativas y tendencias globales en materia de seguridad ferroviaria al reactivar el sistema ferroviario en Colombia.

Por lo tanto, para la reactivación del sistema ferroviario en Colombia, es fundamental establecer políticas estrictas con respecto a las intersecciones a nivel existentes en los corredores férreos que se planea reactivar. Se debe desarrollar un plan integral de supresión de estos pasos a nivel antes de iniciar las operaciones en cada una de las líneas ferroviarias revitalizadas.

Este enfoque garantizará la seguridad de los usuarios y contribuirá a la eficiencia operativa del sistema ferroviario. Además, al alinearse con las prácticas internacionales de seguridad

ferroviaria, Colombia podrá integrarse mejor en la comunidad global y beneficiarse de las lecciones aprendidas y las mejores prácticas desarrolladas en otros países.

9. Bibliografía

- AECOM Colombia. (2022). *Estudio de Tránsito Oferta y Demanda del Proyecto Regiotram de Occidente* (RGT_AE_1_TO_RPT_TTGE_0003).
- Agencia Nacional de Infraestructuras (ANI). (2020). *Plan Maestro Ferroviario de Colombia*.
- Agencia Nacional de Seguridad Ferroviaria. (2024). *Guía sobre como cruzar vías con seguridad*.
- Alcaldía de Bogotá. (2020). *Guía Práctica de la Movilidad Urbana*.
- Alvarez, V., & Eduardo, M. (2020). "PROPUESTA PARA LA EXPLOTACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LA LÍNEA 10 DE FERROCARRILS DE LA GENERALITAT VALENCIANA EN VALENCIA".
- Argente, S. (2023). *Introducción del Sistema Ferroviario*. Universitat Politècnica de Valencia.
- BID. (2016). *Desafíos del transporte ferroviario de carga en Colombia*.
- Castillo, D. & Alvarez, Eduardo. (2013). *MANUAL DE NORMATIVIDAD FÉRREA PARTE I*.
- Castillo, D. E. A. (2013). *MANUAL DE NORMATIVIDAD FÉRREA PARTE II*.
- Correa Montoya, M. (2021). *Manual de diseño de vías urbanas*.
<https://repository.eafit.edu.co/items/e9f3314d-fd84-4c23-81ca-1c27eb3558f9>
- DGT. (2022). *Un anacronismo con mucho peligro*.
<https://revista.dgt.es/es/reportajes/2022/03MARZO/0323-Pasos-a-nivel.shtml>
- Dirección Nacional de Transporte Ferroviario de Uruguay. (2020). *Norma para la seguridad de los pasos a nivel*.
- EGIS, Duran & Osorio Abogados, & Sumatoria. (2019). *Documento de Estructuración Técnica Proyecto Regiotram de Occidente* (p. 115).
- El Nuevo Siglo. (2024). *Regiotram de Occidente: Aceleran obras para que arranque en abril del 2026*. <https://www.elnuevosiglo.com.co/nacion/regiotram-de-occidente-aceleran-obras-para-que-arranque-en-abril-del-2026>
- Granda, R., Estefanía, M., Torres, Z., & Amador, B. (2016). *Determinación de factores para ajuste de volúmenes de tránsito en la vía Loja – Zamora E50*.
- IDEAM. (2016). *Mapa de precipitaciones anuales de Colombia año 2016* [Map].
- IDEAM. (2023). *Características climatológicas de las ciudades principales y municipios turísticos de Colombia*.
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2008). *Manual de Diseño Geométrico de carreteras*.



Izaquita, A. M. B. (2020). *Evaluación económica y financiera del proyecto de RegioTram de occidente*. <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/09b7e760-44c6-43ac-a5c7-c507e6a2c7be>

Lascano, C., & Orlando, C. (2013). *Propuesta para evaluar el nivel de seguridad en cruces ferroviarios a nivel*.

https://www.lareferencia.info/vufind/Record/EC_a9445efed09063a2c16947348ad546d7

López, G. (2023). *Análisis y estimación de la siniestralidad*. Universitat Politècnica de Valencia.

Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana. (2020). *Real Decreto 929/2020, de 27 de octubre, sobre seguridad operacional e interoperabilidad ferroviarias*.

Normativa técnica superficie de rodadura entre carriles de vía, NAPN 6-0-1.0 (2017).

Pimentel Irigoyen, A. (2023). *POT-Bogotá Reverdece 2022–2035*.

<https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/58470>

10. ANEXOS.

- Anexo 1. Cálculo de la distancia de Visibilidad Real
- Anexo 2. Matriz integral cálculo de los niveles de protección de los pasos a nivel analizados
- Anexo 3. Matriz Integral del cálculo de la criticidad de los pasos a nivel analizados
- Anexo 4. Plano en planta de la supresión del Paso a Nivel 15 del Regiotram de Occidente
- Anexo 5. Detalles de Rampa y Pasarela Peatonal.