

MOVILIDAD INTERNA PEATONAL EN PLATAFORMAS DE ESTACIONES;
SISTEMAS DE TRANSPORTE MASIVO BRT – CASO BOGOTÁ

EDWARD ANDRÉS RINCÓN FONSECA

ANGIE JULIETH SISA MARTÍNEZ

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS

TUNJA

2018

MOVILIDAD INTERNA PEATONAL EN PLATAFORMAS DE ESTACIONES;
SISTEMAS DE TRANSPORTE MASIVO BRT – CASO BOGOTÁ

EDWARD ANDRÉS RINCÓN FONSECA

ANGIE JULIETH SISA MARTÍNEZ

Trabajo de grado presentado para optar al título de:
INGENIERO EN TRANSPORTE Y VÍAS

Director

Ing. Esp. JONATAN JAIR VILLAMARÍN MONROY

Codirector

Ing. PhD. DOMINGO ERNESTO DUEÑAS RUIZ

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS

TUNJA

2018

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja, mayo de 2018

DEDICATORIA

A mis padres, Rafael y Claudia, a mis hermanos Rafael y Sebastián, y a mi abuela Carmenza.

Edward Andrés Rincón Fonseca

DEDICATORIA

*A mis padres y hermanos. A quienes más que compañeros serán siempre amigos.
A cada uno de los ingenieros que en el aula me compartieron sus enseñanzas.*

Angie Julieth Sisa Martínez

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Rafael y Claudia, y a mis hermanos Rafael y Sebastián, quienes me inspiran a ser una mejor persona día a día, han sido ejemplo para mí y me brindaron todo su apoyo cuando más lo necesitaba.

A los ingenieros Jonatan Jair Villamarín Monroy y Domingo Ernesto Dueñas Ruiz por su acompañamiento y dirección del presente proyecto.

A los ingenieros José Rodrigo Alarcón Dallos, Fredy Alberto Guio Burgos y a los demás ingenieros que hacen parte de la Escuela de Transporte y Vías, que inculcaron en mí la importancia de ser una persona íntegra y compartieron sus conocimientos.

A Ximena, mi amiga de toda la carrera, doy gracias a la vida por tenerte a mi lado.

A mis amigos Laura, Mayerlin, Cristhian, Eliana, Edwin, Abril, Manuel, Marlon, Kelly y demás compañeros que hicieron parte de esta etapa, y de quienes aprendí muchas cosas.

Edward Andrés Rincón Fonseca

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su gran apoyo, a mis compañeros y amigos con quienes aprendí el valor de la amistad y el trabajo en equipo, a cada uno de los ingenieros que hizo parte de mi proceso de aprendizaje, al director y codirector de la presente investigación quienes con sus conocimientos nos guiaron por el mejor camino, a quienes nos han apoyado y ayudado directamente para hacer de este proyecto una realidad.

Angie Julieth Sisa Martínez

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	21
1. ¿ESTACIONES? INICIO DE UNA METODOLOGÍA COLOMBIANA.....	23
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	23
1.2. TEORÍA DE FLUJO PEATONAL	25
1.2.1. Velocidad.	25
1.2.2. Densidad.....	26
1.2.3. Espacio peatonal requerido.	26
1.2.3.1. Ancho efectivo del pasillo.....	27
1.2.4. Principios de flujo peatonal.	28
1.2.4.1. Relación velocidad – densidad.	28
1.2.4.2. Relación flujo – densidad.....	29
1.2.4.3. Relación velocidad – flujo.	30
1.2.4.4. Relación velocidad – espacio.....	31
1.3. TRANSPORTE SOSTENIBLE	32
1.4. SISTEMAS BRT.....	33
1.4.1. Corredores – vías.	34
1.4.2. Estaciones.	34
1.4.3. Vehículos.	34
1.4.4. Sistema de recolección de tarifas.	35
1.4.5. Sistemas inteligentes de transporte.	35
1.5. EL SISTEMA BRT EN BOGOTÁ – MARCO TRANSMILENIO	35

1.6. DISEÑO DE ESTACIONES	37
1.6.1. ¿Qué es una estación?	38
1.6.2. Tipos de estaciones.	38
1.6.2.1. Tipos de estaciones según su capacidad.	38
1.6.2.2. Tipos de estación según su ubicación.	38
1.6.2.3. Tipos de estaciones según su función.	38
1.6.3. Capacidad de Diseño.....	40
1.6.4. Elementos de circulación peatonal.	40
1.6.4.1. Elementos de circulación horizontal.....	41
1.6.4.2. Elementos de circulación vertical.....	41
1.6.4.3. Plataformas.....	42
1.6.5. Metodología Transit Capacity and Quality of Service Manual 2013 – TCQSM 2013.....	42
1.6.5.1. Elementos de acceso/egreso a la estación.....	42
1.6.5.2. Equipamiento de recolección de tarifas.	43
1.6.5.3. Elementos de circulación horizontal.....	45
1.6.5.4. Elementos de circulación vertical.....	45
1.6.5.5. Plataforma.....	47
1.6.6. Metodología Light Rail Transit Design Guidelines 2017 – LRTDG 2017.	48
1.6.6.1. Principios de diseño.	48
1.6.6.2. Elementos de acceso/egreso a la estación.....	48
1.6.6.3. Equipamiento de recolección de tarifas.	48
1.6.6.4. Elementos de circulación horizontal.....	49

	Pág.
1.6.6.5. Elementos de circulación vertical.....	49
1.6.6.6. Plataforma.....	51
1.6.7. Metodología The Bus of Rapid Transit Planning Guide 2017 – BRTPG 2017.	51
1.6.7.1. Elementos de acceso/egreso a la estación.....	51
1.6.7.2. Equipamiento de recolección de tarifas.	52
1.6.7.3. Elementos de circulación horizontal.....	54
1.6.7.4. Elementos de circulación vertical.....	54
1.6.7.5. Plataforma.....	54
1.6.8. Técnica Transit and Passenger Rail System 2017 – NFPA130 2017.....	56
1.6.8.1. Elementos de acceso/egreso a la estación.....	56
1.6.8.2. Equipamiento de recolección de tarifas.	56
1.6.8.3. Elementos de circulación horizontal y Plataformas.....	57
1.6.8.4. Elementos de circulación vertical.....	57
1.7. NIVELES DE SERVICIO PEATONAL.....	58
1.7.1. Definición de Nivel de Servicio.....	58
1.7.2. Nivel de servicio peatonal.	59
1.7.3. El apretujamiento.	61
1.7.3.1. Efectos del apretujamiento.....	62
2. MOVILIDAD INTERNA PEATONAL EN ESTACIONES	64
2.1. ZONA DE TOMA DE INFORMACIÓN	64
2.2. TAMAÑO MUESTRAL	70
2.2.1. Velocidades.	70

	Pág.
2.2.2. Densidades.....	70
2.3. METODOLOGÍA EN CAMPO	71
2.3.1. Inventario.....	72
2.3.2. Volúmenes.....	72
2.3.3. Velocidades.....	73
2.3.4. Densidades.....	74
2.4. DATOS OBTENIDOS.....	75
2.5. INVENTARIO DE LA PLATAFORMA	77
2.6. CARACTERIZACIÓN VOLÚMENES PEATONALES	82
2.6.1. Composición peatonal.....	82
2.6.2. Comportamiento periódico.....	84
2.6.2.1. Hora pico.....	86
2.7. CARACTERIZACIÓN VELOCIDADES PEATONALES	87
2.7.1. Velocidad pasajeros que circulan en la plataforma.....	87
2.7.1.1. Velocidades de circulación Mujeres.....	87
2.7.1.2. Velocidades de circulación Hombre.....	91
2.7.2. Comportamiento periódico.....	93
2.7.3. Velocidad pasajeros que descienden en la plataforma.....	96
2.7.3.1. Velocidades de descenso Mujeres.....	96
2.7.3.2. Velocidades de descenso Hombres.....	99
2.7.4. Pruebas de hipótesis entre velocidades.....	101
2.8. CARACTERIZACIÓN DENSIDADES PEATONALES.....	103

2.8.1.1. Determinación del ancho efectivo para densidades peatonales en la zona de espera.....	103
2.8.1.2. Análisis estadístico.....	104
2.8.1.3. Comportamiento periódico.....	106
2.9. MODELOS DE FLUJO PEATONAL.....	109
2.9.1. Determinación del ancho efectivo para flujos peatonales.....	109
2.9.1.1. Modelos de flujo peatonal calibrados para el elemento de circulación. ...	111
3. PERCEPCIÓN DE LOS USUARIOS EN ZONAS DE ESPERA.....	117
3.1. TAMAÑO MUESTRAL.....	117
3.2. METODOLOGÍA EN CAMPO.....	118
3.3. CARACTERIZACIÓN DE LA PERCEPCIÓN EN ESTACIÓN CALLE 100 ...	120
3.3.1. Comparación entre densidades de apretujamiento.....	121
3.4. ESCALA DE NIVEL DE SERVICIO PARA ZONAS DE ESPERA.....	122
3.4.1. Comparación con escala de zonas de espera Fruin – TCQSM.....	124
3.5. OPINIÓN DE ACEPTABILIDAD DE TIEMPOS DE ESPERA SEGÚN DENSIDAD PEATONAL.....	126
4. CONCLUSIONES.....	128
5. RECOMENDACIONES.....	131
BIBLIOGRAFÍA.....	132
ANEXOS.....	139

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Elipse Corporal.	27
Figura 2. Espacio para peatones caminando.....	27
Figura 3. Flujo Peatonal - Espacio Peatonal.	28
Figura 4. Relación Velocidad - Densidad Peatonales.	29
Figura 5. Relación Flujo – Espacio peatonal.....	30
Figura 6. Relación Velocidad – Flujo Peatonal.	31
Figura 7. Velocidad – Espacio peatonal.....	31
Figura 8. Localización Bogotá D.C.....	65
Figura 9. Estaciones y Portales con Mayor Demanda en día hábil.....	66
Figura 10. Localización geográfica Estación de estudio.	67
Figura 11. Planta de Estación Calle 100 TransMilenio S.A.....	67
Figura 12. Vagón Estudio.	68
Figura 13. Distancia libre entre torniquetes y zonas de espera	68
Figura 14. Planta general Vagón 2, plataforma de estudio.	69
Figura 15. Ubicación de aforadores	71
Figura 16. Aforadores ejecutando la toma de información.....	72
Figura 17. Puntos de control para conteo de volúmenes.	73
Figura 18. Áreas delimitadas para toma de densidades peatonales sobre zona de espera.....	75
Figura 19. Esquema de plataforma estudio	78
Figura 20. Demarcación horizontal en el vagón puerta 1.....	78
Figura 21. Demarcación horizontal en el vagón puerta 2.....	79

Figura 22. Demarcación horizontal en el vagón puerta 3.....	79
Figura 23. Elementos de información de rutas en el vagón	80
Figura 24. Elementos de información de rutas en puertas del vagón	80
Figura 25. Rutas troncal H disponibles en aplicación TransMilenio y SITP	81
Figura 26. Presencia de personal de seguridad sobre la plataforma	81
Figura 27. Áreas que conforman el vagón estudio.....	82
Figura 28. Composición volúmenes peatonales.	83
Figura 29. Composición por movimientos realizados volúmenes peatonales.....	84
Figura 30. Variación de volúmenes peatonales 09:00 – 12:20	84
Figura 31. Variación de volúmenes peatonales 12:20 – 16:40	85
Figura 32. Variación de volúmenes peatonales 16:40 – 20:00	85
Figura 33. Variación general de tasas de flujo en periodos de 30 min.....	86
Figura 34. Histograma de velocidades de circulación MCE	89
Figura 35. Prueba de lápiz grueso para velocidades de circulación MCE	89
Figura 36. Prueba de Anderson – Darling para velocidades de circulación MCE ..	90
Figura 37. Histograma de velocidades de circulación MSE	91
Figura 38. Histograma de velocidades de circulación HCE	92
Figura 39. Histograma de velocidades de circulación HSE.	93
Figura 40. Variación de velocidades de circulación 09:00 – 12:20	94
Figura 41. Variación de velocidades de circulación 12:20 – 16:40	95
Figura 42. Variación de velocidades de circulación 16:40 – 20:00	96
Figura 43. Histograma de velocidades de descenso MCE.	97
Figura 44. Histograma de velocidades de descenso MSE.....	98

Figura 45. Histograma de velocidades de descenso HCE.....	99
Figura 46. Histograma de velocidades de descenso HSE.....	101
Figura 47. Histograma de densidades	104
Figura 48. Prueba de lápiz grueso para densidades peatonales	105
Figura 49. Variación de densidades 09:00 –12:20.....	107
Figura 50. Variación de densidades 12:20 –16:40.....	108
Figura 51. Variación de densidades 16:40 –20:00.....	108
Figura 52. Influencia de pelotones de espera en ancho efectivo	110
Figura 53. Modelo de mejor ajuste - relación velocidad vs densidad.....	112
Figura 54. Modelo lineal calibrado relación velocidad vs densidad.....	113
Figura 55. Modelos calibrados, relaciones macroscópicas - zona de circulación- plataformas.	114
Figura 56. Comparación grafica entre modelos de flujo peatonal para plataformas e infraestructuras bidireccionales.....	116
Figura 57. Superficies de espera para realización de encuestas.....	118
Figura 58. Encuestadora ejecutando toma de información.....	119
Figura 59. Distribución de percepción según género y estado	120
Figura 60. Comparación grafica entre escalas de nivel de servicio en zonas de espera, variable densidad peatonal (p/m^2).....	124

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características físicas de buses en sistemas BRT	35
Tabla 2. Clasificación de estaciones según su capacidad	38
Tabla 3. Niveles de Servicio para Pasillos	60
Tabla 4. Niveles de Servicio para Escaleras.....	60
Tabla 5. Niveles de Servicio para Zonas de acumulación	61
Tabla 6. Longitudes base para toma de velocidades.....	74
Tabla 7. Volúmenes peatonales para hora pico.....	75
Tabla 8. Velocidades peatonales – muestra sistemática – para hora pico.	76
Tabla 9. Velocidades peatonales – muestra no sistemática – para hora pico.	76
Tabla 10. Densidades peatonales obtenidas en la zona de espera para hora pico.	77
Tabla 11. Estadísticos descriptivos velocidades de circulación MCE	88
Tabla 12. Estadísticos descriptivos velocidades de circulación MSE	90
Tabla 13. Estadísticos descriptivos velocidades de circulación HCE.....	91
Tabla 14. Estadísticos descriptivos velocidades de circulación HSE.....	92
Tabla 15. Estadísticos descriptivos velocidades de descenso MCE.....	97
Tabla 16. Estadísticos descriptivos velocidades de descenso MSE.....	98
Tabla 17. Estadísticos descriptivos velocidades de descenso HCE.....	99
Tabla 18. Estadísticos descriptivos velocidades de descenso HSE.....	100
Tabla 19. Estadísticos descriptivos resumidos de velocidades	101
Tabla 20. Resultados de estadístico observado $Z_{Calculado}$ velocidades de circulación	102

Tabla 21. Resultados de estadístico observado $Z_{\text{Calculado}}$ velocidades de descenso	103
Tabla 22. Estadística descriptiva densidades sobre la zona de espera	104
Tabla 23. Análisis de varianza modelo de mejor ajuste - relación velocidad vs densidad	111
Tabla 24. Análisis de varianza modelo lineal calibrado – relación velocidad vs densidad	113
Tabla 25. Parámetros de modelos de flujo peatonal.....	115
Tabla 26. Estadísticos descriptivos resultados individuales de percepción - apretujamiento	121
Tabla 27. Prueba de hipótesis entre densidades de apretujamiento por genero por estado	121
Tabla 28. Relación entre estados de calidad de servicio y niveles de servicio. ...	122
Tabla 29. Estadísticas descriptivas densidad máxima.....	123
Tabla 30. Escala de nivel de servicio para zonas de espera	123
Tabla 31. Comparación entre escala de nivel de servicio para zonas de espera convencional.....	124
Tabla 32. Estadísticos descriptivos resultados individuales de opinión de aceptabilidad tiempo de espera según el nivel de apretujamiento en la zona de espera.....	126
Tabla 33. Estadísticas descriptivas de la opinión de aceptabilidad de tiempos de espera según estado de densidad.....	126
Tabla 34. Opinión de aceptabilidad de tiempos de espera bajo diferentes condiciones de densidad peatonal.....	127

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Parámetros típicos de torniquetes TCQSM 2013	139
Anexo B. Parámetros típicos de Q y C para diferentes unidades de acceso BRTPG 2017	139
Anexo C. Formato para inventario de plataforma	140
Anexo D. Formato para aforo de volúmenes	140
Anexo E. Formato para aforo de velocidades peatonales.	141
Anexo F. Formato para aforo de densidades peatonales.	141
Anexo G. Ejemplos de cálculo de plataformas	142
Anexo H. Modelo de relaciones macroscópicas en plataformas – zonas de espera	145
Anexo I. Formato de encuesta de percepción en zonas de espera	146

LISTA DE ANEXOS DIGITALES

Anexo digital 1. Resultados de campo Volúmenes peatonales

Anexo digital 2. Resultados de campo Velocidades de circulación peatonales

Anexo digital 3. Resultados de campo Velocidades de descenso peatonales

Anexo digital 4. Resultados de campo Densidades peatonales en zona de espera

Anexo digital 5. Resultados de campo Encuesta de percepción en zona de espera

Anexo digital 6. Prueba de lápiz grueso velocidades MSE

Anexo digital 7. Prueba de Anderson Darling velocidades MSE

Anexo digital 8. Prueba de lápiz grueso velocidades HCE

Anexo digital 9. Prueba de Anderson Darling velocidades HCE

Anexo digital 10. Prueba de lápiz grueso velocidades HSE

Anexo digital 11. Prueba de Anderson Darling velocidades HSE

Anexo digital 12. Prueba de lápiz grueso velocidades descenso MCE

Anexo digital 13. Prueba de Anderson Darling velocidades descenso MCE

Anexo digital 14. Prueba de lápiz grueso velocidades descenso MSE

Anexo digital 15. Prueba de Anderson Darling velocidades descenso MSE

Anexo digital 16. Prueba de lápiz grueso velocidades descenso HCE

Anexo digital 17. Prueba de Anderson Darling velocidades descenso HCE

Anexo digital 18. Prueba de lápiz grueso velocidades descenso HSE

Anexo digital 19. Prueba de Anderson Darling velocidades descenso HSE

RESUMEN

El proyecto de investigación busca calibrar una escala de Nivel de Servicio asociada a la densidad y espacio peatonal para zonas de espera en plataformas de estaciones de sistemas de transporte masivo, con base en encuestas de percepción a usuarios de las zonas de espera de las estaciones del sistema TransMilenio, tomando como caso de estudio la estación Calle 100 de este sistema en la ciudad de Bogotá D.C. – Colombia. El desarrollo del proyecto involucra la revisión de metodologías y técnicas para el diseño de estaciones de sistemas de transporte masivo, y la calibración del modelo de flujo lineal para la plataforma de estudio.

Mediante conteos manuales en periodos 5 minutos se determinaron los volúmenes y velocidades peatonales sobre la plataforma, y densidades peatonales sobre las zonas de espera, mediante encuestas de percepción se determinó la calidad del servicio en cuanto a apretujamiento en las zonas de espera, así mismo se realizó un inventario de la plataforma. Con esta información se realizó una caracterización de la movilidad interna peatonal en la plataforma. La calibración del modelo de flujo lineal considero los siguientes factores para cada periodo de 5 minutos: el ancho efectivo de la plataforma fue ajustado considerando el efecto de los pasajeros en la zona de espera, y la densidad peatonal fue obtenida a partir de la ecuación fundamental del modelo lineal ($\text{flujo} = \text{densidad} \times \text{velocidad}$). Los umbrales para cada de Nivel de Servicio corresponden al percentil 85 de los datos agrupados por la calificación de la calidad del servicio.

Se encontró que la zona de circulación de la plataforma presente un elevado uso con respecto a la zona de espera, la distribución de los flujos peatonales de 83:17 y que los usuarios de la zona de espera se distribuyen de manera heterogénea. El modelo de flujo peatonal de la plataforma presenta variaciones significativas en comparación con los modelos de flujo para infraestructuras peatonales como aceras. Finalmente, se concluye que los usuarios de la zona de espera de la plataforma consideran aceptable tener más gente a su alrededor, por lo que la escala calibrada permite reducir el dimensionamiento de las zonas de espera manteniendo niveles de operación adecuados.

INTRODUCCIÓN

El transporte público es uno de los principales ejes del desarrollo y avance de la sociedad, hace posible la comunicación y el movimiento de personas y mercancías, por eso debe garantizar eficiencia, generando en los usuarios comodidad, seguridad, rapidez y bajos costos, motivando así su uso diario, pese a ello en muchas ocasiones su enfoque no es suplir las necesidades reales de movilidad de una población; TransMilenio se caracteriza por ser uno de los principales medios de transporte en la ciudad de Bogotá, moviliza cerca de 2.5 millones de personas en un día hábil típico, y a pesar de ello la demanda ha superado la capacidad de diseño, dando como resultado afectaciones negativas en la operación del sistema y por ende en la percepción de los usuarios para con los vehículos y estaciones; con la presente investigación se buscan analizar los factores de importancia relacionados con la percepción de los usuarios y el espacio peatonal en las zonas de espera de las plataformas situadas en estaciones del sistema.

La estación Calle 100 del sistema TransMilenio se localiza en la ciudad de Bogotá D.C. – Colombia, sobre la Avenida Carrera 45 entre las Calles 94 y 97, se compone de 3 vagones, con plataformas centrales, siendo esta la estación seleccionada con base en informes mensuales “*Estadísticas de oferta del Sistema Integrado de Transporte Público – SITP*” publicados por TransMilenio entre 2016 y 2017; y el documento CONPES 3882 del 2017.

Diversos autores indican la percepción de los usuarios es fundamental en el diseño y operación de cualquier sistema de transporte, estableciendo Niveles de Servicio que permiten identificar si una instalación requiere o no de intervenciones, las condiciones de operación de los elementos, y por último y fundamentalmente, la percepción de los usuarios para con ellos, relacionada claramente con su disposición a usarlos.

El desarrollo de la presente investigación requiere de toma información asociada a la movilidad interna sobre la plataforma, realizada de manera manual dentro de la plataforma del vagón 2 de la estación mencionada, con el objetivo de obtener valores de velocidades y volúmenes para los flujos continuos, y densidades peatonales y encuestas de percepción para los usuarios de la zona de espera. Los datos son tomados en un día típico para reducir el sesgo de los resultados y, ceñidos a las directrices dadas por TransMilenio. Con los datos obtenidos, se calibra una escala de Nivel de Servicio para zonas de espera asociada al espacio y densidad peatonal, y se realiza la caracterización de los flujos peatonales en la plataforma del Vagón 2 en la Estación Calle 100 del Sistema TransMilenio calibrando las relaciones entre las principales variables macroscópicas del flujo peatonal. Con la nueva escala de Nivel de Servicio se busca; fomentar la investigación y calibración de otras

escalas y parámetros del flujo peatonal en estaciones de sistemas de transporte masivo en Colombia y compararla con otros indicadores de Nivel de Servicio de espacio peatonal en plataformas.

El presente documento se compone de 5 capítulos, entre los cuales se destaca el capítulo 1, siendo esta herramienta fundamental para la comprensión de diversos conceptos y metodologías para el diseño de estaciones; en el capítulo 2 se muestra la metodología usada en campo para la recolección de información asociada con volúmenes y velocidades peatonales: se presenta de manera general los datos obtenidos en la hora pico relacionados con las principales variables macroscópicas del flujo peatonal, la caracterización de la movilidad interna peatonal en la plataforma y la calibración del modelo lineal de flujo peatonal. El capítulo 3 se centra en la evaluación de la percepción de los usuarios sobre las zonas de espera de la plataforma, y se presenta la escala calibrada de Nivel de Servicio para las zonas de espera en función de la densidad y espacio peatonal.

Con la presente se busca incentivar la investigación en infraestructuras peatonales y elementos que conforman la estación en los sistemas de transporte, haciendo énfasis en sistemas masivos, en donde los usuarios se ven afectados con las decisiones tomadas durante su diseño, construcción y operación, por ende, es necesario tener en cuenta la percepción de los usuarios en pro de mejoras, y en pro de un desarrollo social.

1. ¿ESTACIONES? INICIO DE UNA METODOLOGÍA COLOMBIANA

En este capítulo se encuentra el planteamiento del problema, las bases teóricas necesarias para el diseño de estaciones de sistemas de transporte desde el punto de vista peatonal, considerando la teoría del flujo peatonal y las principales variables macroscópicas que de ella dependen, conceptos asociados a los niveles de servicio peatonal, la conceptualización e importancia del transporte sostenible y las características de los sistemas BRT y su papel en la ciudad de Bogotá - Colombia, así como cuatro metodologías para el diseño de estaciones de sistemas de transporte, haciendo énfasis en los sistemas BRT.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El transporte en las ciudades se constituye como un elemento importante en la sociedad moderna¹, el cual crece de manera acelerada a un ritmo igual o mayor que la tasa de crecimiento económico, y en el largo plazo aún más que las tasas de reducción de energía e intensidad de contaminación, así mismo consume elevados niveles de recursos agotables: energía, hábitats humanos y ecológicos, capacidad de carga de carbono en la atmosfera y tiempos disponibles de los individuos², se estima que el transporte consume aproximadamente el 25 % de la energía producida a nivel mundial y cerca del 61.5 % de la producción anual de petróleo³, genera aproximadamente el 50 % de las emisiones contaminantes⁴, y muestra un incremento de estas más acelerado que en otros sectores⁵, y es en las ciudades en donde se concentran estos consumos producto el incremento de las tasas de motorización, que han repercutido en la congestión del transporte, aumentando los consumos energéticos y las tasas de polución⁶, por lo que sin un transporte urbano de calidad, apto para ricos y pobres no será posible desincentivar el uso del vehículo privado ni reducir los problemas que la motorización impone a la salud, calidad de vida y la competitividad de las ciudades⁷.

¹ MATHEW, Tom. RAO, KV Krishna. Introduction to Transportation Engineering. Mumbai, 2006. p. 3.1.

² GOLDMAN, Todd. GORHAM, Roger. Sustainable urban transport: Four innovate directions. En: Technology in society. 2006. vol. 28. p. 263.

³ RODRIGUE, Jean-Paul. Transportation and Energy. [En línea] Citado el 10 de marzo de 2018. Disponible en < https://transportgeography.org/?page_id=5717 >

⁴ LOWSON. Martin. A New Approach to sustainable transport systems. En: 13th World Clean Air and Environmental Protection Congress (6: 22-27, August, London). 2004. p. 2.

⁵ STJERNBORG, Vanessa y MATTISSON, Ola. The Role of Public Transport in Society – A Case Study of General Policy Documents in Sweden. En: Sustainability. 2016. vol. 28, no. 1120. p. 2.

⁶ THE WORLD BANK. Cities on the Move. A world bank urban transport strategy review. Washington DC., 2002. p.7.

⁷ GUTIÉRREZ, Luis. Transporte Publico de calidad y la movilidad urbana. 2013. p. 1

Se evidencia la necesidad de la implementación de los sistemas de transporte sostenibles⁸, considerando y comprendiendo que las decisiones del transporte público son las decisiones del futuro de una ciudad⁹, sin dejar a un lado la concepción de documentos técnicos para su eficaz diseño y operación.

En Colombia, la implementación de sistemas de transporte masivo surge a partir del año 2000, en el cual el Departamento Nacional de Planeación incentivo la construcción de estos, mediante los CONPES 3167 de 2002 y 3260 de 2002 y se da inicio a la operación del sistema TransMilenio en Bogotá D.C. – Colombia. A pesar de esto las bases teóricas relacionadas con el diseño de estaciones y facilidades para estos sistemas en el país era escasa. Lo cual conllevó a utilizar metodologías y/o criterios que para la época no representaban el comportamiento de los peatones en el medio colombiano y, que en la actualidad han sido modificados (el diseño conceptual de TransMilenio expuesto en 1999¹⁰ indicaba que las estaciones convencionales del sistema tendrían un ancho de 5 m, en el año 2003¹¹ un reporte realizado para el Banco Mundial indico que podrían variar de los 5 m a los 3.5 m).

En la actualidad TransMilenio es uno de los principales medios de transporte en la ciudad de Bogotá, transportando a más de dos millones trescientos mil pasajeros en un día hábil típico¹², demanda que ha superado la capacidad de diseño del sistema¹³. Lleva a plantear el siguiente interrogante, ¿Los parámetros de diseño como capacidad y/o nivel de servicio de los elementos de una estación de sistemas de transporte masivo en el país, son acordes a la percepción de los usuarios?, metodologías como *Transit Capacity and Quality of Service Manual - TCQSM*¹⁴ definen lineamientos para el diseño de estaciones de sistemas de transporte de pasajeros, el *Highway Capacity Manual - HCM*¹⁵ y FRUIN¹⁶ formulan modelos con variaciones significativas, calibrados para entornos diferentes. A pesar de esto, en

⁸ LOWSON. Op. cit. p.2.

⁹ GESELLSCHAFT FÜR TECHNISCHE ZUSAMMENARBEIT. Sustainable Transport: A Sourcebook for Policy-Makers in Developing Cities, Module 3a: Mass Transit Options. 2003. p. 1.

¹⁰ STEER DAVIES GLEAVE. TRANSMILENIO Situación Actual – Diseño Conceptual. [Diapositivas]. 1999. p. 109.

¹¹ CRACKNELL, John. TransMilenio Busway-Based Mass Transit, Bogotá, Colombia. 2003. p. 8.

¹² TRANSMILENIO S.A. Estadísticas de oferta y demanda del Sistema Integrado de Transporte Público - SITP - septiembre 2017. [En línea] Citado el 19 de enero de 2018. Disponible en < http://www.transmilenio.gov.co/Publicaciones/estadisticas_de_oferta_y_demanda_del_sistema_integrado_de_transporte_publico_sitp_septiembre_2017>

¹³ LI, Zheng y HENSHER, David. Crowding un Public Transport. A Review of Objective and Subjective Measures. En: Journal of Public Transportation. 2013. vol. 16, no. 2. p. 110.

¹⁴ TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Transit Capacity and Quality of Service Manual. 3th Edition. Washington D.C. 2013.

¹⁵ TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Highway Capacity Manual 2010. 5th Edition. 2010.

¹⁶ FRUIN, John. Designing for pedestrians [En línea] Citado el 23 de agosto de 2017. Disponible en < https://ntl.bts.gov/DOCS/11877/Chapter_8.html >

el país dichas metodologías no han tenido amplia aplicación en la determinación de estos parámetros de calidad de servicio en estaciones de sistemas de transporte masivo, por lo que es necesario establecer si son aplicables al medio colombiano.

Para el caso, el enfoque principal de la investigación se centra en la percepción de los usuarios del sistema TransMilenio hacia el apretujamiento experimentado sobre las *plataformas* de las estaciones del sistema, considerado como el elemento principal de una estación¹⁷, además de caracterizar las principales variables macroscópicas de los flujos peatonales que allí se desarrollan, así como de la calibración de los principales modelos macroscópicos, que permitirán analizar la movilidad interna dentro de las estaciones, así mismo se realizara un análisis comparativo con la escala de nivel de servicio calibrada en la plataforma de estudio y la expuesta con la metodología TCQSM.

1.2. TEORÍA DE FLUJO PEATONAL

A continuación, se definen los conceptos fundamentales relacionados con el flujo peatonal, como lo son la velocidad, densidad, flujo y espacio peatonal, de igual manera se muestran las relaciones entre las variables macroscópicas, velocidad – densidad, flujo – densidad, velocidad – flujo y velocidad – espacio.

Según MÁRQUEZ¹⁸, uno de los principales objetivos de una parada de autobús es proveer un espacio adecuado, y con las facilidades apropiadas en los periodos pico, garantizando seguridad y comodidad. El espacio que normalmente requieren las personas varía y aumenta con la velocidad de caminata, es importante entonces considerar el tipo y características de los peatones¹⁹. Es importante saber también que la capacidad peatonal, refiere al máximo número de personas que puede ocupar o pasar a través de una instalación peatonal, expresada en personas por unidad de área o personas por unidad de tiempo²⁰; y la tasa de flujo peatonal, por su parte hace referencia al número de personas pasando por unidad de tiempo, expresado como personas por minuto, 15 min, u otro periodo de tiempo²¹.

1.2.1. Velocidad. Hace referencia a la relación dada entre un espacio o distancia recorrida por el tiempo usado para ello, para el caso refiere a la velocidad de marcha

¹⁷ TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Transit Capacity and Quality of Service Manual, Op. cit., p. 10-29.

¹⁸ MÁRQUEZ, Luis Fernando. Determinación del Nivel de Servicio en Pasillos de Acceso a las estaciones Perisur y Villa Olímpica del BRT – Metrobús. México, 2013, p. 29.

¹⁹ *Ibíd.*, p. 31.

²⁰ *Ibíd.*, p. 30.

²¹ *Ibíd.*, p. 31.

peatonal media, expresada generalmente en metros por segundo. Puede ser medida estimando el tiempo que tarda cada peatón en atravesar una determinada zona de la vía²². Las velocidades de caminata peatonal normal varían en un amplio rango, dependiendo de muchos factores, según MÁRQUEZ²³ se ha encontrado que las velocidades de caminata están afectadas por factores como la edad, género, hora del día, clima, temperatura, composición del tráfico peatonal, propósito del viaje, equipaje y características del entorno y que las velocidades de flujo libre están en un rango entre 45 m/min y 145 m/min, las velocidades por debajo de 45 m/min pueden ser consideradas como restringidas, y las velocidades mayores a 145 m/min están asociadas a peatones corriendo, de igual manera establece que una velocidad peatonal usada para diseñar regularmente es de 75 m/min.

1.2.2. Densidad. La densidad peatonal es el número promedio de personas por unidad de área dentro de un pasillo o un área de espera, expresada como p/ft^2 o p/m^2 ²⁴. Es uno de los factores más influyente en la velocidad peatonal de caminata. La caminata normal requiere de un espacio adecuado para que un peatón pueda adelantar a otro sin restricciones, teniendo reconocimiento sensorial, y adecuada reacción a los obstáculos: si se incrementa la densidad, se reduce el espacio disponible para caminar y se incrementa los conflictos entre los peatones, y por lo tanto, se reduce la velocidad de caminata²⁵. Las velocidades peatonales están a flujo libre hasta un espacio promedio peatonal de 2.3 m² por persona, por debajo de este valor, las velocidades empiezan a descender²⁶.

1.2.3. Espacio peatonal requerido. El espacio peatonal refiere al área promedio usada por cada peatón en un pasillo o área de espera, expresada en términos de ft^2 o m^2 cuadrados por peatón; este es el inverso a la densidad²⁷.

Para llevar a cabo el diseño de espacios peatonales se usan las medidas corporales profundidad *del cuerpo* y *el ancho de los hombros* para los estándares de espacio mínimo: el espacio básico para un peatón solitario es una elipse del cuerpo de 0.5 m x 0.6 m con un área total de 0.3 m², en el caso de una instalación peatonal, un área de 0.75 m² se emplea como el espacio de amortiguamiento para cada peatón²⁸. En la figura 1 se muestra la elipse corporal.

²² BAÑÓN, Luis y BEVIÁ. José. Manual de Carreteras elementos y proyecto. Ortiz e Hijos, Contratista de Obras S.A, 2000. vol. 1. p. 232.

²³ MÁRQUEZ. Op. cit., p. 37.

²⁴ BAÑÓN y BEVIÁ. Op. cit., p. 233.

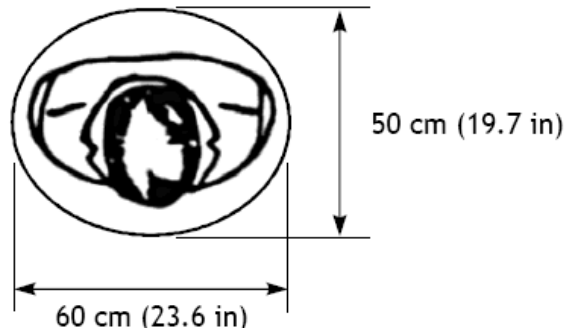
²⁵ MÁRQUEZ. Op. cit., p. 38.

²⁶ BAÑÓN y BEVIÁ. Op. cit., p. 38.

²⁷ *Ibíd.*, p. 233.

²⁸ MÁRQUEZ. Op. cit., p. 39.

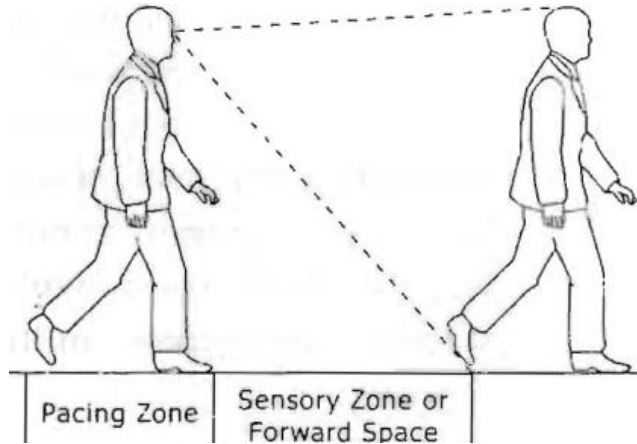
Figura 1. Elipse Corporal.



Fuente: adaptado de TRB. Highway Capacity Manual 2010. Cap 4. p. 4-24.

Para el caso de un peatón caminando; se requiere de un espacio por delante, denominado dimensión crítica, la cual determina la velocidad del viaje y el número de peatones disponibles a pasar por un periodo de tiempo dado, en la figura 2 se muestra la dimensión crítica y la zona sensorial de una persona caminando²⁹.

Figura 2. Espacio para peatones caminando.



Fuente: TRB. Highway Capacity Manual 2010. Cap 4. p. 4-24.

1.2.3.1. Ancho efectivo del pasillo. El ancho efectivo hace referencia a la porción de un ancho de pasillo o área de un espacio que es usada normalmente por los peatones, entonces las longitudes ocupadas por obstrucciones físicas y espacios de amortiguamiento adyacentes a las paredes y obstrucciones son excluidas del ancho efectivo o área³⁰. Uno de los factores de gran importancia y que afecta la capacidad del pasillo es el ancho efectivo disponible³¹, según MÁRQUEZ³², estudios

²⁹ *Ibíd.*, p. 39.

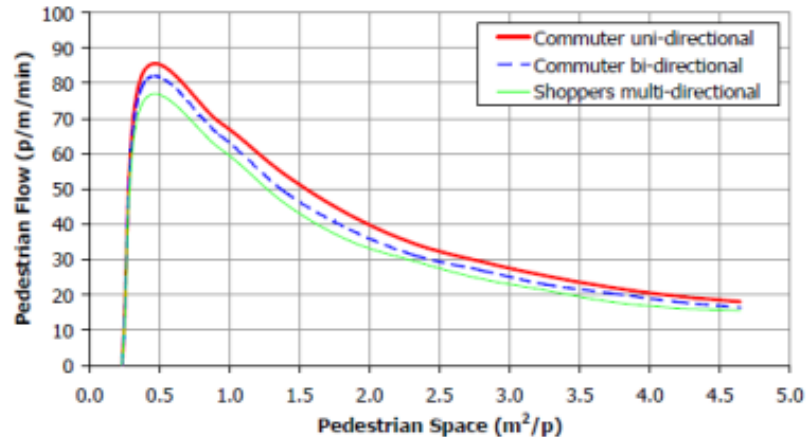
³⁰ *Ibíd.*, p. 41.

³¹ *Ibíd.*, p. 32.

³² *Ibíd.*, p. 37.

han mostrado que los peatones mantienen una longitud 0.5 m de espacio de amortiguamiento entre ellos y las paredes adyacentes, bordes de calles, orillas de la plataforma u otros obstáculos. En la figura 3 se muestra la relación entre el flujo peatonal por unidad de ancho efectivo del pasillo y el espacio promedio peatonal, expresada en p/m/min y m²/p, respectivamente.

Figura 3. Flujo Peatonal - Espacio Peatonal.



Fuente: MÁRQUEZ. Determinación del Nivel de Servicio en Pasillos de Acceso a las estaciones Perisur y Villa Olímpica del BRT – Metrobús. p. 34.

Como se muestra en la figura 3, las tasas de flujo pico promedio máximas son 86 p/m/min para un flujo direccional, 81 p/m/min para bidireccional y 76.4 p/m/min para el multidireccional, estas ocurren en una ocupación media de 0.5 m²/p.

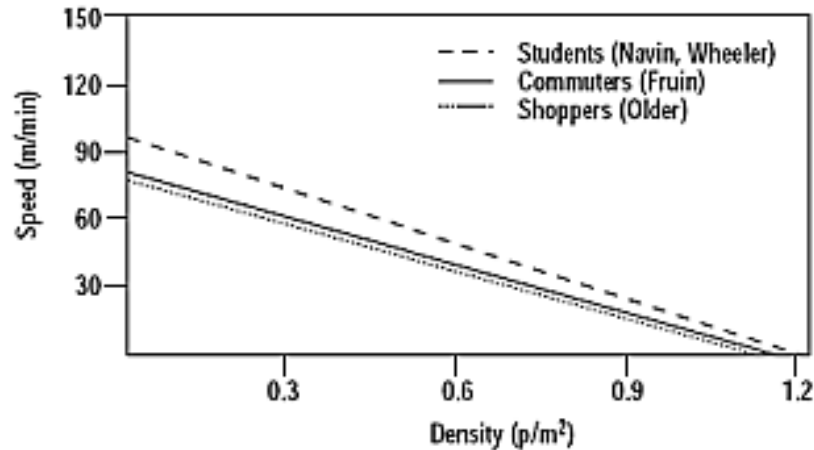
1.2.4. Principios de flujo peatonal. Según BAÑÓN y BEVIA³³, las principales variables que definen la circulación peatonal son la intensidad (flujo peatonal), densidad, capacidad y nivel de servicio; algunos de los factores que influyen en el nivel de servicio percibido son el confort, comodidad, seguridad y economía del sistema. A continuación, se muestra la relación entre las principales variables macroscópicas relacionadas con la circulación peatonal.

1.2.4.1. Relación velocidad – densidad. La relación entre velocidad, densidad y volumen para flujo peatonal es similar al flujo vehicular; cuando el volumen y la densidad incrementan, la velocidad peatonal desciende, por ende, el grado de movilidad entre cada individuo desciende, al igual que la velocidad promedio de los

³³ BAÑÓN y BEVIÁ. Op. cit., p. 233.

peatones. En la figura 4 se muestra la relación entre velocidad y densidad, expresada en m/min y p/m², respectivamente, para tres tipos de peatones.

Figura 4. Relación Velocidad - Densidad Peatonales.



Fuente: MÁRQUEZ. Determinación del Nivel de Servicio en Pasillos de Acceso a las estaciones Perisur y Villa Olímpica del BRT – Metrobús. p. 33.

1.2.4.2. Relación flujo – densidad. El flujo peatonal se encuentra definido por la relación entre la velocidad peatonal y la densidad peatonal, dada en personas por pie por minuto, y corresponde a la siguiente ecuación³⁴:

$$V = S * D$$

Dónde: V= flujo peatonal por unidad de ancho (p/ft/min) o (p/m/min). S= Velocidad peatonal (ft/min) o (m/min). D= Densidad Peatonal (p/ft²) o (p./m²).

A continuación, se muestra la relación que define la variable *flujo peatonal*, considerando el espacio peatonal es decir el inverso de la densidad, expresada también como “flujo por unidad de ancho”³⁵.

$$V = \frac{S}{M}$$

Dónde: V= flujo peatonal por unidad de ancho (p./pie/minuto) o (p/m/min). S= Velocidad peatonal (ft/min) o (m/min). M= Espacio peatonal (ft²/p) o (m²/p).

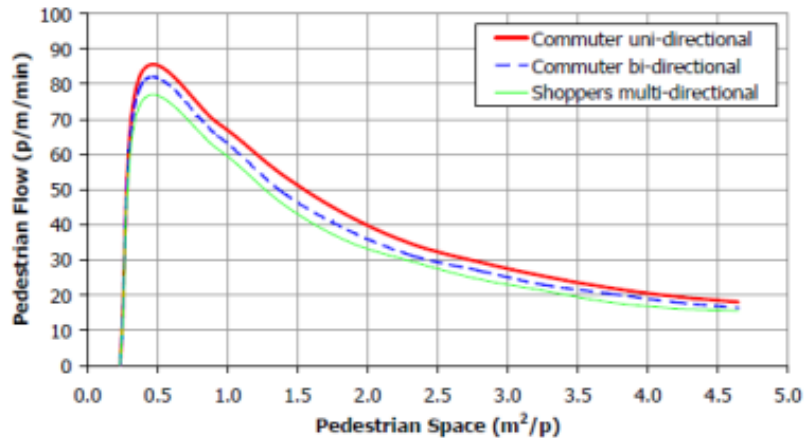
En la figura 5 se muestra la relación básica entre el flujo peatonal y espacio peatonal, expresada en p/m/min y m²/p, respectivamente. Como se puede observar, el

³⁴ FRUIN, John. Designing for Pedestrians: A Level-Of-Service Concept. 1971. p. 2.

³⁵ *Ibíd.*, p. 2.

espacio promedio por peatón esta entre 0.4 y 0.9 m²/p. Cuando el espacio peatonal es inferior a 0.4 m²/p, la tasa de flujo descende.

Figura 5. Relación Flujo – Espacio peatonal.

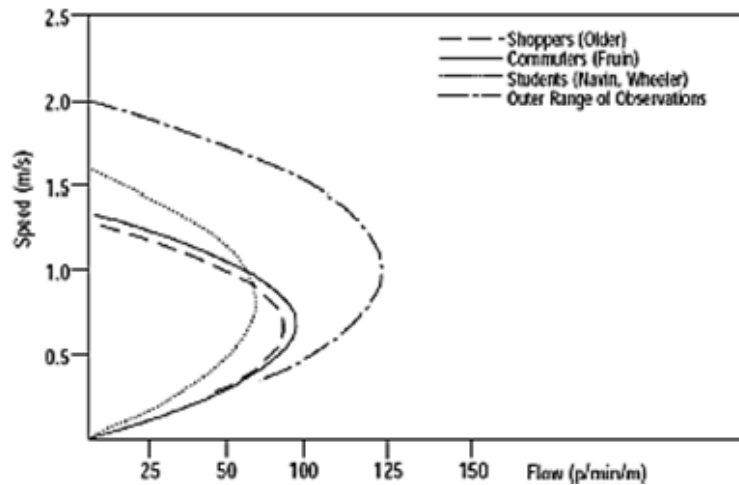


Fuente: MÁRQUEZ. Determinación del Nivel de Servicio en Pasillos de Acceso a las estaciones Perisur y Villa Olímpica del BRT – Metrobús. p. 34.

1.2.4.3. Relación velocidad – flujo. En la figura 6 se muestra la relación entre la velocidad peatonal y el flujo peatonal, expresada en m/s y p/m/min, respectivamente. Cuando hay muy pocos peatones en el pasillo, es decir, cuando los peatones están en niveles de flujo bajos, es posible escoger velocidades de caminata mayores. A medida que el flujo se incrementa, la velocidad descende debido a que las interacciones entre peatones son más estrechas. Cuando un nivel crítico de multitud ocurre, el movimiento se torna más difícil de tal forma que tanto velocidad como flujo descenden³⁶.

³⁶ MÁRQUEZ, Luis Fernando. Determinación del Nivel de Servicio en Pasillos de Acceso a las estaciones Perisur y Villa Olímpica del BRT – Metrobús. México, 2013 - Fruin (1971). p. 35.

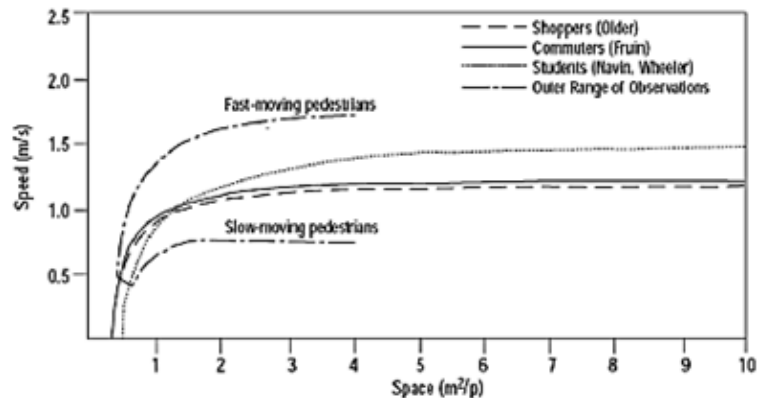
Figura 6. Relación Velocidad – Flujo Peatonal.



Fuente: MÁRQUEZ. Determinación del Nivel de Servicio en Pasillos de Acceso a las estaciones Perisur y Villa Olímpica del BRT – Metrobús. p. 35.

1.2.4.4. Relación velocidad – espacio. En la figura 7, se puede observar la relación entre la velocidad de caminata y el espacio disponible por persona (inverso de la densidad peatonal), expresada en m/s y m^2/p , respectivamente, se observa que en un espacio promedio o menor que $1.5 m^2/p$ los peatones no pueden lograr sus niveles deseados de caminata³⁷.

Figura 7. Velocidad – Espacio peatonal.



Fuente: MÁRQUEZ. Determinación del Nivel de Servicio en Pasillos de Acceso a las estaciones Perisur y Villa Olímpica del BRT – Metrobús. p. 36.

Según el *Transit Capacity and Quality of Service Manual - TCQSM*³⁸, la capacidad de un pasillo está controlada por factores como velocidad peatonal de caminata,

³⁷ MÁRQUEZ. Op. cit., p. 36.

³⁸ TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Op. cit. p. 10-20.

densidad de tráfico peatonal, características del peatón y ancho efectivo del pasillo en su punto más estrecho.

1.3. TRANSPORTE SOSTENIBLE

Definido por LÍNEA VERDE³⁹ como el sistema de transporte de personas y mercancías, que permite la reducción de los costos sociales y ambientales actuales, afectando el factor de utilización del vehículo privado como medio de transporte y de los combustibles fósiles como fuente de energía, en pro de la calidad de vida actual y la de generaciones futuras, por otro lado MOSTACHJOV⁴⁰ indica que los pilares del transporte sostenible están asociados al balance económico y la sostenibilidad ambiental y social. GILBERT⁴¹ complementa este concepto, indicando que el transporte sostenible debe ser asequible, justo y eficiente, debe proveer diferentes opciones de transporte e incentivar la competitividad de la economía y el desarrollo regional. JIMÉNEZ⁴² establece que la reducción de la congestión en las áreas urbanas y metropolitanas y, la disminución de los niveles de contaminación y gases de efecto invernadero se logran mediante la implementación de modos de transporte sostenibles, seguros y de calidad.

En el entorno urbano los principales medios de transporte público que ofrecen soluciones ambientales y de movilidad son: sistemas BRT (mediante vehículos que usen combustibles limpios), metro y tren ligero, que en conjunto con medidas de control buscan reducir el uso del vehículo privado. Sin embargo no hay que olvidarse del transporte no motorizado, conformado por el transporte peatonal y la bicicleta, los cuales contribuyen de manera significativa al transporte sostenible, el consumo de energía se reduce considerablemente y no producen contaminación.⁴³

Retomando los sistemas BRT - *Bus of Rapid Transit* - como eje central de la investigación, según MOSTACHJOV⁴⁴ desde el punto de vista ambiental los buses empleados deben cumplir con los estándares de emisiones partículas

³⁹ LÍNEA VERDE. Módulo IX: Transporte sostenible. p. 2,3.

⁴⁰ MOSTACHJOV, Dmitrij. Sustainable public Transportation: quantifying the benefits of Sustainable Bus Rapid Transit systems. Tesis de Maestría. Stockholm: KTH Industriell teknik och management. 2015. p. 6.

⁴¹ GILBERT, Richard. Defining Sustainable Transportation. The Centre for Sustainable Transportation. 2005. p. 6,7.

⁴² JIMÉNEZ, Luis. Transporte y movilidad, claves para la sostenibilidad. Universidad Complutense de Madrid y Observatorio de la Sostenibilidad en España. [En línea] Citado el 15 de mayo de 2018. Disponible en <

http://www.fgcsic.es/lychnos/es_ES/articulos/transporte_movilidad_claves_para_la_sostenibilidad >

⁴³ ECOLOGISTAS EN ACCIÓN. Ideas y buenas prácticas para la movilidad sostenible. Ministerio de Medioambiente. España. 2007. p. 21, 23, 24, 25, 27.

⁴⁴ MOSTACHJOV. Op. cit., p.2.

contaminantes, contribuyendo al transporte público sostenible y mediante el indicador de emisiones de CO₂ Kg/pas/km es posible controlar y cuantificar los beneficios, desde el punto de vista económico justifica la sostenibilidad en la viabilidad financiera del sistema considerando los costos en términos de distancia recorrida, costos por pasajero y otros indicadores de rendimiento, finalmente asocia el pilar socioeconómico a la disminución de la tasas de accidentalidad producto del tráfico vehicular y tasas de morbilidad y mortalidad producto las emisiones de partículas contaminantes de los modos de transporte, así mismo considera la accesibilidad y beneficios sobre la productividad de la región y los impactos económicos derivados del sistema.

El sistema TransMilenio en Bogotá D.C. – Colombia redujo de manera significativa la emisión de partículas contaminantes, contribuyó a una mejora en la calidad de vida de los ciudadanos, sustancialmente redujo los tiempos de viaje a un costo relativamente bajo, que respalda mediante políticas económicas solvento los problemas de asequibilidad al sistema, redujo también las tasas de accidentalidad y morbilidad⁴⁵, la viabilidad económica del sistema se vio afectada por sobre costos en la construcción y operación, a pesar de esto el distrito consiguió nuevas fuentes de financiación, desde otro punto de vista los costos operativos de TransMilenio son cubiertos con la tarifa⁴⁶.

1.4. SISTEMAS BRT

La *Transport Research Board* - TRB⁴⁷ establece que los sistemas BRT - *Bus of Rapid Transit* - son un modo de transporte rápido que provee la calidad de un tren ligero y la flexibilidad de los buses, combinando estaciones, vehículos, servicios y corredores en un sistema integrado. El *Institute for Transportation & Development and Policy* - ITDP⁴⁸ complementa este concepto indicando que logra altas capacidades, velocidades y calidades de servicio a un costo relativamente bajo, e incluye, en su operación sistemas de pago fuera de la estación, abordaje en plataformas a nivel, prioridad en intersecciones, entre otros. A continuación, se describen algunas de las características más importantes de los sistemas BRT.

⁴⁵ INSTITUTE FOR DEVELOPMENT STUDIES. Sustainable Transport in Colombia: Bogota and the Transmilenio. 2012. p. 2. 4 p.

⁴⁶ CENTRE FOR EUROPEAN POLICY STUDIES. Bogota's Sustainable mass urban transport system. 2015. p. 1,2. 4 p.

⁴⁷ TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. TCRP Report 90 - Bus Rapid Transit Volume 2: Implementation Guidelines. Washington D.C. 2003. p. S-1.

⁴⁸ INSTITUTE FOR TRANSPORTATION & DEVELOPMENT POLICY. The BRT Standard. 2016. p. 4.

1.4.1. Corredores – vías. El ITDP⁴⁹ indica que se trata de uno o varios tramos de vía en los que se suelen encontrar carriles exclusivos, y sobre los cuales operan una o varias rutas de buses, y establece que en el caso de los *corredores* deben poseer una longitud de al menos 3 Km. La TRB⁵⁰ resalta que deben permitir desplazamientos rápidos y seguros con la menor interferencia del tráfico mixto. La *Federal Transit Administration – FTA*⁵¹ complementa lo anterior, definiendo los *tipos de carriles* sobre los cuales operan los vehículos; Sobre la Calle (On-Street) y Por fuera de la calle (Off-Street), el primero hace uso del espacio público y generalmente es abierto a todo el tráfico (vehicular, peatonal y bicicletas), el segundo hace uso de vías rápidas en las cuales el tráfico es restringido (vehicular) y resalta, que deben emplearse *elementos de señalización*, con el fin de delimitarlos o indicar la prioridad para los vehículos del sistema.

1.4.2. Estaciones. Según la FTA⁵² se trata del punto de entrada al sistema y el más importante desde el punto de vista del usuario, incidiendo la accesibilidad, confort, seguridad, confiabilidad, percepción y demoras del sistema, algunas de las características a consideradas en su diseño están relacionadas con *servicios ofrecidos a los usuarios*; elementos de información, bancas, baños, *diseño de la plataforma*; longitud, número de buses que pueden atender al mismo tiempo y ubicación de los pelotones de espera, *capacidad de adelantamiento*; presencia de carriles de adelantamiento e incorporación, e *intermodalidad*; conexión con otros sistemas de transporte. Así mismo la TRB⁵³ establece que deben contar con protección del clima, garantizar accesibilidad a pasajeros con movilidad reducida, y que su diseño arquitectónico debe acoplarse al contexto urbano circundante.

1.4.3. Vehículos. El ITDP⁵⁴ indica que la tipología de vehículo tiene un alto impacto en desempeño del sistema, por lo que afecta la velocidad, capacidad, accesibilidad y sostenibilidad de este, así como el confort de los usuarios. En la tabla 1 se encuentran las medidas convencionales de los buses empleados en sistemas BRT.

La FTA⁵⁵ menciona que las características evaluadas en la selección de los vehículos están asociadas a la configuración interna, relacionada con la capacidad y distribución del equipamiento y, los sistemas de propulsión que determinan las

⁴⁹ *Ibíd.*, p. 5.

⁵⁰ TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. *Op. cit.*, p. S-2.

⁵¹ FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION. *Characteristics of BUS RAPID TRANSIT for Decision-Making*. Florida. Febrero, 2009. p. 2-3, 2-8.

⁵² *Ibíd.*, p. 2-1.

⁵³ TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. *Op. cit.*, p. S-9.

⁵⁴ INSTITUTE FOR TRANSPORTATION & DEVELOPMENT POLICY. *The BRT Planning Guide*. 2017. p. 634.

⁵⁵ FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION. *Op. cit.*, p. 2-42.

tasas de aceleración, velocidades máximas, niveles de ruido, consumos de combustible, entre otros.

Tabla 1. Características físicas de buses en sistemas BRT

Tipo de vehículo	Longitud (m)	Capacidad (pas/veh)
Estándar	12	60 - 80
Articulado	18,5	120 - 170
Bi-articulado	24	240 - 270

Fuente: adaptado de Guía de Planificación de Sistemas BRT – Autobuses de Transito Rápido. 2010. p. 277.

1.4.4. Sistema de recolección de tarifas. La FTA⁵⁶ establece que el sistema de recolección de tarifas debe permitir un ingreso rápido al sistema, prefiriendo que sea por fuera de la plataforma (Off board) y de manera electrónica. Con base en esto, el ITDP⁵⁷ establece que su diseño debe estar enfocado en grandes volúmenes de pasajeros y advierte que sistemas inapropiados resultan en la insatisfacción por parte de estos así como en la formación de grandes colas de espera, mientras que sistemas apropiados, y sencillos de usar, mejoran la imagen del sistema y atraen usuarios.

1.4.5. Sistemas inteligentes de transporte. Tal como lo menciona la FTA⁵⁸, los sistemas inteligentes de transporte repercuten en la seguridad, calidad del servicio y eficiencia del sistema de transporte, mediante el análisis de información en tiempo real, asociada a los vehículos y a la red, y que proveer esta información a los usuarios, resulta en una afectación positiva de su conveniencia. Algunos de estos están asociados a la seguridad y protección, priorización de vehículos de transporte público, vehículos inteligentes.

1.5. EL SISTEMA BRT EN BOGOTÁ – MARCO TRANSMILENIO

Se entiende por transporte masivo de pasajeros la combinación organizada de infraestructura y equipos, en un sistema que cubre un alto volumen de pasajeros y da respuesta a un porcentaje significativo de las necesidades de movilización urbana⁵⁹. En donde los principales objetivos son⁶⁰: Eliminar la “guerra del centavo”;

⁵⁶ *Ibíd.*, p. 2-61.

⁵⁷ INSTITUTE FOR TRANSPORTATION & DEVELOPMENT POLICY. *Op. cit.*, p. 601 – 602.

⁵⁸ FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION. *Op. cit.*, p. 2-80.

⁵⁹ MINISTERIO DE TRANSPORTE. CONPES 3260, Política Nacional de Transporte Urbano y Masivo. Bogotá, 2003. p. 10.

⁶⁰ *Ibíd.*, p. 10.

integrar física, tarifaria y operacionalmente la mayor parte de las rutas de la ciudad; aumentar la velocidad promedio de los corredores troncales; eliminar la sobreoferta; Impulsar desarrollo urbano; entre otras.

El objetivo del transporte público es garantizar la movilidad de las personas a cualquier punto de la ciudad, cumpliendo con la comodidad, rapidez, seguridad y costos⁶¹, desempeña un papel fundamental en la sociedad, ya que contribuye con la movilidad sostenible en las ciudades. El desarrollo en los modos de transporte aporta grandes ventajas sociales, entre ellos menor congestión, menor contaminación, ahorro de costos, disminución de riesgos de accidentes, entre otros. El vehículo, la infraestructura, las redes y rutas de transporte son los componentes básicos del transporte público, ya que son los vehículos la unidad básica usada para el transporte de los pasajeros; dentro de la infraestructura de mayor importancia se destacan: paraderos, paraderos en vía pública, bahías, estaciones de transferencia, estaciones y la infraestructura vial⁶².

Actualmente la ciudad de Bogotá cuenta con el Sistema Integrado de Transporte Masivo de Buses, TransMilenio, el cual está organizado por un conjunto de corredores de carácter exclusivo para este, es importante destacar la presencia de rutas alimentadoras. Según evaluaciones económicas, la sociedad se ha visto muy beneficiada por la puesta en marcha de este sistema, dado al ahorro en tiempos de viaje y reducción de costos⁶³. Con el fin de dar orden al tránsito del sistema y una mayor velocidad, se construyeron las estaciones para facilitar el acceso, de una manera rápida y cómoda de los pasajeros. En la actualidad el Sistema TransMilenio cuenta con 138 estaciones clasificadas como estaciones sencillas e intermedias y 9 portales o estaciones de cabecera⁶⁴.

Otros impactos que se destacan en el Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte⁶⁵, muestra una reducción de 67% en accidentalidad, con la consecuente reducción en lesiones y muertes en accidentes de tránsito en los corredores del sistema, y la disminución hasta de 40% en partículas contaminantes emitidas. TransMilenio inició su operación en Bogotá el 18 de diciembre de 2000 y poco a poco ha aumentado sus rutas, mostrando grandes

⁶¹ ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte. Bogotá, 2005. p. 94.

⁶² *Ibíd.*, p. 94.

⁶³ *Ibíd.*, p. 183.

⁶⁴ TRANSMILENIO S.A. Infraestructura [En línea] Citado el 10 de marzo de 2018. Disponible en < http://www.transmilenio.gov.co/Publicaciones/nuestro_sistema/Componentes/Infraestructura >

⁶⁵ ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. Op. cit., p. 183.

beneficios tanto ambientales como sociales, y convirtiéndose en la posible solución de transporte urbano para otras ciudades del país⁶⁶.

Es importante en los sistemas masivos la utilización de una infraestructura especial, destinada de manera específica al funcionamiento del mismo y la implementación de corredores troncales especializados, dotados en su mayoría de carriles de uso exclusivo para la circulación de los vehículos de transporte público masivo, cumpliendo con especificaciones técnicas particulares, que se integran con las rutas alimentadoras, que contribuyen con la incrementación del cubrimiento del sistema⁶⁷; El sistema TransMilenio está dotado con estaciones, puentes y plazoletas de acceso peatonal especial y específicamente diseñados para facilitar a los usuarios el acceso al sistema.

El documento CONPES 3260⁶⁸, Política Nacional de Transporte Urbano y Masivo, presenta un impulso para la implementación de sistemas integrados de transporte masivo – SITM – en las grandes ciudades del país y así fortalecer la capacidad institucional para la planeación y gestión del tráfico y transporte en las demás ciudades, con el propósito de incrementar su calidad de vida y productividad, e impulsar procesos integrales de desarrollo urbano.

Otros beneficios del Sistema de Transporte Masivo TransMilenio, son: recuperación del espacio público, ordenamiento de la estructura institucional en torno al transporte, promoción y consolidación del desarrollo urbano, mejoramiento de la calidad y periodicidad de obtención de la información relacionada con la movilidad⁶⁹.

1.6. DISEÑO DE ESTACIONES

En el presente numeral se encuentran los conceptos fundamentales del diseño de estaciones de sistemas de transporte, en donde se presentan las clasificaciones de estaciones, la definición de los elementos de circulación peatonal típicos, así como los pasos de diseño de las metodologías y técnicas: *Transit Capacity and Quality of Service Manual 2013 – TCQSM 2013*, *The Bus of Rapid Transit Planning Guide 2017 – BRTPG 2017*, *Light Rail Transit Design Guidelines 2017 – LRTDG 2017* y *Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail System 2017 – NFPA130 2017*.

⁶⁶ *Ibíd.*, p. 183.

⁶⁷ *Ibíd.* p., 184.

⁶⁸ MINISTERIO DE TRANSPORTE. Op. cit., p. 2.

⁶⁹ *Ibíd.* p., 10.

1.6.1. ¿Qué es una estación? Edmonton⁷⁰ define las estaciones como una instalación conformada principalmente por una plataforma en donde el vehículo se detiene para recoger y/o dejar pasajeros, incluye sistemas de recolección de tarifas e información de rutas, y presenta elementos de circulación peatonal así como servicios para los usuarios.

1.6.2. Tipos de estaciones. Según la disponibilidad, dimensiones y ubicación de las infraestructuras, a continuación, se encuentran diferentes clasificaciones de sistemas BRT y LRT, considerando las metodologías mencionadas previamente.

1.6.2.1. Tipos de estaciones según su capacidad. En esta clasificación, las estaciones de sistemas BRT son divididas según la capacidad global, considerando la disponibilidad de carriles de adelantamiento y sub-paradas. En la tabla 2 se muestra la clasificación de estaciones según su capacidad, realizada por el ITDP⁷¹.

Tabla 2. Clasificación de estaciones según su capacidad

Clasificación, según Capacidad	Carriles de Adelantamiento	Sub-Paradas
Alta	Si	Si
Media	No	Si
Baja	No	No

Fuente: adaptado de The BRT Planning Guide. 2017. p. 820 - 821.

1.6.2.2. Tipos de estación según su ubicación. Según la ubicación de la estación en la sección transversal del corredor o vía, el ITDP⁷² define tres tipos de estaciones para sistemas BRT: *estaciones isla* conformadas por una plataforma central caracterizadas por atender tráfico en dos direcciones, *estaciones divididas* conformadas por dos plataformas paralelas separadas por carriles exclusivos del sistema y *estaciones compensadas* conformadas por una plataforma central de gran longitud.

1.6.2.3. Tipos de estaciones según su función. Según los niveles de demanda, dimensiones de la instalación y ubicación a lo largo de los corredores se establece la siguiente clasificación:

⁷⁰ CITY OF EDMONTON. LRT Design Guidelines. Edmonton, 2017. p. 10.2

⁷¹ INSTITUTE FOR TRANSPORTATION & DEVELOPMENT POLICY. Op. cit., p. 820 – 821.

⁷² *Ibid.*, p. 830 – 834.

Paradas de Bus. El TCQSM⁷³ indica que las paradas de bus consisten en áreas de espera integradas en el espacio público, situadas sobre o fuera de la calle, con elementos de señalización, y servicios como bancas, cubiertas, información de rutas (ej. Paraderos de Alimentadores en el sistema TransMilenio en Bogotá). El dimensionamiento del área de espera es el factor más importante en su diseño, con el fin de evitar que los pelotones no afecten el movimiento peatonal adyacente a esta.

Terminales. El TCQSM⁷⁴ establece que se trata de instalaciones que generalmente sitúan por fuera de calle, en donde se prestan servicios como información de rutas, zonas de abordaje, servicios para personas con movilidad reducida, bancas, cubiertas, ciclo-parqueaderos, venta de tiquetes, entre otros*. También se dispone de elementos y/o personal de vigilancia y algunos servicios asociados a la operación como salas de descanso para conductores, parqueaderos para empleados. El dimensionamiento del área de espera para cada parada y de zonas de circulación, debe permitir que los pasajeros se muevan rápido entre paradas, a lo largo de la instalación y entre puertas de acceso/egreso. Otros factores a considerar son; el número de zonas de embarque/desembarque, longitud de plataformas, ubicación de cruces peatonales, radios de giro de los vehículos del sistema.

Estaciones BRT. Situadas sobre los corredores o carriles exclusivos de buses, *sobre o fuera de calle*, según el TCQSM⁷⁵ su longitud está asociada al número de rutas que atienda, su frecuencia, demanda de pasajeros y longitud de los buses, con longitudes típicas de 12, 30 o 120 m, a pesar de su extensión, presenta servicios básicos como; protección contra el clima, venta de tiquetes, información de rutas, elementos y/o personal de seguridad. Suelen contar con elementos de circulación vertical*, plataformas a nivel para el abordaje y sistemas de recolección de tarifas, en estaciones BRT se emplea el sistema *pago fuera del vehículo* por lo que cuenta con torniquetes y la plataforma se considera como zona pagada por la tarifa. Pueden disponer de un solo carril a lo largo de la estación, o contar con carriles de adelantamiento.

⁷³ TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Transit Capacity and Quality of Service Manual, Op. cit., p. 10-5

⁷⁴ *Ibíd.*, p. 10-6.

* Los servicios son similares a los encontrados en una Parada de Bus, solo que estos son de mayor magnitud y elaboración que los encontrados en esta. Ej. En zonas de espera en una Parada de Bus se suelen encontrar cobertizos o ninguna protección contra el clima, en las Terminales las zonas de espera se encuentran total o parcialmente cubiertas, además de ser de mayor superficie.

⁷⁵ *Ibíd.*, p. 10-8.

* Escaleras, rampas, puentes de acceso

Estaciones LRT. Situadas sobre los corredores férreos, *sobre o fuera de calle*, o en un centro de tránsito, según el TCQSM⁷⁶, este tipo de estaciones tiene una longitud típica de 55 m a 120 m, puede presentar plataformas a nivel o intermedias, Al igual que las estaciones BRT cuenta con servicios como protección contra el clima, información de rutas, maquinas vendedoras de tiquetes, entre otros. El sistema de recolección de tarifas en este tipo de estaciones está basado en el *sistema de prueba de pago*, por lo que no cuenta con elementos como torniquetes y generalmente, la plataforma es considerada como la única zona pagada por la tarifa.

1.6.3. Capacidad de Diseño. Según el TCQSM⁷⁷ los factores que inciden en la determinación de la capacidad de diseño son; flujo peatonal pico bajo condiciones típicas, demanda adicional o atraída y eventos extraordinarios (como eventos especiales, evacuaciones, etc). Es importante recalcar que este último puede condicionar el diseño parcial o total de la estación, para lo cual la NFPA⁷⁸ ha establecido criterios relacionados con la ocurrencia de estos eventos.

Según las condiciones de diseño y el elemento analizado, se han establecido diferentes niveles de servicio deseables para la determinación de la capacidad de diseño, en vez de diseñar los elementos con su máxima capacidad a costa de un nivel de servicio menos deseable. Con esto, el ITDP⁷⁹ establece que la capacidad de una estación se divide en Local y Global, bajo las cuales no hay formación de colas, la primera asociada al máximo número de pasajeros que pueden ingresar al sistema a través de la estación, en una hora, y la segunda asociada al máximo número de pasajeros que pueden salir o arribar a la estación desde un vehículo del sistema, en una hora.

1.6.4. Elementos de circulación peatonal. El TCQSM⁸⁰ establece que las características de las infraestructuras peatonales dependen directamente de las tipologías de los usuarios que harán uso de estas, las características temporales y espaciales de los flujos. KONE⁸¹ complementa lo anterior, haciendo énfasis en el flujo peatonal dentro de una estación, el cual se ve afectado por la distribución y ubicación de las infraestructuras, la forma en la que los usuarios establecen su recorrido, y el tipo de instalaciones en el área circundante.

⁷⁶ *Ibíd.*, p. 10-7.

⁷⁷ *Ibíd.*, p. 10-2 – 10-3.

⁷⁸ NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. NFPA 130 – Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail System. 2017.

⁷⁹ INSTITUTE FOR TRANSPORTATION & DEVELOPMENT POLICY. *Op. cit.*, p. 820.

⁸⁰ TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. *Op. cit.*, p. 10-20 – 10-30.

⁸¹ KONE. Planning Guide for People Flow™ in transit stations. p. 11.

Según el TCQSM⁸² los elementos de circulación peatonal dentro de una estación se dividen en *verticales* (escaleras, escaleras eléctricas, elevadores), *horizontales* (pasillos, áreas de circulación peatonal, cintas transportadoras) y *plataformas*, y son aquellos que permiten el desplazamiento dentro de una estación, a continuación se describen las características de las plataformas.

1.6.4.1. Elementos de circulación horizontal. El TCQSM⁸³ indica que están constituidos principalmente por pasarelas peatonales, y que su capacidad está regulada por la velocidad de caminata, densidad peatonal, tipología de peatones y ancho efectivo en la sección más estrecha, a continuación, se encuentran estos elementos de circulación peatonal;

Pasillos/Pasarelas: destinadas para la circulación de peatones entre elementos de la estación. Para su diseño se consideran los factores mencionados previamente.

Áreas de circulación peatonal de múltiples actividades: típicas en Terminales, en estas se llevan a cabo actividades como; desplazamientos, colas para compra de tiquetes, peatones detenidos, comercio, entre otros. Para su diseño se emplean micro-simulaciones.

Cinta transportadora: empleadas cuando un elevado flujo peatonal recorre distancias entre 30 y 300 metros, así como para la conexión de puntos distantes en plataformas. Para su diseño se deben considerar los flujos peatonales en cada dirección, ancho de la banda y de las pasarelas adyacentes y, costos de operación y mantenimiento.

1.6.4.2. Elementos de circulación vertical. El TCQSM⁸⁴ establece que son empleados para permitir la circulación peatonal entre diferentes niveles y, para la conexión entre la plataforma con el resto de la estación, a continuación se describen estos elementos de circulación:

Escaleras: principales elementos de movimiento vertical, la capacidad se ve afectada por su ancho. Los flujos peatonales convergen en la formación de carriles de circulación, por lo que el ancho repercutirá en el número de carriles. Los flujos peatonales en dirección opuesta reducen la capacidad del elemento. La formación de colas está asociada a la convergencia del tramo final de la escalera, en espacios reducidos, condición que puede afectar la operación de otros elementos peatonales.

⁸² TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Op. cit., p. 10-13 - 10-30.

⁸³ *Ibíd.*, p. 10-20, 10-24.

⁸⁴ *Ibíd.*, p. 10-24, 10-28.

Escaleras eléctricas: cumplen la misma función que las escales convencionales con la característica de ser unidireccionales, suelen situarse a la par con estas. Su capacidad depende del ancho de entrada y la velocidad de operación. El ángulo típico de inclinación es de 30° y su velocidad de operación es de 27.4 m/min. Dadas las condiciones de operación, no es posible la formación de colas, por lo que se debe disponer de una superficie libre* al final de esta.

Rampas: empleadas para la circulación de personas con movilidad reducida, y peatones con paquetes.

Elevadores: empleados típicamente para el desplazamiento de peatones con movilidad reducida entre niveles de la estación o para superar pequeños desniveles en donde no es posible instalar rampas.

1.6.4.3. Plataformas. Según Edmonton⁸⁵, la plataforma es el elemento principal de una estación. El TCQSM⁸⁶ complementa lo anterior indicando que se trata de zonas de espera, de formación de colas, y de circulación para pasajeros que ingresan/egresan de los vehículos del sistema, y que el *área efectiva* requerida está asociada al nivel de servicio mínimo que lo permite. Así mismo establece que las plataformas presentan una capacidad crítica de almacenamiento, por lo que si es excedida los usuarios pueden caer sobre las líneas de circulación de los vehículos del sistema, o resultar heridos, producto del apretujamiento, y que al igual que las áreas de circulación peatonal de múltiples actividades, las plataformas no presentan un uso uniforme, por lo que se experimenta mayor congestión en áreas específicas, como el área adyacente a las puertas de abordaje, por lo que la ubicación y dirección de elementos de circulación horizontal y vertical tienen un efecto directo en su operación.

1.6.5. Metodología Transit Capacity and Quality of Service Manual 2013 – TCQSM 2013. A continuación, se describen los conceptos y procedimientos más relevantes del TCQSM 2013⁸⁷, en cuanto al diseño de estaciones para diferentes sistemas de transporte.

1.6.5.1. Elementos de acceso/egreso a la estación. Los criterios establecidos para el diseño y análisis de las puertas de acceso a la estación son los siguientes: el Nivel de Servicio corresponde al mismo empleado en el cálculo del ancho efectivo

* Esta área debe contar con un mayor ancho que el de la escalera, en donde no se formen colas o converjan flujos peatonales de otras escales y/o elementos.

⁸⁵ CITY OF EDMONTON. Op. cit., p. 10.15

⁸⁶ TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Op. cit., p. 10-29.

⁸⁷ *Ibíd.*, p. 10-38 – 10-58.

del pasillo (C o superior) con el fin de mantener un flujo y/o velocidad peatonal estable a lo largo de todo el sistema, la capacidad de las puertas está influenciado por su ancho, además de la facilidad con que se abre en caso de permanecer cerrada⁸⁸. El procedimiento para el cálculo del número de puertas es el siguiente:

- Seleccionar el periodo de análisis, t_o (min), y estimar la demanda peatonal, Q_d durante el periodo de análisis seleccionado.
- Seleccionar el Nivel de Servicio deseado, LOS_d y su equivalente en el máximo flujo peatonal, Pf_M (p/m/min).
- Cálculo del flujo peatonal de diseño, $Pf_d = Q_d/t_o$ (p/min).
- Cálculo del ancho requerido de la puerta $W_D = Pf_d/Pf_M$ (m).
- Cálculo del número de puertas requerido $N_D = W_A/W_D$ (m), considerando el ancho de entrada total requerido y/o disponible W_A (m). Este valor debe ser redondeado por exceso.

El procedimiento para el cálculo de la capacidad de las puertas es el siguiente:

- Determinar el número de peatones que cruzan a través de la puerta durante 1 minuto (con base en observaciones de campo a puertas de características similares o empleando un volumen de 40 p/min para puertas de dos hojas o, 25 p/min para puertas giratorias), Pf_c (p/min).
- Calcular el flujo máximo de entrada $Pf_d = Pf_c * N_D$ (p/min).
- Cálculo de la capacidad peatonal, $P_C = Pf_d * 60$ (p/h).

1.6.5.2. Equipamiento de recolección de tarifas. El equipamiento empleado está conformado por maquinas vendedoras de tiquetes - *MVT*, validadores de Tiquetes – *VT* y torniquetes. El número de *MVT* debe proveer la suficiente capacidad para satisfacer la demanda estimada, mas no prevenir la no formación de colas debido a

⁸⁸ *Ibíd.*, p. 10-39 – 10-41.

la variación en el patrón de llegadas de los pasajeros y en los tiempos de transacción, el cálculo de MVT se realiza con la siguiente ecuación⁸⁹:

$$N_{MVT} = \frac{P_{arr} * p_t}{\frac{3600}{t_t}}$$

En dónde; N_{MVT} = número de MVT requerido, P_{arr} = número de pasajeros que llegan a la estación o entrada en la hora pico (p/h), p_t = proporción de pasajeros que compran tiquetes y t_t = tiempo promedio de transacción (s/p).

No se presenta un método para la determinación del número de VT, por el contrario, se plantean recomendaciones en cuanto a su ubicación; cuando se requiere validar el tiquete antes de ingresar al vehículo deben ser ubicados en las plataformas, procurando que también estén disponibles en el interior del vehículo, en cualquier caso, la cantidad y ubicación de VT no debe interferir con la selección de rutas de los pasajeros dentro de la instalación o producir amontonamientos en sus inmediaciones⁹⁰.

El cálculo del número de torniquetes está asociado a: la capacidad bidireccional del elemento, proveer suficiente capacidad en periodos picos bajo condiciones especiales (ej. eventos públicos), características del peatón y la presencia permanente un torniquete activo, el procedimiento para el cálculo del número de torniquetes es el siguiente⁹¹.

- Seleccionar el periodo de análisis, t_o (min), y estimar la demanda peatonal, Q_d durante el periodo de análisis seleccionado.
- Cálculo del flujo peatonal de diseño, $Pf_d = Q_d/t_o$ (p/min).
- Determinar el número de peatones que cruzan a través del torniquete durante 1 min, basado en observaciones de campo (a torniquetes en condiciones similares) o seleccionar el tipo de torniquete y el flujo correspondiente (anexo A). Pf_{FG} (p/min)

⁸⁹ *Ibíd.*, p. 10-41.

⁹⁰ *Ibíd.*, p. 10-42.

⁹¹ *Ibíd.*, p. 10-43.

- Cálculo del número de torniquetes requerido $N_{FG} = P_{fd}/P_{fFG} + 1$ (Torniquete previsto para el flujo en dirección opuesta)

1.6.5.3. Elementos de circulación horizontal. Los criterios establecidos para el diseño y análisis de pasillos son los siguientes: bajo condiciones pico el Nivel de Servicio deseable corresponde a C o superior, así mismo establece que la máxima capacidad de las pasarelas se da cuando se encuentran en el Nivel de Servicio E⁹². El procedimiento para el cálculo del ancho del pasillo es el siguiente:

- Seleccionar el periodo de análisis, t_o (min), y estimar la demanda peatonal, Q_d durante el periodo de análisis seleccionado.
- Seleccionar el Nivel de Servicio deseado, LOS_d y su equivalente en el máximo flujo peatonal, P_{fM} (p/m/min).
- Cálculo del flujo peatonal de diseño, $P_{fd} = Q_d/t_o$ (p/min).
- Cálculo del ancho efectivo, $W_E = P_{fd}/P_{fM}$ (m).
- Cálculo del ancho total de pasarela, $W_T = W_E + 2*[(0.6 \text{ m a } 1.0 \text{ m}) + (0.3 \text{ m} + 0.5 \text{ m})]$ (m), el primer intervalo corresponde a un valor estándar, mientras que a una distancia de amortiguamiento con respecto al borde del pasillo.

El procedimiento para el cálculo de la capacidad de los pasillos es el siguiente:

- Cálculo del ancho efectivo, $W_E = W_T - \text{distancias de separación}$ (m).
- Cálculo de flujo peatonal de diseño, $P_{fd} = W_E * 82 \text{ p/m/min}$ (flujo en el LOS E) (p/min).
- Cálculo de la capacidad peatonal, $P_C = P_{fd} * 60$ (p/h).

1.6.5.4. Elementos de circulación vertical. Las condiciones establecidas para el análisis y diseño de escaleras convencionales son las siguientes: bajo condiciones pico el Nivel de Servicio deseable corresponde a C, D o superior, la capacidad se da en el Nivel de Servicio E. Algunas consideraciones para el diseño de escaleras

⁹² Ibíd., p. 10-43 – 10-46.

convenciones están asociadas a la *ubicación de otros elementos*; debe haber una superficie libre que permita la formación de colas, cuando una escalera conecte a un pasillo del mismo ancho, tendrá una capacidad inferior a este por lo que será el factor que controle el diseño de la escalera y, *dimensionamiento de escalones*; altura menor a 18 cm⁹³. El procedimiento para el cálculo del ancho de escaleras es el siguiente:

- Seleccionar el periodo de análisis, t_o (min), y estimar la demanda peatonal en la dirección más cargada Q_d durante el periodo de análisis seleccionado.
- Seleccionar el Nivel de Servicio deseado, LOS_d y su equivalente en el máximo flujo peatonal, Pf_M (p/m/min).
- Cálculo del flujo peatonal de diseño, $Pf_d = Q_d/t_o$ (p/min).
- Cálculo del ancho, $W_T = Pf_d/Pf_M$ (m), cuando se presenten bajos flujos peatonales con frecuencia, en dirección opuesta, aumentar el ancho de la escalera, W_T , como mínimo en 0.75 m (equivalente a un carril).

El procedimiento para el cálculo de la capacidad de las escaleras es el siguiente:

- Cálculo de flujo peatonal de diseño, $Pf_d = W_T * 56$ p/m/min (flujo en el LOS E) (p/min).
- Cálculo del flujo peatonal de diseño ajustado, $Pf_{da} = Pf_d * (0.8 - 1.0)$ (p/min), la magnitud del valor será tomado en función de la presencia de flujos peatonales en ambas direcciones, valores de uno o cercanos serán aplicados cuando el flujo sea netamente unidireccional.
- Cálculo de la capacidad peatonal, $P_C = Pf_{da} * 60$ (p/h).

El procedimiento para el cálculo de la superficie de colas es el siguiente:

- Estimar la máxima demanda peatonal, Q_M (p/h) que se encuentre próxima a acceder a la escalera en un momento dado.

⁹³ *Ibíd.*, p. 10-48 – 10-51.

- Cálculo del número de peatones que exceden la capacidad, $Q_E = Q_M - P_C$ (p/h).
- Cálculo de la superficie de colas, $A_q = Q_E * 0.5m^2/p$ (m^2).

1.6.5.5. Plataforma. El procedimiento para el cálculo del ancho de la plataforma es el siguiente:

- Seleccionar el periodo de análisis, t_o (min), estimar las demandas peatonales, Q_d de la zona de espera y del elemento de circulación durante el periodo de análisis seleccionado.
- Seleccionar el Nivel de Servicio deseado, LOS_d y su equivalente en espacio peatonal, P_s (m^2/p) y ajustarlo según la tipología de los pasajeros (presencia de paquetes, coches de bebe, etc)
- Cálculo del espacio de la zona de espera requerida, considerando la demanda peatonal de la zona de espera, $W_{aiS} = Q_d * P_s$ (m^2)
- Cálculo del ancho de la pasarela requerido, considerando la demanda peatonal del elemento de circulación, W_E , necesario para los peatones que circulan sobre la plataforma, de manera similar a lo expuesto en *Cálculo de ancho efectivo de pasarela* (solo se debe calcular el ancho efectivo del elemento de circulación, como recomendación el nivel de servicio deseado debe ser el mismo)
- Calcular el espacio de colas, Q_s (m^2) para los puntos de acceso/egreso de la plataforma (ej. Escaleras, Ascensores). Si es necesario.
- Determinar la longitud de la plataforma, L_P (m) considerando factores como la longitud del bus, arquitectónicos, entre otros, mencionados en el numeral 2.2 ESTACIONES. 4.4.3 Estaciones BRT y 4.5.1 Plataformas).
- Estimar el área de la plataforma que no serán utilizada, correspondientes a zonas muertas, áreas de elementos no caminables, franja de seguridad o amortiguamiento (ancho recomendado de 0.45 m o 0.50 m, multiplicado por L_P), D_s (m^2).
- Calcular el área mínima necesaria de la plataforma, $P_{TA} = W_{aiS} + W_{aiS} + Q_s + D_s$

- Calcular el ancho mínimo de la plataforma, $W_P = P_{TA} / L_P + W_E$

1.6.6. Metodología Light Rail Transit Design Guidelines 2017 – LRTDG 2017. Edmonton⁹⁴ clasifica las estaciones según el *tipo de instalación* (cerrada, parcialmente cerrada o abierta) y su *ubicación* (subterránea, elevada o a nivel). A continuación, se describen los conceptos y procedimientos más relevantes expuestos por City of Edmonton – CoE, en cuanto al diseño de estaciones para sistemas de trenes ligeros.

1.6.6.1. Principios de diseño. Las estaciones deben ser diseñadas desde un punto de vista global en donde se consideren factores como el efecto en los flujos peatonales y vehiculares, expansiones y vida útil de la estación (100 años para Subterráneas y 75 años para Centros de Tránsito y Estaciones a nivel)⁹⁵. Los principios de diseño propuestos están asociados a; *Intermodalidad y Accesibilidad*, la configuración interna, externa y las infraestructuras peatonales deben permitir un desplazamiento seguro desde y hacia otros modos de transporte, *Sistema de recolección de tarifas*, diseñadas con base en las características de la estación (considerando que se emplea un sistema de prueba de pago de tarifas y que los LRT no son diseñados para el uso de sistemas cerrados de tarifa como sucede con los BRT⁹⁶), *Seguridad y protección de los pasajeros*, mediante elementos y/o personal de seguridad, y la adecuación de las zonas aledañas y *Arquitectura*, un diseño sencillo, económico y funcional, propio del entorno, con materiales durables, además de brindar protección ante el clima y el tráfico vehicular, la iluminación debe ser constante y uniforme, resaltando zonas peligrosas, elementos de circulación peatonal y vehicular.

1.6.6.2. Elementos de acceso/egreso a la estación. Los criterios establecidos para el diseño de las puertas de acceso a la estación son los siguientes: todas las estaciones deben disponer de al menos dos puntos de acceso y se deben disponer de tal manera que se evite la formación de colas. Para personas con movilidad reducida se debe disponer de al menos una entrada libre de barreras en cada estación, en plataformas se debe disponer de rampas en: estaciones a nivel y centros de tránsito, y elevadores en: centros de tránsito y estaciones subterráneas.

1.6.6.3. Equipamiento de recolección de tarifas. El equipamiento empleado está conformado por Maquinas vendedoras de tiquetes - *MVT* y Validadores de Tiquetes - *VT*. En estaciones subterráneas y Centros de Tránsito, la plataforma es

⁹⁴ CITY OF EDMONTON. Op. cit., p. 10.2

⁹⁵ *Ibíd.*, p. 10.4.

⁹⁶ SANTA CLARA VALLEY TRANSPORTATION AUTHORITY VTA Transit. LIGHT RAIL TRANSIT SERVICE GUIDELINES. Sustainability Policy 1-32, San Jose, 2007. p. 28.

considerada como área pagada por la tarifa por lo que los sistemas de recolección de tarifas se sitúan en las áreas adyacentes a los puntos de acceso de estas (Vestíbulos) con un mínimo de dos *MVT* y dos *VT*. En estaciones a nivel se suelen situar en el área central de la plataforma, de manera agrupada, formando así un área de recolección de tarifas ⁹⁷.

1.6.6.4. Elementos de circulación horizontal. Los criterios y parámetros para el diseño de pasillos están asociados a longitudes mínimas y están condicionadas por la arquitectura, a pesar de esto deben ser validadas bajo condiciones de evacuación, en pasillos de uso no público tendrán un ancho mínimo de 0.9 m y en los de uso público tendrán un ancho mínimo de 4 m⁹⁸.

1.6.6.5. Elementos de circulación vertical. A continuación, se presentan los criterios y parámetros de diseño para los elementos de circulación vertical.

Rampas⁹⁹: con una inclinación máxima de 1:16. Con zonas de descanso de al menos 1.20 m por cada 9 m de longitud. Debe disponer de pretilas en ambos costados. El ancho efectivo mínimo debe ser de 1.5 m.

Escaleras¹⁰⁰. CoE considera tres criterios estructurales; no debe haber espacios vacíos entre escalones, deben contar con pretilas continuas en ambos costados y, cuando este adyacente a una escalera eléctrica deben ser paralelas y presentar la misma inclinación. Así mismo indica que las dimensiones típicas de un escalón son 16.5 cm x 30.5 cm. No se realiza el cálculo del ancho de la escalera de manera directa, si no que se realiza una validación del número de escaleras bajo condiciones de emergencia, bajo el concepto de que una Unidad de Salida es equivalente a 550 mm y cada 1.1 m de ancho de escalera permite un flujo de salida de 65 p/min. El procedimiento para el cálculo del número de escaleras es el siguiente*:

- Estimar el número de pasajeros a evacuar de la plataforma, N_{PE} (p) así como el tiempo para esto t_0 (min).

⁹⁷ CITY OF EDMONTON. Op. cit., p. 10.19.

⁹⁸ *Ibíd.*, p. 10.15.

⁹⁹ *Ibíd.*, p. 10.11.

¹⁰⁰ *Ibíd.*, p. 10.12.

* El cálculo del número de escaleras puede ser complementado con el cálculo del número de escaleras eléctricas y viceversa, con el fin de optimizar el número de estos elementos.

- Estimar el total de escaleras, N_{Es} .
- Calcular el número de pasajeros evacuados estimados, $N_{Pee} = N_{Es} * 65 \text{ p/min} * t_0$ (p)
- Verificar que $N_{Pee} > N_{PE}$, si esta relación no se cumple aumentar el número de escaleras.

Escaleras eléctricas¹⁰¹: en estaciones *subterráneas* debe haber mínimo dos entre la plataforma y el nivel del vestíbulo, y al menos una entre este y el nivel de calle. En estaciones a nivel no son requeridas. En Centros de Transito, se requiere de al menos una, cuando la plataforma se encuentra separada del acceso peatonal de la estación. Al igual que en las escaleras, se realiza una validación del número de escaleras eléctricas bajo el concepto de que una Unidad de Salida es equivalente a 550 mm y cada 1.22 m de ancho de escalera eléctrica permite un flujo de salida de 100 p/min. El procedimiento para el cálculo del número de escaleras eléctricas es el siguiente:

- Estimar el número de pasajeros a evacuar de la plataforma, N_{PE} (p) así como el tiempo para esto t_0 (min).
- Estimar el total de escaleras, N_{EsEI} .
- Calcular el número de pasajeros evacuados estimados, $N_{Pee} = N_{EsEI} * 100 \text{ p/min} * t_0$ (p)
- Verificar que $N_{Pee} > N_{PE}$, si esta relación no se cumple aumentar el número de escaleras eléctricas

Elevadores¹⁰²: en estaciones subterráneas debe haber al menos un elevador entre la plataforma y el nivel de calle. En Centros de Transito se requiere de al menos una cuando la plataforma se encuentra separada del acceso peatonal de la estación. Mas, sin embargo, siempre debe haber un elevador en operación cuando otro se encuentre fuera de servicio. En estaciones a nivel no son requeridas.

¹⁰¹ *Ibíd.*, p. 10.12 – 10.13

¹⁰² *Ibíd.*, p. 10.13 – 10.14.

1.6.6.6. Plataforma. El diseño de la plataforma suele estar condicionado por la longitud del tren, en estaciones subterráneas generalmente es de 123 m (operación de un tren de 5 vagones), en estaciones a nivel y en Centros de Transito al menos 100 m (operación de un tren de 4 vagones) con un espacio reservado para permitir su expansión¹⁰³. El ancho lo determina el número de pasajeros que desembarcan sobre la plataforma, en general las de configuración central suelen tener entre 8.0 y 9.0 m, en estaciones a nivel varía en función de los elementos de circulación. En cualquier configuración de la plataforma debe haber al menos 2 puntos de acceso/salida. Posteriormente al diseño conceptual se deben realizar las siguientes validaciones; distancia de seguridad 0.5 m desde el borde de la plataforma, al menos 2.5 m entre el borde de la plataforma y obstáculos como escaleras, escaleras eléctricas, columnas, y un ancho efectivo mínimo de 1.7 m¹⁰⁴. El procedimiento para el cálculo del ancho de la plataforma es el siguiente:

- Seleccionar longitud de plataforma, L_P (m) - 123 m para plataformas Subterráneas y Centros de Transito, 100 m para Estaciones a nivel.
- Estimar el número de pasajeros sobre la plataforma, Q_d (p).
- Calcular el área requerida de la plataforma para los pasajeros, $W_S = Q_d * 0.743 \text{ m}^2/\text{p}^*$ (m^2)*
- Calcular el ancho requerido de la plataforma para los pasajeros $W_P = W_S * L_P$ (m)
- Determinar el ancho de zonas de seguridad, equipamiento y elementos de circulación, P_{TA} (m).
- Cálculo del ancho total de la plataforma $W_{TP} = W_P + P_{TA}$ (m)

1.6.7. Metodología The Bus of Rapid Transit Planning Guide 2017 – BRTPG 2017. A continuación, se presentan los criterios y recomendaciones establecidas por el ITDP para el diseño de estaciones de sistemas BRT.

1.6.7.1. Elementos de acceso/egreso a la estación. Los sistemas BRT disponen del sistema de pago antes de abordar (ver numeral 2.2.4. *Sistemas de recolección*

¹⁰³ *Ibíd.*, p. 10.16.

¹⁰⁴ *Ibíd.*, p. 10.16.

* Valor de espacio peatonal utilizado por el 2017 LRT DESIGN GUIDELINES.

de tarifas y 2.4.2.3. Tipos de estaciones según su función – Estaciones BRT) por lo que los elementos de acceso/egreso de la estación estarán conformados en su mayoría por el equipamiento de recolección de tarifas (generalmente torniquetes) y la presencia de puntos de venta de tiquetes o taquillas antes del ingreso a la plataforma¹⁰⁵, lo cual no es recomendable ya que la venta de tiquetes o tarjetas en la plataforma propicia la formación de colas, para lo cual el ITDP recomienda que estos puntos de venta se sitúen en los acceso peatonales de las estaciones (puentes, túneles, etc) o en tiendas, e indica la capacidad de estos puntos de venta: entre 500 p/h y 3000 p/h para las horas pico, sugiriendo los 1000 p/h y 1500 p/h. Ahora bien, se plantean algunas recomendaciones en cuanto al acceso peatonal a la estación, considerando el acceso a nivel y a desnivel, para el primero las entradas a la estación deben estar lo más cerca posible de los cruces peatonales en intersecciones, se debe proveer una adecuada visibilidad para peatones y conductores, entre otros, para los accesos a desnivel se establecen criterios como visibilidad, iluminación, accesibilidad, anchos, entre otros¹⁰⁶.

1.6.7.2. Equipamiento de recolección de tarifas. La estimación del número de puertas o torniquetes N considera el máximo flujo peatonal que hará uso de estos, la capacidad del elemento y la provisión de unidades adicionales en caso de falla, considerando que con el valor de N no se presentaran colas. La ecuación para el cálculo de N se muestra a continuación¹⁰⁷:

$$N = \left(\frac{Q}{C} + 0,5 \right) + R$$

En dónde; N = número de unidades requerida, Q = número de pasajeros que llegan a la estación o entrada (p/h), C = capacidad promedio de la unidad (p/h), 0.5 = según el ITDP mediante este factor se pretende evitar la formación de colas aleatorias y no tener menos de 0.5 de capacidad, R = unidad en caso de fallas (este factor debe ser como mínimo 1).

Es importante recordar que el valor obtenido de N debe ser redondeado por exceso. En el anexo B se presentan los parámetros típicos de Q y C para diferentes unidades de acceso.

Se debe estimar el número de unidades N para la hora pico de la mañana y de la tarde, considerando que si las unidades son bidireccionales no se debe tener en cuenta la unidad R en cada estimación, pero, en cualquier caso, el número mínimo de unidades G_{TOTALM} deberá incluir al menos una unidad de reserva. El cálculo del

¹⁰⁵ INSTITUTE FOR TRANSPORTATION & DEVELOPMENT POLICY. Op. cit., p. 847.

¹⁰⁶ *Ibid.*, p. 959 – 964.

¹⁰⁷ *Ibid.*, p. 849.

número total de puertas o torniquetes G_{TOTAL} , considerando que no todas las unidades son bidireccionales, se realiza con la siguiente ecuación¹⁰⁸:

$$G_{TOTAL} = Max (G_{ENTRADA-MAÑ} + G_{SALIDA-MAÑ}, G_{ENTRADA-TAR} + G_{SALIDA-TAR})$$

En donde G_{TOTAL} = número total de puertas o torniquetes, $G_{ENTRADA-MAÑ}$ Y $G_{ENTRADA-TAR}$ = número total de torniquetes de entrada para la mañana y tarde respectivamente, $G_{SALIDA-MAÑ}$ Y $G_{SALIDA-TAR}$ = número total de torniquetes de salida para la mañana y tarde respectivamente

El cálculo del número de torniquetes para entradas $G_{ENTRADA}$, salidas G_{SALIDA} y torniquetes reversibles $G_{REVERSIBLE}$, se realiza con las siguientes ecuaciones¹⁰⁹:

$$M_{ENTRADA} = Max (G_{ENTRADA-MAÑ} + G_{ENTRADA-TAR})$$

$$M_{SALIDA} = Max (G_{SALIDA-MAÑ} + G_{SALIDA-TAR})$$

$$G_{REVERSIBLE} = M_{ENTRADA} + M_{SALIDA} - G_{TOTAL}$$

$$G_{ENTRADA} = M_{ENTRADA} - G_{REVERSIBLE}$$

$$G_{SALIDA} = M_{SALIDA} + G_{REVERSIBLE}$$

En donde $M_{ENTRADA}$ = número máximo de torniquetes de entrada, M_{SALIDA} = número máximo de torniquetes de salida, $G_{REVERSIBLE}$ = número de torniquetes reversibles, $G_{ENTRADA}$ = número de torniquetes de entrada y G_{SALIDA} = número de torniquetes de salida.

Una vez estimados los valores de torniquetes de entrada, salida y reversible, se calcula el número mínimo de torniquetes G_{TOTALM} , con la siguiente ecuación¹¹⁰:

$$G_{TOTALM} = G_{REVERSIBLE} + G_{ENTRADA} + G_{SALIDA} + 1$$

¹⁰⁸ *Ibíd.*, p. 849.

¹⁰⁹ *Ibíd.*, p. 849.

¹¹⁰ *Ibíd.*, p. 849.

1.6.7.3. Elementos de circulación horizontal. Dentro de los lineamientos propuestos por el ITDP no se menciona de manera explícita el diseño de elementos de circulación horizontal de manera independiente. Por lo que los pasillos o pasarelas que resulten de su implementación estarán gobernados por otros elementos (ej. El ancho de una pasarela que conecte dos plataformas estará gobernado por el ancho de estas).

1.6.7.4. Elementos de circulación vertical. El ITDP no considera el diseño específico de los elementos de circulación vertical, en cambio se proveen algunas recomendaciones generales para rampas y escaleras convencionales: el ancho debe ser suficiente para permitir un adecuado flujo peatonal en horas pico, deben permitir la accesibilidad a personas con movilidad reducida¹¹¹. Así mismo indica que las rampas son el método preferido de acceso a las estaciones y plantea los siguientes criterios¹¹²: el ancho debe ser igual al ancho de la estación, una pendiente de 5 % (máximo 8 %), pretilos en ambos costados, entre otros.

1.6.7.5. Plataforma. El ancho de la plataforma debe incluir suficiente espacio para los usuarios que circulan y esperan, considerando el tipo de estación (ver numeral 2.4.2.2. *Tipos de estación según su ubicación*) ya que este factor condicionara el número de zonas de espera que se deban calcular (si es bidireccional tendrá dos zonas de espera paralelas, si es unidireccional tendrá una zona de espera). El ancho de la plataforma es determinado con la siguiente ecuación¹¹³:

$$W_P = W_i + W_{waiS} + W_E + W_{waiS1} (m)$$

En dónde; W_P = ancho mínimo de la plataforma, W_i = ancho requerido para infraestructura básica de la estación (el ITDP recomienda que este valor sea de 1 m, pero dependerá de los servicios que se presten en la estación, distancias de amortiguamiento, la presencia de elementos estructurales; columnas y/o barreras de separación entre las líneas de circulación de los vehículos), W_{waiS} = ancho requerido de la zona de espera de pasajeros en una dirección, W_E = ancho requerido de la zona de circulación y W_{waiS1} = ancho requerido de la zona de espera de pasajeros en dirección opuesta (cuando la plataforma es unidireccional este valor es 0)

¹¹¹ *Ibíd.*, p. 963.

¹¹² *Ibíd.*, p. 983.

¹¹³ *Ibíd.*, p. 839.

El ancho requerido de la zona de circulación W_E es calculado con la siguiente ecuación¹¹⁴:

$$W_E = \frac{P f_d}{P f_{sat}} (m)$$

En dónde; W_E = ancho requerido de la zona de circulación (m), $P f_d$ = flujo de diseño peatonal de usuarios que circulan en una hora (p/h) y $P f_{sat}$ = flujo peatonal de saturación (p/h/m) es el máximo número de personas por unidad de metro que pueden circular en un nivel de servicio razonable, el ITDP establece este valor en 2000 p/h/m.

El cálculo del ancho de las zonas de espera para pasajeros W_{waiS} y/o W_{waiS1} , está influenciado por los siguientes factores: número de pasajeros esperando sobre la zona de espera en la hora pico Q_{Pax} (p), y el espacio requerido de la zona de espera W_{aiS} (m^2), a continuación se presentan las ecuaciones para su cálculo¹¹⁵:

$$Q_{Pax} = \sum_{i=1}^{Nruta} \frac{P b_i}{F_i} (p)$$

En dónde; Q_{Pax} = número de pasajeros esperando en la zona de espera en la hora pico (p), $P b_i$ = número de pasajeros que esperan la *ruta* i en la hora pico (p/h) y F_i = frecuencia de la *ruta* i en la hora pico expresada en vehículos por hora (veh/h)

$$W_{aiS} = \frac{Q_{Pax}}{P_D} (m^2)$$

En dónde; W_{waiS} = espacio de la zona de espera requerida (m^2) y P_D = densidad peatonal aceptable para zonas de espera (el ITDP establece un valor de densidad peatonal máximo de 3 p/ m^2) (p/ m^2)

Una vez estimados los parámetros Q_{Pax} y W_{aiS} , se procede a determinar el ancho requerido de las zonas de espera de los pasajeros W_{waiS} , es importante recordar que para plataformas bidireccionales (tipo isla o centrales) los parámetros (Q_{Pax} y W_{aiS}) se estiman dos veces, una por sentido, por lo que también se estimaran dos

¹¹⁴ *Ibíd.*, p. 839.

¹¹⁵ *Ibíd.*, p. 839, 840.

valores de W_{waiS} (W_{waiS} y W_{waiS1}). El cálculo del W_{waiS} se realiza con la siguiente ecuación¹¹⁶:

$$W_{waiS} = \frac{W_{aiS}}{L_P}$$

En dónde; W_{waiS} = ancho requerido de la zona de espera de pasajeros en la dirección analizada, W_{aiS} = espacio de la zona de espera requerida (m²) y L_P = longitud de la plataforma (generalmente corresponde a la longitud del vehículo más la longitud que este requiera para maniobrar)

Es importante considerar que en plataformas bidireccionales con puertas de ascenso/descenso, as áreas de espera en las estaciones con puertas en ambos lados de la estación generalmente se deben compensar para que las puertas de embarque no se enfrenten directamente entre sí, de lo contrario los pasajeros pueden entrar en conflicto cuando tratan de apiñarse en el mismo espacio¹¹⁷.

1.6.8. Técnica Transit and Passenger Rail System 2017 – NFPA130 2017. Los criterios de validación para el diseño de elementos de circulación peatonal que sirven como medios de evacuación en estaciones, están asociados a geometría y flujos peatonales, y pueden condicionar el diseño de un elemento. A continuación se presentan los más importantes según la NFPA130 2017¹¹⁸.

1.6.8.1. Elementos de acceso/egreso a la estación. Las puertas de la estación que conecten con áreas públicas, deben ser validadas con los siguientes flujos peatonales Pf_d : 60 p/min para puertas de hoja simple y, 0.0819 p/mm/min para puertas de dos o más hojas (bajo el ancho efectivo)

1.6.8.2. Equipamiento de recolección de tarifas. Los torniquetes o validadores de tiquetes situados en medios de evacuación deben permitir un flujo peatonal ininterrumpido en la dirección de evacuación cuando: hallan fallas de energía, se active la alarma de incendios o evacuación de la estación o, sean desactivados de manera manual o remota por el personal de control, cuando estos requisitos no sean atendidos, el equipamiento debe ser diseñado para que permita el paso cuando una fuerza horizontal de 66 N es aplicada. Los criterios para torniquetes convencionales están asociados a su geometría y flujos peatonales: deben proporcionar un ancho libre mínimo de 0.45 m, cuando giren libremente deben proveer una capacidad de

¹¹⁶ *Ibíd.*, p. 839.

¹¹⁷ *Ibíd.*, p. 855.

¹¹⁸ NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. Op. cit., p. 130-12 – 130-16.

25 p/min, y cuando funcionen bajo condiciones de flujo ininterrumpido, la capacidad será de 50 p/min.

1.6.8.3. Elementos de circulación horizontal y Plataformas. Los siguientes criterios son aplicados para pasillos, rampas y plataformas, los factores geométricos inciden en el ancho de estos tres elementos, mientras que los requisitos de flujo peatonal afectan de manera directa el dimensionamiento de pasillos y rampas.

- Se debe proveer un ancho libre de obstrucciones W_C , *mínimo* de 1.12 m, e incluir las distancias de amortiguamiento: 0.30 m a cada lado de una pared y 0.45 m entre bordes de pasillos, rampas o plataformas que estén abiertos a las líneas de circulación y la máxima distancia desde cualquier lugar de la plataforma a una salida es de 100 m.
- Se deben proveer al menos dos medios de egreso separados entre sí, en la estación. En plataformas, el tiempo de evacuación debe ser 4 min o menos. El tiempo de evacuación de la estación hasta un punto seguro debe ser 6 min o menos.
- Los pasillos deben ser verificadas bajo un flujo Pf_d de 0.0819 p/mm/min y, cuando se necesario una velocidad de desplazamiento S_P de 37.7 m/min.

La verificación del tiempo de evacuación de las plataformas estará sujeto a¹¹⁹ : 1) *Carga de ocupación de la estación*: número total de pasajeros que requieren ser evacuados hasta un punto seguro e involucra dos factores *carga entrante*: *pasajeros acumulados sobre la plataforma durante el periodo de falla* y *carga de los vehículos calculada*: *número de pasajeros a bordo de los vehículos en la estación*. 2) *capacidad egreso de los elementos de la plataforma*: asociada a la máxima capacidad de los elementos de circulación vertical y/o horizontal situados sobre la plataforma, la verificación del tiempo de evaluación de la estación incluye: 3) *capacidad de egreso de los elementos de egreso de la estación*: asociado a la máxima capacidad de egreso de los elementos de acceso (ej. torniquetes, puertas de emergencia). 4) *Distancias y velocidades peatonales sobre los elementos de la plataforma, asociados a la ruta de evacuación más larga*.

1.6.8.4. Elementos de circulación vertical. Para elementos de circulación vertical los criterios a validar están asociados a geometría y flujo peatonal, en escaleras convencionales se debe mantener un ancho W_T mínimo de 1.120 m, y en conjunto

¹¹⁹ SCHACHENMAYR, Martin. Application Guidelines for the Egress Element of the Fire Protection Standard for Fixed Guideway Transit Systems, For Use with the 1997 Edition of the NFPA 130 Standard. 1998. p. 19 – 62.

con las escaleras eléctricas deben ser analizadas bajo un flujo Pf_d de 0.0555 p/mm/min, y cuando se necesario una velocidad de desplazamiento de 14.6 m/min (componente vertical de la velocidad peatonal). Las rampas deben ser verificadas bajo un flujo Pf_d de 0.0819 p/mm/min y, cuando se necesario una velocidad de desplazamiento S_P de 37.7 m/min.

1.7. NIVELES DE SERVICIO PEATONAL

A continuación, se presentan los conceptos y escalas empleadas en los Niveles de Servicio peatonales.

1.7.1. Definición de Nivel de Servicio. FRUIN¹²⁰ indica que es una medida cuantitativa, que estima la calidad de un servicio o instalación con base en su nivel de congestionamiento (relaciones volumen/capacidad), evaluaciones cualitativas de la conveniencia del conductor, DAS y PANDIT¹²¹ agregan que la opinión de los usuarios es fundamental para el adecuado diseño de instalaciones y mejoramiento de la satisfacción del usuario.

Fue introducido por el *Highway Capacity Manual* HCM en 1965, en donde categorizo los niveles de servicio en 6 letras de la A a la F, en donde A indica las mejores condiciones de operación y F las peores condiciones de operación¹²². Si bien es cierto que fue desarrollado para carreteras diferentes autores y entidades lo emplean para otros modos tal como lo indica el *Florida Department of Transportation - FDOT*¹²³, mencionando que puede ser utilizada para los modos peatonales, bicicletas, entre otros.

¹²⁰ FRUIN. Op. cit., p. 1.

¹²¹ DAS, Shreya y PANDIT, Debapratim. Methodology to Determine Level of Service for Bus Transit in a Developing Country Like India. En: 13th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management (4: 7-13, Julio, Utrecht). 2013. p. 2.

¹²² *Ibid.*, p. 2.

¹²³ FLORIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. QUALITY / LEVEL OF SERVICE HANDBOOK. 2009. p. 12

1.7.2. Nivel de servicio peatonal. SAHANI¹²⁴ indica que se basa en medidas netamente subjetivas, con las que es posible estimar rangos de densidad, flujos y velocidades para definir los criterios de niveles de servicio.

MÁRQUEZ¹²⁵ establece que las fronteras de los Niveles de Servicio están asociadas con la libertad para seleccionar velocidades de caminata deseadas, para adelantar a otros peatones, facilidad de cruce de corrientes peatonales, la presencia de flujos en dirección opuestas, en general el circular sin conflictos con otros peatones o realizar cambios en la velocidad de caminata. Y que, con los valores adaptados para cada indicador del Nivel de Servicio, es posible diseñar los elementos o infraestructuras peatonales, calculando dimensiones de plataformas, número y ancho de escaleras, ancho de pasillos, entre otros.

FRUIN¹²⁶ desarrollo los indicadores de Niveles de Servicio para pasillos y escaleras basado en registros fotográficos, definiendo así diversas relaciones de entre volúmenes y espacios promedios peatonales, de los cuales determino que A representa un flujo sin impedimentos y, F una interrupción en el desplazamiento y densidades críticas, de igual manera encontró que para zonas de espera, como plataformas de estaciones, el nivel de servicio se basa en densidades peatonales y libertades de movilidad sobre el área, MÁRQUEZ¹²⁷ complementa lo anterior, indicando que el espacio disponible permanente, percepción de comodidad, seguridad y la facilidad de desplazamiento, inciden sobre este.

Diversos estudios han resultado en la modificación de los umbrales para las infraestructuras peatonales para escenarios definidos, ajustándolos a las condiciones particulares y objetivos específicos, tal es el caso de IGAZVÖLGYI¹²⁸, SHAN et al¹²⁹, LI y HENSHER¹³⁰. Entonces es posible decir que no se han desarrollado estándares globales, y que probablemente no se desarrollaran, idea que es reforzada por PANTZAR¹³¹ quien menciona que las escalas de Niveles de

¹²⁴ SAHANI, Rima. LEVEL OF SERVICE CRITERIA OF URBAN WALKING ENVIRONMENT IN INDIAN CONTEXT USING CLUSTER ANALYSIS. Tesis de Maestría; Master of Technology in Transportation Engineering. Rourkela, 2013. p. 9.

¹²⁵ MÁRQUEZ. Op. cit., p. 36.

¹²⁶ FRUIN. Designing for pedestrians [En línea]. Op. cit. Citado el 26 de diciembre de 2017.

¹²⁷ MÁRQUEZ. Op. cit., p. 36.

¹²⁸ KOVÁCKS, Zsuzsanna. Pedestrian's Level of Service on Tramline Platforms in Budapest. En: POLLACK PERIODICA. 2015. vol. 10, no. 1. p. 98 - 100.

¹²⁹ SHAN, Xiaonian; YE, Jianhong. y CHEN, Xiaohong. Proposing a Revised Pedestrian Walkway Level of Service Based on Characteristics of Pedestrian Interactive Behaviours in China. En: PROMET - Traffic&Transportation. 2013. vol. 28, no. 6. p. 589 – 590.

¹³⁰ LI HENSHER. Op. cit. p. 113.

¹³¹ PANTZAR, Mia. PEDESTRIAN LEVEL OF SERVICE AND TRIP GENERATION – International Best Practice and Its Applicability to Melbourne. Melbourne. 2012. p. 23.

Servicio desarrolladas por Fruin aun constituyen el método de diseño de elementos peatonales más empleado globalmente.

En las tablas 3 y 4, se encuentran las escalas de Nivel de Servicio para los elementos de circulación: pasarelas, escaleras, respectivamente, basados en el espacio peatonal. Se observa que en estas infraestructuras peatonales el espaciamiento entre peatonales es mayor al observado en zonas de acumulación (tabla 5), puesto que para peatones en movimiento se requiere una zona adicional, conformada por la zona del paso y la zona sensorial¹³².

Tabla 3. Niveles de Servicio para Pasillos

LOS	FRUIN. 1971	HCM 2010	KOVÁCKS. 2015	SHAN. <i>et al.</i> 2015
	Espacio Peatonal (m ² /p)			
A	≥3,25	≥5,57	≥3,23	≥5,26
B	2,32-3,25	3,72-5,57	2,33-3,23	2,94-5,26
C	1,39-2,32	2,23-3,72	1,39-2,33	1,64-2,94
D	0,93-1,39	1,39-2,23	0,93-1,39	1,25-1,64
E	0,46-0,93	0,74-1,39	0,47-0,93	0,93-1,25
F	<0,46	<0,74	<0,47	<0,93

Fuente: elaboración propia a partir de referencias

Tabla 4. Niveles de Servicio para Escaleras

LOS	FRUIN. 1971
	Espacio Peatonal (m ² /p)
A	≥1,86
B	1,39-1,86
C	0,93-1,39
D	0,65-0,93
E	0,37-0,65
F	<0,37

Fuente: elaboración propia a partir de referencias

En la tabla 5 se encuentra la escala de Nivel de Servicio para zonas de acumulación basada en el espacio peatonal, la escala expuesta por Fruin está concebida para zonas de espera, mientras que la escala de Li y Hensher está enfocada en los

¹³² GUÍO, Fredy. Caracterización y modelación de flujos peatonales en infraestructuras continuas – caso estudio Tunja - Colombia. Tesis de Maestría, Ingeniería con Énfasis en Tránsito. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Escuela de posgrados, 2009. p. 87.

niveles de ocupación vehicular, se evidencia que para infraestructuras peatonales las condiciones de espacio peatonal son mejores que para vehículos hasta el nivel de servicio D, a partir del nivel de servicio E se encuentran mejores condiciones de espacio peatonal en vehículos.

Tabla 5. Niveles de Servicio para Zonas de acumulación

LOS	FRUIN. 1971	LI y HENSHER. 2013
	Espacio Promedio Peatonal (m ² /p)	
A	≥ 1.21	≥ 1.00
B	0.93 - 1.20	0.76 - 0.99
C	0.65 - 0.92	0.51 - 0.75
D	0.28 - 0.64	0.36 - 0.50
E	0.19 - 0.29	0.20 - 0.35
F	<0.19	<0.20

Fuente: elaboración propia a partir de referencias

1.7.3. El apretujamiento. HELBING¹³³ establece que se trata de la aglomeración de personas en una misma superficie, al mismo tiempo. Y que la densidad de apretujamiento es aquella lo suficientemente alta como para causar continuas interacciones y conflictos en el flujo peatonal. En la ingeniería del tráfico algunas medidas empleadas para su uso medición¹³⁴; Pasajeros en exceso de capacidad (PIXC), Pasajeros por metro cuadrado, Pasajeros por pie cuadrado, Pasajeros por vehículo (PPC), Capacidad optima de pasajeros. Los niveles de apretujamiento varían en los diferentes países o regiones, por ejemplo, para Europa y Australia el punto de referencia es de 4 p/m², para el caso de Estados Unidos este número aumenta a 5 p/m² y alcanza los 8 p/m² para China, para el caso de los sistemas BRT el apretujamiento presenta después de los 5 p/m² durante la hora pico¹³⁵.

YAO. *et al.*¹³⁶ encontró que en entornos peatonales de sistemas de transporte, el apretujamiento muestra dos restricciones, espacial y temporal; la primera generada por la reducción del espacio interno de desplazamiento, con la que los peatones son forzados a desplazarse lateralmente y la segunda, asociada a las frecuentes

¹³³ HELBING, Dirk. JOHANSSON, Anders. Pedestrian, Crowd and Evacuation Dynamics. En: Encyclopedia of Complexity and Systems Science 16. 2015. p. 6467.

¹³⁴ JIA, Wendy y CHOW, Melissa. How Crowded is Crowded? A Practitioner's Tool to Assessing Rail Congestion. 2014. p. 4.

¹³⁵ LI y HENSHER. Op. cit. p. 110.

¹³⁶ YAO, Liya. *et al.* Research on the Behavior Characteristics of Pedestrian Crowd Weaving Flow in Transport Terminal. En: Mathematical Problems in Engineering. vol 2012. 2012. p. 3.

aceleraciones, desaceleraciones de los peatones y variaciones en la selección del camino, generadas por los itinerarios de las rutas y altas densidades peatonales.

En los sistemas de transporte el apretujamiento puede presentarse en los buses, en las plataformas o en ambos; DUDUTA y SUBEDI¹³⁷ establece que el primero es un problema de capacidad del corredor e indica que ha sido ampliamente estudiado, además de ser solucionado mediante la ampliación de los buses y reducción del tiempo de frecuencia, mientras que para el segundo no se dispone de un análisis detallado para sistemas BRT. De igual manera, YAO. *et al.*¹³⁸ hace hincapié en que los frecuentes y excesivos niveles de apretujamiento en áreas espera, no solo reducen la comodidad, y por ende el nivel de servicio, sino que también pueden resultar en graves afecciones hacia los peatones, como el pisoteo.

1.7.3.1. Efectos del apretujamiento. Una de las variables de mayor influencia en la calidad del servicio en el transporte público corresponde al nivel de ocupación de los vehículos y estaciones, en particular cuando muchas personas se ven forzadas a compartir un espacio limitado, caso en el cual se produce hacinamiento. El concepto de hacinamiento se relaciona con una alta densidad de personas en vehículos, estaciones, paraderos y accesos¹³⁹.

El apretujamiento en el transporte público tiene características que son similares a la congestión (tráfico): degradación de la experiencia individual de viajar, aumenta el costo de viaje generalizado, entre otros, considerando un exceso de demanda¹⁴⁰, ya que esta crece superando la capacidad disponible.

Es indispensable resaltar la importancia del espacio para el movimiento, tal como lo resalta FRUIN¹⁴¹; las características del movimiento humano, las dimensiones del cuerpo, y el espacio personal son referencia para entender la relación del tráfico de peatones. Considerando el ancho de la espalda humana, balanceo del cuerpo y evitar el contacto con otros, se requiere un espacio de 28 a 30 pulgadas (710 a 760 mm) para tener un movimiento confortable. En cuanto al espacio longitudinal, debe ser de 2.5 m a 3 m. Esto resulta en un área personal mínima de 2 a 3 m²/p.

¹³⁷ DUDUTA, Nicolae y SUBEDI, Asis. Understanding Platform Overcrowding at Bus Rapid Transit Stations. 2015. p. 3.

¹³⁸ YAO. *et al.* Op. cit., p. 2.

¹³⁹ TIRACHINI, Alejandro; HENSHER, David y ROSE, John. Seis Pasajeros por Metro Cuadrado: Efecto del Hacinamiento en la Oferta del Transporte Público, El Bienestar de los Usuarios y la Estimación de la Demanda. En: XVI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte (5: 10-13, octubre, Santiago). 2013. p. 2.

¹⁴⁰ DE PALM, André; LINDSEY, Robin y MONCHAMBERT, Guillaume. The Economics of Crowding in Public Transport. 2015. p. 8.

¹⁴¹ FRUIN. DESIGNING FOR PEDESTRIANS: A LEVEL-OF-SERVICE CONCEPT. Op. cit., p. 3.

Entonces, el nivel de servicio que se ofrece en una infraestructura de tránsito peatonal, se ve reducido generalmente cuando se forman pelotones.

TIRACHINI, HENSHER y ROSE¹⁴², establece algunos efectos del hacinamiento respecto al tiempo en el vehículo, tiempos de espera, variabilidad en los tiempos de viaje, en el bienestar de los usuarios, ahorro de tiempos de viaje, en la elección de la ruta y vehículo, y en la estimación de oferta y tarifas óptimas; sobre el bienestar de los usuarios, se destaca que es un tema muy complejo de analizar, existe una serie de factores físicos y psicológicos que intervienen en la percepción del hacinamiento y sus efectos, incluyendo un aumento en la ansiedad, estrés y sensación de cansancio, aumento en la sensación de inseguridad (referida a accidentes y crímenes), sensación de invasión de la privacidad, propensión a llegar tarde al trabajo, entre otros.

¹⁴² TIRACHINI, HENSHER y ROSE. Op. cit., p. 4.

2. MOVILIDAD INTERNA PEATONAL EN ESTACIONES

En este capítulo se detallan los aspectos y criterios relacionados con la ubicación y selección del área de estudio, cálculo de tamaños muestrales para las variables macroscópicas velocidad de la zona de circulación y densidad para la zona de espera, así como el procedimiento ejecutado en campo para la recopilación de estas variables en conjunto con los volúmenes peatonales. Finalmente se encuentran los datos obtenidos en campo asociados al comportamiento peatonal.

2.1. ZONA DE TOMA DE INFORMACIÓN

La ciudad de *Bogotá Distrito Capital* corresponde a la capital de la República de Colombia y del departamento de Cundinamarca, tiene una población estimada de 8'180,851 habitantes y está conformada por 20 localidades, en las que se realizan un aproximado de 12'755,826 viajes diarios mayores a 15 minutos, de los cuales el 45 % es realizado en transporte público: 26,7 % en transporte público colectivo, 16,2 % en TransMilenio y 1,7 % en alimentador^{143 144}. En la figura 8 se presenta la localización geográfica de Bogotá D.C. Sobre una de las estaciones del sistema TransMilenio se llevará a cabo la toma de información, siendo esta la Estación Calle 100, más adelante se enuncian los criterios y factores que determinaron su elección.

De las 138 estaciones que hacen parte del sistema TransMilenio¹⁴⁵, era necesario caracterizar una estación, en este caso la Estación Calle 100, la cual fue seleccionada con base en los siguientes criterios:

1) Los informes mensuales *Estadísticas de oferta del Sistema Integrado de Transporte Público – SITP*¹⁴⁶ publicados TransMilenio en 2016 y 2017, en donde se evidencia que es la estación que suele presentar mayor demanda diaria en un día típico, con un tráfico superior a los 45,000 p/día (a excepción del mes de Junio del 2017 en donde se presenta una demanda de 42,893 p/día) esto se evidencia en la

¹⁴³ CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ. Observatorio de Movilidad Reporte Anual de Movilidad 2015. Bogotá D.C.: 2016. p. 13

¹⁴⁴ CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ. Observatorio de Movilidad Balance de Movilidad 2007 – 2016 Reporte Anual de Movilidad 2016. Bogotá D.C.: 2017. p. 12

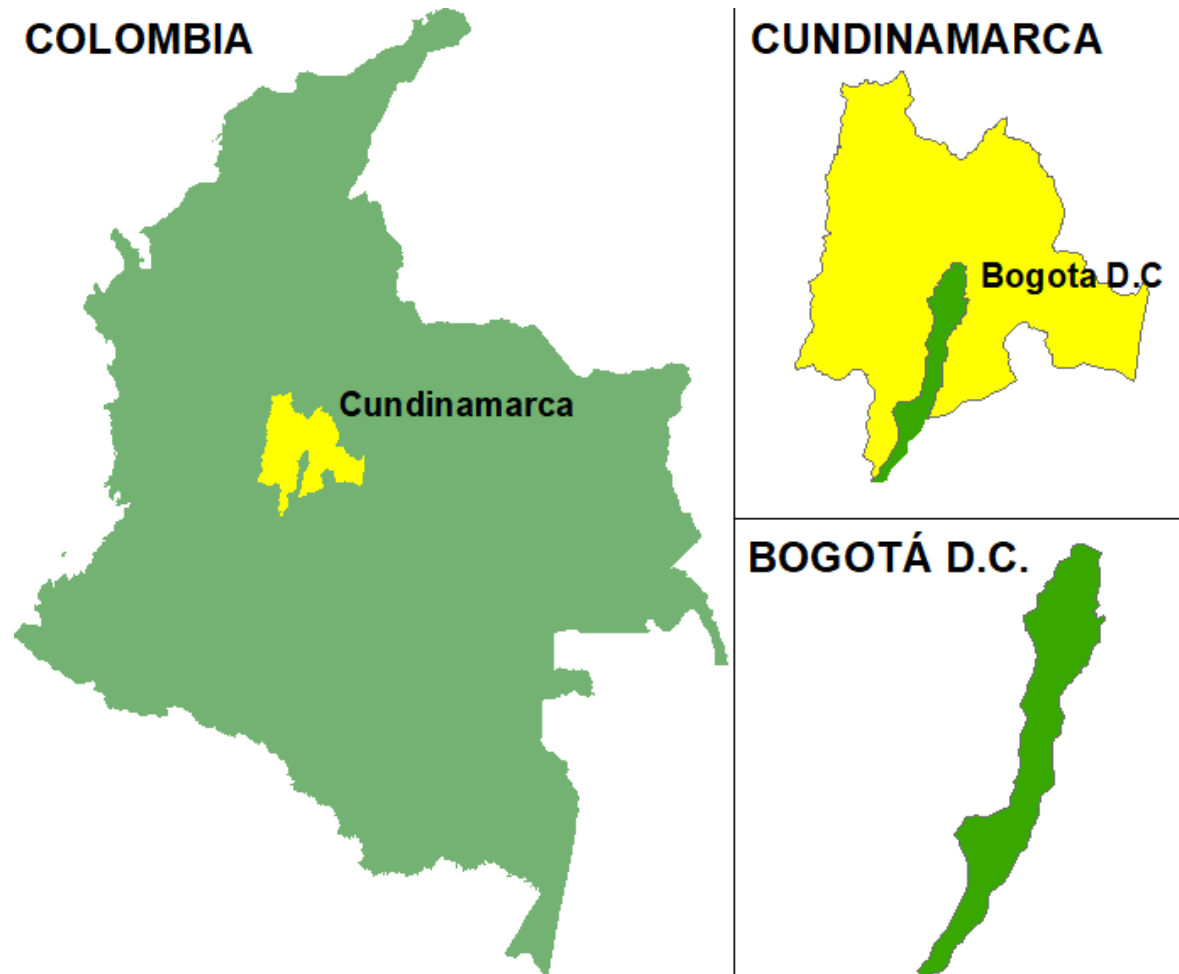
¹⁴⁵ TRANSMILENIO S.A. Infraestructura [En línea] Citado el 10 de marzo de 2018. Disponible en < http://www.transmilenio.gov.co/Publicaciones/nuestro_sistema/Componentes/Infraestructura >

¹⁴⁶ TRANSMILENIO S.A. TransMilenio en Cifras, Estadísticas de oferta y demanda del Sistema Integrado de Transporte Público – SITP [En línea] Citado el 10 de marzo de 2018. Disponible en < http://www.transmilenio.gov.co/Publicaciones/la_entidad/transparencia_y_acceso_a_la_informacion_publica_transmilenio/2_informacion_de_interes/estadisticas_de_oferta_y_demanda_del_sistema_integrado_de_transporte_publico_sitp >

figura 9, y que solo es superada en los meses de septiembre y diciembre de 2016 y febrero de 2017 por la estación Avenida Jiménez.

2) El CONPES 3882 del 2017¹⁴⁷, en donde se indica que la estación Calle 100 en conjunto con otras estaciones del sistema presenta niveles de saturación superiores al 80 %.

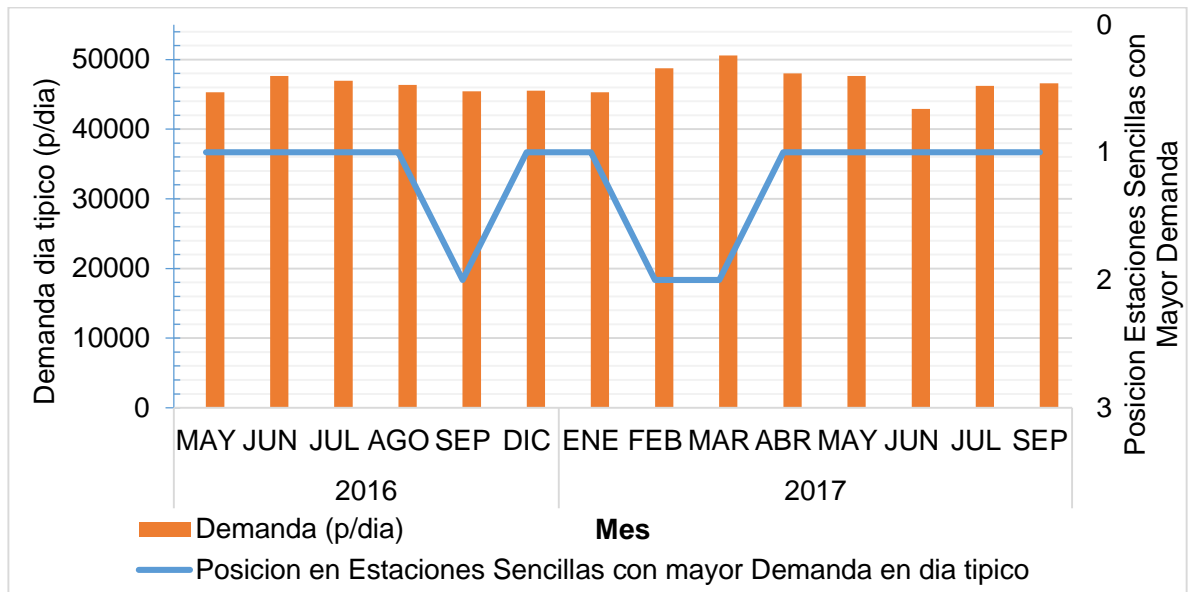
Figura 8. Localización Bogotá D.C.



Fuente: autores

¹⁴⁷ DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. CONPES 3882 Apoyo del gobierno nacional a la política de movilidad de la región capital Bogotá-Cundinamarca y declaratoria de importancia estrategia del proyecto sistema integrado de transporte masivo – Soacha Fases II y III. Bogotá, 2017. p. 26.

Figura 9. Estaciones y Portales con Mayor Demanda en día hábil.



Fuente: adaptado de TRANSMILENIO S.A. TransMilenio en Cifras, Estadísticas de oferta y demanda del Sistema Integrado de Transporte Público – SITP. Informe N° 46. Septiembre, 2017.

Como se muestra en la figura 9, la estación Calle 100 reporta un máximo de 50,584 p/día, presentada en el mes de marzo de 2017. Mientras que, en el último reporte disponible, se presentaron 46,567 p/día en el mes de septiembre de 2017. Por lo que se trata de una estación sencilla que presenta altos niveles de demanda, lo cual se evidencia en las horas pico, en donde se forman extensas colas de espera sobre los puentes de acceso, y elevados niveles de apretujamiento y conflictos peatonales en el interior de los vagones.

El área de estudio corresponde a la estación Calle 100 del sistema TransMilenio ubicada en Bogotá, Colombia, se localiza sobre la Avenida Carrera 45 entre las Calles 94 y 97, en las localidades de Chapinero y Barrios Unidos. Inaugurada en el año 2001, atiende la demanda de los barrios La Castellana, Chicó Norte III y sus alrededores urbanos y comerciales. En la figura 10 se encuentra la localización geográfica de la plataforma de estudio.

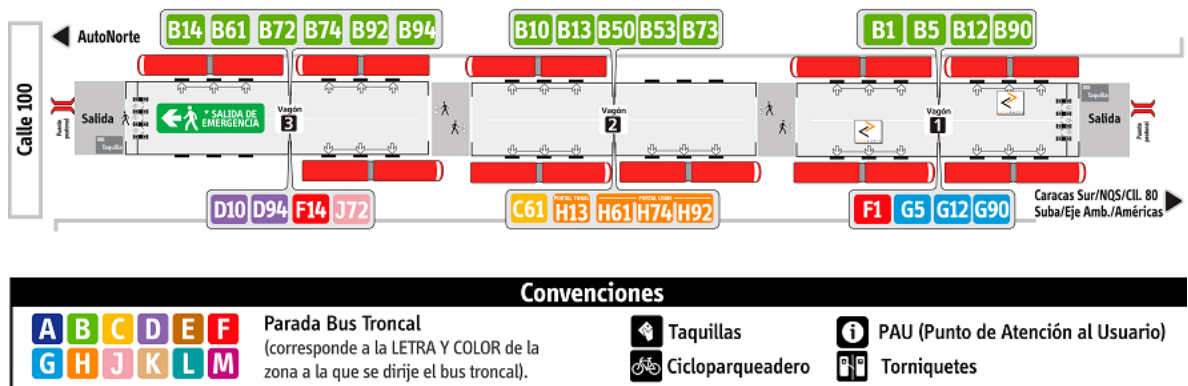
La estación Calle 100 se compone de 3 vagones, con plataformas tipo isla o centrales (ver figura 12), cada vagón cuenta con capacidad para atender 2 vehículos de manera simultánea por sentido, adicionalmente cuenta dos puentes peatonales de acceso, situados en los extremos norte y sur de la estación. En la figura 11 se encuentra la planta general de la Estación Calle 100.

Figura 10. Localización geográfica Estación de estudio.



Fuente: adaptado de Google Earth (fecha de imagen satelital 01/27/2016).

Figura 11. Planta de Estación Calle 100 TransMilenio S.A.

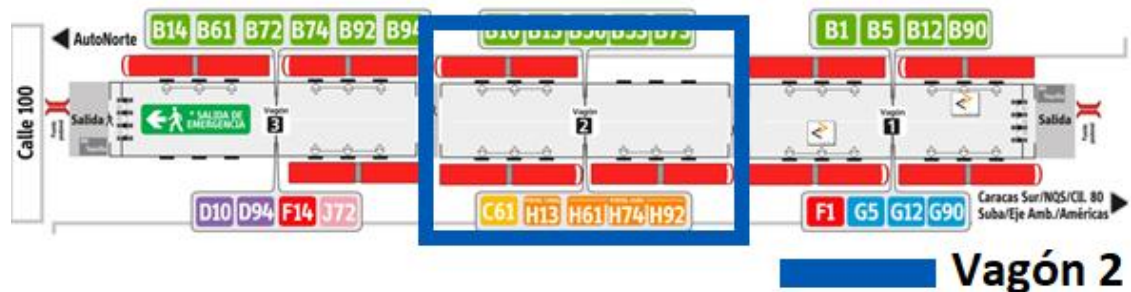


Fuente: Adaptado de SITP – TransMilenio S.A.

El vagón 2 ubicado en la parte central de la estación (ver figura 12), fue seleccionado como área de toma de información. Los vagones 1 y 3 fueron descartados debido a la presencia de los torniquetes en sus extremos (punto de acceso/egreso peatonal a la estación), en las diferentes horas del día, especialmente en horas pico se produce un efecto de acumulación en el interior (zona pagada) y en el exterior (zona gratuita) generado por los pasajeros que salen, ingresan y compran los tickets del sistema producto de la insuficiencia de espacio en la zona de acumulación dada para los torniquetes o, por el número de los torniquetes, resultando en una

afectación de los flujos peatonales en las plataformas adyacentes y por ende en todo el vagón, problema que es analizado desde el punto de vista de la capacidad de los torniquetes y su incidencia en el diseño de los accesos a la estación¹⁴⁸. La distancia libre entre los torniquetes y las zonas de espera de los vagones es de 1.0 m para el vagón 1 y 0.60 m para el vagón 3 (ver figura 13), en la literatura esta distancia libre se encuentre entre 4.5 m¹⁴⁹ y 10.0 m¹⁵⁰.

Figura 12. Vagón Estudio.



Fuente: adaptado de SITP – TransMilenio S.A.

Figura 13. Distancia libre entre torniquetes y zonas de espera



Fuente: autores

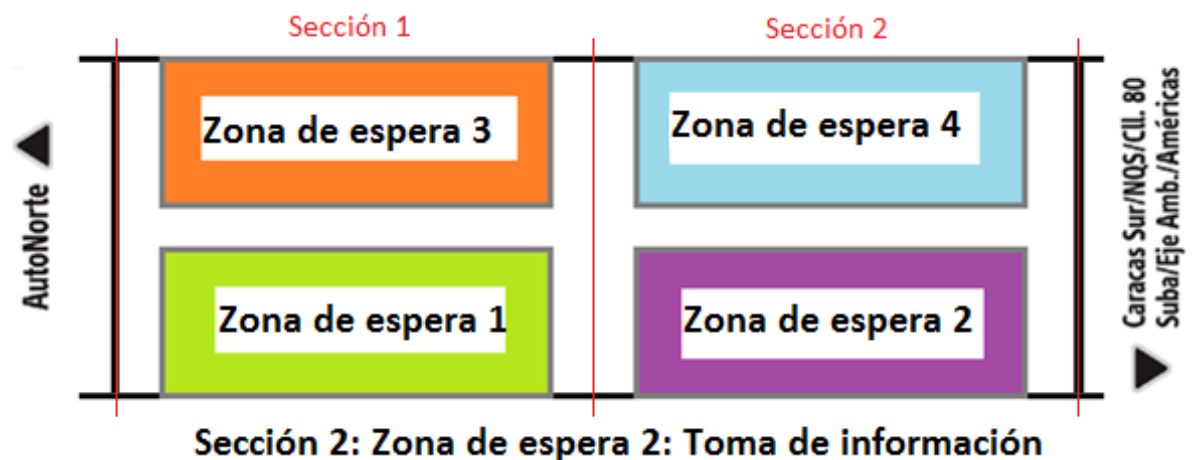
¹⁴⁸ DUDUTA y SUBEDI. Op. cit., p. 7.

¹⁴⁹ BAY AREA RAPID TRANSIT. Bart Facilities Standards Architecture – Passenger Stations. San Francisco, 2013. p. 12.

¹⁵⁰ INSTITUTE FOR TRANSPORTATION & DEVELOPMENT POLICY, The BRT Planning Guide, Op. cit., p. 838.

La toma de información relacionada con las variables macroscópicas y las encuestas de percepción fue realizada sobre una sección del vagón estudio (ver figura 12), para lo cual se dividió el vagón en 2 secciones agrupando las zonas de espera, seleccionando la sección 2 (toma de información de variables: volúmenes y velocidades) asociada a la zona de espera 2 (toma de información de variables: encuestas de percepción y densidades) (ver figura 14) con base en observaciones en campo se identificó que a lo largo del día esta zona de espera presenta un comportamiento normal en todos los periodos del día y, en periodos pico se presenta una ocupación hasta la mitad del vagón sin invadir la zona de espera 4 ni restringir el flujo peatonal en el vagón. En las zonas de espera 3 y 4 se presenta una baja demanda de pasajeros concentrada en periodos cortos y específicos del día, por el contrario, la zona de espera 1 presenta una demanda elevada que en horas pico excede la capacidad de la zona de espera, resultando en la extensión de esta zona hasta la zona de espera 3 restringiendo el flujo peatonal e interfiriendo con los pasajeros que hacen uso de esta zona (zona de espera 3). Es importante resaltar que las zonas de espera 3 y 4 son despreciables debido a la baja demanda observada en campo.

Figura 14. Planta general Vagón 2, plataforma de estudio.



Fuente: adaptado de SITP – TransMilenio S.A.

La toma de información se vio limitada por los condicionamientos impuestos por TransMilenio, asociados a: personal (limitado a 4 personas) y su ubicación en el vagón, el periodo de toma de datos (8 am a 8 pm) y el formato de encuestas (aprobado después de ser revisado y modificado por TransMilenio). Pese a esto, la plataforma seleccionada permitió obtener la información necesaria y los resultados esperados. La toma de información fue realizada entre semana, en días hábiles típicos, correspondientes al 26 y 27 de octubre del 2017.

2.2. TAMAÑO MUESTRAL

A continuación, se encuentran los criterios empleados para el cálculo del tamaño muestral necesario para la toma de información de las variables macroscópicas: velocidad y densidad, con la expresión del tamaño de muestra para poblaciones infinitas.

2.2.1. Velocidades. El tamaño de muestra necesario para la toma de velocidades es calculado considerando el nivel de confianza, la desviación estándar y el error máximo admisible, con la siguiente ecuación¹⁵¹:

$$n \geq \left(\frac{Z^{\alpha/2} * S}{e} \right)^2$$

En dónde; n_0 = tamaño muestral para población infinita, $Z^{\alpha/2}$ = constante que depende del nivel de confianza, σ = desviación estándar poblacional y e = error máximo admisible.

Considerando un nivel de confianza del 95 % con un $Z^{\alpha/2}$ igual a 1.96, una desviación estándar σ de 0.29 m/s¹⁵² (desviación estándar de velocidades peatonales obtenida en una estación de tren Alemana), un error máximo admisible e del 5 %, se obtiene que el tamaño muestral n_0 para la toma de velocidades debe ser como mínimo 130 observaciones, valor tomado para un periodo de una hora, ejecutadas mediante muestreo sistemático.

A pesar de lo anterior, y con base en recomendaciones de expertos se decide ejecutar el muestreo sistemático realizando una observación cada 30 s por aforador, obteniendo 10 observaciones de velocidad por cada periodo de 5 min por aforador, es decir 240 observaciones en total por hora (en el numeral 3.3. *METODOLOGÍA EN CAMPO* se indica el número y distribución de los aforadores)

2.2.2. Densidades. El tamaño de muestra para la variable densidades es calculado considerando las mismas variables del numeral 3.1.1. *Velocidades*. Considerando un nivel de confianza del 95 % con un $Z^{\alpha/2}$ igual a 1.96, una desviación estándar σ

¹⁵¹ VALDIVIESO, Carlos; CASTELLÓN, Roberto y VALDIVIESO, Oscar. Determinación del tamaño muestral mediante el uso de árboles de decisión. En: UPB – INVESTIGACIÓN & DESARROLLO, vol. 11. 2011. p. 151.

¹⁵² DAVIDICH, Maria. KÖSTER, Gerta. Predicting Pedestrian Flow: A Methodology and Proof of Concept Based on Real-Life Data. En: PLOS ONE, vol. 8, no 12. 2013. p. 3.

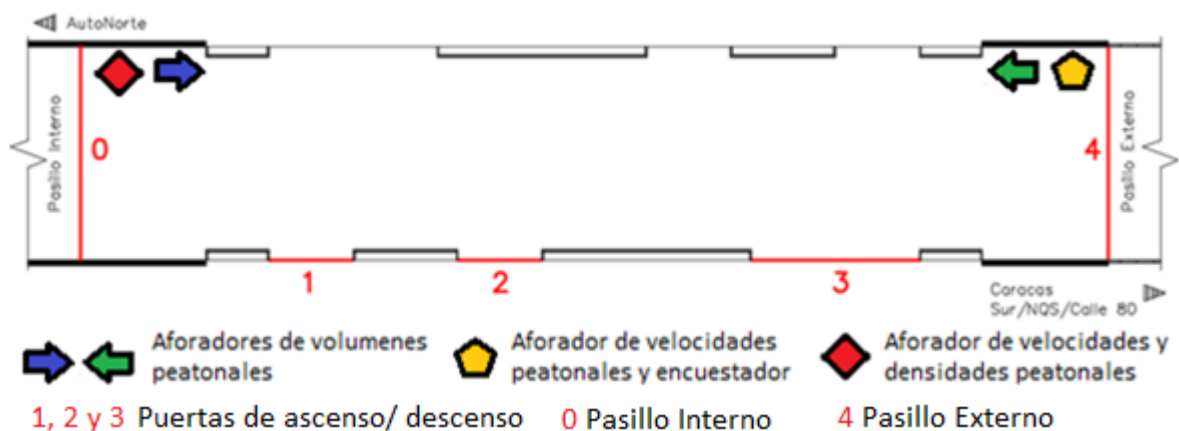
de 0.049 p/m² ¹⁵³ (desviación estándar de densidades peatonales obtenida en vías peatonales exclusivas, a pesar de no presentar el mismo comportamiento de una plataforma, en la literatura no se encuentran análisis estadísticos de observaciones de densidad en estaciones y/o plataformas, por lo que se optó por tomar este valor para estimar el tamaño muestral inicial), un error máximo admisible e del 5 %, se obtiene que el tamaño muestral n_0 para la toma de densidades debe ser como mínimo 4 observaciones, valor tomado para un periodo de 5 minutos, ejecutadas mediante muestreo sistemático.

A pesar de lo anterior, y con base en la literatura se decide ejecutar el muestreo sistemático realizando una observación cada 30 s¹⁵⁴, obteniendo 10 observaciones de densidad por cada periodo de 5 min, es decir 120 observaciones en una hora.

2.3. METODOLOGÍA EN CAMPO

Como se explicó de manera previa, el personal disponible para la toma datos en campo fue de 4 personas (ver numeral 3.1. ZONA DE TOMA DE INFORMACIÓN), asignados de la siguiente manera: 2 personas para el conteo de volúmenes, 1 persona para aforo de velocidades y ejecución de muestras y 1 persona para aforo de velocidades y de densidades, en la figura 15 se encuentra la ubicación de los aforadores. En la figura 16 se observan algunos de los aforadores ejecutando la toma de información.

Figura 15. Ubicación de aforadores



Fuente: autores

¹⁵³ GUÍO. Op. cit., p. 82.

¹⁵⁴ LEON, Laurent. Video Data Collection Method for Pedestrian Movement Variables & Development of A Pedestrian Spatial Parameters Simulation Model for Railway Station Environments. Tesis de Doctorado; Doctor of Philosophy of Science in Engineering. Stellenbosch: University of Stellenbosch. 2012. p. 82.

Figura 16. Aforadores ejecutando la toma de información.



Fuente: autores

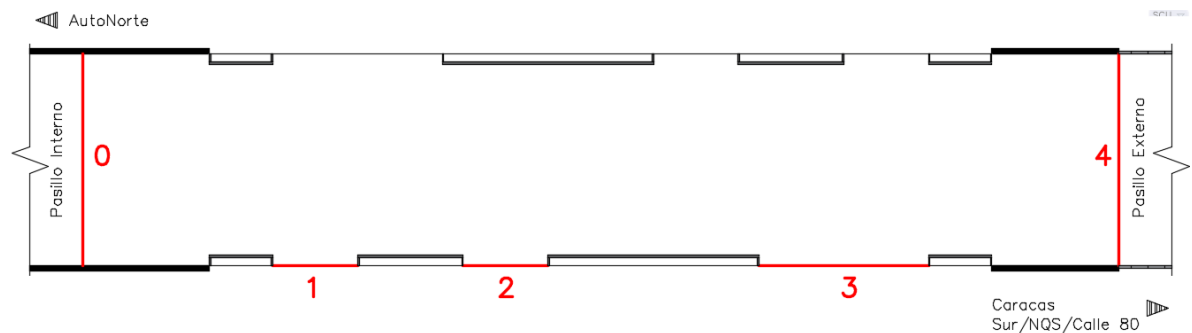
A continuación, se describe el procedimiento ejecutado en campo para la toma de información asociada a; *inventario de la plataforma estudio*, *aforos peatonales* (realizados de manera manual y considerando características como flujos, velocidades y densidades) y *ejecución de encuestas de percepción*. El periodo seleccionado para los aforos corresponde a 5 min. La tipología empleada para la caracterización del flujo peatonal y la toma de velocidades está asociada al género y características del peatón, obteniendo así cuatro clasificaciones, Hombre sin Equipaje, Hombre con Equipaje, Mujer sin Equipaje y Mujer con Equipaje.

2.3.1. Inventario. Se realizaron mediciones del ancho y largo de la plataforma de estudio, ancho de elementos como; puertas de ascenso/descenso de los buses y barandas, información necesaria para realizar el esquema de la plataforma. Así mismo se realizó la verificación de la existencia y estado funcional de elementos de iluminación, protección contra el clima, sistemas de información y elementos de seguridad, finalmente se tomaron registros fotográficos de la plataforma, finalmente se registra el nombre de aforador, la fecha y las observaciones pertinentes de los elementos sobre la plataforma. En el anexo C se encuentra el formato empleado para el inventario de la plataforma.

2.3.2. Volúmenes. Los volúmenes peatonales fueron registrados de manera manual, estableciendo cinco secciones de control sobre la plataforma de estudio, tres asociadas a las puertas de acceso de los vehículos (1, 2 y 3) y dos a los pasillos de acceso/egreso de la plataforma (0 y 4), lo anterior se observa en la figura 17, para su tabulación se empleó la siguiente codificación: movimiento 1 (suma 0-1 y 4-1), movimiento 2 (suma 0-2 y 4-2), movimiento 3 (suma 0-3 y 4-3) y movimiento 4 (suma 0-4 y 4-0). Los formatos de volúmenes se registraron de la siguiente manera:

se registró el número y tipología de peatones que accedían desde cualquiera de los pasillos de acceso/egreso (puntos de control 0 y 4) hacia otro punto de control, en el periodo correspondiente, finalmente se registra el nombre de aforador, la fecha y las observaciones pertinentes presentadas durante el aforo. En el anexo D se encuentra el formato empleado para el aforo de volúmenes.

Figura 17. Puntos de control para conteo de volúmenes.



Fuente: autores

2.3.3. Velocidades. Las velocidades peatonales fueron registradas de manera manual, considerando dos muestras; una asociada a los *pasajeros que circulaban en la plataforma* y otra a los *pasajeros que descendían de los vehículos*, la primera registrada a partir de una *muestra aleatoria sistemática* y la segunda a partir de una *muestra aleatoria no sistemática*. A partir de observaciones previas realizadas en campo se determinaron los recorridos más comunes a realizar por los pasajeros, obteniendo *una* longitud base para la muestra sistemática y *seis* longitudes base para la muestra no sistemática, considerando las secciones de control enunciadas en el numeral 3.2.2. *Volúmenes*, las longitudes base empleadas se observan en la tabla 6.

Con base en lo anterior y en el muestreo sistemático expuesto en el numeral 3.1.1. *Velocidades*, los formatos de velocidades se registraron de la siguiente manera: se identificó al pasajero objetivo, y se registró el tiempo que tardaba en cruzar las secciones de control, el movimiento realizado y la tipología de peatón en el periodo correspondiente, en el caso de las velocidades no sistemáticas se identificó el pasajero que iba a realizar el descenso del vehículo y una vez este abriera sus puertas se registraba el tiempo que tardaba en desplazarse a las secciones 0 o 4, así como el movimiento y tipología de peatón en el periodo correspondiente; finalmente se registra el nombre de aforador, la fecha y las observaciones pertinentes presentadas durante el aforo. En el anexo E se encuentra el formato empleado para la toma de velocidades.

Tabla 6. Longitudes base para toma de velocidades.

Movimiento	Longitud Base Estimada(m)	Tipo de Muestra	Movimiento	Longitud Base Estimada(m)	Tipo de Muestra
1 a 0	6.4	No Sistemática	3 a 0	16.4	No Sistemática
1 a 4	17.2		3 a 4	7.2	Sistemática
2 a 0	10.0		0 a 4	19.6	Sistemática
2 a 4	13.6		4 a 0	19.6	

Fuente: autores

2.3.4. Densidades. Las densidades peatonales sobre la zona de espera fueron registradas de manera manual, con el fin de analizar la variación periódica sobre la zona de espera. El número de superficies para la medición de densidades fue seleccionado considerando que según REILLY y LEVINSON¹⁵⁵ se deben medir densidades peatonales en diferentes puntos sobre la zona de espera con el fin de determinar la densidad promedio de esta, por lo que se establecieron tres superficies asociadas a las puertas de acceso/egreso a los vehículos. Las dimensiones de estas superficies fueron determinadas considerando lo expuesto por DAAMEN¹⁵⁶, quien indica que el tamaño de las superficies para la toma de densidades es seleccionado considerando el nivel de congestión que se espera ocurra y, partir de observaciones previas realizadas en campo, definiendo que el largo de la superficie correspondería al ancho total de la puerta más 0.40 m a cada lado y que el ancho correspondería a 1.7 m (mitad del ancho del vagón, 2 m, menos la distancia de amortiguamiento de las paredes del vagón y de los pretilos, 0.3 m¹⁵⁷ ¹⁵⁸). En la figura 18 se encuentran las dimensiones y ubicación de las superficies establecidas para la toma de densidades.

Con base en lo anterior y en el muestreo sistemático expuesto en el numeral 3.1.2. *Densidades*, los formatos de densidades se registraron de la siguiente manera, se realizó el conteo del número de personas que se encontraban dentro de la superficie, registrando el código de la puerta, el número de personas y el ancho estimado que ocupa el pelotón de personas esperando, en el periodo correspondiente, finalmente se registra el nombre de aforador, la fecha y las

¹⁵⁵ REILLY, Jack y LEVINSON, Herbert. Public Transport Capacity Analysis Procedures for Developing Cities. World Bank, Transport Research Support Program. 2011. p. 110.

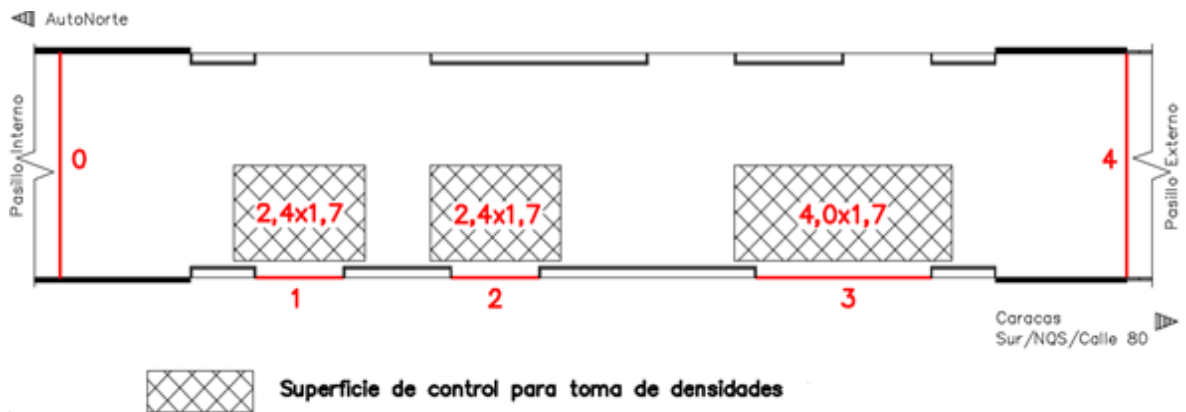
¹⁵⁶ DAAMEN, Winnie. Modelling Passenger Flows in Public Transport Facilities. Delft University of Technology. Delft, 2004. p. 71.

¹⁵⁷ TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Op. cit. p. 10-45.

¹⁵⁸ NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. Op. cit., p. 130-14.

observaciones pertinentes presentadas durante el aforo. En el anexo F se encuentra el formato empleado para la toma de densidades peatonales.

Figura 18. Áreas delimitadas para toma de densidades peatonales sobre zona de espera.



Fuente: autores

2.4. DATOS OBTENIDOS

A continuación, se presentan de manera general, los datos recopilados en campo encontrados para la hora pico, asociados a las variables macroscópicas volumen (tabla 7), velocidad (tabla 8 y tabla 9), y densidad (tabla 10). En el anexo digital 1 se encuentran los datos de volúmenes peatonales, en el anexo digital 2 se encuentran los datos de velocidad de circulación, en el anexo digital 3 los datos de velocidad de descenso y en el anexo digital 4 los de densidades sobre las zonas de espera.

Tabla 7. Volúmenes peatonales para hora pico^{*}.

Intervalo	Movimiento 1 (p/5min)	Movimiento 2 (p/5min)	Movimiento 3 (p/5min)	Movimiento 0 - 4 (p/5min)	Total (p/5min)
17:15 - 17:20	17	16	68	225	326
17:20 - 17:25	13	15	32	187	247
17:25 - 17:30	9	4	33	207	253
17:30 - 17:35	8	5	34	179	226
17:35 - 17:40	16	10	35	208	269
17:40 - 17:45	10	12	51	184	257
17:45 - 17:50	11	24	32	227	294
17:50 - 17:55	18	12	38	180	248
17:55 - 18:00	8	9	19	195	231

^{*} Codificación (ver numeral 3.2.2. Volúmenes, figura 17): movimiento 1 (suma 0-1 y 4-1), movimiento 2 (suma 0-2 y 4-2), movimiento 3 (suma 0-3 y 4-3) y movimiento 4 (suma 0-4 y 4-0)

Tabla 7. (Continuación)

Intervalo	Movimiento 1 (p/5min)	Movimiento 2 (p/5min)	Movimiento 3 (p/5min)	Movimiento 0 - 4 (p/5min)	Total (p/5min)
18:00 - 18:05	9	7	15	180	211
18:05 - 18:10	6	20	29	251	306
18:10 - 18:15	4	5	18	219	246

Fuente: autores

Tabla 8. Velocidades peatonales – muestra sistemática – para hora pico **.

Intervalo	Velocidad HSE (m/s)	Velocidad HCE (m/s)	Velocidad MSE (m/s)	Velocidad MCE (m/s)	Velocidad promedio (m/s)
17:15 - 17:20	1.26	1.06	1.16	0.89	1.03
17:20 - 17:25	0.92	0.94	0.94	0.94	0.94
17:25 - 17:30	0.85	0.91	0.89	0.92	0.90
17:30 - 17:35	0.90	0.93	0.94	0.91	0.92
17:35 - 17:40	0.91	0.95	0.99	0.94	0.95
17:40 - 17:45	0.93	0.95	0.92	0.91	0.93
17:45 - 17:50	0.90	0.94	0.94	0.92	0.92
17:50 - 17:55	0.94	0.94	0.94	0.93	0.94
17:55 - 18:00	1.13	1.09	1.10	0.99	1.07
18:00 - 18:05	1.36	1.57	1.42	1.20	1.38
18:05 - 18:10	1.05	1.02	1.16	0.99	1.04
18:10 - 18:15	0.92	0.91	0.94	0.86	0.91

Fuente: autores

Tabla 9. Velocidades peatonales – muestra no sistemática – para hora pico***.

Intervalo	Velocidad HSE (m/s)	Velocidad HCE (m/s)	Velocidad MSE (m/s)	Velocidad MCE (m/s)	Velocidad promedio (m/s)
17:15 - 17:20	NA	0.78	NA	NA	0.78
17:20 - 17:25	NA	NA	NA	1.28	1.28
17:25 - 17:30	1.86	NA	NA	NA	1.86
17:30 - 17:35	NA	0.91	NA	NA	0.91
17:40 - 17:45	NA	1.03	NA	NA	1.03
17:50 - 17:55	NA	NA	NA	1.12	1.12
17:55 - 18:00	NA	0.63	NA	1.39	1.01
18:00 - 18:05	NA	0.76	NA	1.66	1.21
18:05 - 18:10	NA	1.09	NA	1.26	1.18

Fuente: autores

** y *** Tipologías (ver numeral 3.2.3. *Velocidades*): HSE = hombre sin equipaje, HCE = hombre con equipaje, MSE = mujer sin equipaje y MCE = mujer con equipaje. NA indica que no hay observaciones para la tipología en el periodo correspondiente.

Tabla 10. Densidades peatonales obtenidas en la zona de espera para hora pico****.

Intervalo	Densidad Promedio (p/m ²)	Longitud Promedio Pelotón (m)
17:15 - 17:20	4.87	2.5
17:20 - 17:25	3.14	1.6
17:25 - 17:30	3.34	1.7
17:30 - 17:35	2.40	1.2
17:35 - 17:40	3.98	2.0
17:40 - 17:45	2.21	1.1
17:45 - 17:50	3.74	1.9
17:50 - 17:55	2.16	1.1
17:55 - 18:00	1.37	0.7
18:00 - 18:05	2.40	1.2
18:05 - 18:10	3.61	1.8
18:10 - 18:15	3.05	1.5

Fuente: autores

2.5. INVENTARIO DE LA PLATAFORMA

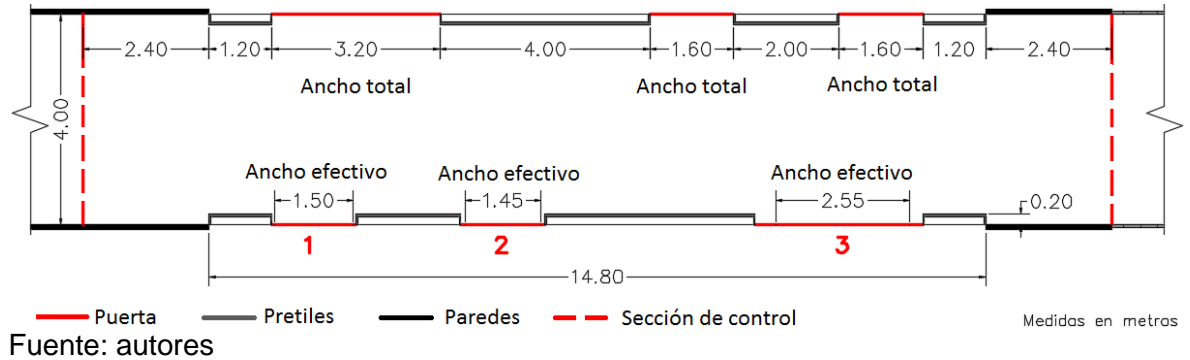
En la figura 19 se encuentra el esquema del área estudio, elaborado con información recopilada en campo, se evidencia que la plataforma presenta una longitud de 19.6 m, superior a la longitud típica de los vehículos articulados del sistema que operan sobre esta, 18.5 m. Las dimensiones y ubicación de los elementos como demarcación horizontal y vertical y pretilos de la plataforma presentan simetría inversa con la zona de espera paralela que presta el servicio en sentido opuesto. El vagón tiene un ancho total de 4.0 m, no presenta elementos que obstruyan la circulación peatonal, dispone de pretilos discontinuos (entre puertas), y elementos de información de rutas, así como de demarcación horizontal y vertical (ver figuras 20 a 23), cuenta con cobertura total de la plataforma, brindando protección contra el clima, las líneas de circulación de los vehículos se encuentran separadas del vagón mediante las paredes de este.

Por sentido presenta tres puertas, la puerta de mayor longitud está diseñada de manera preferencial para personas: con movilidad reducida, de la tercera edad o en estado de embarazo, las puertas 1 y 2 tienen el mismo ancho total, a pesar de esto, las puertas no son funcionales por lo que durante los diferentes periodos de operación del día se encuentran abiertas antes y después de la llegada de los vehículos, la puerta 3 también presenta esta afectación, las puertas pueden presentar variaciones en su ancho efectivo producto de los movimientos realizados por los usuarios: al ascender y/o descender de los vehículos, o esperar en la

**** Superficies de control para toma de densidades (ver numeral 3.2.4. Densidades, figura 18)

plataforma, razón por la cual el ancho total y el ancho efectivo de las puertas mostrado en la figura 19 no es el mismo.

Figura 19. Esquema de plataforma estudio



La demarcación vertical incluye el nombre de la estación y señales que incentivan al usuario a hacer un uso responsable del sistema (información de usuarios preferenciales y de seguridad vial). En general la demarcación se encuentra en buen estado y su identificación es posible, en las figuras 20, 21 y 22 se encuentra la demarcación horizontal y vertical de cada puerta. A pesar de que las puertas cuentan con demarcación horizontal en la que se indica la prelación peatonal para los usuarios que descienden de los vehículos, en campo se evidencia que los usuarios hacen caso omiso de esta, generando demoras adicionales cuando el vehículo se detiene y abre sus puertas sobre la plataforma

Figura 20. Demarcación horizontal en el vagón puerta 1

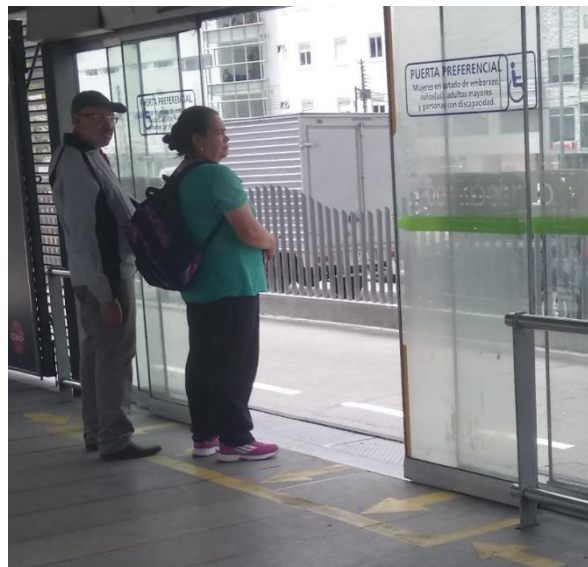


Figura 21. Demarcación horizontal en el vagón puerta 2



Fuente: autores

Figura 22. Demarcación horizontal en el vagón puerta 3



Fuente: autores

Los elementos de información de rutas del sistema se encuentran en la parte superior de las puertas de las plataformas, y en la parte central del vagón anclados al techo. Los elementos de información de las puertas presentan la información específica de los horarios y rutas de vehículos que operan en esa puerta, así como señales que incentivan al usuario a hacer uso responsable del sistema, los elementos de información situados en la parte central del vagón muestran la

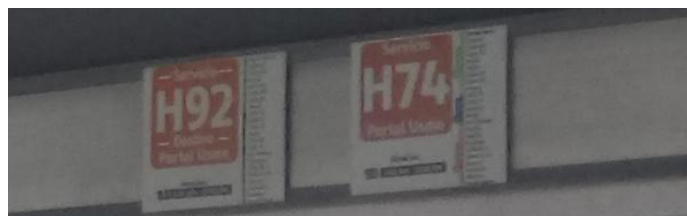
información relacionada con el número de identificación del vagón en el que se encuentra el usuario, y el número de identificación de los vagones adyacentes, acompañados por flechas de dirección, y los dígitos de identificación de los servicios troncales que se presentan en esos vagones, así como la ubicación de las salidas de la estación. Ambos tipos de elementos de información se encuentran en buen estado, siendo posible su identificación. Lo anterior se observa en la figura 23 y 24.

Figura 23. Elementos de información de rutas en el vagón



Fuente: autores

Figura 24. Elementos de información de rutas en puertas del vagón



Fuente: autores

Los elementos de información situados en las puertas se encuentran desactualizados, puesto que la información expuesta en estos (ver figura 24) no se encuentra en las aplicaciones y herramientas web de TransMilenio, dispuestas para los usuarios del sistema, ver figura 25.

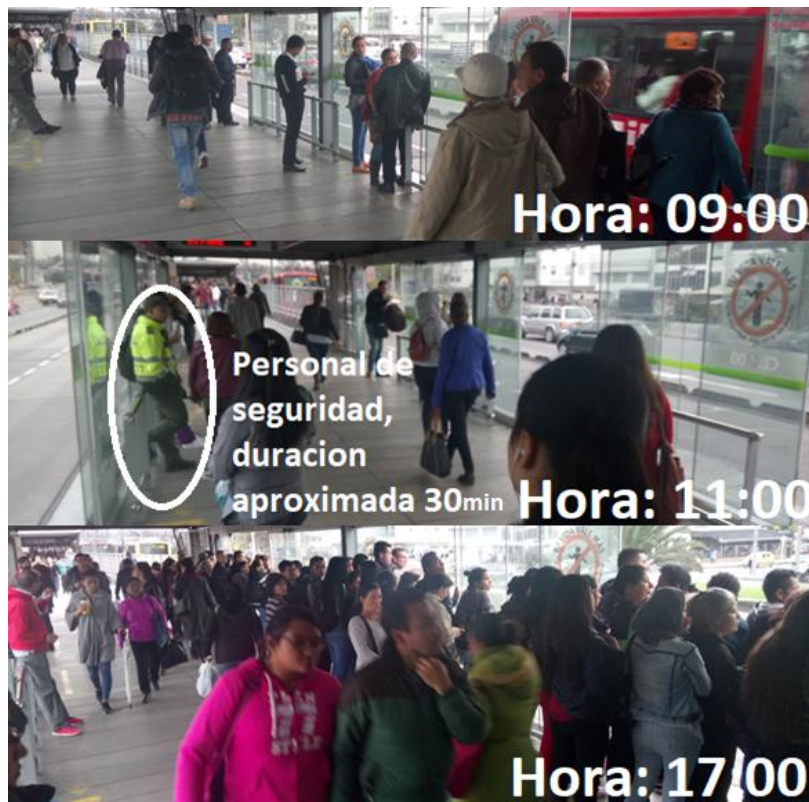
Figura 25. Rutas troncal H disponibles en aplicación TransMilenio y SITP

Sin Servicio H72 Toberín » Portal Usme L-S 05:30 am - 11:00 pm	Sin Servicio H83 Museo Nacional » Usme L-V 05:00 am - 11:00 pm D-F 06:00 am - 09:30 pm
Sin Servicio H73 Toberín » Portal Tunal L-V 05:30 am - 09:00 am L-V 04:30 pm - 08:00 pm	Sin Servicio J23 Portal Américas » Las Aguas L-V 04:00 am - 11:00 pm S 04:30 am - 11:00 pm
Sin Servicio H75 Portal Norte » Portal Usme L-S 05:00 am - 11:00 pm D-F 05:30 am - 10:00 pm	

Fuente: adaptado de aplicación TransMilenio y SITP (fecha de imagen 03/14/2018).

El vagón cuenta con elementos de iluminación situados de manera longitudinal sobre las zonas de espera, y son encendidos sobre las 17:00, el grado de intensidad aumenta a medida que transcurren las horas, el vagón no cuenta con elementos seguridad, como cámaras de vigilancia o botones de emergencia, a pesar de esto, hay presencia de personal de seguridad, por lo general uno, el cual no permanece de manera permanente en un vagón o plataforma. En la figura 26 se observa la variación de la presencia de este personal de seguridad.

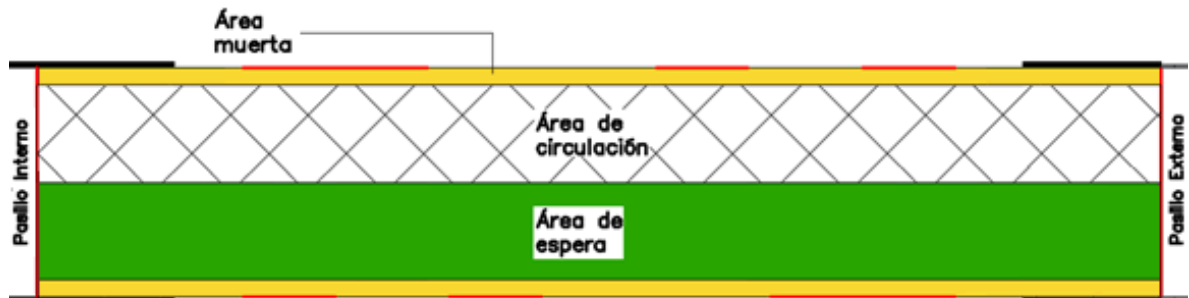
Figura 26. Presencia de personal de seguridad sobre la plataforma



Fuente: autores

Como se mencionó en el numeral 3.2.2. *Densidades* las dimensiones de la zona de espera son: el ancho es equivalente a la mitad del ancho del vagón menos el ancho efectivo del pretil – 1.7 m –; mientras que *la longitud total* es equivalente a la distancia entre vigas metálicas, situadas en los extremos de la plataforma (secciones de control 0 y 4, ver figura 19) – 19.60 m –. En la figura 27 se presentan las áreas que conforman el vagón estudio.

Figura 27. Áreas que conforman el vagón estudio



Fuente: autores

El área de espera es de 33.32 m², el área muerta es de 11.76 m², el área de circulación aproximada es de 33.32 m². Los elementos de circulación peatonal que conectan la plataforma con la estación están conformados por elementos horizontales *pasillos de circulación* uno cubierto (dentro del vagón o *pasillo interno*) y otro descubierto (entre los vagones 2 y 3 o *pasillo externo*), no hay presencia de una superficie para colas puesto que no hay elementos de circulación vertical o de recolección de tarifas (ver figuras 19 y 27). En el anexo G se presenta un ejemplo del dimensionamiento de las plataformas aplicando las metodologías expuestas en el numeral 2.4. *DISEÑO DE ESTACIONES* y considerando la información recopilada en campo.

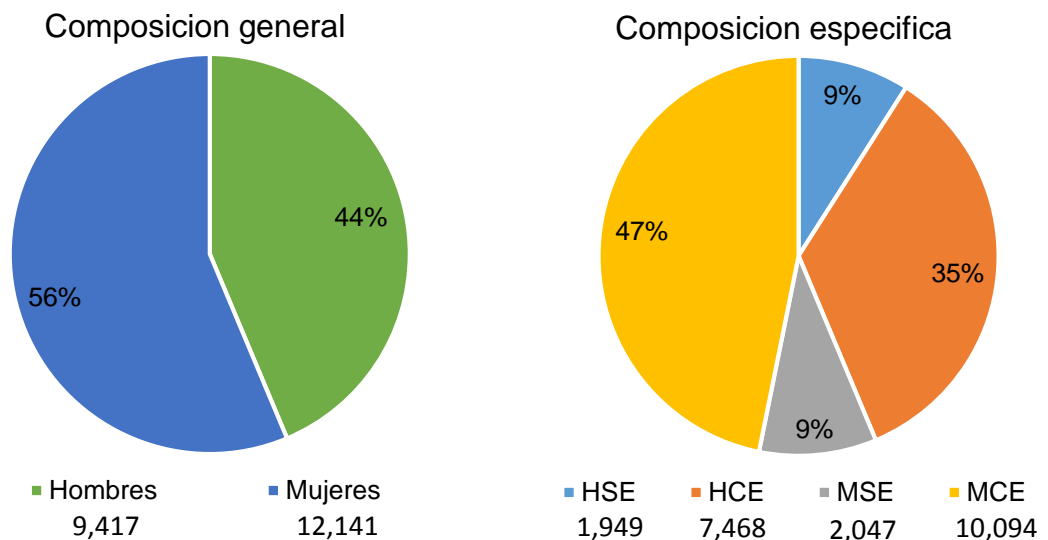
2.6. CARACTERIZACIÓN VOLÚMENES PEATONALES

A continuación, se encuentra el análisis referente a los datos de volúmenes peatonales, en el que se identifica la composición peatonal, comportamiento periódico y periodos de 5 min más cargados, hora de máxima demanda, su composición y distribución. Como se indica en el numeral 3.3. *METODOLOGÍA EN CAMPO*, se registró el número de personas y la trayectoria ejecutada, considerando las secciones de control establecidas en el numeral 3.3.2. *Volúmenes*.

2.6.1. Composición peatonal. Los volúmenes peatonales se componen por un 56 % de Mujeres y un 44 % de Hombres, según la tipología de peatones se encontró

que el 47 % corresponde a Mujeres con equipaje, 35 % a Hombres con equipaje, Mujeres sin equipaje y Hombres sin equipaje son las tipologías de menor porcentaje en la composición peatonal. En la figura 28 se encuentra la composición general y específica peatonal obtenida en los volúmenes peatonales.

Figura 28. Composición volúmenes peatonales.



Fuente: autores

En sentido Sur – Norte (movimiento 4-0), 10,512 personas ingresaron al área de estudio, representando el 48.76 % del total de la población, el restante, 51.23 % corresponde a la población que transita en sentido Norte – Sur (movimiento 0-4), siendo 11,046 personas. Del total de la población el 83.4 % de las personas hicieron uso del área de circulación (movimientos 4-0 y 0-4) (17,896 personas), mientras el 16.8 % restante hicieron uso del área de espera (movimientos de 4 y 0, a 1, 2 y 3) (3,662 personas). Lo anterior se evidencia en la figura 29, es importante destacar que las zonas de espera adyacentes a las puertas de los extremos (1 y 3) presentan mayor afluencia que la zona de espera adyacente a la puerta 2, y que la puerta de mayores dimensiones 3, a pesar de ser preferencial (ver numeral 3.5. *INVENTARIO DE LA PLATAFORMA*) es la más concurrida por parte de los usuarios.

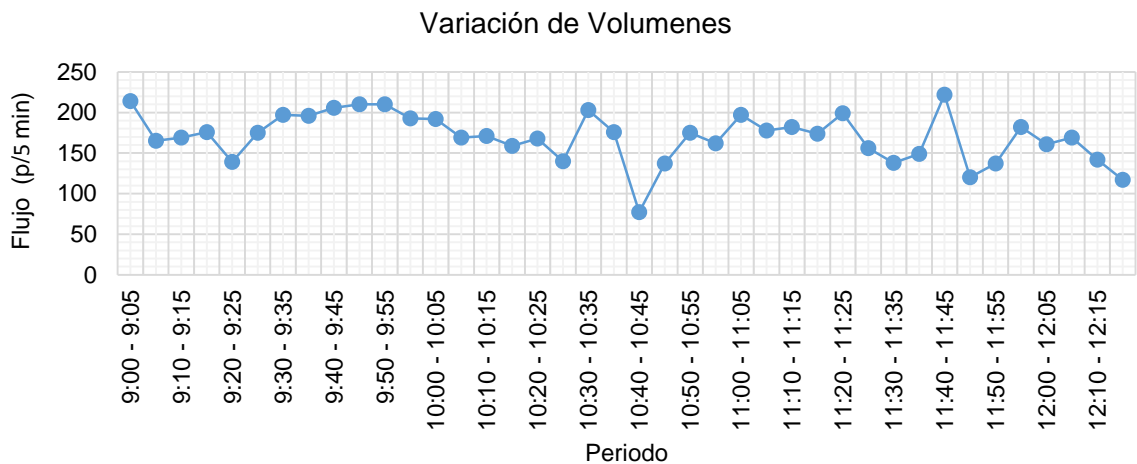
Figura 29. Composición por movimientos realizados volúmenes peatonales



Fuente: autores

2.6.2. Comportamiento periódico. En las figuras 30, 31 y 32 se muestra la variación de los volúmenes peatonales a lo largo del día. En la figura 30, se encuentra el periodo entre las 9:00 y 12:20, se evidencia un comportamiento regular entre las 9:30 y 10:05, entre las 11:40 y 11:45 se presenta el mayor pico con un flujo de 222 p/5 min y el menor flujo peatonal se da entre las 10:40 y 10:45 con 77 p/5 min. En los primeros 40 periodos (3 horas y 20 minutos), en mención 6685 personas transitaron por el área de circulación.

Figura 30. Variación de volúmenes peatonales 09:00 – 12:20

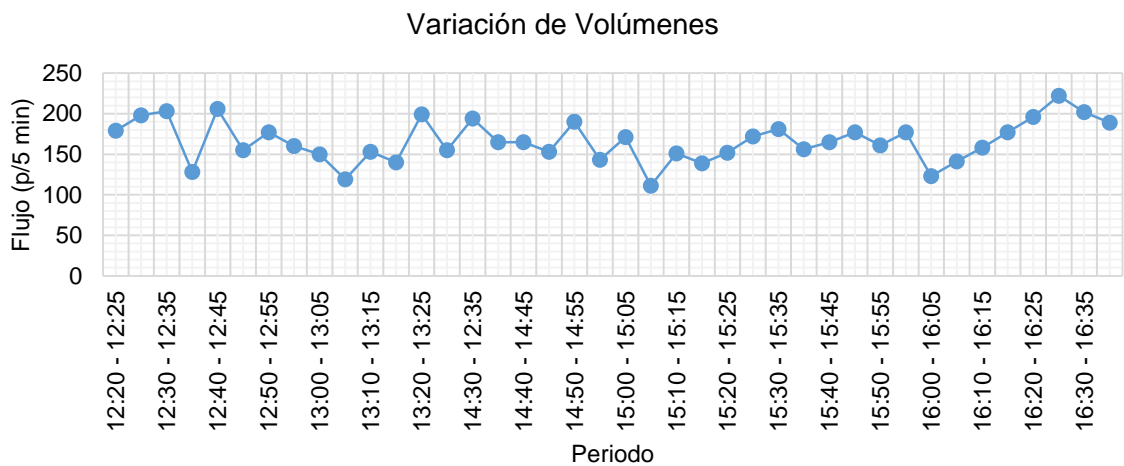


Fuente: autores

En la figura 31 se observa la variación de volúmenes entre las 12:20 y 16:40, se evidencia una mayor variación de los flujos peatonales hasta las 16:05, en donde el volumen presenta un crecimiento regular. Para el caso 6,581 personas transitaron

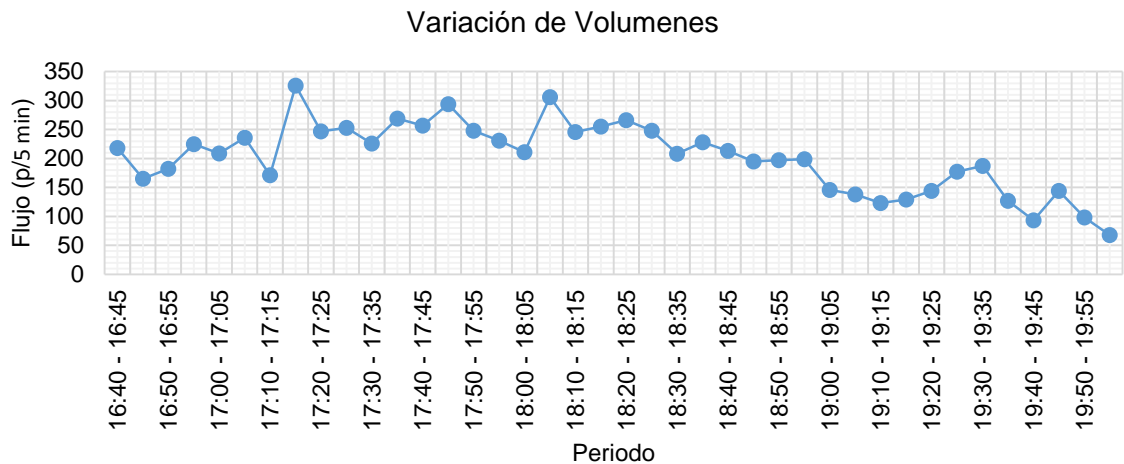
por la zona de estudio, encontrando que el mayor flujo se da entre las 16:25 - 16:30 siendo este de 222 p/5 min, por otro lado, el menor flujo es de 111 p/5 min, entre las 15:05 y 15:10. En la figura 32 se muestra la variación de los volúmenes entre las 16:40 y las 20:00, siendo esta la hora de finalización de la toma de información. Los volúmenes son mayores en horas de la tarde en el periodo comprendido entre las 16:30 y 19:00, destacando que dentro de este periodo se presenta la hora pico (17:15 – 18:15). El mayor pico se da en el periodo de 15:15 a 15:20 con un flujo de 326 p/5 min y el menor flujo peatonal es de 68 p/5 min encontrado entre las 19:55 y 20:00.

Figura 31. Variación de volúmenes peatonales 12:20 – 16:40



Fuente: autores

Figura 32. Variación de volúmenes peatonales 16:40 – 20:00



Fuente: autores

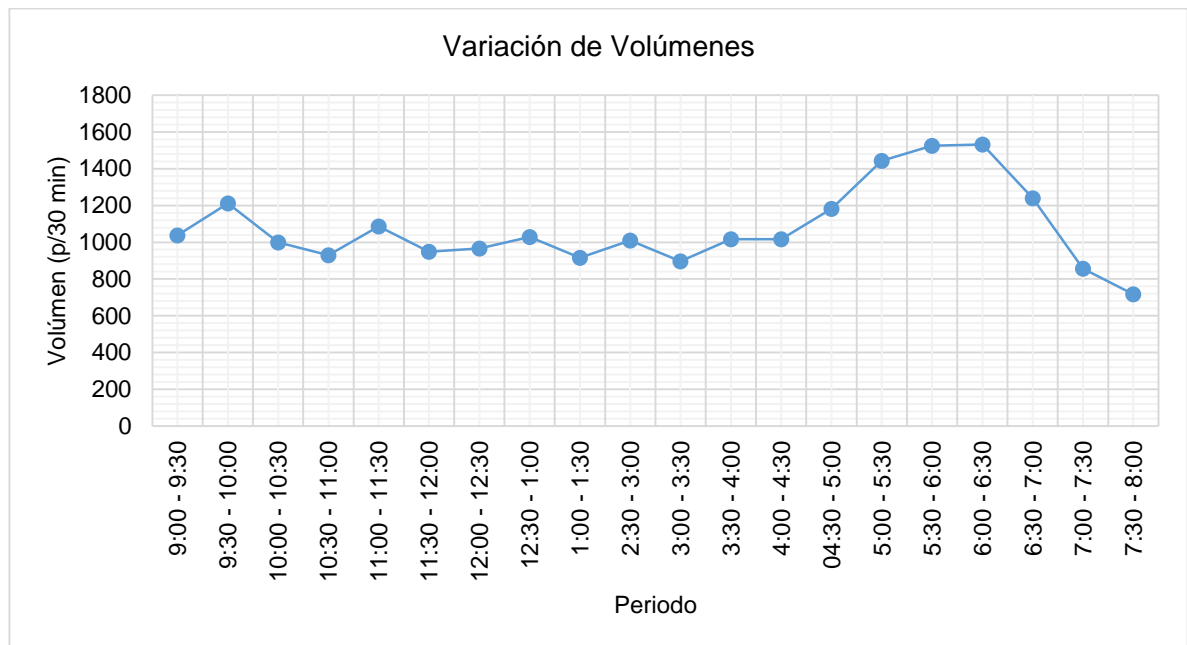
2.6.2.1. Hora pico. A lo largo del periodo aforado se encontró que 21,558 personas transitaron en el área de estudio, la hora pico se presenta entre las 17:15 y 18:15 con un volumen de 3,114 p/h, representado el 14 % del total aforado. El máximo flujo peatonal para para la hora pico se da en el periodo de las 17:15 – 17:20 y equivale a 326 p/5 min, por lo tanto, el factor de hora pico, considerando periodos de 5 min es:

$$FHP = \frac{3114}{12 * 326} = 0.79$$

El factor de hora pico es de 0.79, lo cual indica que a lo largo de la hora de máxima demanda la distribución de las tasas de flujo presenta un comportamiento homogéneo.

Adicionalmente, se encontró que la hora valle se presenta entre las 19:00 - 20:00, con un volumen de 1,574 p/h. En la figura 33 se muestra la variación de las tasas de flujo considerando periodos de 30 min, es posible observar el comportamiento general a lo largo de día, identificando que desde las 16:00 se presenta un aumento en las tasas de llegada de peatones que se mantiene hasta las 18:30, y decrece hasta las 20:00.

Figura 33. Variación general de tasas de flujo en periodos de 30 min.



Fuente: autores

2.7. CARACTERIZACIÓN VELOCIDADES PEATONALES

La velocidad una de las variables más importantes en el análisis de flujos peatonales, su medición es sencilla; para el caso, las velocidades sistemáticas tomadas en campo corresponden a velocidades de tipo media espacial y las velocidades no sistemáticas corresponden a velocidades de tipo media temporal, respecto a mediciones manuales, disgregando la población en las tipologías enunciadas en el numeral 3.3. *Metodología en Campo*. A continuación, se presentan los datos en mención. Es fundamental destacar que para el caso fueron estudiados dos tipos de velocidades, referenciadas en el numeral 3.3.3. *Velocidades*.

2.7.1. Velocidad pasajeros que circulan en la plataforma. A continuación, se muestran las velocidades asociadas a los usuarios que recorren toda el área de estudio, que no se detienen en el área de espera o áreas muertas, es decir los movimientos 4-0 y 0-4 (ver figura 17).

La velocidad representativa de circulación es de 0.99 m/s con una desviación estándar de 0.28 m/s y un error típico de 0.01 m/s. Según las tipologías peatonales las velocidades representativas son: MCE y MSE es de 0.97 m/s y 0.98 m/s respectivamente, mientras que para las tipologías HCE y HSE es de 1.00 m/s y 0.99 m/s respectivamente, siendo la velocidad de circulación peatonal representativa de 0.99 m/s, indicadores que son menores a la velocidad encontrada por MÁRQUEZ¹⁵⁹ (1.23 m/s en los accesos a las estaciones BRT en Ciudad de México – México), menores a la encontrada por DAVIDICH y KÖSTER¹⁶⁰ (1.10 m/s en estaciones de tren en Alemania) y mayores a las encontradas por PATRA¹⁶¹ (0.65 m/s en estaciones de tren en Hyderabad – India). Las velocidades de las tipologías con equipaje (MCE y HCE), sin equipaje (MSE y HSE), hombres y mujeres son menores a las encontradas por GUIO¹⁶² (velocidad peatonal de hombres 1.27 m/s, mujeres 1.23 m/s, peatón con paquetes 1.20 m/s, peatona sin paquetes 1.25 m/s encontradas en infraestructuras peatonales en Tunja – Colombia). A continuación, se presenta el análisis estadístico que permite determinar estos valores.

2.7.1.1. Velocidades de circulación Mujeres. En la tabla 11 se encuentran los estadísticos descriptivos obtenidos para las velocidades MCE, se observa que presentan una distribución de tipo leptocúrtica, con concentración de datos por debajo de la media, lo cual se evidencia en el histograma de la figura 37; el

¹⁵⁹ MÁRQUEZ. Op. cit., p. 90.

¹⁶⁰ DAVIDICH y KÖSTER. Op. cit., p. 3.

¹⁶¹ PATRA, Monalisa; SALA, Eswar y RAVISHANKAR, K.V.R. Evaluation of pedestrian flow characteristics across different facilities inside a railway station. En: World Conference on Transport Research (6: 7-16, Julio, Shanghai). 2016. p. 4766.

¹⁶² GUIO. Op. cit., p. 77.

coeficiente de variación es del 22.07 % por lo que los datos no presentan una dispersión elevada. La media o promedio de los datos es 1.04 m/s y representa la suma de las observaciones dividida entre el número total de observaciones, siendo usado este valor para su análisis estadístico cuando es una distribución de tipo normal, de no ser así se debe usar la mediana de los datos; la mediana o valor medio de los datos es 0.97 m/s y representa el valor que se encuentra en el lugar central de los datos, dejando la misma cantidad de observaciones por encima y por debajo de este valor. La moda del conjunto de datos es de 0.91 m/s, siendo entonces este el valor de velocidad más repetido o frecuente. La dispersión de los datos respecto a la media o desviación estándar es de 0.24 m/s, este parámetro indica que tan dispersos están los datos con respecto a la media. El coeficiente de asimetría es de 2.03, indicando una distribución unilateral que se extiende hacia valores más positivos. El número total de datos para el conjunto de MCE es de 736 datos siendo el valor mínimo de 0.74 m/s y el máximo de 2.45 m/s; la suma de los datos es 766.31 m/s. Según los cuartiles el 25 % de las velocidades peatonales son iguales o inferiores a 0.89 m/s y otro 25 % de ellas son superiores a 1.10 m/s.

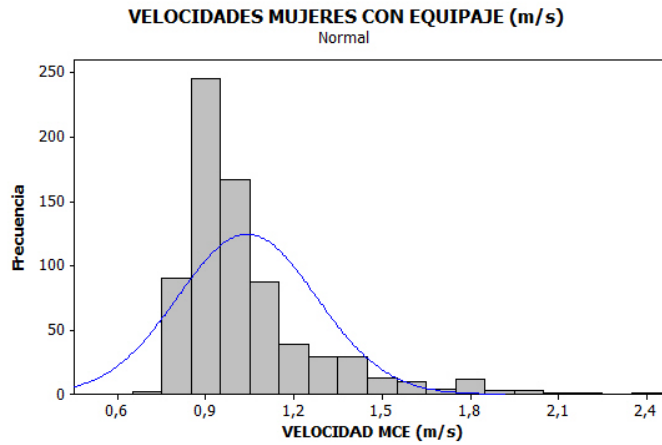
Tabla 11. Estadísticos descriptivos velocidades de circulación MCE

Medida	Valor	Medida	Valor
Media (m/s)	1.04	Coeficiente de asimetría	2.03
Error típico (m/s)	0.01	Rango (m/s)	1.71
Mediana (m/s)	0.97	Mínimo (m/s)	0.74
Moda (m/s)	0.91	Máximo (m/s)	2.45
Desviación estándar (m/s)	0.24	Suma (m/s)	766.31
Varianza de la muestra	0.06	Conteo total	736
Coeficiente de variación	0.23	Q1 (m/s)	0.89
Curtosis	4.98	Q3 (m/s)	1.11

Fuente: autores

El histograma de la figura 34 muestra la distribución de velocidades MCE, gran parte de los datos se encuentran por debajo de la media. Las velocidades con mayor frecuencia son las cercanas a los 0.9 m/s y las de menor frecuencia son las cercanas a los 2 m/s.

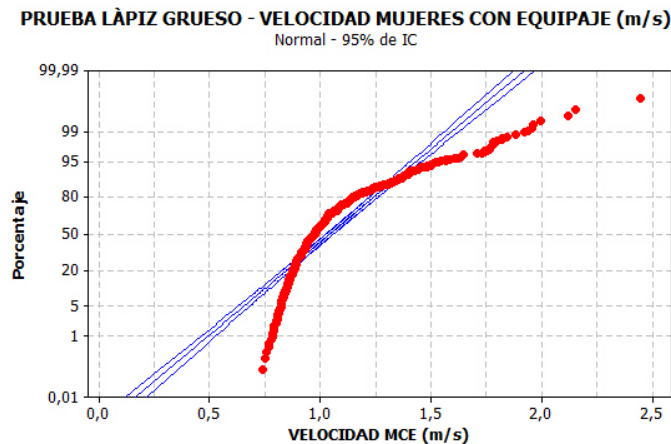
Figura 34. Histograma de velocidades de circulación MCE



Fuente: autores

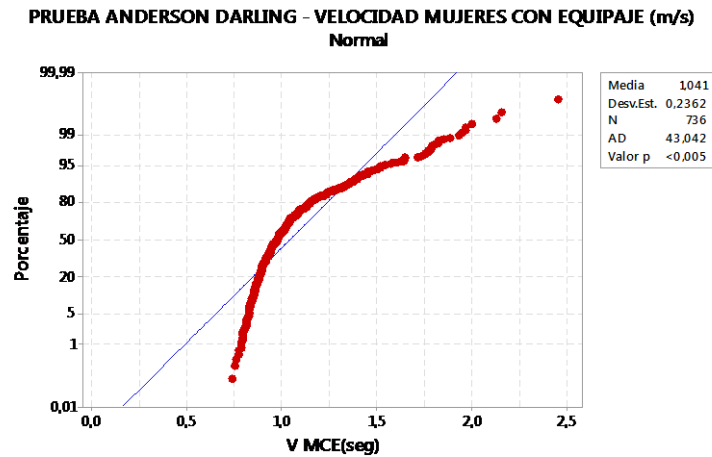
En la figura 35 se encuentra la prueba de lápiz grueso realizada para las observaciones de velocidad de MCE, se evidencia que los datos no presentan comportamiento normal, puesto que gran parte de los valores de las velocidades están distantes de las líneas de referencia. En la figura 36 se muestran los resultados obtenidos al aplicar la prueba de normalidad de Anderson Darling, de donde se concluye que las observaciones no tienen comportamiento normal, dado que su p es < 0.005 . El conjunto de datos de velocidades MCE no presenta una distribución normal, siendo su mediana de 0.97 m/s.

Figura 35. Prueba de lápiz grueso para velocidades de circulación MCE



Fuente: autores

Figura 36. Prueba de Anderson – Darling para velocidades de circulación MCE



Fuente: autores

En la tabla 12 se encuentran los estadísticos descriptivos obtenidos para las velocidades correspondientes a MSE, se observa que presentan una distribución leptocúrtica, con concentración de datos por debajo de la media. El coeficiente de variación es del 25.90 % e indica que la dispersión de los datos no es alta. El primer cuartil indica que el 25 % de las velocidades peatonales son iguales o inferiores a 0.918 m/s y el tercer cuartil establece que el 25 % de las velocidades son superiores a 1.116 m/s.

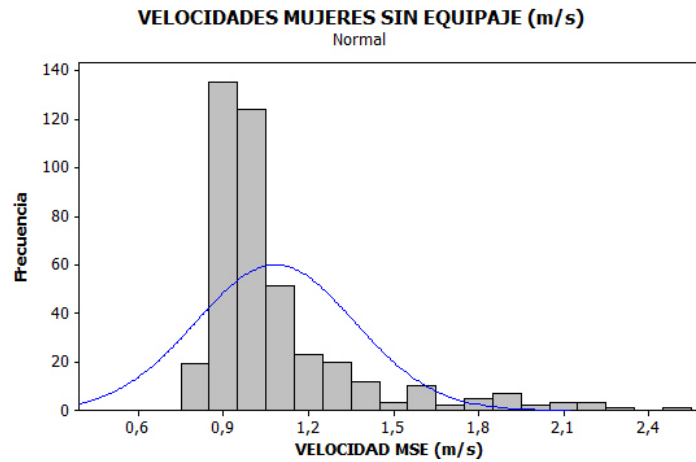
Tabla 12. Estadísticos descriptivos velocidades de circulación MSE

Medida	Valor	Medida	Valor
Media (m/s)	1.08	Coefficiente de asimetría	2.28
Error típico (m/s)	0.01	Rango (m/s)	1.66
Mediana (m/s)	0.98	Mínimo (m/s)	0.79
Moda (m/s)	0.93	Máximo (m/s)	2.45
Desviación estándar (m/s)	0.28	Suma (m/s)	455.95
Varianza de la muestra	0.08	Conteo total	421
Coefficiente de variación	0.26	Q1 (m/s)	0.92
Curtosis	5.46	Q3 (m/s)	1.12

Fuente: autores

El histograma de la figura 37, permite identificar que hay una mayor concentración de velocidades inferiores a la media (1.08 m/s), en valores cercanos a los 0.9 m/s y 1 m/s.

Figura 37. Histograma de velocidades de circulación MSE



Fuente: autores

En el anexo digital 6 se encuentra la prueba de lápiz grueso realizada para las observaciones de velocidad MSE, se evidencia que las observaciones no presentan comportamiento normal, gran parte de estas se encuentran distantes de las líneas ajustadas de referencia. En el anexo digital 7 se muestran los resultados obtenidos al aplicar la prueba de normalidad de Anderson Darling, de donde se concluye que las observaciones no tienen comportamiento normal, ya que se encuentra el $p < 0.005$.

2.7.1.2. Velocidades de circulación Hombre. En la tabla 13 se encuentran los estadísticos descriptivos obtenidos para la muestra de velocidades de la población HCE se observa que presentan una distribución leptocúrtica, con concentración de datos por debajo de la media, por su parte el coeficiente de variación es del 25.94 %, lo cual indica que la dispersión de los datos no es alta.

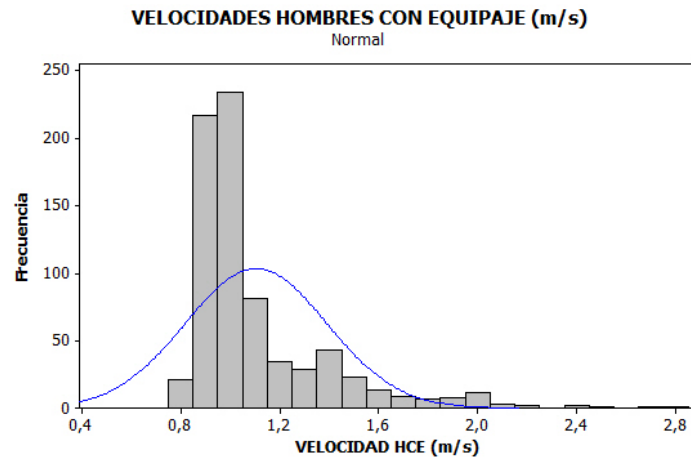
Tabla 13. Estadísticos descriptivos velocidades de circulación HCE

Medida	Valor	Medida	Valor
Media	1.10	Coeficiente de asimetría	2.19
Error típico	0.01	Rango	2.01
Mediana	1.00	Mínimo	0.79
Moda	1.01	Máximo	2.80
Desviación estándar	0.29	Suma	818.54
Varianza de la muestra	0.08	Conteo total	741
Coeficiente de variación	0.26	Q1	0.93
Curtosis	5.71	Q3	1.15

Fuente: autores

El histograma de la figura 38, permite identificar que hay una mayor concentración de velocidades inferiores a la media (1.104 m/s), en valores cercanos a los 0.9 m/s y 1.1 m/s.

Figura 38. Histograma de velocidades de circulación HCE



Fuente: autores

En el anexo digital 8 se encuentra la prueba de lápiz grueso realizada para las observaciones de velocidad peatonal, se evidencia que las observaciones no presentan comportamiento normal, puesto que gran parte de las observaciones se encuentran distantes de las líneas de ajuste correspondiente. En el anexo digital 9 se encuentran los resultados obtenidos al aplicar la prueba Anderson Darling, las observaciones no tienen comportamiento normal, ya que se encuentra el $p < 0.005$.

En la tabla 14 se encuentran los estadísticos descriptivos obtenidos para la muestra de velocidades de la población correspondiente HSE, se observa que presentan una distribución leptocúrtica, con concentración de datos por debajo de la media, el coeficiente de variación es del 27.80 %, lo cual indica que la dispersión de los datos no es alta. El 25 % de las velocidades peatonales son iguales o inferiores a 0.90 m/s y el tercer cuartil establece que el 25 % de las velocidades son superiores a 1.15 m/s.

Tabla 14. Estadísticos descriptivos velocidades de circulación HSE.

Medida	Valor	Medida	Valor
Media (m/s)	1.10	Coefficiente de asimetría	1.92
Error típico (m/s)	0.01	Rango (m/s)	1.75
Mediana (m/s)	0.99	Mínimo (m/s)	0.70
Moda (m/s)	0.89	Máximo (m/s)	2.45
Desviación estándar (m/s)	0.31	Suma (m/s)	550.53

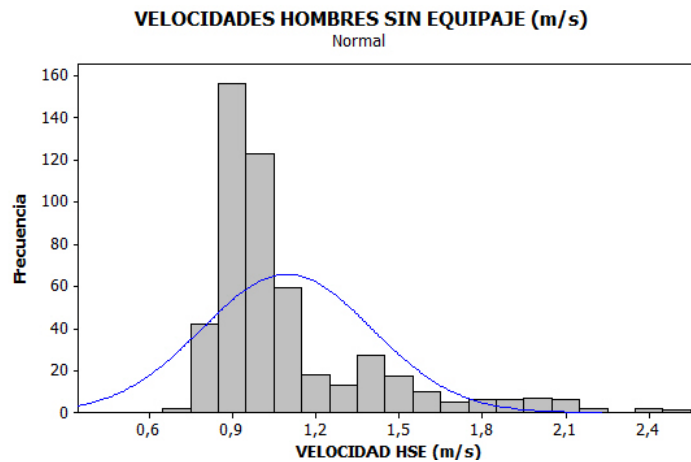
Tabla 14. (Continuación)

Medida	Valor	Medida	Valor
Varianza de la muestra	0.09	Conteo total	502
Coefficiente de variación	0.28	Q1 (m/s)	0.90
Curtosis	3.63	Q3 (m/s)	1.15

Fuente: autores

El histograma de la figura 39, permite identificar que hay una mayor concentración de velocidades inferiores a la media (1.097 m/s), en valores cercanos a los 0.8 m/s y 1.1 m/s. En el anexo digital 10 se encuentra la prueba de lápiz grueso realizada para las observaciones de velocidad HSE, en este caso se evidencia que las observaciones no presentan comportamiento normal, puesto que gran parte de las observaciones se encuentran distantes de las líneas ajustadas de referencia. En el anexo digital 11 se muestran los resultados obtenidos al aplicar la prueba de normalidad Anderson Darling, de la cual se concluye, que las observaciones no tienen comportamiento normal, ya que se encuentra el $p < 0.005$.

Figura 39. Histograma de velocidades de circulación HSE.



Fuente: autores

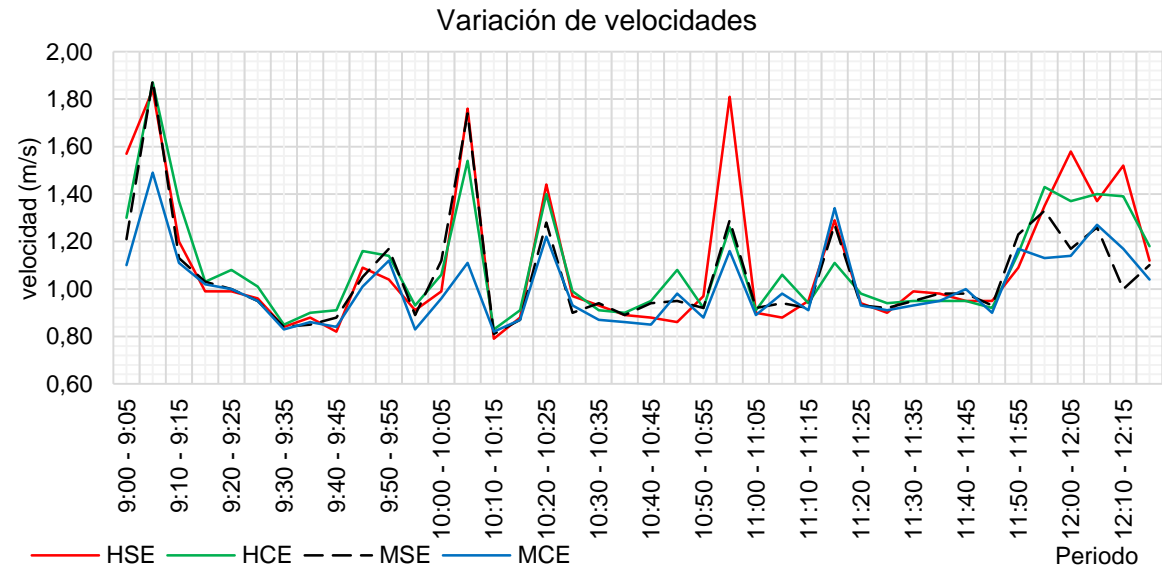
2.7.2. Comportamiento periódico. A lo largo del día se presentaron diferentes comportamientos de velocidad sobre la plataforma, para cada uno de los grupos de población ya mencionados. A continuación, se analiza la variación de estas observaciones y su incidencia en el flujo peatonal. En general, la mayor velocidad promedio para el total de la población en estudio es de 1.89 m/s, obtenida entre las 19:25 y 19:30. Entre las 10:10 y 10:15 se presenta la menor velocidad promedio, siendo esta de 0.81 m/s. Es fundamental destacar que dentro de las 17:00 y las 19:30 se presenta un comportamiento de velocidades similar, con presencia de pequeños picos, en este intervalo se encuentra la hora pico y los mayores flujos

peatonales, por su parte después de las 19:30 las velocidades son mayores debido a la disminución del flujo peatonal.

En la figura 40 se muestra la variación de velocidades entre las 9:00 y las 12:25, entre las 9:05 y 9:10 para las categorías HSE, HCE y MSE se las mayores velocidades (mayores a 1.8 m/s), se evidencia que la mayor velocidad presentada por MCE es inferior a estas 3 categorías (1.49 m/s). La menor velocidad dentro del periodo mostrado la presenta la categoría HSE (0.79 m/s), seguida por MSE (0.81 m/s). Las velocidades promedio para cada categoría dentro del periodo mostrado fueron 1.09 m/s para HSE, 1.09 m/s para HCE, 1.06 m/s para MSE y 1.0 m/s para MCE, siendo así los Hombres los de mayores velocidades en las horas relacionadas.

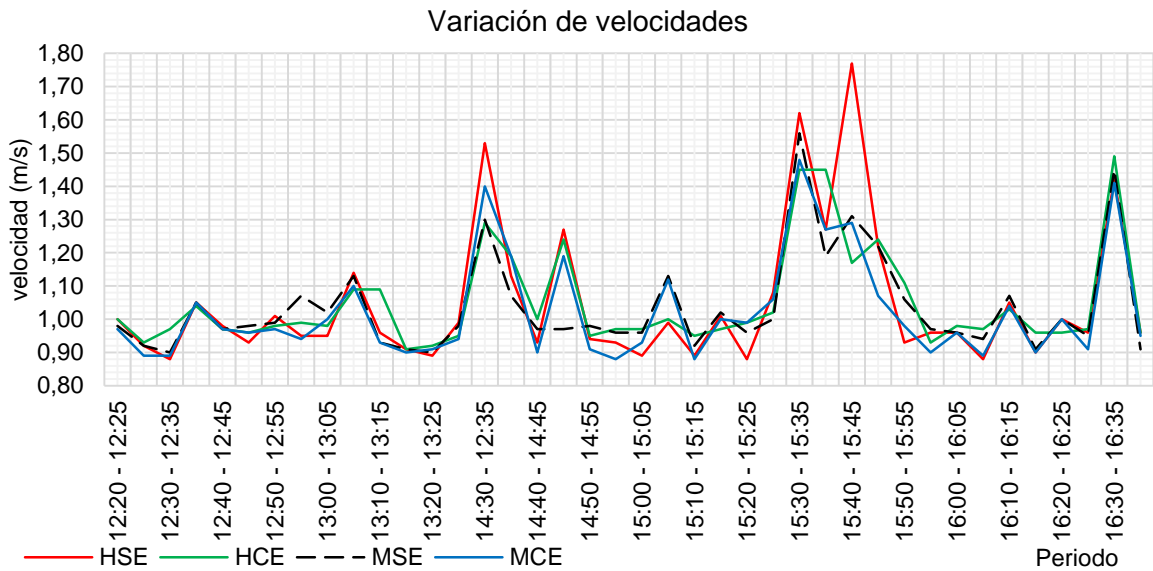
En la figura 41 se muestra la variación de velocidades entre las 12:20 y las 16:40, los HSE presentan un gran pico entre las 15:40 y 15:45, alcanzando una velocidad de 1.77 m/s, siendo este el mayor valor entre las horas mencionadas. Para el caso de los HCE la mayor velocidad es de 1.49 m/s, de MCE es de 1.48 m/s y de MSE de 1.56 m/s. Las velocidades encontradas entre las 12:20 y 16:40, son menores a las obtenidas entre las 9:00 y 12:20, esta reducción está asociada al incremento de los flujos peatonales observados previamente (ver figura 34).

Figura 40. Variación de velocidades de circulación 09:00 – 12:20



Fuente: autores

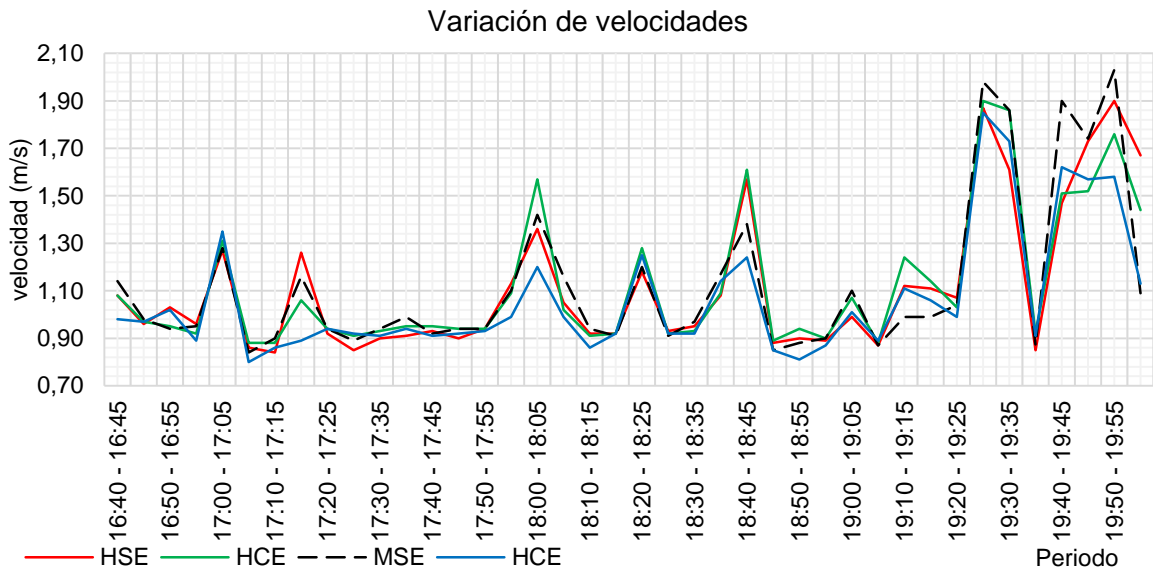
Figura 41. Variación de velocidades de circulación 12:20 – 16:40



Fuente: autores

La variación de velocidades mostrada en la figura 42 corresponde a la comprendida entre las 16:40 y 20:00, las velocidades son superiores a las observadas en las figuras 40 y 41, mostrando picos entre las 19:20 y 19:55 (después del descenso de los flujos peatonales, ver figura 33), la categoría con mayores velocidades son MSE, (2.03 m/s), HSE y HCE (1.90 m/s), MCE presenta la menor velocidad máxima (1.85 m/s). La menor velocidad encontrada en estas horas fue de 0.80 m/s, correspondiente a MCE.

Figura 42. Variación de velocidades de circulación 16:40 – 20:00



Fuente: autores

2.7.3. Velocidad pasajeros que descienden en la plataforma. El presente título contiene el análisis de las velocidades de los usuarios que realizan los movimientos 1-0, 1-4, 2-0, 2-4, 3-0 y 3-4 (ver figura 17 y tabla 6), es importante recordar que fueron recopiladas en campo de manera no sistemática (ver numeral 3.3.3. *Velocidades*).

La velocidad representativa de descenso es de 1.12 m/s con una desviación estándar de 0.41 m/s y un error típico de 0.03 m/s. Según las tipologías peatonales las velocidades representativas son: MCE y MSE es de 1.20 m/s y 1.08 m/s respectivamente, mientras que para las tipologías HCE y HSE es de 1.07 m/s y 1.31 m/s respectivamente, siendo la velocidad de circulación peatonal representativa de 1.17 m/s, velocidades que son mayores a las encontradas por PATRA¹⁶³, en el caso de las tipologías MSE y HCE son menores a las encontradas por DAVIDICH y KÖSTER¹⁶⁴. A continuación, se presenta el análisis estadístico que permite determinar estos valores.

2.7.3.1. Velocidades de descenso Mujeres. En la tabla 15 se encuentran los estadísticos descriptivos obtenidos para la muestra de velocidades de MCE, se observa que presentan una distribución leptocúrtica, con concentración de datos por debajo de la media, como se muestra en el histograma de la figura 43; el coeficiente

¹⁶³ PATRA; SALA y RAVISHANKAR. Op. cit., p. 4766.

¹⁶⁴ DAVIDICH y KÖSTER. Op. cit. p. 3.

de variación es del 41 %, lo cual indica que los datos presentan un grado notable de dispersión.

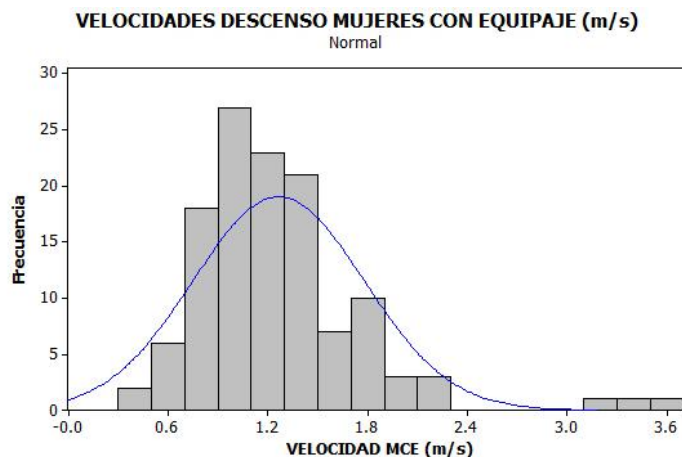
Tabla 15. Estadísticos descriptivos velocidades de descenso MCE.

Medida	Valor	Medida	Valor
Media	1.26	Coeficiente de asimetría	1.82
Error típico	0.05	Rango	3.22
Mediana	1.20	Mínimo	0.40
Moda	1.44	Máximo	3.62
Desviación estándar	0.52	Suma	155.55
Varianza de la muestra	0.27	Conteo total	123
Coeficiente de variación	0.41	Q1	0.95
Curtosis	5.91	Q3	1.45

Fuente: autores

El histograma de la figura 43 muestra las velocidades MCE, en este se corrobora lo dicho anteriormente, gran parte de los datos se encuentran por debajo de la media. Las velocidades que tienen mayor frecuencia durante el día son las cercanas a 1 m/s – 1.2 m/s. En el anexo digital 12 se encuentra la prueba de lápiz grueso realizada para las observaciones de velocidad de descenso MCE, se evidencia que las observaciones no presentan comportamiento normal, puesto que parte de las observaciones se encuentran por fuera de las líneas de ajuste. En el anexo digital 13 se muestran los resultados obtenidos al aplicar la prueba de Anderson Darling, de donde se concluye que las observaciones no tienen comportamiento normal, ya que el p es < 0.005 . El conjunto de velocidades de descenso MCE no presenta una distribución normal, siendo su mediana de 1.20 m/s.

Figura 43. Histograma de velocidades de descenso MCE.



Fuente: autores

En la tabla 16 se encuentran los estadísticos descriptivos obtenidos para la muestra MSE, se observa que presentan una distribución normal, con concentración de datos cercana a la media, con tendencia simétrica, el coeficiente de variación es del 27 %, lo cual indica que la dispersión de los datos no es alta.

Tabla 16. Estadísticos descriptivos velocidades de descenso MSE.

Medida	Valor	Medida	Valor
Media (m/s)	1.08	Coefficiente de asimetría	0.02
Error típico (m/s)	0.06	Rango (m/s)	1.13
Mediana (m/s)	1.08	Mínimo (m/s)	0.51
Moda (m/s)	1.00	Máximo (m/s)	1.64
Desviación estándar (m/s)	0.29	Suma (m/s)	22.60
Varianza de la muestra	0.08	Conteo total	21
Coefficiente de variación	0.27	Q1 (m/s)	0.90
Curtosis	-0.25	Q3 (m/s)	1.27

Fuente: autores

El histograma de la figura 44, permite identificar que hay una concentración de velocidades cercanas a la media, presentando un comportamiento normal, los valores se distribuyen y ajustan al pico y las colas de manera adecuada. En el anexo digital 14 se encuentra la prueba de lápiz grueso para las observaciones de velocidad de descenso MSE, se evidencia que las observaciones presentan comportamiento normal, puesto que todas las observaciones se encuentran dentro de las líneas de ajuste. En el anexo digital 15 se muestran los resultados obtenidos de la prueba de Anderson Darling, de donde se concluye que las observaciones tienen comportamiento normal, ya que se encuentra el $p = 0.918$. Las velocidades de descenso MSE presentan una distribución normal, siendo su media de 1.08 m/s.

Figura 44. Histograma de velocidades de descenso MSE.



Fuente: autores

2.7.3.2. Velocidades de descenso Hombres. En la tabla 17 se encuentran los estadísticos descriptivos de la población correspondiente a la muestra HCE, se observa que presentan una distribución leptocúrtica, con concentración de datos por encima de la media, como se muestra en el histograma de la figura 48; por su parte el coeficiente de variación es del 40 %, lo cual indica que los datos presentan dispersión.

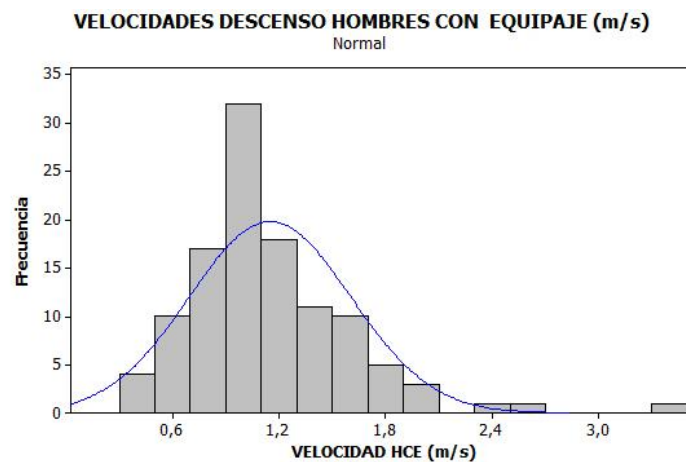
Tabla 17. Estadísticos descriptivos velocidades de descenso HCE.

Medida	Valor	Medida	Valor
Media (m/s)	1.15	Coefficiente de asimetría	1.44
Error típico (m/s)	0.07	Rango (m/s)	2.94
Mediana (m/s)	1.07	Mínimo (m/s)	0.38
Moda (m/s)	1.03	Máximo (m/s)	3.32
Desviación estándar (m/s)	0.46	Suma (m/s)	129.90
Varianza de la muestra	0.21	Conteo total	113
Coefficiente de variación	0.40	Q1 (m/s)	0.86
Curtosis	4.21	Q3 (m/s)	1.38

Fuente: autores

El histograma de la figura 45, permite identificar que hay una mayor concentración de velocidades inferiores a la media, en valores cercanos a 1 m/s. Se presentan velocidades mayores a 2.5 m/s con poca frecuencia, al igual que se muestra en la figura 46 para el caso de MCE; las velocidades de mayor frecuencia son las cercanas a 1.0 m/s.

Figura 45. Histograma de velocidades de descenso HCE.



Fuente: autores

En el anexo digital 16 se encuentra la prueba de lápiz grueso realizada para las observaciones de velocidad de descenso HCE, se evidencia que las observaciones no presentan comportamiento normal, parte de las observaciones se encuentran por fuera de las líneas de ajuste correspondientes. En el anexo digital 17 se muestran los resultados obtenidos al aplicar la prueba Anderson Darling, de la cual se concluye que las observaciones no tienen comportamiento normal, ya que se encuentra el $p < 0.005$. Para esta categoría se tiene entonces que los datos no presentan una distribución normal, siendo su mediana de 1.07 m/s.

En la tabla 18 se encuentran los estadísticos descriptivos obtenidos para la muestra HSE, se observa que presentan una distribución normal, con concentración de datos cercana a la media, con tendencia simétrica, por su parte el coeficiente de variación es del 40 %, lo que indica que los datos presentan una dispersión notable.

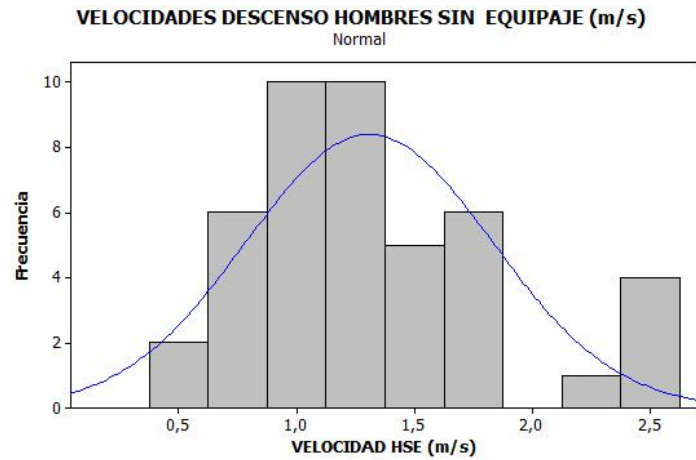
Tabla 18. Estadísticos descriptivos velocidades de descenso HSE.

Medida	Valor	Medida	Valor
Media	1.31	Coeficiente de asimetría	0.71
Error típico	0.08	Rango	1.88
Mediana	1.24	Mínimo	0.52
Moda	1.26	Máximo	2.40
Desviación estándar	0.52	Suma	57.53
Varianza de la muestra	0.27	Conteo total	44
Coeficiente de variación	0.40	Q1	0.95
Curtosis	-0.05	Q3	1.63

Fuente: autores

El histograma de la figura 43, permite identificar que hay una mayor concentración de velocidades cerca a la media, hay gran frecuencia de velocidades entre los 0.5 m/s y 1.5 m/s. En el anexo digital 18 se encuentra la prueba de lápiz grueso realizada para las observaciones de velocidad de descenso HSE, en este caso es difícil identificar si las velocidades presentan una distribución normal. En el anexo digital 19 se muestran los resultados obtenidos al aplicar la prueba Anderson Darling, de la cual se concluye que las observaciones no tienen un comportamiento normal, ya que se encuentra el $p = 0.019$ menor al nivel de significancia ($p=0.05$). Para esta categoría se tiene entonces que los datos presentan una distribución normal, siendo su mediana de 1.24 m/s.

Figura 46. Histograma de velocidades de descenso HSE.



Fuente: autores

2.7.4. Pruebas de hipótesis entre velocidades. Se realizó un contraste entre las velocidades peatonales, según el género y tipo (de circulación y de descenso), considerando los resultados expuestos anteriormente, los cuales se presentan de manera resumida en la tabla 19, empleado la siguiente ecuación¹⁶⁵:

$$Z_{Calculado} = \frac{(X_1 - X_2)}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}$$

En dónde; $Z_{Calculado}$ = estadístico observado, X_1 y X_2 = mediana/media de las observaciones (según los resultados de la prueba de normalidad), S_1 y S_2 = *desviación estándar muestral de las observaciones* y n_1 y n_2 = tamaño muestral de las observaciones (debe ser mayor o igual a 30).

Tabla 19. Estadísticos descriptivos resumidos de velocidades

Tipo de Velocidad	Categoría	Mediana (m/s)	Desv. Estándar (m/s)	Tamaño muestral
Circulación	HSE	0.99	0.31	502
	HCE	1.00	0.29	741
	MSE	0.98	0.28	421
	MCE	0.97	0.24	736

¹⁶⁵ Pruebas de hipótesis para dos muestras. [En línea] Citado el 30 de marzo de 2018. Disponible en < <http://www.geociencias.unam.mx/~ramon/EstInf/Clase15.pdf> >

Tabla 19. (Continuación)

Tipo de Velocidad	Categoría	Mediana (m/s)	Desv. Estándar (m/s)	Tamaño muestral
Descenso	MCE	1.20	0.52	123
	HCE	1.07	0.46	113
	HSE	1.24	0.52	44
Tipo de Velocidad	Categoría	Media (m/s)	Desv. Estándar (m/s)	Tamaño muestral
Descenso	MSE	1.08	0.29	21

Fuente: autores

Los siguientes criterios son establecidos para la ejecución de las pruebas de hipótesis entre velocidades peatonales.

• Hipótesis: *H-nula* H_0 : Las velocidades medias son iguales; $X_1 = X_2$. *H-alternativa* H_1 : Las velocidades medias son diferentes; $X_1 \neq X_2$

• Se acepta H_0 si $Z_{\text{Calculado}} \leq Z_{\text{Teorico}}$. Se rechaza H_1 si $Z_{\text{Calculado}} > Z_{\text{Teorico}}$

• Z_{Teorico} de 1.96 establecido para un nivel de confianza del 95 %

Los resultados del estadístico observado $Z_{\text{Calculado}}$ para las velocidades de circulación se encuentran en la tabla 20, y para las velocidades de descenso en la tabla 21. En el caso de las hipótesis entre velocidades de circulación, se encuentra que estadísticamente con un nivel de confianza del 95 % que las velocidades: HSE es igual a HCE y MSE, que la velocidad MSE es igual a la velocidad MCE, y que los HCE son significativamente más rápidos que las MCE, lo anterior se encuentra en la tabla 20.

Tabla 20. Resultados de estadístico observado $Z_{\text{Calculado}}$ velocidades de circulación

Comparación entre velocidades	Z Calculado
HSE - HCE	-0,57
HSE - MSE	0,51
MSE - MCE	0,61
MCE - HCE	-2,17

Fuente: autores

En el caso de las hipótesis entre velocidades de circulación, se encuentra que estadísticamente con un nivel de confianza del 95 %: que la velocidad HSE es significativamente mayor a la velocidad HCE, que la velocidad HCE es significativamente menor a la velocidad MCE, lo anterior se encuentra en la tabla 21.

Tabla 21. Resultados de estadístico observado $Z_{\text{Calculado}}$ velocidades de descenso

Comparación entre velocidades	Z Calculado
HSE - HCE	1,90
HCE - MCE	-2,04

Fuente: autores

2.8. CARACTERIZACIÓN DENSIDADES PEATONALES

A continuación, se presenta el análisis de las densidades peatonales sobre la zona de espera de la plataforma, indicando las variables que inciden en su determinación *ancho efectivo*, el comportamiento periódico a lo largo del día y el nivel de apretujamiento durante la hora pico de la plataforma.

2.8.1.1. Determinación del ancho efectivo para densidades peatonales en la zona de espera. El ancho efectivo de las superficies para la medición de densidades sobre la zona de espera es considerado teniendo en cuenta la mitad del ancho total del vagón (ver numeral 3.3.4. *Densidades*) y la suma de los anchos y distancias que obstruyen la circulación, con la siguiente ecuación¹⁶⁶:

$$W_E = W_T - W_o (m)$$

En dónde; W_E = ancho efectivo, W_T = ancho total y W_o = suma de anchos de elementos que obstruyen la circulación.

La suma de los anchos de los elementos que obstruyen la circulación es seleccionada con base en la literatura, y se mantiene durante todo periodo aforado, $W_o = 0.3$ m (correspondiente al pretil de un costado del vagón). Por lo que el ancho efectivo para la medición y el cálculo de las densidades sobre la zona de espera, se mantendrá constante durante todos los periodos de 5 min, este valor es de 1.7 m.

¹⁶⁶ TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Highway Capacity Manual 2010, Op. cit., p. 23-9.

2.8.1.2. Análisis estadístico. En la tabla 22 se encuentran los estadísticos descriptivos obtenidos para la muestra de densidades sobre la zona de espera. Se observa que los datos presentan una distribución leptocúrtica con una concentración de densidades por debajo de la media, lo cual se evidencia en el histograma de la figura 47. La desviación estándar indica que las densidades presentan una dispersión alta ya que el coeficiente de variación es de 62.56 %. El primer cuartil indica que el 25 % de las densidades peatonales son iguales o inferiores a 0.98 p/m² (espacio peatonal de 1.02 m²/p), y el tercer cuartil establece que el 25 % de las densidades son superiores a 2.44 p/m² (espacio peatonal de 0.41 m²/p).

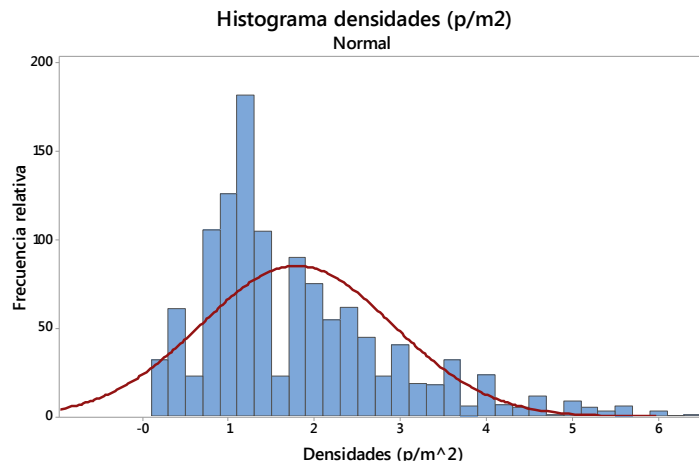
Tabla 22. Estadística descriptiva densidades sobre la zona de espera

Medida	Valor	Medida	Valor
Media (p/m ²)	1.79	Coefficiente de asimetría	1.16
Error típico	0.03	Rango (p/m ²)	6.26
Mediana (p/m ²)	1.47	Mínimo (p/m ²)	0.18
Moda (p/m ²)	0.74	Máximo (p/m ²)	6.43
Desviación estándar (p/m ²)	1.12	Suma (p/m ²)	2153.20
Varianza de la muestra (p/m ²)	1.26	Conteo total	1200.00
Coefficiente de variación	62.56	Q1 (p/m ²)	0.98
Curtosis	1.26	Q3 (p/m ²)	2.44

Fuente: autores

El histograma de la figura 47, permite identificar que hay una mayor concentración de densidades inferiores a la media, 1.79 p/m² (espacio peatonal de 0.56 m²/p), que son equivalentes al 50 %, aproximadamente de las densidades observadas.

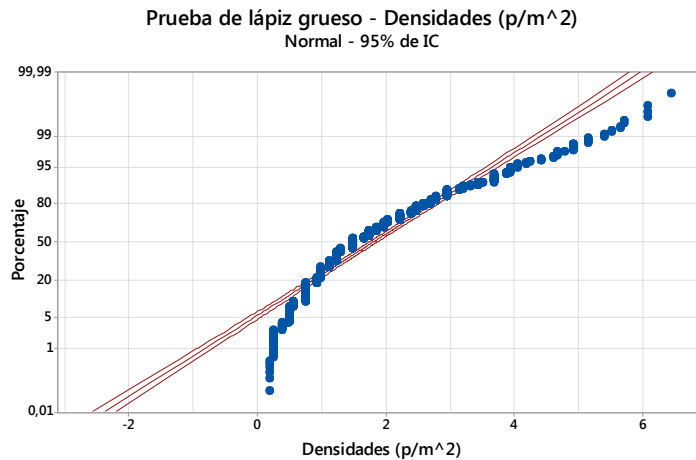
Figura 47. Histograma de densidades



Fuente: autores

En la figura 48 se encuentra la prueba de lápiz grueso realizada para las observaciones de densidad peatonal, en este caso se evidencia que las observaciones no presentan comportamiento normal, puesto que gran parte de las observaciones se encuentran distantes de las líneas ajustadas.

Figura 48. Prueba de lápiz grueso para densidades peatonales



Fuente: autores

En general, la zona de espera presenta una densidad media de 1.79 p/m^2 , equivalente a un espacio peatonal de $0.56 \text{ m}^2/\text{p}$, y al no presentar una distribución normal se hace necesario el uso de la mediana que es igual a 1.47 p/m^2 , equivalente a un espacio peatonal de $0.68 \text{ m}^2/\text{p}$. Ambos indicadores representan una condición incómoda para el peatón, en donde se presentan continuos conflictos, y restricciones en el desplazamiento¹⁶⁷. En la hora pico (17:15 – 18:15) se presenta una densidad promedio de 3.02 p/m^2 (espacio peatonal de $0.33 \text{ m}^2/\text{p}$), mayor a la encontrada bajo condiciones pico por WMATA¹⁶⁸ (densidad estimada en zonas de espera de plataformas del sistema Metro de Washington: entre 1.08 p/m^2 y 2.17 p/m^2), menor a la encontrada por SERIANI¹⁶⁹ (densidad promedio en experimentos de laboratorio a escala real de zonas de espera en plataformas de sistemas Metro: de $4.0 \text{ m}^2/\text{p}$) y KOVACS¹⁷⁰ (densidad promedio en las zonas de espera de las plataformas del sistema de tranvía de Budapest: 3.57 p/m^2).

¹⁶⁷ TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Transit Capacity and Quality of Service Manual, Op. cit., p. 10-14.

¹⁶⁸ WASHINGTON METROPOLITAN AREA TRANSIT AUTHORITY. Shady Grover Station Capacity Improvements Study. 2015. Montgomery County. p. 70.

¹⁶⁹ SERIANI, Sebastián. Pedestrian Level of Interaction on Platform Conflict Areas by Real-scale Laboratory Experiments. En: 13th World Clean Air and Environmental Protection Congress (3: 1-16, Enero, Bristol). 2016. p. 8.

¹⁷⁰ KOVÁCKS. Op. cit., p. 99.

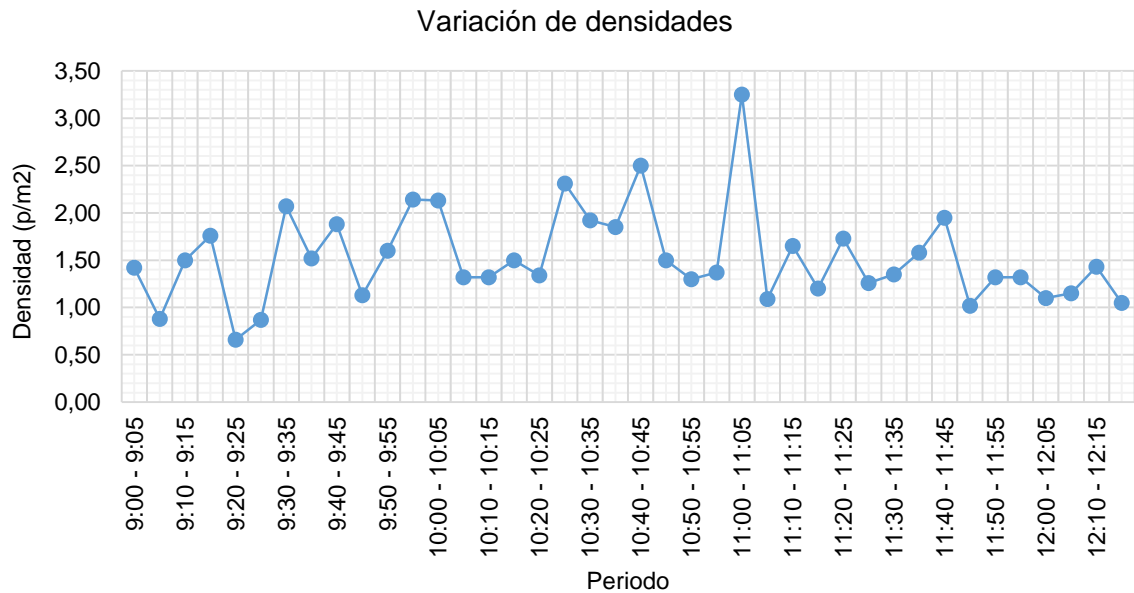
2.8.1.3. Comportamiento periódico. A lo largo del día se presentaron diferentes comportamientos de densidad sobre la zona de espera de la plataforma, por lo que se determinó la densidad promedio para cada periodo de 5 minutos. En las figuras 49, 50 y 51 se presenta la variación periódica de las densidades promedio sobre la plataforma, se evidencian múltiples picos que alcanzan densidades entre 1.5 p/m^2 (espacio peatonal de $0.67 \text{ m}^2/\text{p}$) y 4.87 p/m^2 (espacio peatonal de $0.21 \text{ m}^2/\text{p}$) que después disminuyen a densidades inferiores a 1.5 p/m^2 , comportamiento generado por el patrón de llegadas de los vehículos del sistema a la plataforma, así mismo es sencillo identificar periodos en los que los vehículos del sistema se encuentran próximos a su capacidad o por el contrario no hubo servicio del vehículo ya que la densidad crece de manera acelerada entre periodos consecutivos.

En contraste con el volumen peatonal en donde se determinó que la hora pico se presenta entre las 17:15 – 18:15, las densidades más altas también se presentan en ese periodo, en donde la elipse corporal se ve invadida de manera constante por otros peatones, se generan múltiples conflictos entre estos y el movimiento está restringido dentro de las zonas de espera, alcanzando una densidad máxima de 4.87 p/m^2 (la más elevada del estudio), en los periodos de 16:15 – 17:15 y 18:15 y 19:15 se observa como la densidad peatonal presenta una tendencia a aumentar (antes de la hora pico) y decrecer (después de la hora pico) respectivamente, hasta aproximadamente las 19:35 en donde las densidades peatonales presentan un comportamiento similar al periodo de 09:00 – 16:15.

La densidad peatonal más baja sobre la zona de espera se presentó en la noche en el periodo de las 19:55 – 20:00 y es de 0.55 p/m^2 (espacio peatonal de $1.82 \text{ m}^2/\text{p}$), en la mañana alcanzo un valor mínimo de 0.66 p/m^2 (espacio peatonal de $1.52 \text{ m}^2/\text{p}$) en el periodo de las 09:20 – 9:25, en la tarde este valor fue de 0.60 p/m^2 (espacio peatonal de $1.67 \text{ m}^2/\text{p}$) en el periodo de las 15:10 – 15:15.

En la figura 49 se observa la variación periódica de las densidades promedio peatonales sobre las zonas de espera de la plataforma en el periodo 9:00 a 12:20, se evidencia que en periodos específicos: 09:05 – 09:10, 09:20 – 09:25, 09:25 – 09:30, 11:45 – 11:50 y 12:15 – 12:20 se presentan densidades inferiores a 1.11 p/m^2 (espacio peatonal de $0.90 \text{ m}^2/\text{p}$) en donde para los peatones es posible circular de manera parcialmente restringida y no se presenta invasión de la elipse corporal, en los otros periodos esta densidad aumenta restringiendo el desplazamiento dentro de la zona de espera y generando conflictos peatonales, hasta alcanzar un valor máximo de 3.25 p/m^2 (espacio peatonal de $0.31 \text{ m}^2/\text{p}$) en donde la elipse corporal de los peatones empieza ser invadida por la de otros peatones.

Figura 49. Variación de densidades 09:00 –12:20

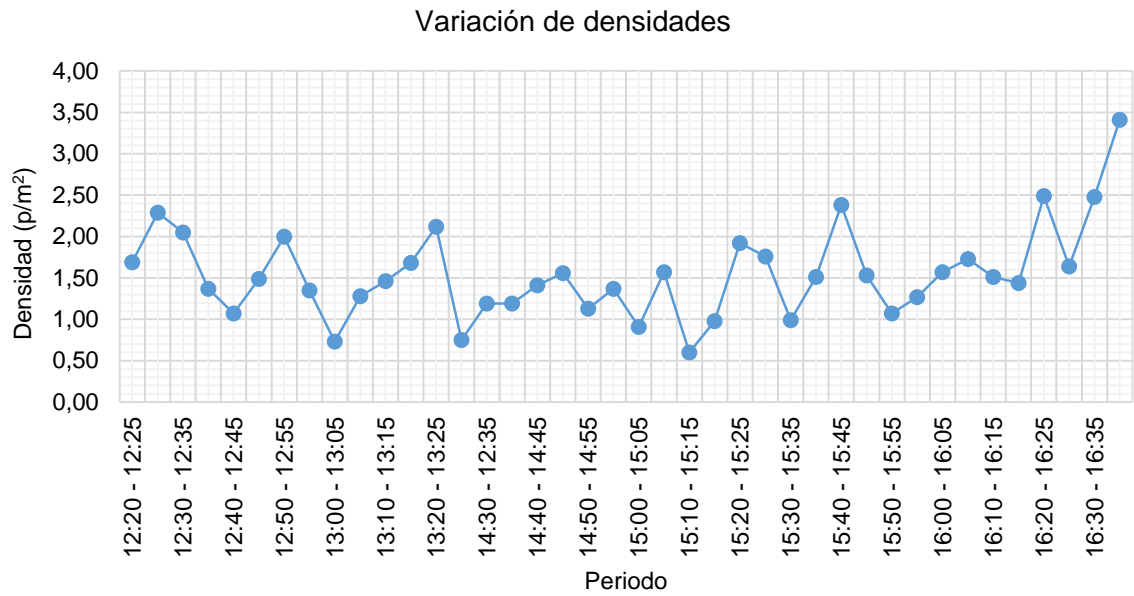


Fuente: autores

En la figura 50 se observa la variación periódica de las densidades promedio peatonales en el periodo 12:20 a 16:40, se evidencia a partir de las 12:20 las densidades aumentan y tienden a ser mayores que en el periodo de la mañana (figura 49) superando el umbral de la elipse corporal, es posible observar periodos cortos en los que la densidad es inferior a 1.43 p/m² (espacio peatonal de 0.70 m²/p). Como se mencionó previamente, desde las 16:15 la densidad peatonal presenta una tendencia de crecimiento.

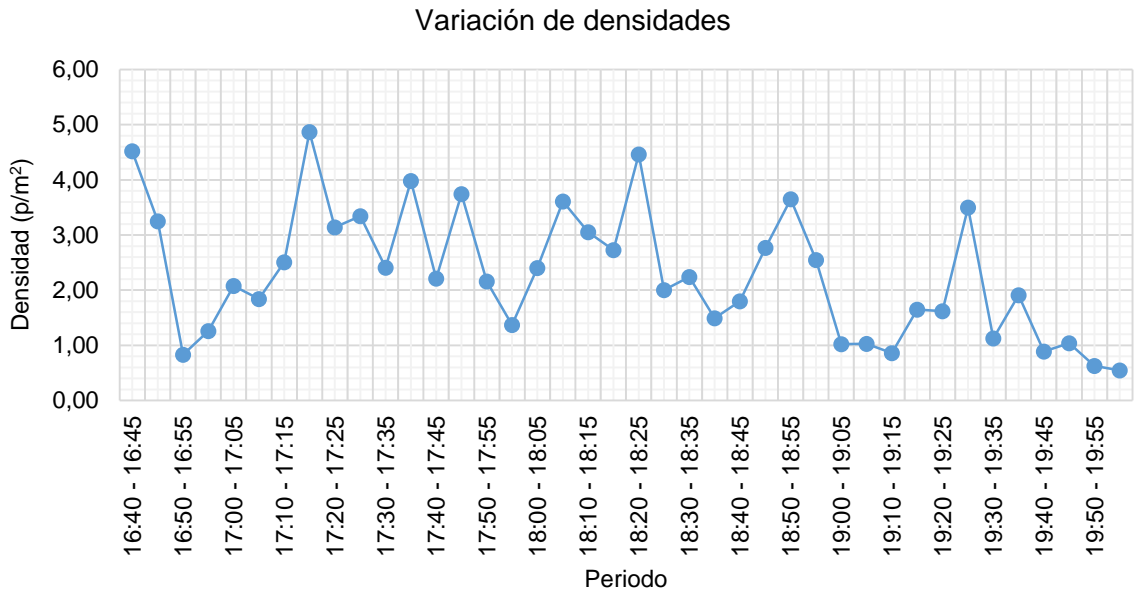
En la figura 51 se observa la variación periódica de las densidades promedio peatonales en el periodo 16:40 a las 20:00, en este las densidades peatonales presentan los valores más elevados de todo el estudio y tienden a mantenerse hasta 19:35 aproximadamente, hora en la cual los volúmenes peatonales son inferiores a los 150 p/5 min. La densidad peatonal promedio de la hora pico (17:15 – 18:15) es de 3.03 p/m² (espacio peatonal de 0.33 m²/p) valor cercano a la elipse corporal, 3.3 p/m² (espacio peatonal de 0.30 m²/p), en la hora pico se presentan las densidades peatonales más altas del estudio, corresponden a 4.87 p/m² (espacio peatonal de 0.21 m²/p) y 4.46 (espacio peatonal de 0.22 m²/p).

Figura 50. Variación de densidades 12:20 –16:40



Fuente: autores

Figura 51. Variación de densidades 16:40 –20:00



Fuente: autores

2.9. MODELOS DE FLUJO PEATONAL

Con base en el contenido expuesto en los capítulos previos, especialmente los numerales 2.1. *Teoría del flujo peatonal* y 2.4. *Diseño de estaciones* y el contenido del presente capítulo, se procede a analizar la relación entre las variables volumen, velocidad y densidad para plataformas. Considerando los siguientes aspectos: la calibración de los modelos de flujo peatonal continuo de observaciones continuas de volumen, velocidad y densidad bajo diferentes condiciones de flujo: libre, estable, inestable y forzado, estas dos últimas condiciones son las más difíciles de encontrar en campo y, cada punto según la relación entre variables, tendrá asociado un valor de velocidad media y/o densidad media, el cual corresponde al periodo de flujo considerado¹⁷¹. La variable de flujo dentro de las relaciones macroscópicas no considera el efecto de flujos bidireccionales o multidireccionales¹⁷², por lo que el flujo representativo de cada periodo de 5 min será igual a la suma de todos los movimientos entre secciones de control (ver figura 17).

El modelo más empleado en la teoría del flujo peatonal es el de velocidad vs densidad que obedece a un modelo lineal simple y está planteando para infraestructuras de flujo continuo¹⁷³, a pesar de esto el grupo de puntos puede presentar un mejor factor ajuste a otro modelo, a continuación, se presenta el modelo de mejor ajuste y el modelo lineal calibrado para la relación velocidad-densidad, propio del elemento o área de circulación de la plataforma (ver figura 27).

2.9.1. Determinación del ancho efectivo para flujos peatonales. El ancho efectivo del vagón es calculado considerando el ancho total del vagón y la suma de los anchos y distancias que obstruyen la circulación, con la siguiente ecuación¹⁷⁴:

$$W_E = W_T - W_0 (m)$$

En dónde; W_E = ancho efectivo, W_T = ancho total y W_0 = suma de anchos de elementos que obstruyen la circulación.

En campo se observó que los pasajeros que se situaban en las zonas de espera de la plataforma se consolidaban como una obstrucción que restringía la circulación peatonal a lo largo del vagón, por lo que era necesario considerar el efecto de estos

¹⁷¹ GUÍO. Op. cit., p. 90 – 91.

¹⁷² NEW YORK CITY DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Pedestrian Level of Service Study. Phase I. 2006. p. 15.

¹⁷³ GUÍO. Op. cit. p. 100.

¹⁷⁴ TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Op. cit., p. 23-9.

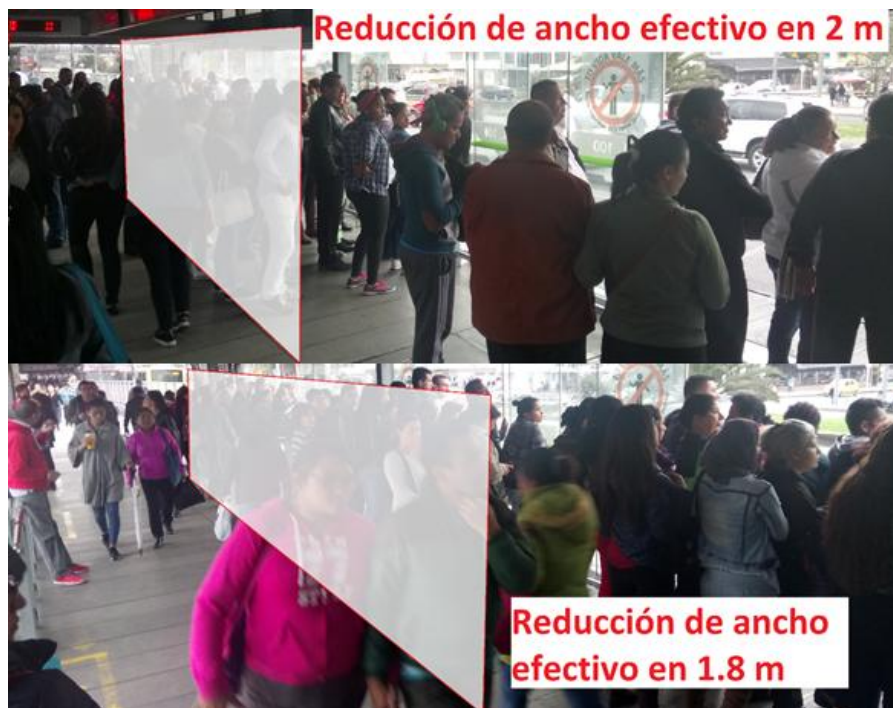
en el ancho efectivo del vagón, considerando también lo expuesto por GUÍO¹⁷⁵ “si los obstáculos no cubren una longitud significativa (más de 3 metros) no tienen un efecto significativo en la reducción del ancho efectivo”, puesto que esta obstrucción se extendía en una longitud de aproximadamente 20 m, en la figura 52 se evidencia este comportamiento. Se registra el ancho estimado que ocupan los pelotones de espera al mismo tiempo que se registran las mediciones para densidad peatonal. Por lo que la ecuación para el cálculo del ancho efectivo queda de la siguiente forma.

$$W_E = W_T - W_0 - W_{Wais} (m)$$

En dónde; W_E = ancho efectivo, W_T = ancho total, W_0 = suma de anchos de elementos que obstruyen la circulación y W_{Wais} = ancho promedio de peatones en zona de espera.

La suma de los anchos de los elementos que obstruyen la circulación es seleccionada con base en la literatura, y se mantiene durante todo periodo aforado, $W_0 = 0.6$ m (distancia de 0.3 m¹⁷⁶ a cada lado del vagón), el ancho promedio de peatones en zona de espera varía según el periodo de 5 min, y se encuentra entre 0.3 m y 2.5 m, para cada periodo de 5 min se calcula el ancho efectivo.

Figura 52. Influencia de pelotones de espera en ancho efectivo



Fuente: autores

¹⁷⁵ GUÍO. Op. cit., p. 88.

¹⁷⁶ *Ibíd.*, p. 88.

2.9.1.1. Modelos de flujo peatonal calibrados para el elemento de circulación.

Como bien se mencionó previamente, el modelo lineal del flujo peatonal está basado en flujos continuos, por lo que la calibración de la relación velocidad vs densidad será realizada para el elemento de circulación de la plataforma, sin considerar la densidad sobre las zonas de espera, los valores de densidad promedio para cada periodo de 5 min son determinados con base en el procedimiento expuesto por YAO. *et al.*¹⁷⁷ : mediante la relación básica del flujo peatonal $q=v*k$ se determina el valor de densidad media peatonal para cada periodo, considerando en el flujo y la velocidad promedio peatonal de dicho periodo; posteriormente fueron validados con mediciones de densidad realizadas sobre registros fotográficos de la toma de información.

En la figura 53 se encuentra el modelo de mejor ajuste para las variables velocidad vs densidad, el cual obedece a un modelo logarítmico, en la tabla 23 se encuentra el análisis de varianza, el valor de P es menor al nivel de significancia (0.05) por lo que la relación es estadísticamente significativa. La ecuación del modelo es la siguiente:

$$v = -12.35 * \ln(k) + 43.03$$

En donde V= velocidad peatonal en m/s y D= densidad peatonal en p/m².

Tabla 23. Análisis de varianza modelo de mejor ajuste - relación velocidad vs densidad

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Estadístico Fisher	Estadístico P
Regresión	1	3391.28	3391.28	42.55	0.000
Error	114	9084.99	79.69		
Total	115	12476.27			

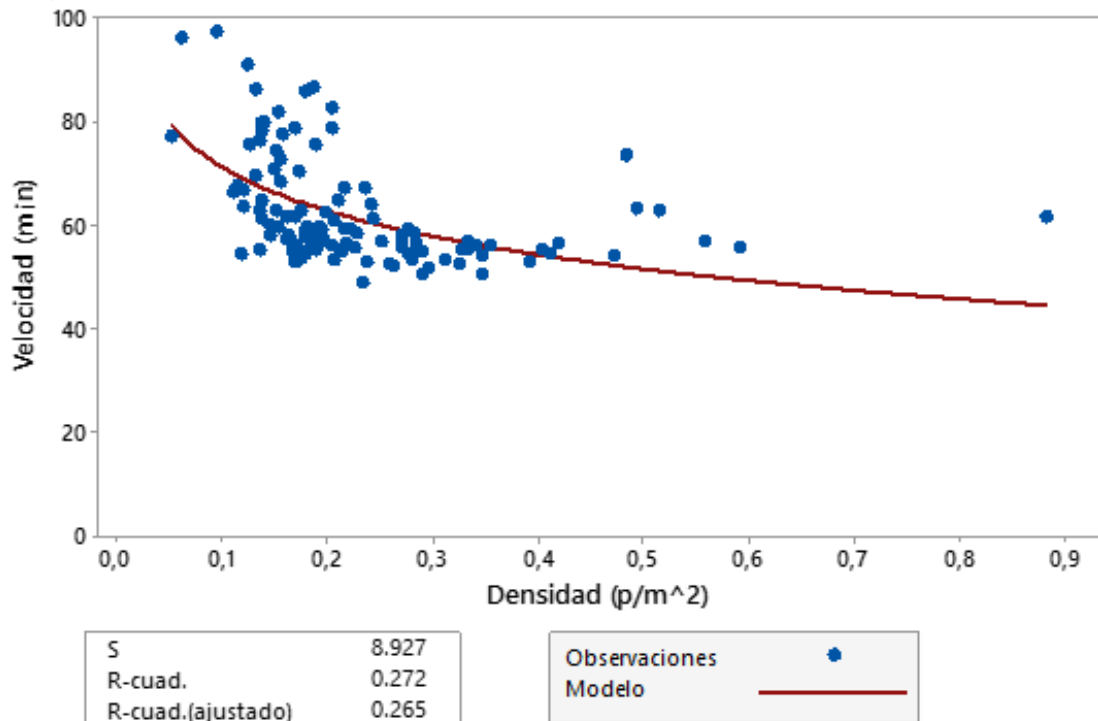
Fuente: autores

Como se observa en la figura 55, el grupo de mediciones presenta variabilidad y poca homogeneidad, debido a esto el factor de ajuste del modelo no es bueno. A pesar de lo anterior, el modelo es útil para representar condiciones de flujo libre e incluso inestable, bajo condiciones de flujo libre la velocidad peatonal decrece de manera más acelerada que bajo condiciones de flujo inestable, pero bajo condiciones de flujo a congestión el modelo no presenta un valor de densidad

¹⁷⁷ YAO, Liya, *et al.* Adaptability Analysis of Service Facilities in Transfer Subway Stations. En: Mathematical Problems in Engineering. vol. 12. 2012. p. 5.

máxima razonable (aproximadamente 33 p/m²), razón por la que el modelo es descartado.

Figura 53. Modelo de mejor ajuste - relación velocidad vs densidad



Fuente: autores

En la figura 54, se encuentra el modelo lineal calibrado para la relación velocidad vs densidad de la zona de circulación de la plataforma. En la tabla 24 se presenta el análisis de varianza, de donde se concluye que la relación es estadísticamente significativa. La ecuación del modelo es la siguiente:

$$v = -33.34 * k + 70.04$$

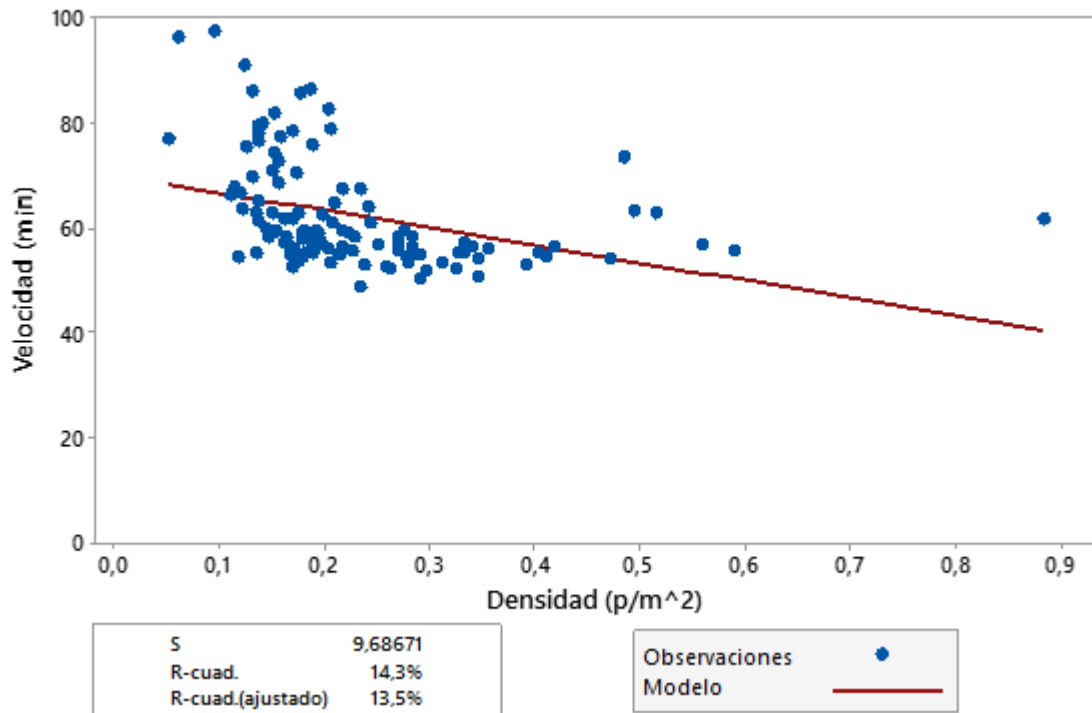
El modelo indica un valor máximo de densidad peatonal k_c de 2.10 p/m² (espacio peatonal de 0.48 m²/p) y una velocidad peatonal a flujo libre v_i de 70.04 m/min, con lo cual se obtiene un valor de flujo máximo q_m , de 36.02 p/m/min.

Tabla 24. Análisis de varianza modelo lineal calibrado – relación velocidad vs densidad

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Estadístico Fisher	Estadístico P
Regresión	1	1792.75	1792.75	19.13	0.000
Error	114	10683.52	93.72		
Total	115	12476,27			

Fuente: autores

Figura 54. Modelo lineal calibrado relación velocidad vs densidad



Fuente: autores

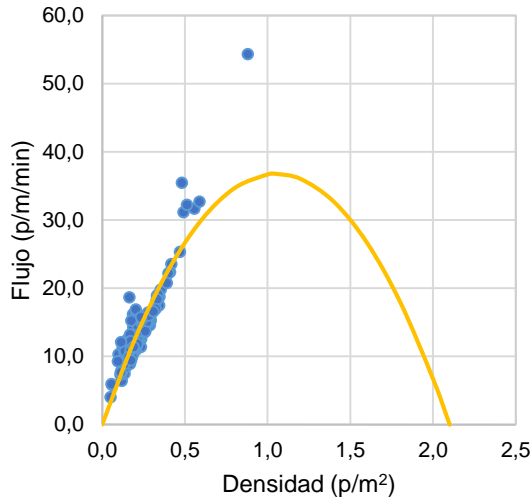
En la figura 55 se presentan los modelos calibrados para las relaciones velocidad vs densidad, flujo vs densidad y velocidad vs flujo. En la figura 56 se observa de manera gráfica la comparación entre los modelos de flujo peatonal para plataformas y los modelos teóricos determinados por FRUIN¹⁷⁸ para infraestructuras peatonales bidireccionales y por YAO. et al.¹⁷⁹ para plataformas, en la tabla 25 se encuentran

¹⁷⁸ FRUIN. DESIGNING FOR PEDESTRIANS: A LEVEL-OF-SERVICE CONCEPT. Op. cit., p. 10.

¹⁷⁹ YAO. et al. Op. cit. p. 9.

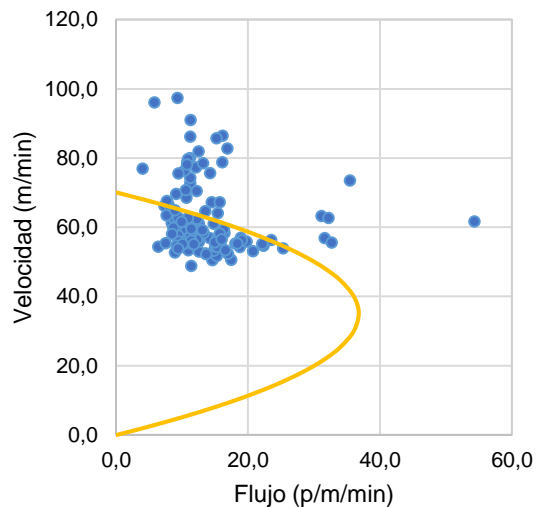
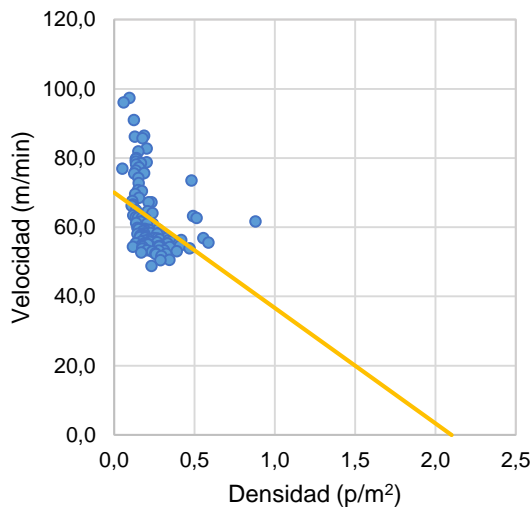
los parámetros de densidad máxima, flujo máximo y velocidad a flujo libre para cada uno de estos modelos.

Figura 55. Modelos calibrados, relaciones macroscópicas - zona de circulación-plataformas.



Parámetros del modelo:

- Densidad máxima $k_c = 2.10 \text{ p/m}^2$
- Velocidad a flujo libre $v_l = 70.04 \text{ m/min}$
- Flujo máximo $q_m = 36.02 \text{ p/m/min}$



Fuente: autores

El modelo calibrado para la plataforma de la estación Calle 100, presenta diferencias claras en cuanto al modelo clásico de Fruin para infraestructuras bidireccionales en donde se evidencia que todos los parámetros son inferiores al de este, y al modelo de Yao. et al. calibrado para plataformas en el cual la densidad máxima es superior al de la estación Calle 100. El modelo de la estación Calle 100 presenta una velocidad a flujo libre mayor que la de Yao. et al, los parámetros de densidad máxima y flujo máximo del modelo de la estación Calle 100 son aproximadamente

el 50 % de los del modelo de Yao. et al, variación que puede estar asociada al ancho de la plataforma y al sistema de transporte, la plataforma de Yao. et al tiene un ancho de 10.0 m y se trata de un sistema metro, mientras que en la estación Calle 100 es de 4.0 m y es un sistema BRT, esto se observa en la tabla 25 y figura 56.

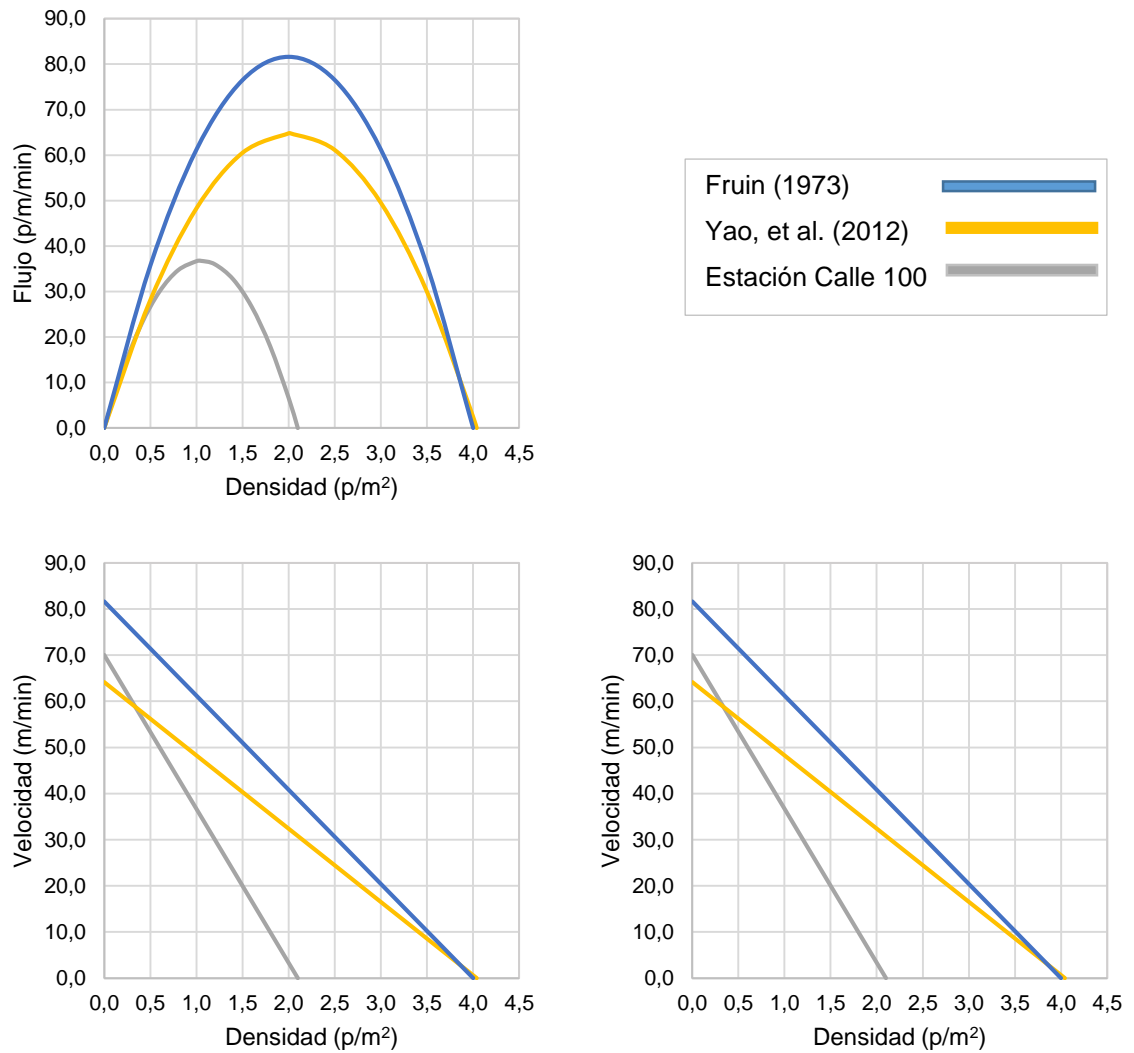
Tabla 25. Parámetros de modelos de flujo peatonal.

Modelo	Velocidad a flujo libre (m/min)	Densidad máxima (p/m ²)	Flujo máximo (p/m/min)
FRUIN (1973)	81.60	4.00	81.60
YAO. et al. (2012)	64.16	4.04	64.80
Plataforma Estación Calle 100	70.04	2.10	36.02

Fuente: autores

En el anexo H se presenta un modelo calibrado de la plataforma que considera únicamente las densidades de la zona de espera, este modelo presenta valores de densidad peatonal y velocidad a flujo libre mayores a los expuestos previamente, y un valor de flujo máximo inferior al calibrado para la zona de circulación. Es interesante ver el efecto que tienen las densidades de la zona de espera, y sobre todo en el modelo lineal del flujo peatonal para infraestructuras continuas, al combinar personas en movimiento y personas estáticas, las densidades aumentan de manera significativa, por lo que el uso del modelo lineal por si solo arroja resultados de capacidad máxima y flujo máximo elevados.

Figura 56. Comparación grafica entre modelos de flujo peatonal para plataformas e infraestructuras bidireccionales.



Fuente: autores

3. PERCEPCIÓN DE LOS USUARIOS EN ZONAS DE ESPERA

DAS y PANDIT¹⁸⁰ indica que la percepción de los usuarios es un factor clave en el diseño y operación de un sistema de transporte, puesto que son ellos quienes sufren las consecuencias de un servicio de mala calidad. FRUIN¹⁸¹ establece que con medidas asociadas a la percepción de los usuarios es posible determinar el Nivel de Servicio de un elemento de circulación peatonal. Lo anterior es complementado por OLIVKOVA¹⁸², quien establece que con el Nivel de Servicio es posible identificar las condiciones de operación, información que es fundamental no solo para los operadores del sistema, sino que también para los usuarios de este.

El elemento específico sobre el cual se busca realizar la calibración de una escala de nivel de servicio con encuestas de percepción, corresponde a las zonas de espera en plataformas de estaciones del sistema TransMilenio, la zona de estudio corresponde a la explicada en el numeral 3.1. *ZONA DE TOMA DE INFORMACIÓN*. En este capítulo se presentan los aspectos y criterios relacionados con: el cálculo de tamaño muestral para encuestas y el procedimiento ejecutado en campo para su aplicación, método para la calibración de la escala de Nivel de Servicio. Finalmente se encuentran de manera general los datos obtenidos en cuanto a la percepción, el análisis de esta y la escala calibrada.

3.1. TAMAÑO MUESTRAL

El tamaño de muestra necesario para la realización de las encuestas de percepción es calculado considerando el nivel de confianza, la proporción que se supone existe en la población y el error máximo admisible, con la siguiente ecuación¹⁸³ :

$$n \geq \frac{Z^{\alpha/2} * P * (1 - P)}{e^2}$$

En dónde; n = tamaño muestral para población infinita para estimación de proporción poblacional, $Z^{\alpha/2}$ = constante que depende del nivel de confianza, P = proporción estimada que existe en la población y e = error máximo admisible.

¹⁸⁰ DAS y PANDIT. Op. cit., p. 2.

¹⁸¹ FRUIN. Designing for pedestrians [En línea]. Op. cit. Citado el 8 de febrero de 2018.

¹⁸² OLIVKOVÁ, Ivana. Quality standards for measuring the level of service in public transport. En: Perner's Contacts. 2011. vol. 5, no. 5. p. 229 – 231.

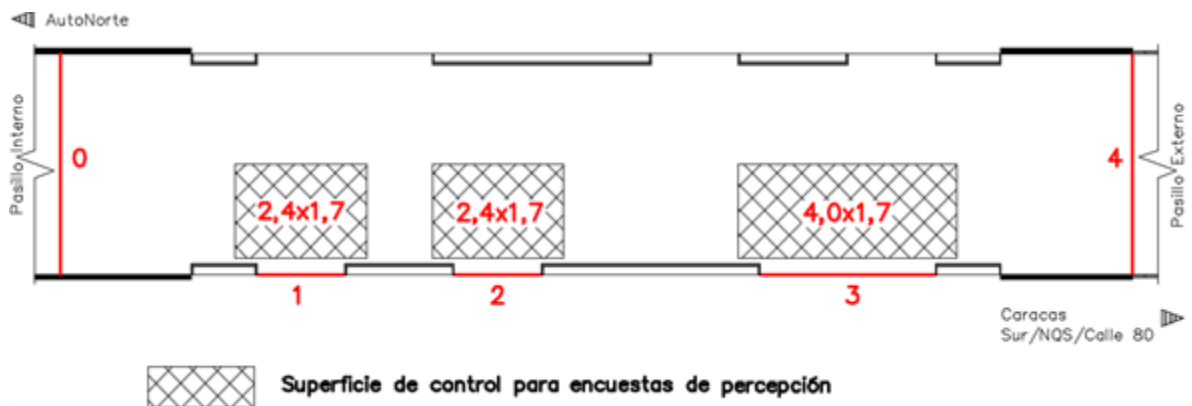
¹⁸³ VALDIVIESO; CASTELLÓN y VALDIVIESO. Op. cit., p. 158.

Considerando un nivel de confianza del 95 % con un $Z^{\alpha/2}$ igual a 1.96, una proporción estimada que existe en la población P de 0.5 (valor por defecto cuando no se tienen estudios de referencia bajo condiciones similares¹⁸⁴, valor de P empleado la Ciudad de México para determinación de la percepción del servicio en BRT¹⁸⁵), un error máximo admisible e del 5 %, se obtiene que el tamaño muestral n para las encuestas de percepción debe ser como mínimo 196, valor que es aproximado a 300, obteniendo un error máximo admisible e del 4.04 %, ejecutadas mediante muestreo sistemático.

3.2. METODOLOGÍA EN CAMPO

Las encuestas fueron realizadas mediante un muestreo sistemático, realizando una encuesta cada 2 minutos. Una vez seleccionado el pasajero objetivo, se esperó a que se detuviera dentro de cualquiera de las superficies (ver figura 57), y se realizó la encuesta, registrando: la calificación de 1 a 5, en donde 1 es pésimo y 5 es excelente, acerca del apretujamiento en la zona de espera de la plataforma, el tiempo en minutos que estaría dispuesto a esperar bajo esas condiciones, el sexo del pasajero, el número de personas dentro de la superficie y el código de la puerta, finalmente se registra el nombre de aforador, la fecha y las observaciones pertinentes presentadas durante la encuesta. En el anexo I se encuentra el formato empleado para la encuesta de percepción y en la figura

Figura 57. Superficies de espera para realización de encuestas



Fuente: autores

¹⁸⁴ *Ibíd.*, p. 158.

¹⁸⁵ LÁMBARRY, Fernando. RIVAS, Luis y, TRUJILLO, Mara. Desarrollo de una escala de medición de la percepción en la calidad del servicio en los sistemas de autobuses de tránsito rápido, a partir del Metrobús de la Ciudad de México. *En: INNOVAR JOURNAL*. vol. 23, no 50. p. 83.

El registro del número de personas y el código de la puerta en la encuesta es necesario para la determinación la densidad, la cual está asociada a la calificación del usuario. Este procedimiento se basó en el aplicado por NEUTS y NIJKAMP¹⁸⁶, quien indaga acerca de la percepción del nivel de apretujamiento por parte de turistas, empleando registros fotográficos del lugar de interés sobre los cuales agrega peatones de manera digital, y posteriormente pregunta a los turistas su percepción del apretujamiento con base en esos escenarios (fotografías). La encuesta de percepción fue elaborada considerando los resultados obtenidos en diferentes investigaciones y encuestas tipo, en donde se indagaba acerca de atributos de comodidad en sistemas de transporte, realizadas por ZEITLIN¹⁸⁷, DAS y PANDIT¹⁸⁸ y, Inter-American Development Bank IDB¹⁸⁹. De igual manera la escala Likert fue seleccionada considerando su utilización en estudios de percepción de calidad del servicio como el de YANG et al¹⁹⁰, LÁMBARRY, RIVAS Y TRUJILLO¹⁹¹ y CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ¹⁹². En la figura 58 se observa la realización de encuestas en campo.

Figura 58. Encuestadora ejecutando toma de información.



Fuente: autores

¹⁸⁶ NEUTS, Bart y NIJKAMP, Peter. Tourist Crowding Perception and Acceptability in Cities An Applied Modelling Study on Bruges. En: Annals of Tourism Research. 2012. vol. 39, no. 4. p. 2140.

¹⁸⁷ ZEITLIN, Jascha M. Perceived Crowding and Visitor Support for Use Rationing: A Reanalysis of Existing Data. Tesis de Maestría, Master of science in recreation resource management. Utah State University. Logan, 2008. p. 46 – 51.

¹⁸⁸ DAS y PANDIT. Op. cit., p. 6.

¹⁸⁹ INTER-AMERICAN DEVELOPMENT BANK, Transport Division. Evaluation of Passenger Comfort in Bus Rapid Transit Systems. 2015. p. 40 – 47.

¹⁹⁰ YANG, Yi-hui. et-al. LOS of Pedestrian Perception for Corridor in Subway Station Considering the Reliability and Validity. En: Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology. 2016. vol. 16, no. 2. p. 212.

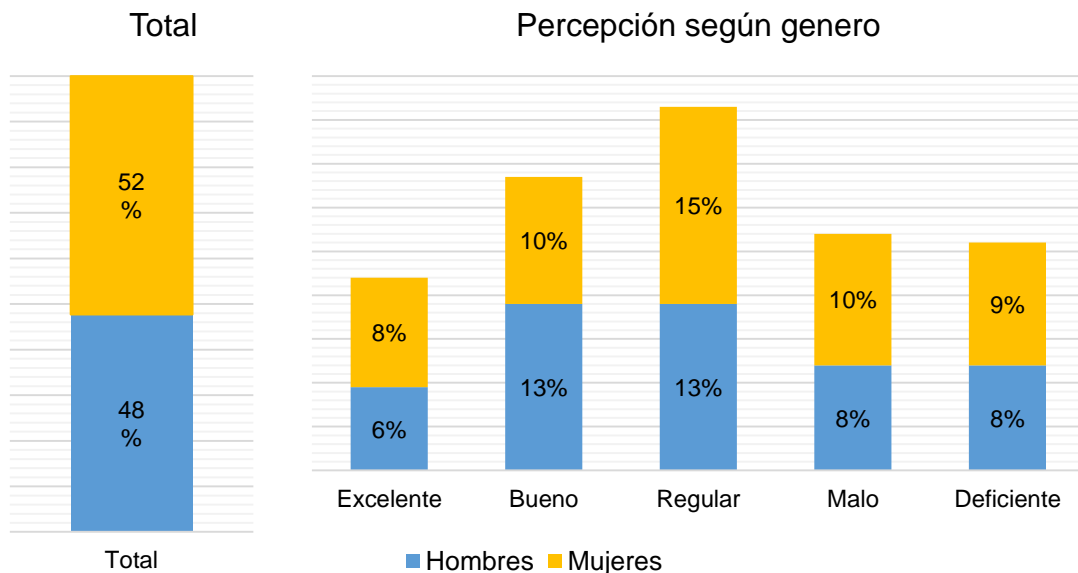
¹⁹¹ LÁMBARRY, RIVAS y TRUJILLO. Op. cit., p. 83 – 86.

¹⁹² CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ. Resultados encuesta de percepción sobre las condiciones, calidad y servicio a los usuarios de Transmilenio, TPC y SITP. 2013. p. 22.

3.3. CARACTERIZACIÓN DE LA PERCEPCIÓN EN ESTACIÓN CALLE 100

Los 300 encuestados se clasifican de la siguiente manera: 143 corresponden a hombres y 157 a mujeres, obteniendo una distribución 48 a 52 (hombres a mujeres). En general, las mujeres perciben que el apretujamiento en las zonas de espera se encuentra con mayor frecuencia en niveles *excelentes*, *regulares*, *malos* y *pésimos*, que los hombres, por el contrario, los hombres perciben un nivel *bueno* de apretujamiento un mayor número de veces que las mujeres, esta distribución se puede observar en la figura 59.

Figura 59. Distribución de percepción según género y estado



Fuente: autores

En la tabla 26 se encuentran los estadísticos descriptivos individuales de percepción para el apretujamiento en la zona de espera, según género *hombre - H* y *mujer - M* y estado *excelente - Exc*, *bueno - Bue*, *regular - Reg*, *malo - Mal* y *pésimo - Pes*. En general las categorías presentan datos homogéneos, la desviación estándar es pequeña, representado aproximadamente el 20 % de la media. Se evidencia que tanto hombres como mujeres perciben una disminución de la calidad del servicio a medida que la densidad crece, de igual manera, el percentil 85 indica que: las mujeres soportan mayores densidades que los hombres en el estado de apretujamiento *excelente*, en los estados *regular* y *malo* sucede lo contrario, y en los estados *bueno* y *pésimo* la percepción del apretujamiento es igual para hombres y mujeres.

Tabla 26. Estadísticos descriptivos resultados individuales de percepción - apretujamiento

Medida\Valor	Exc H	Exc M	Bue H	Bue M	Reg H	Reg M	Mal H	Mal M	Pes H	Pes M
Media (p/m ²)	1,13	1,15	1,50	1,49	2,58	2,43	3,35	3,18	4,59	4,51
Desv. Estándar (p/m ²)	0,28	0,35	0,39	0,42	0,64	0,57	0,52	0,63	0,59	0,45
P15 (p/m ²)	0,92	0,74	1,08	0,98	1,96	1,72	2,88	2,45	3,86	4,04
P85 (p/m ²)	1,47	1,50	1,86	1,96	3,20	3,13	3,95	3,92	5,15	5,15
Cuenta	19	25	38	29	38	45	24	30	24	28

Fuente: autores

3.3.1. Comparación entre densidades de apretujamiento. Se realizó un contraste entre las densidades de apretujamiento según el género y la calificación, considerando los resultados expuestos en la tabla 26, aplicando la ecuación expuesta en el numeral 3.7.3 *Pruebas de hipótesis entre velocidades*, bajo los siguientes criterios:

- Hipótesis: *H-nula* H_0 : Las densidades/ tiempos de espera medias son iguales; $X_1 = X_2$. *H-alternativa* H_1 : Las densidades/ tiempos de espera medias son diferentes; $X_1 \neq X_2$

- Se acepta H_0 si $Z_{\text{Calculado}} \leq Z_{\text{Teorico}}$. Se rechaza H_0 si $Z_{\text{Calculado}} > Z_{\text{Teorico}}$

- Z_{Teorico} de 1.96 establecido para un nivel de confianza del 95 %

Los resultados del estadístico observado $Z_{\text{Calculado}}$ para densidades se encuentran en la tabla 27. En el caso de la comparación entre densidades por género, se encuentra que estadísticamente con un nivel de confianza del 95 %, las densidades son diferentes, considerando que a medida que el estado empeora, la densidad aumenta, comportamiento que sucede en hombres y mujeres (ver tabla 27). En el caso de la comparación entre genero por estados, se observa que las densidades son iguales para hombres y mujeres, por lo que no es necesario definir un límite de densidad de apretujamiento para cada género en cada estado.

Tabla 27. Prueba de hipótesis entre densidades de apretujamiento por genero por estado

Comparación Hombres	$Z_{\text{Calculado}}$	Comparación Mujeres	$Z_{\text{Calculado}}$
Excelente - Bueno	-4.19	Excelente - Bueno	-3.23
Bueno - Regular	-8.87	Bueno - Regular	-8.15

Tabla 27. (Continuación)

Comparación Hombres	Z _{Calculado}	Comparación Mujeres	Z _{Calculado}
Regular - Malo	-5.16	Regular - Malo	-5,26
Malo - Pésimo	-7.68	Malo - Pésimo	-9,36
Comparación entre calificaciones		Z _{Calculado}	
Exc Hombre - Exc Mujer		-0.26	
Bue Hombre - Bue Mujer		0.15	
Reg Hombre - Reg Mujer		1.14	
Mal Hombre - Mal Mujer		1.10	
Pes Hombre - Pes Mujer		0.53	

Fuente: autores

3.4. ESCALA DE NIVEL DE SERVICIO PARA ZONAS DE ESPERA

La escala de Nivel de Servicio es determinada con los resultados obtenidos de las encuestas de percepción realizadas a los usuarios de las zonas de espera de la plataforma, considerando que el umbral de cada calificación es calculado según lo expuesto y recomendado por DUEÑAS¹⁹³ quien establece que “Las respuestas obtenidas se agrupan según cada estado y a estos datos se les determina el percentil 85 que define el límite superior para ese estado”. Finalmente se establece la relación entre los estados de calidad del servicio y los niveles de servicio, esta se encuentra en la tabla 28.

Tabla 28. Relación entre estados de calidad de servicio y niveles de servicio.

Calificación	Calidad de servicio	Nivel de servicio
5	Excelente	A
4	Bueno	B
3	Regular	C
2	Malo	D
1	Pésimo	E

Fuente: autores

En la tabla 29 se encuentran las estadísticas descriptivas de las densidades, se evidencia que las densidades (media, y percentiles 15 y 85) aumentan a medida que el estado de apretujamiento empeora, así mismo no hay límites superiores

¹⁹³ DUEÑAS, Domingo. Calidad del servicio en el sistema de transporte público en buses en ciudades pequeñas e intermedias. 2000. p. 157.

(percentil 85) iguales. Es importante recalcar que, en el estado *malo* y *pésimo* la elipse corporal se empieza a ver invadida por la de otros peatones.

Tabla 29. Estadísticas descriptivas densidad máxima

Medida\Valor	Excelente	Bueno	Regular	Malo	Pésimo
Media (p/m ²)	1,14	1,50	2,50	3,26	4,55
Desviación estándar (p/m ²)	0,31	0,40	0,60	0,58	0,52
P15 (p/m ²)	0,74	0,98	1,72	2,51	4,04
P85 (p/m ²)	1,47	1,96	3,15	3,92	5,15
Cuenta	44	67	83	54	52

Fuente: autores

En la tabla 30 se encuentra la escala de nivel de servicio para zonas de espera calibrada para la plataforma estudio de la estación Calle 100 del sistema TransMilenio, considerando la densidad peatonal y el espacio peatonal expresadas en p/m² y m²/p respectivamente. Es interesante ver que los usuarios de la zona de espera aceptan densidades de diseño mayores a las convencionales, la densidad peatonal típica para el dimensionamiento de zonas de espera corresponde al nivel de servicio C (generalmente tomada en espacio peatonal como 0.65 m²/p o una densidad peatonal de 1.54 p/m²) y para el caso, que los usuarios aceptarían zonas de espera más pequeñas que las convencionales, puesto que la densidad encontrada para el nivel de servicio C corresponde a 3.15 p/m² o 0.50 m²/p.

Tabla 30. Escala de nivel de servicio para zonas de espera

Nivel de Servicio	Densidad peatonal (p/m ²)	Espacio peatonal (m ² /p)
A	≤ 1.47	≥ 0.68
B	1.46 - 1.96	0.51 - 0.67
C	1.95 - 3.15	0.32 - 0.50
D	3.14 - 3.92	0.26 - 0.31
E	3.91 - 5.15	0.19 - 0.25
F	> 5.15	< 0.19

Fuente: autores

3.4.1. Comparación con escala de zonas de espera Fruin – TCQSM. En la tabla 31 se encuentra la escala de nivel de servicio para zonas de espera calibrada para la zona de espera de la plataforma estudio de la estación Calle 100 y la desarrollada por FRUIN y aun empleada por el TCQSM. Se evidencia que bajo las condiciones de operación de TransMilenio, la escala de nivel de servicio para zonas de espera arroja unos umbrales para los niveles de servicio mayores a los obtenidos por FRUIN desde el punto de vista de la densidad peatonal, por lo que los usuarios del sistema TransMilenio consideran aceptable o normal el tener más gente a su alrededor: el nivel de servicio A de la escala calibrada para la zona de espera de la plataforma se encuentra en el nivel de servicio C de la escala de FRUIN próximo al nivel de servicio D. La escala calibrada permite diferenciar con mayor claridad los niveles de servicio, en comparación con la de FRUIN. En general, hasta el nivel de servicio D la escala calibrada permite reducir el dimensionamiento de las zonas de espera, a partir del nivel de servicio E la escala de FRUIN arroja umbrales de densidad peatonal relativamente más grandes. En la figura 60 se evidencia de manera gráfica la variación entre estas escalas de nivel de servicio.

Tabla 31. Comparación entre escala de nivel de servicio para zonas de espera convencional.

Nivel de Servicio	Densidad peatonal (p/m ²)		Espacio peatonal (m ² /p)	
	Investigación	Fruin - TCQSM	Investigación	Fruin - TCQSM
A	≤ 1.47	≤ 0.83	≥ 0.68	≥ 1.21
B	1.46 - 1.96	0.82 - 1.08	0.51 - 0.67	0.93 - 1.20
C	1.95 - 3.15	1.07 - 1.54	0.32 - 0.50	0.65 - 0.92
D	3.14 - 3.92	1.53 - 3.57	0.26 - 0.31	0.28 - 0.64
E	3.91 - 5.15	3.56 - 5.26	0.19 - 0.25	0.19 - 0.27
F	> 5.15	> 5.26	< 0.19	< 0.19

Fuente: autores

Figura 60. Comparación grafica entre escalas de nivel de servicio en zonas de espera, variable densidad peatonal (p/m²)



Figura 61. (continuación)



Fuente: autores

3.5. OPINIÓN DE ACEPTABILIDAD DE TIEMPOS DE ESPERA SEGÚN DENSIDAD PEATONAL

En la tabla 32 se encuentran los estadísticos descriptivos individuales de opinión de aceptabilidad de tiempo de espera según el nivel de apretujamiento en la zona de espera, según género *hombre - H* y *mujer - M* y estado *excelente - Exc*, *bueno - Bue*, *regular - Reg*, *malo - Mal* y *pésimo - Pes*. En general las categorías presentan datos de tiempo de espera dispersos, la desviación estándar es elevada, representado aproximadamente el 40 % o más de la media, en la categoría *Pes M* se evidencia la mayor variación de tiempos de espera, la desviación estándar equivale al 75 % de la media. Tanto hombres como mujeres reducen el umbral de tiempo de espera a medida que los niveles de apretujamiento empeoran. El percentil 85 indica que: las mujeres y hombres están dispuestos a esperar el mismo tiempo en los estados de apretujamiento *excelentes* y *buenos*, mientras que para los estados *regular* y *malo* los hombres tienen un mayor tiempo de espera, y sorpresivamente el percentil 85 indica que las mujeres en estado *pésimo* esperarían más que los hombres, es curioso observar que bajo condiciones *buenas* y *regulares* los hombres esperarían el mismo tiempo, pero las mujeres no.

Tabla 32. Estadísticos descriptivos resultados individuales de opinión de aceptabilidad tiempo de espera según el nivel de apretujamiento en la zona de espera

Medida\Valor	Exc H	Exc M	Bue H	Bue M	Reg H	Reg M	Mal H	Mal M	Pes H	Pes M
Media (min)	9.84	11.00	7.58	6.41	6.18	5.58	5.38	4.70	2.63	2.21
Desv. Estándar (min)	4.46	4.79	4.21	3.04	3.34	2.63	3.49	2.79	1.13	1.66
P15 (min)	5.00	5.00	5.00	3.00	2.85	3.90	2.75	2.00	1.00	0.00
P85 (min)	15.00	15.00	10.00	10.00	10.00	8.00	7.75	7.00	4.00	5.00
Cuenta	19	25	38	29	38	45	24	30	24	28

Fuente: autores

En la tabla 33 las estadísticas descriptivas de la opinión de aceptabilidad de tiempos de espera asociadas a cada estado de densidad, se evidencia que el tiempo de espera disminuye a medida que el estado de apretujamiento empeora.

Tabla 33. Estadísticas descriptivas de la opinión de aceptabilidad de tiempos de espera según estado de densidad.

Medida\Valor	Excelente	Bueno	Regular	Malo	Pésimo
Media (min)	10.50	7.07	5.86	5.00	2.40
Desviación estándar (min)	4.63	3.77	2.97	3.11	1.45
P15 (min)	5.00	4.20	3.00	2.00	1.00

Tabla 33. (Continuación)

Medida\Valor	Excelente	Bueno	Regular	Malo	Pésimo
P85 (min)	15.00	10.00	8.80	7.00	4.05
Cuenta	44	67	83	54	52

Fuente: autores

En la tabla 34 se presenta la opinión de aceptabilidad de tiempos de espera por parte de los usuarios de la zona de espera de la estación Calle 100 bajo diferentes condiciones de densidad peatonal. Se observa la influencia de la densidad o espacio peatonal sobre la opinión de tiempos de espera, bajo las peores condiciones de apretujamiento (mayor densidad peatonal o menor espacio peatonal, según se analice) los usuarios opinan que no están dispuestos a esperar por un prolongado periodo de tiempo sobre la zona de espera, bajo condiciones normales de diseño de una zona de espera - densidad peatonal de 3.15 p/m² o 3.92 p/m² (equivalente a un nivel de servicio C o D) los usuarios opinan que un periodo de 7 min es aceptable, mientras que para las peores condiciones de apretujamiento, el tiempo de espera aceptable se reduce a 4.05 min, valor cercano a las frecuencias de los buses del sistema TransMilenio en la hora pico en la plataforma analizada.

Tabla 34. Opinión de aceptabilidad de tiempos de espera bajo diferentes condiciones de densidad peatonal

Densidad peatonal (p/m ²)	Tiempo de espera aceptados según la opinión de usuarios
≤ 1.47	≥ 15.00
1.46 - 1.96	14.99 – 10.00
1.95 - 3.15	9.99 - 8.80
3.14 - 3.92	8.79 – 7.00
3.91 - 5.15	6.99 - 4.05
> 5.15	< 4.05

Fuente: autores

Como se observa en la tabla 34, los usuarios opinan pueden aceptar tiempos de espera de hasta 15 min mientras que las condiciones de apretujamiento sobre la zona de espera sean excelentes (una densidad peatonal menor o igual a 1.47 p/m², o un espacio peatonal mayor o igual a 0.68 m²/p). Es interesante observar que después del umbral de los 3.92 p/m² (espacio peatonal de 0.31 m²/p) los tiempos de espera tolerables por los usuarios se asemejan a las frecuencias de los buses del sistema. Finalmente, el lector no debe confundir el tiempo de espera como un indicador que permite determinar el nivel de servicio de la zona de espera y/o que este asociado directamente con la percepción sobre la zona de espera, sino como un elemento complementario que refleja la opinión de los usuarios en cuanto a la aceptabilidad de mayores tiempos de espera según los niveles de apretujamiento.

4. CONCLUSIONES

El diseño de elementos de circulación peatonal que brinda las mejores condiciones de operación es el de la metodología TCQSM 2013, ya que provee diferentes umbrales de diseño asociados a los Niveles de Servicio deseados para diferentes infraestructuras. A pesar de que la metodología LRTDG 2017 no considere el concepto de Nivel de Servicio deseado, provee mejores estándares de comodidad en las zonas de espera.

El diseño de elementos de circulación vertical en la metodología LRTDG 2017 se encuentra limitado en cuanto a su dimensionamiento y no es posible adaptarlo al Nivel de Servicio deseado. El diseño de los elementos de circulación horizontal en las metodologías BRTPG 2017 y LRTDG 2017 generalmente está gobernado por el ancho de la plataforma, y no por los flujos peatonales que se espera hagan uso de estas.

En estaciones cuyo acceso se efectuó mediante elementos tipo torniquete, se deben proveer unidades bidireccionales y una distancia libre suficiente entre otros elementos de circulación.

A pesar de que la metodología NFPA130 2017 está enfocada en la validación de los elementos de circulación peatonal, esta no considera un parámetro máximo de densidad o espacio peatonal para zonas de espera que permita limitar el apretujamiento.

El diseño de las plataformas no considera la interacción peatonal entre las zonas de circulación y las zonas de espera, esto resulta en una afectación de la capacidad de estos elementos, la cual varía en función de los flujos peatonales, afectando el ancho efectivo y las velocidades peatonales en la zona de circulación, por lo que la capacidad de la plataforma está asociada con el ancho total de la misma.

Los usuarios de la zona de espera se concentran en el área de influencia de las puertas de ascenso/ descenso, resultando en una distribución heterogénea a lo largo de la zona de espera, este comportamiento no es considerado por ninguna metodología para su dimensionamiento.

Los elementos de circulación peatonal horizontales en plataformas presentan variaciones significativas de flujo máximo, densidad máxima y velocidad a flujo libre en comparación con los elementos de circulación como andenes o puentes

peatonales, estos indicadores se ven afectados por el sistema de actividades y factores propios del entorno.

La composición por género sobre la plataforma presenta una distribución 56: 44 (mujeres: hombres), la hora pico se presenta en la tarde entre las 17:15 y las 18:15 con una distribución homogénea de los flujos peatonales, y presenta un nivel de servicio D según los estándares del TCQSM 2013, con la escala calibrada el nivel de servicio mejora a C. La composición por zona estableció que la zona de circulación presenta un uso elevado en comparación con la zona de espera con una distribución de 83: 17. La velocidad representativa de descenso es de 1.12 m/s, siendo mayor que la velocidad representativa de circulación, 0.99 m/s.

Sobre la plataforma de estaciones de sistemas de transporte BRT las velocidades peatonales de circulación y de descenso no presentan una distribución normal. Las velocidades de circulación y de descenso indican que los usuarios con equipaje caminan a una velocidad estadísticamente igual que los usuarios sin equipaje.

Se logró calibrar el modelo de flujo lineal para la zona de circulación de la plataforma, considerando exitosa la toma de información de manera manual. Así mismo, se encontró que la calibración de un modelo de flujo lineal para plataformas no debe considerar de manera integral el efecto de las zonas de espera o de las zonas de acumulación, esto repercute en la representatividad del modelo en cuanto a densidades y flujos máximos peatonales.

La escala de Niveles de Servicio calibrada para zonas de espera en estaciones de sistemas BRT es la primera en realizarse en el país, esto es fundamental ya que permite comparar y validar la aplicación de las metodologías tradicionales. Los usuarios de la zona de espera de la plataforma indican que la calidad del servicio asociada a densidad peatonal que se presenta con mayor frecuencia es regular, y la que se presenta con menor frecuencia es excelente. La percepción de las mujeres refleja una menor aceptación de mayores densidades peatonales que la percepción de los hombres.

La percepción de los usuarios de la zona de espera de la plataforma indica que están conformes con tener más gente a su alrededor, a pesar de esto, a partir de los 5 p/m² los usuarios consideran que la calidad del servicio disminuye a pésima, este indicador debe ser considerado para el diseño de otros sistemas de transporte, procurando no ofrecer densidades superiores. La escala de densidad peatonal calibrada permite la reducción del dimensionamiento de las zonas de espera, manteniendo niveles de operación adecuados.

La percepción del apretujamiento por parte de los usuarios de la zona de espera no se ve afectada por el género, estadísticamente no presenta diferencias significativas por lo que la calibración de una escala de Nivel de Servicio no debe considerar esta variable.

Los usuarios opinan que bajo condiciones excelentes de densidad peatonal están dispuestos a esperar 15 minutos o más, pero que a medida que las condiciones empeoren el tiempo de espera máximo se reduce a 4.05 minutos, por lo que el tiempo de espera sobre las zonas de espera de la plataforma se ve afectado por la densidad peatonal

5. RECOMENDACIONES

La percepción de los usuarios es un pilar fundamental para el diseño y operación de cualquier sistema de transporte, es necesario que desde la academia se incentive su investigación orientada a la calibración de los indicadores de Niveles de Servicio para diferentes elementos de circulación peatonal, logrando conformar un documento técnico que represente de manera adecuada la percepción de los usuarios en el entorno y se constituya como un elemento de apoyo para la construcción de nuevos sistemas de transporte, limitando por ejemplo la densidad peatonal en zonas de espera o a bordo de vehículos.

Los efectos del apretujamiento sobre la opinión de aceptabilidad de tiempos de espera son claros, y deben ser considerados en las etapas de diseño y evaluación de los sistemas de transporte público, dentro de estos efectos se recomienda considerar la influencia en los beneficios sociales. Así mismo, se debe re conceptualizar el atributo de comodidad en los sistemas de transporte, se pretende desincentivar el uso del vehículo privado ofreciendo densidades peatonales malas o inaceptables en estaciones y vehículos del sistema.

Futuros estudios deben contrastar los métodos para el dimensionamiento de los elementos de circulación peatonal en una estación, validando si se requiere del uso de software de simulación.

La capacidad y Niveles de Servicio de una plataforma están condicionados por el ancho del elemento y el comportamiento de los usuarios, por lo que futuras investigaciones deben considerar la toma de información en estaciones de diferentes características, considerando a su vez la toma de información mediante cámaras de video.

BIBLIOGRAFÍA

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ. Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y el Transporte. Bogotá, 2005. tomo 1. 255 p.

BAÑÓN, Luis y BEVIÁ. José. Manual de Carreteras elementos y proyecto. Ortiz e Hijos, Contratista de Obras S.A, 2000. Vol 1. 409 p.

BAY AREA RAPID TRANSIT. Bart Facilities Standards Architecture – Passenger Stations. San Francisco, 2013. 48 p.

CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ. Observatorio de Movilidad Balance de Movilidad 2007 – 2016 Reporte Anual de Movilidad 2016. Bogotá D.C.: 2017. 83 p.

CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ. Observatorio de Movilidad Reporte Anual de Movilidad 2015. Bogotá D.C.: 2016. 74 p.

CÁMARA DE COMERCIO DE BOGOTÁ. Resultados encuesta de percepción sobre las condiciones, calidad y servicio a los usuarios de TransMilenio, TPC y SITP. 2013. 37 p.

CENTRE FOR EUROPEAN POLICY STUDIES. Bogota's Sustainable mass urban transport system. 2015. 4 p.

CITY OF EDMONTON. LRT Design Guidelines. Edmonton, 2017. 754 p.

CRACKNELL, John. TransMilenio Busway-Based Mass Transit, Bogotá, Colombia. 2003. 23 p.

DAAMEN, Winnie. Modelling Passenger Flows in Public Transport Facilities. Delft University of Technology. Delft, 2004. 403 p.

DAS, Shreya y PANDIT, Debapratim. Methodology to Determine Level of Service for Bus Transit in a Developing Country Like India. En: 13th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management (4: 7-13, Julio, Utrecht). 2013. 28 p.

DAVIDICH, Maria. KÖSTER, Gerta. Predicting Pedestrian Flow: A Methodology and Proof of Concept Based on Real-Life Data. En: PLOS ONE, vol 8, no 12. 2013. p. 1-11.

DE PALM, André; LINDSEY, Robin y MONCHAMBERT, Guillaume. The Economics of Crowding in Public Transport. 2015. 46 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. CONPES 3260 Política Nacional de Transporte Urbano y Masivo. Bogotá, 2003. 37 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. CONPES 3882 Apoyo del gobierno nacional a la política de movilidad de la región capital Bogotá-Cundinamarca y declaratoria de importancia estrategia del proyecto sistema integrado de transporte masivo – Soacha Fases II y III. Bogotá, 2017. 81 p.

DUDUTA, Nicolae y SUBEDI, Asis. Understanding Platform Overcrowding at Bus Rapid Transit Stations. 2015. p. 1-14.

DUEÑAS, Domingo. Calidad del servicio en el sistema de transporte público en buses en ciudades pequeñas e intermedias. 2000. 157 p.

ECOLOGISTAS EN ACCIÓN. Ideas y buenas prácticas para la movilidad sostenible. Ministerio de Medioambiente. España. 2007. 33 p.

FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION. Characteristics of BUS RAPID TRANSIT for Decision-Making. Florida. Febrero, 2009. 412 p.

FLORIDA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. QUALITY / LEVEL OF SERVICE HANDBOOK. 2009. 152 p.

FRUIN, John. Designing for pedestrians [En línea] Citado el 23 de agosto de 2017. Disponible en <https://ntl.bts.gov/DOCS/11877/Chapter_8.html>

FRUIN, John. Designing for Pedestrians: A Level-Of-Service Concept. 1971. 15 p.

GESELLSCHAFT FÜR TECHNISCHE ZUSAMMENARBEIT. Sustainable Transport: A Sourcebook for Policy-Makers in Developing Cities, Module 3a: Mass Transit Options. 2003. 30 p.

GILBERT, Richard. Defining Sustainable Transportation. The Centre for Sustainable Transportation. 2005. 22 p.

GOLDMAN, Todd y GORHAM, Roger. Sustainable urban transport: Four innovative directions. En: Technology in society. 2006. vol. 28. p. 261-273.

GUÍO, Fredy. Caracterización y modelación de flujos peatonales en infraestructuras continuas – caso estudio Tunja - Colombia. Tesis de Maestría, Ingeniería con Énfasis en Tránsito. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Escuela de posgrados, 2009. 153 p.

GUTIÉRREZ, Luis. Transporte Público de calidad y la movilidad urbana. 2013. 13 p.

HELBING, Dirk. JOHANSSON, Anders. Pedestrian, Crowd and Evacuation Dynamics. En: Encyclopedia of Complexity and Systems Science 16. 2015. p. 6476-6495.

INSTITUTE FOR DEVELOPMENT STUDIES. Sustainable Transport in Colombia: Bogota and the Transmilenio. 2012. 4 p.

INSTITUTE FOR TRANSPORTATION & DEVELOPMENT POLICY. The BRT Planning Guide. 2017. 1076 p.

INSTITUTE FOR TRANSPORTATION & DEVELOPMENT POLICY. The BRT Standard. 2016. 40 p.

INTER-AMERICAN DEVELOPMENT BANK, Transport Division. Evaluation of Passenger Comfort in Bus Rapid Transit Systems. 2015. 67 p.

JIA, Wendy y CHOW, Melissa. How Crowded is Crowded? A Practitioner's Tool to Assessing Rail Congestion. 2014. 14 p.

JIMÉNEZ, Luis. Transporte y movilidad, claves para la sostenibilidad. Universidad Complutense de Madrid y Observatorio de la Sostenibilidad en España. [En línea] Citado el 15 de mayo de 2018. Disponible en < http://www.fgcsic.es/lychnos/es_ES/articulos/transporte_movilidad_claves_para_la_sostenibilidad >

KONE. Planning Guide for People Flow™ in transit stations. 43 p.

KOVÁCKS, Zsuzsanna. Pedestrian's Level of Service on Tramline Platforms in Budapest. En: POLLACK PERIODICA. 2015. vol. 10, no. 1. p. 93-102.

LÁMBARRY, Fernando. RIVAS, Luis y, TRUJILLO, Mara. Desarrollo de una escala de medición de la percepción en la calidad del servicio en los sistemas de autobuses de tránsito rápido, a partir del Metrobús de la Ciudad de México. En: INNOVAR JOURNAL. vol. 23, no 50. p. 79-92.

LEON, Laurent. Video Data Collection Method for Pedestrian Movement Variables & Development of A Pedestrian Spatial Parameters Simulation Model for Railway Station Environments. Tesis de Doctorado; Doctor of Philosophy of Science in Engineering. Stellenbosch: Universidad de Stellenbosch. 2012. p. 82.

LI, Zheng y HENSHER, David. Crowding un Public Transport. A Review of Objective and Subjective Measures. En: Journal of Public Transportation. 2013. vol. 16, no. 2. p. 107-134.

LÍNEA VERDE. Módulo IX: Transporte sostenible. 9 p.

LOWSON. Martin. A New Approach to sustainable transport systems. En: 13th World Clean Air and Enviromental Protection Congress (6: 22-27, agosto, Londres). 2004. 10 p.

MÁRQUEZ, Luis Fernando. Determinación del Nivel de Servicio en Pasillos de Acceso a las estaciones Perisur y Villa Olímpica del BRT – Metrobús. Tesis de Pregrado, Ingeniería civil. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. División de ingeniería civil y geomática, 2013. 121 p.

MATHEW, Tom y RAO, KV Krishna. Introduction to Transportation Engineering. Mumbai, 2006. p. 3.1-3.5.

MOSTACHJOV, Dmitrij. Sustainable public Transportation: quantifying the benefits of Sustainable Bus Rapid Transit systems. Tesis de Maestria. Stockholm: KTH Industriell teknik och management. 2015. 63 p.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. NFPA 130 – Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail System. 2017. 78 p.

NEUTS, Bart y NIJKAMP, Peter. Tourist Crowding Perception and Acceptability in Cities An Applied Modelling Study on Bruges. En: Annals of Tourism Research. 2012. vol. 39, no. 4. p. 2133 – 2153.

NEW YORK CITY DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Pedestrian Level of Service Study. Phase I. 2006. 167 p.

OLIVKOVÁ, Ivana. Quality standards for measuring the level of service in public transport. En: Perner's Contacts. 2011. vol. 5, no. 5. p. 229 – 235.

PANTZAR, Mia. PEDESTRIAN LEVEL OF SERVICE AND TRIP GENERATION – International Best Practice and Its Applicability to Melbourne. Melbourne. 2012. 45 p.

PATRA, Monalisa; SALA, Eswar y RAVISHANKAR, K.V.R. Evaluation of pedestrian flow characteristics across different facilities inside a railway station. En: World Conference on Transport Research (6: 7-16, Julio, Shanghai). 2016. p. 4767-4774.

Pruebas de hipótesis para dos muestras. [En línea] Citado el 30 de marzo de 2018. Disponible en < <http://www.geociencias.unam.mx/~ramon/EstInf/Clase15.pdf> >

REILLY, Jack y LEVINSON, Herbert. Public Transport Capacity Analysis Procedures for Developing Cities. World Bank, Transport Research Support Program. 2011. 127 p.

RODRIGUE, Jean-Paul. Transportation and Energy. [En línea] Citado el 10 de marzo de 2018. Disponible en < https://transportgeography.org/?page_id=5717 >

SAHANI, Rima. LEVEL OF SERVICE CRITERIA OF URBAN WALKING ENVIRONMENT IN INDIAN CONTEXT USING CLUSTER ANALYSIS. Tesis de Maestria; Master of Technology in Transportation Engineering. Rourkela, 2013. 123 p.

SANTA CLARA VALLEY TRANSPORTATION AUTHORITY VTA Transit. LIGHT RAIL TRANSIT SERVICE GUIDELINES. Sustainability Policy 1-32, San Jose, 2007. 34 p.

SCHACHENMAYR, Martin. Application Guidelines for the Egress Element of the Fire Protection Standard for Fixed Guideway Transit Systems, For Use with the 1997 Edition of the NFPA 130 Standard. 1998. 109 p.

SERIANI, Sebastián. Pedestrian Level of Interaction on Platform Conflict Areas by Real-scale Laboratory Experiments. En: 13th World Clean Air and Environmental Protection Congress (3: 1-16, Enero, Bristol). 2016. p. 1-12.

SHAN, Xiaonian; YE, Jianhong. y CHEN, Xiaohong. Proposing a Revised Pedestrian Walkway Level of Service Based on Characteristics of Pedestrian Interactive Behaviours in China. En: PROMET - Traffic&Transportation. 2013. vol. 28, no. 6. p. 583 – 591.

STEER DAVIES GLEAVE. TRANSMILENIO Situación Actual – Diseño Conceptual. [Diapositivas]. 1999. 122 p.

STJERNBORG, Vanessa y MATTISSON, Ola. The Role of Public Transport in Society – A Case Study of General Policy Documents in Sweden. En: Sustainability. 2016. vol. 28, no. 1120. p. 1-16

THE WORLD BANK. Cities on the Move. A world bank urban transport strategy review. Washington DC., 2002. 228 p.

TIRACHINI, Alejandro; HENSHER, David y ROSE, John. Seis Pasajeros por Metro Cuadrado: Efecto del Hacinamiento en la Oferta del Transporte Público, El Bienestar de los Usuarios y la Estimación de la Demanda. En: XVI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte (5: 10-13, octubre, Santiago). 2013. 15 p.

TRANSMILENIO S.A. Estadísticas de oferta y demanda del Sistema Integrado de Transporte Público - SITP. [En línea] Citado el 19 de enero de 2018. Disponible en <http://www.transmilenio.gov.co/Publicaciones/estadisticas_de_oferta_y_demanda_del_sistema_integrado_de_transporte_publico_sitp_septiembre_2017>

TRANSMILENIO S.A. Infraestructura [En línea] Citado el 10 de marzo de 2018. Disponible en <
http://www.transmilenio.gov.co/Publicaciones/nuestro_sistema/Componentes/Infraestructura >

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Highway Capacity Manual 2010. 5th Edition. 2010. vol 3. 502 p.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. TCRP Report 90 - Bus Rapid Transit Volume 2: Implementation Guidelines. Washington D.C. 2003. 233 p.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Transit Capacity and Quality of Service Manual. 3th Edition. Washington D.C. 2013. 804 p.

VALDIVIESO, Carlos; CASTELLÓN, Roberto y VALDIVIESO, Oscar. Determinación del tamaño muestral mediante el uso de árboles de decisión. En: UPB – INVESTIGACIÓN & DESARROLLO, vol. 11. 2011. p. 148-176.

WASHINGTON METROPOLITAN AREA TRANSIT AUTHORITY. Shady Grover Station Capacity Improvements Study. 2015. Montgomery County. 125 p.

YANG, Yi-hui. et-al. LOS of Pedestrian Perception for Corridor in Subway Station Considering the Reliability and Validity. En: Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology. 2016. vol. 16, no. 2. p. 212 – 218.

YAO, Liya, *et al.* Adaptability Analysis of Service Facilities in Transfer Subway Stations. En: Mathematical Problems in Engineering. vol. 12. 2012. p. 5.

YAO, Liya. *et al.* Research on the Behavior Characteristics of Pedestrian Crowd Weaving Flow in Transport Terminal. En: Mathematical Problems in Engineering. vol 2012. 2012. p. 1-10.

ZEITLIN, Jascha M. Perceived Crowding and Visitor Support for Use Rationing: A Reanalysis of Existing Data. Tesis de Maestría, Master of science in recreation resource management. Utah State University. Logan, 2008. 292 p.

ANEXOS

Anexo A. Parámetros típicos de torniquetes TCQSM 2013

Tipo de entrada	Brecha promedio observada (s)	Flujo peatonal equivalente (p/min)
Entrada libre (solo barrera)	1.0 - 1.5	40 - 60
Recaudo de tiquete manual por operador	1.7 - 2.4	25 - 35
Torniquete accionado con monedas, ranura sencilla	1.2 - 2.4	25 - 50
Torniquete accionado con monedas, ranura doble	2.5 - 4.0	15 - 25
Salida de 0.9 m de ancho	0.8	75
Salida de 1.2 m de ancho	0.6	100
Salida de 1.5 m de ancho	0.5	125

Fuente: adaptado de TRB. TCQSM 2013. p.

Anexo B. Parámetros típicos de Q y C para diferentes unidades de acceso BRTPG 2017

Tipo de entrada	Q (p/h)	C (p/h)
Maquina vendedora de tiquetes	$Q = \frac{Max(Pb, Pa)}{N_t}$ <p>En donde N_t=número promedio de tiquetes comprados por operación, P_a = total de pasajeros que salen y P_b= total de pasajeros que llegan</p>	180
Puerta de entrada: torniquete con tarjeta de proximidad	Total de pasajeros que llegan	900
Puerta de salida: torniquete con tarjeta de proximidad	Total de pasajeros que salen	900
Salida sin torniquetes	Total de pasajeros que salen	3000 /m2

Fuente: adaptado de ITDP. The BRT Planning Guide 2017. p. 849.

Anexo C. Formato para inventario de plataforma



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA - INGENIERÍA DE TRANSPORTE Y VÍAS
 PDG - MOVILIDAD INTERNA PEATONAL EN ESTACIONES DE SISTEMAS DE
 TRANSPORTE MASIVO BRT - CASO BOGOTÁ
 FORMATO - INVENTARIO PLATAFORMA

Fecha / /
 Pagina de

Plataforma					
Ancho (m)		Elementos de Seguridad	Si / No	Elementos de Información	Si / No
Largo (m)		Tipo de Instalación	Cerrada / Parcialmente Cerrada / Abierta		
Tipo de superficie		Elementos de Iluminación	Si / No	Funcional	Si / No
Barandas	Si / No	Ancho (m)		Puerta 1	
Esquema Plataforma		Ancho (m)		Funcional	Si / No
		Elementos de Información	Si / No	Demarcación Horizontal	Si / No
		Puerta 2			
		Ancho (m)		Funcional	Si / No
		Elementos de Información	Si / No	Demarcación Horizontal	Si / No
		Puerta 3			
		Ancho (m)		Funcional	Si / No
		Elementos de Información	Si / No	Demarcación Horizontal	Si / No
Observaciones					

Fuente: autores

Anexo D. Formato para aforo de volúmenes



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA - INGENIERÍA DE TRANSPORTE Y VÍAS
 PDG - MOVILIDAD INTERNA PEATONAL EN ESTACIONES DE SISTEMAS DE
 TRANSPORTE MASIVO BRT - CASO BOGOTÁ
 FORMATO - VOLUMENES PEATONALES

Fecha / /
 Pagina de
 Sección de Control 0 / 4

Intervalo (5 min)	Peatón	Movimiento							
		1	Total	2	Total	3	Total	4	Total
	HSE								
	HCE								
	MSE								
	MCE								

Fuente: autores

Anexo E. Formato para aforo de velocidades peatonales.



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA - INGENIERÍA DE TRANSPORTE Y VÍAS
 PDG - MOVILIDAD INTERNA PEATONAL EN ESTACIONES DE SISTEMAS DE TRANSPORTE MASIVO BRT - CASO BOGOTÁ
 FORMATO - VELOCIDADES PEATONALES

Fecha / /
 Página de

TIPO PEATON: HSE (Hombre sin equipaje) HCE (Hombre con equipaje) MSE (Mujer sin equipaje) MCE (Mujer con equipaje)

Intervalo (5 min)	Tipo Peatón	Tiempo (s)	Movimiento	Tipo Peatón	Tiempo (s)	Movimiento	Intervalo (5 min)	Tipo Peatón	Tiempo (s)	Movimiento	Tipo Peatón	Tiempo (s)	Movimiento

Fuente: autores

Anexo F. Formato para aforo de densidades peatonales.



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA - INGENIERÍA DE TRANSPORTE Y VÍAS
 PDG - MOVILIDAD INTERNA PEATONAL EN ESTACIONES DE SISTEMAS DE TRANSPORTE MASIVO BRT - CASO BOGOTÁ
 FORMATO - DENSIDADES PEATONALES

Fecha / /

Página de

Intervalo (5 min)	Puerta N°	Numero de Personas	L.Equi. (m)	Puerta N°	Numero de Personas	L.Equi. (m)	Intervalo (5 min)	Puerta N°	Numero de Personas	L.Equi. (m)	Puerta N°	Numero de Personas	L.Equi. (m)

Fuente: autores

Anexo G. Ejemplos de cálculo de plataformas

A continuación, se presentan ejemplos del dimensionamiento de la *plataforma* considerando las metodologías expuestas en el numeral 2.4. *DISEÑO DE ESTACIONES*, los datos de volumen recopilados en campo (anexo digital 1) y la escala de nivel de servicio calibrada para zonas de espera (ver numeral 4.4 *ESCALA DE NIVEL DE SERVICIO PARA ZONAS DE ESPERA*). Con base en lo anterior se estiman los siguientes parámetros de diseño. Periodo de análisis, t_o (min) = 5.0, Demanda estimada de pasajeros que circulan sobre la plataforma, Q_d (p/5 min) = 208.3, Demanda estimada de pasajeros que esperan sobre la plataforma Q_d (p/5 min) = 62.5 y, Longitud de la plataforma, L_p (m) = 19.60. En campo se observó que la frecuencia F de los buses en la hora pico era de 4.5 min La verificación del tiempo de evacuación de la plataforma se realizará con los siguientes parámetros: vehículos sobre la plataforma = 1, máxima ocupación del vehículo = 180 p, periodo de falla = $2 * F$, el acceso a la plataforma se realiza mediante dos pasillos de circulación, uno interno y otro externo, que presentan el mismo ancho que la plataforma, considerando un escenario crítico en el que la evacuación se realiza por el pasillo externo al estar más cerca de la salida de la estación.

• **Plataforma TCQSM 2013.** El espacio peatonal sugerido corresponde a aquel que se presenta en un nivel de servicio C, por lo tanto, $P_s = 0.65 \text{ m}^2/\text{p}$. El elemento de circulación también será diseñado para un nivel de servicio C, por lo que $P_{fM} = 49 \text{ p/m/min}$.

$$\text{Espacio de la zona de espera, } W_{ais} = 62.5 * 0.65 = 40.63 \text{ m}^2$$

$$\text{Ancho de pasarela requerido, } W_E = 208.30 / 5 / 49 = 0.85 \text{ m}$$

Espacio de colas, $Q_s = \text{no se requiere}$

$$\text{Area muerta, } D_S = 0.45 * 2 * 19.6 = 17.64 \text{ m}^2$$

$$\text{Ancho minimo plataforma, } W_p = (17.64 + 40.63) / 19.60 + 0.85 = 4.1$$

Ancho de la plataforma, W_p redondeado a 4.5 m

Validación NFPA130: El ancho de la plataforma considera una distancia de amortiguamiento superior a los 0.30 m, y se provee un ancho libre superior a 1.12 m. Considerando un periodo de 15 min, el tiempo de evacuación de la plataforma es:

$$\text{Carga de ocupacion de la plataforma} = 812.4 * 2 * \frac{4.5}{4.5} + 180 = 993$$

$$\text{Capacidad de egreso elementos de la plataforma} = (4.5 - 2 * 0.3) * 81.9 = 319.4 \text{ p/min}$$

$$\text{Tiempo evacuacion plataforma} = \frac{993}{319.44} = 3,11 \text{ min} < 4.0 \text{ min}$$

$$W_p \text{ definitvo} = 4.5 \text{ m}$$

• **Plataforma BRTPG 2017** La densidad peatonal P_D empleada para las zonas de espera es de 3.0 p/m^2 , y el flujo de saturación para el elemento de circulación Pf_{sat} es de 2000 p/h .

Ancho de pasarela requerido, $W_E = (208.30 * 12) / 2000 = 1.3 \text{ m}$

Numero de pasajeros esperando en la zona de espera, $Q_{Pax} \sum_{i=1}^1 \frac{62.5 * 12}{60/4.5} = 56.3 \text{ p}$

Espacio de la zona de espera, $W_{ais} = 56.3/3 = 18.8 \text{ m}^2$

Ancho de la zona de espera, $W_{wais} = 18.8/19.6 = 1.0 \text{ m}$

Ancho de la zona de espsera, $W_{wais1} = 0 \text{ m}$

Ancho minimo plataforma, $W_P = 0.5 * 2 + 1.0 + 1.3 + 0 = 3.3 \text{ m}$

Ancho de la plataforma, W_P redondeado a 3.5 m

Validación NFPA130: El ancho de la plataforma considera una distancia de amortiguamiento superior a los 0.30 m , y se provee un ancho libre superior a 1.12 m . Considerando un periodo de 15 min , el tiempo de evacuación de la plataforma es:

Carga de ocupacion de la plataforma = $812.4 * 2 * \frac{4.5}{4.5} + 180 = 993$

Capacidad de egreso elementos de la plataforma = $(3.5 - 2 * 0.3) * 81.9 = 237.5 \text{ p/min}$

Tiempo evacuacion plataforma = $\frac{993}{237.5} = 4.18 \text{ min} > 4.0 \text{ min} \therefore \text{aumentar } W_P$

Aumentado a $4 \text{ m } W_P$ el tiempo de evacuacion se reduce a 3.6 min

W_P definitvo = 4.0 m

• **Plataforma LRTDG 2017.** El espacio peatonal P_S empleado para las zonas de espera es de $0.743 \text{ m}^2/\text{p}$, el flujo de diseño para el elemento de circulación Pf_M es de 81.9 p/m/min .

Area para pasajeros en la plataforma, $W_S = (62.5 + 208.30) * 0.743 = 201.20 \text{ m}^2$

Ancho para pasajeros en la plataforma, $W_P = 201.20/19.6 * = 10.3 \text{ m}$

Ancho minimo plataforma, $W_P = 0.400 * 2 + 10.3 = 11 \text{ m}$

Ancho de la plataforma, W_P redondeado a 11 m

* A pesar de que la metodología LRTDG 2017 establece que la longitud para estaciones a nivel debe ser mínimo 100 m , para el ejemplo de comparación bajo un mismo escenario, se selecciona 19.6 m

Validación NFPA130: El ancho de la plataforma considera una distancia de amortiguamiento superior a los 0.30 m, y se provee un ancho libre superior a 1.12 m. Considerando un periodo de 15 min, el tiempo de evacuación de la plataforma es:

$$\text{Carga de ocupacion de la plataforma} = 812.4 * 2 * \frac{4.5}{4.5} + 180 = 993$$

$$\text{Capacidad de egreso elementos de la plataforma} = (11 - 2 * 0.3) * 81.9 = 851.76 \text{ p/min}$$

$$\text{Tiempo evacuacion plataform} = \frac{993}{851.76} = 1.17 \text{ min} < 4.0 \text{ min}$$

$$W_p \text{ definitvo} = 11.0 \text{ m}$$

• **Plataforma TCQSM 2013 – considerando escala de Nivel de servicio calibrada para zonas de espera.** El espacio peatonal sugerido corresponde a aquel que se presenta en un nivel de servicio C, por lo tanto, $P_S = 0.32 \text{ m}^2/\text{p}$. El elemento de circulación también será diseñado para un nivel de servicio C, por lo que $Pf_M = 49 \text{ p/m/min}$.

$$\text{Espacio de la zona de espera, } W_{aiS} = 62.5 * 0.32 = 20.00 \text{ m}^2$$

$$\text{Ancho de pasarela requerido, } W_E = 208.30 / 5 / 49 = 0.85 \text{ m}$$

Espacio de colas, $Q_s = \text{no se requiere}$

$$\text{Area muerta, } D_S = 0.45 * 2 * 19.6 = 17.64 \text{ m}^2$$

$$\text{Ancho minimo plataforma, } W_P = (17.64 + 20.00) / 19.60 + 0.85 = 2.8$$

Ancho de la plataforma, W_p redondeado a 3.0 m

Validación NFPA130: El ancho de la plataforma considera una distancia de amortiguamiento superior a los 0.30 m, y se provee un ancho libre superior a 1.12 m. Considerando un periodo de 15 min, el tiempo de evacuación de la plataforma es:

$$\text{Carga de ocupacion de la plataforma} = 812.4 * 2 * \frac{4.5}{4.5} + 180 = 993$$

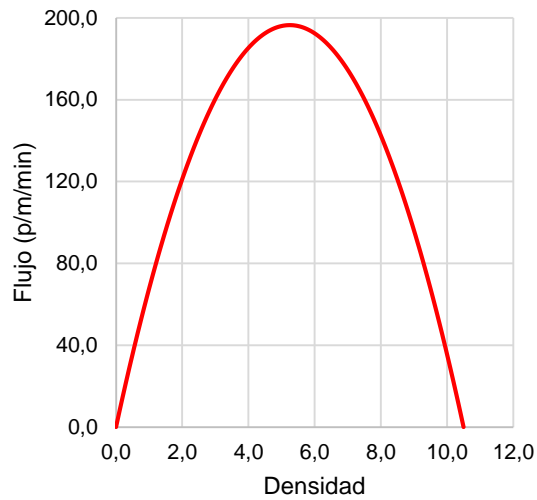
$$\text{Capacidad de egreso elementos de la plataforma} = (3 - 2 * 0.3) * 81.9 = 196.56 \text{ p/min}$$

$$\text{Tiempo evacuacion plataforma} = \frac{993}{196.56} = 5.05 \text{ min} > 4.0 \text{ min} \therefore \text{aumentar } W_p$$

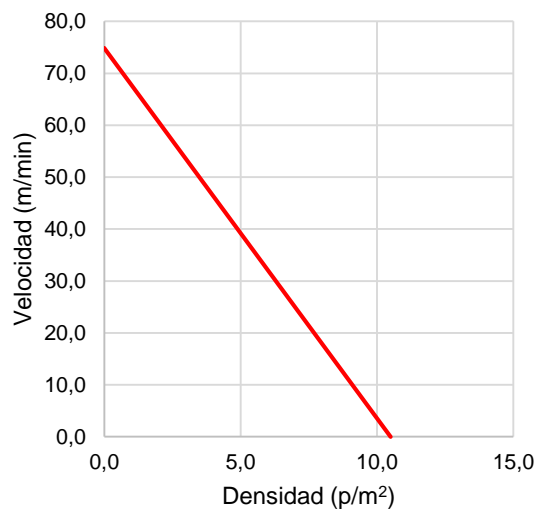
Aumentado a 4 m W_p el tiempo de evacuacion se reduce a 3.6 min

$$W_p \text{ definitvo} = 4.0 \text{ m}$$

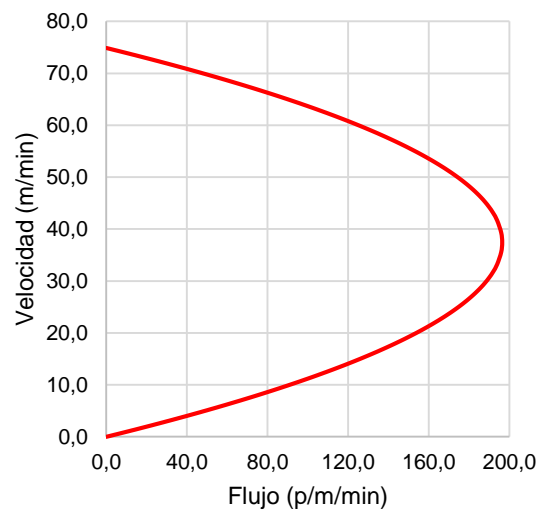
Anexo H. Modelo de relaciones macroscópicas en plataformas – zonas de espera



$$q(p/m/min) = 13.49 * k(p/m^2) - 7.13 * k(p/m^2)^2$$




$$v \left(\frac{m}{s} \right) = 74.86 - 7.13 * k \left(\frac{p}{m^2} \right)$$



$$v = 37.43 \pm \frac{\sqrt{74.86^2 - 28.52 * q (p/m/min)}}{2}$$

Fuente: autores

Anexo I. Formato de encuesta de percepción en zonas de espera

	UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA - INGENIERÍA DE TRANSPORTE Y VÍAS						
	PDG - MOVILIDAD INTERNA PEATONAL EN ESTACIONES DE SISTEMAS DE TRANSPORTE MASIVO BRT - CASO BOGOTÁ						
ENCUESTA DE PERCEPCION COMODIDAD ZONAS DE ESPERA							
¿Cómo calificaría el apretujamiento en la zona de espera de la plataforma?							
Pesimo	<table border="1" style="display: inline-table;"> <tr> <td style="width: 30px; text-align: center;">1</td> <td style="width: 30px; text-align: center;">2</td> <td style="width: 30px; text-align: center;">3</td> <td style="width: 30px; text-align: center;">4</td> <td style="width: 30px; text-align: center;">5</td> </tr> </table>	1	2	3	4	5	Excelente
1	2	3	4	5			
¿Por cuánto tiempo estaría dispuesto a esperar bajo estas condiciones? _____ (min)							
Sexo	H M						
Puerta N°	<table border="1" style="display: inline-table;"> <tr> <td style="width: 30px; text-align: center;">1</td> <td style="width: 30px; text-align: center;">2</td> <td style="width: 30px; text-align: center;">3</td> </tr> </table>	1	2	3	N° Personas _____		
1	2	3					
Observaciones	_____						

Fuente: autores