

Análisis de la evolución de la red de rutas del transporte público colectivo urbano (TPCU) al sistema de transporte masivo integrado de occidente (MIO), y su relación con los cambios en la accesibilidad en la ciudad de Santiago de Cali

María José Grueso Mendoza - 1626839

maria.gueso@correounivalle.edu.co

Sebastián Mallama Grisales - 1628004

sebastian.mallama@correounivalle.edu.co



Universidad Del Valle
Facultad De Ingeniería
Escuela De Ingeniería Civil Y Geomática
Grupo De Investigación En Transporte, Tránsito Y Vías - GITTV
Ingeniería Topográfica
Santiago De Cali
Febrero De 2022

Análisis de la evolución de la red de rutas del transporte público colectivo urbano (TPCU) al sistema de transporte masivo integrado de occidente (MIO), y su relación con los cambios en la accesibilidad en la ciudad de Santiago de Cali

María José Grueso Mendoza

Sebastián Mallama Grisales

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Topográfico

Director De Tesis

Ciro Jaramillo Molina PhD.



Universidad Del Valle
Facultad de ingeniería
Escuela De Ingeniería Civil Y Geomática
Grupo De Investigación En Transporte, Tránsito Y Vías - GITTV
Ingeniería topográfica
Santiago de Cali
Febrero de 2022

Nota de aceptación

Firma del presidente de jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Dedicatoria

María José Grueso Mendoza:

El primer gran logro fue haber podido ingresar a esta universidad, conocer docentes con tanta pasión para enseñar y compartir sus experiencias, ayudando a formarme como persona y como profesional. Poder dar fin a esta etapa de mi vida significa contar con las herramientas necesarias para trabajar por alcanzar mis metas propuestas a largo plazo. Por esto quiero dedicar este triunfo a todas las personas que hicieron parte de este proceso, a mis profesores, compañeros y amigos, por haberme ayudado a crecer como persona y por continuar haciéndolo con quienes apenas están iniciando.

A mi madre Guiselly Mendoza, a mi tío Manuel Orejuela y a mi abuela Orfilia Mendoza les quiero dar las gracias por confiar siempre en mí y ver mis fortalezas aun cuando yo misma no lo hacía. Gracias por ser siempre las voces de aliento en las situaciones adversas y por ser el motivo de mi esfuerzo y dedicación. A mi tío Edgar Marín, que, aunque ya no está físicamente, le quiero dar las gracias por demostrarme que se puede querer mucho a alguien sin importar que no se comparta ningún lazo familiar y que sin importar la edad todas las metas se pueden alcanzar.

A mi compañero de trabajo de grado y amigo, por su paciencia y perseverancia entregada a este proyecto.

A la Universidad del Valle, por haberme abierto sus puertas y permitirme iniciar y culminar una etapa importante de mi vida.

Sebastián Mallama Grisales:

Este trabajo de grado me gustaría dedicarlo a mi mamá, Ruby y a mis tíos Doris, Dilson, Olanda y Javier, que desde que tengo uso de razón, han confiado ciegamente en mis capacidades y la vida me ha permitido compensarles con éxitos, ya no quedan palabras para agradecer eternamente su confianza, voluntad y afecto que han puesto en mí, son los responsables directos que yo sea la persona que soy al día de hoy, y créanme que trataré de cada día mejorar más para ser un excelente profesional lleno de esos buenos valores que tanto los caracterizan a ustedes. Agradecer también a mi compañera y sobre todo amiga de verdad, Maria José por su voluntad, paciencia conmigo y por sus capacidades y ganas de salir adelante, y por último y no menos importante, dedicarle este trabajo, esté donde esté, a mi querida abuelita Edelmira, dónde quieras que estés, mira, lo logré de nuevo, te quiero muchísimo y te extraño demasiado.

También debo agradecer a la vida por permitirme formarme en una institución tan maravillosa como la Universidad del Valle, cada día comprendo la importancia de los valores infundidos en este lugar tan especial, humano y sobre todo, empático con la sociedad, fue una experiencia para nunca olvidar.

Agradecimientos

Queremos expresar un sincero agradecimiento a nuestro director de tesis y profesor Ciro Jaramillo Molina, Ph.D por el acompañamiento, guía y apoyo que nos brindó en este proyecto. Sus conocimientos en las áreas de movilidad y transporte, así como su empatía, calidez humana y sobretodo disposición en tiempos tan complejos como en los que se realizó este trabajo, fueron el pilar para el inicio, desarrollo y culminación de los objetivos planteados, así como a los diferentes equipos de la Secretaría de Movilidad de Transporte de Cali, colegas ingenieros de Metrocali, que facilitaron en pro del conocimiento información valiosa y esencial para la elaboración de este trabajo.

Tabla de contenido

Resumen	1
Abstract	1
Introducción	2
1. Planteamiento del problema	3
1.1 Descripción del problema	3
1.2 Formulación del problema	5
1.3 Justificación	5
2. Objetivos	7
2.1 Objetivo general	7
2.2 Objetivos específicos	7
3. Marco contextual	8
3.1 Marco conceptual	8
3.2 Marco teórico	11
3.2.1 Indicadores de accesibilidad	11
3.2.2.1 Medidas topológicas	11
3.2.2.1.1 Indicadores absolutos	12
3.2.2.1.1.1 Indicador absoluto de tiempo global	12
3.2.2.1.1.2 Curvas isócronas	12
3.2.2.1.2 Indicadores relativos	12
3.2.2.1.2.1 Factor de ruta o indicador de trazado	12
3.2.2.1.2.2 Índice de trazado - velocidad	12
3.2.2.1.2.3 Indicador de densidad	13
3.2.2.1.2.4 Índice de densidad ponderada	13
3.2.2.2 Medidas agregadas	13
3.2.2.2.1 Índice de provisión de transporte público	13
3.2.2.2.2 índice relativo de provisión de transporte público (R-IPTP)	14
3.2.2.2.3 Indicador de Hansen	14
3.2.2.3 Análisis estadístico de datos	14
3.2.2.3.1 Medidas de distribución	15
3.2.2.3.1.1 Frecuencia absoluta	15

3.2.2.3.1.2 Frecuencia relativa.....	15
3.2.2.3.2 Medidas de posición	15
3.2.2.3.2.1 La media aritmética	15
3.2.2.3.2.2 La moda	15
3.2.2.3.2.3 La mediana.....	16
3.2.2.3.3 Medidas de dispersión absoluta.....	16
3.2.2.3.3.1 La varianza	16
3.2.2.3.3.2 La desviación estándar.....	16
3.2.2.3.3.3 Rango	17
3.2.2.3.3.4 Coeficiente de variación.....	17
3.2.2.3.3.5 Medida de simetría y asimetría.....	17
3.2.2.3.3.6 Medida de curtosis o apuntamiento.....	18
3.2.2.3.3.7 Coeficiente de correlación de Pearson	18
3.2.3 Herramientas y Softwares	18
3.2.3.1 Análisis espacial de datos.....	18
3.2.3.1.1 Los Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	19
3.2.3.1.1.1 ArcGIS.....	19
3.2.3.1.1.2 GeoDa	19
3.2.3.1.1.2.1 Diagrama de Caja y Bigotes (Box Plot).....	19
3.2.3.1.1.2.2 Diagrama de dispersión	20
3.2.3.1.1.2.3 Mapas temáticos: Cuantiles.....	21
3.3 Marco referencial	21
4. Metodología	25
4.1 Localización	25
4.2 Métodos y procedimientos.....	26
4.2.1 Caracterizar en variables territoriales el TPCU y el MÍO en los intervalos de tiempo estudiados.....	26
4.2.1.1 Identificación de las variables territoriales.....	26
4.2.1.2 Definición del rango de tiempo analizado	27
4.2.1.3 Generación de una base de datos completa sobre el TPCU en el año 2007 y el SITM- MIO en el año 2019	27

4.2.1.3.1 Corrección de los archivos vectoriales con información del TPCU y el SITM-MIO	28
4.2.1.3.2 Generación de variable de paradas del sistema de TPCU 2007	28
4.2.2 Identificar los indicadores de accesibilidad en común entre el TPCU y el MIO	29
4.2.2.1 Indicador de densidad (Izquierdo, R. (1994)).....	29
4.2.2.2 Indicador absoluto de tiempo global (Sarmiento, I.,Muñoz, J. Y Ángel, C., 2000) 31	
4.2.2.3 Indicador de Hansen (Hansen, W., 1959).....	32
4.2.2.4 índice relativo de provisión de transporte público (R-IPTP) (Jaramillo et al., 2012)	33
4.2.3 Modelar por medio de indicadores de accesibilidad territorial los sistemas de transporte a estudiar para evaluar su implementación.	33
4.2.4 Realizar un análisis estadístico-espacial de los indicadores calculados, para los sistemas de transporte estudiados, a través del tiempo.	34
5. Resultados	35
5.1 Caracterizar en variables territoriales el TPCU y el MIO en los intervalos de tiempo estudiados.....	35
5.2 Identificar los indicadores de accesibilidad en común entre el TPCU y el MIO	40
5.3 Modelar por medio de indicadores de accesibilidad territorial los sistemas de transporte a estudiar para evaluar su implementación.	41
5.3.1 Indicador de densidad	41
5.3.2 Indicador de densidad ponderada	42
5.3.3 Indicador absoluto de tiempo global	43
5.3.4 Índice de accesibilidad de Hansen	45
5.3.5 Índice relativo de provisión de transporte público R-IPTP	46
5.4 Realizar un análisis estadístico-espacial de los indicadores calculados, para los sistemas de transporte estudiados, a través del tiempo.....	49
5.4.1 Mapas y diagramas de caja y bigotes o box plot para cada indicador del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el 2019.	49
5.4.1.1 Indicador de densidad	50
5.4.1.2 Indicador de densidad ponderada	52
5.4.1.3 Indicador absoluto de tiempo global	54
5.4.1.4 Índice de accesibilidad de Hansen	56
5.4.1.5 Índice relativo de provisión de transporte público R-IPTP	58

5.4.2 Diagramas de dispersión (Indicadores de accesibilidad TPCU 2007 versus SITM-MIO 2019).....	59
5.4.2.1 Indicador de densidad	59
5.4.2.2 Indicador de densidad ponderada	61
5.4.2.3 Indicador absoluto de tiempo global	63
5.4.2.4 Índice de accesibilidad de Hansen	65
5.4.2.5 Índice relativo de provisión de transporte público R-IPTP	67
6. Discusiones de los resultados	69
7. Conclusiones y recomendaciones	70
8. Fuentes y bibliografía	72
9. Lista de anexos.....	74

Lista de figuras

Figura 1, Interpretación de un diagrama de dispersión.	21
Figura 2, Localización de la zona de estudio.	26
Figura 3, Matriz origen-destino – año 2007 - TPCU (izq.) y Matriz origen-destino – año 2019 – SITM-MIO (der.).....	32
Figura 4, Interpretación del diagrama de caja y bigotes.....	35
Figura 5, Esquema de la información consolidada en la base de datos geográfica.....	37
Figura 6, Red del TPCU – 2007 (izq.) y red del SITM-MIO – 2019 (der.).	39
Figura 7, Paradas del TPCU en el año 2007 (izq.) y del SITM-MIO en el año 2019 (der.).	39
Figura 8, Indicador de densidad del TPCU (2007) y del SITM-MIO (2019).....	41
Figura 9, Indicador de densidad ponderada del TPCU (2007) y del SITM-MIO (2019).....	42
Figura 10, Curvas isócronas del TPCU (2007) y del SITM-MIO (2019).	44
Figura 11, Indicador de Hansen del TPCU (2007) y del SITM-MIO (2019).	45
Figura 12, Índice relativo de provisión de transporte público R-IPTP del TPCU (2007) y del SITM-MIO (2019).	47
Figura 13, Box plot del indicador de densidad del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el año 2019.....	51
Figura 14, Barrios con valores atípicos situados por encima del límite superior del Box plot del indicador de densidad del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el año 2019.....	51
Figura 15, Box plot del indicador de densidad ponderada del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el año 2019.....	53
Figura 16, Barrios con valores atípicos situados por encima del límite superior del Box plot del indicador de densidad ponderada del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el año 2019.	53
Figura 17, Box plot del índice de accesibilidad de Hansen del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el año 2019.....	57

Figura 18, Barrios con valores atípicos situados por encima del límite superior del Box plot del indicador de Hansen del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el año 2019.	57
Figura 19, Box plot del índice relativo de provisión de transporte público (R-IPTP) del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el año 2019.	58
Figura 20, Barrios con valores atípicos situados por encima del límite superior del Box plot del índice relativo de provisión de transporte público (R-IPTP) del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el año 2019.	59
Figura 21, Diagrama de dispersión del indicador de densidad del TPCU (2007) versus SITM-MIO (2019).	60
Figura 22, Representación espacial de los cuadrantes del diagrama de dispersión del indicador de densidad (TPCU 2007 versus SITM-MIO 2019).	61
Figura 23, Diagrama de dispersión del indicador de densidad ponderada del TPCU (2007) versus SITM-MIO (2019).	62
Figura 24, Representación espacial de los cuadrantes del diagrama de dispersión del indicador de densidad ponderada (TPCU 2007 versus SITM-MIO 2019).	63
Figura 25, Diagrama de dispersión del indicador de Hansen del TPCU (2007) versus SITM-MIO (2019).	66
Figura 26, Representación espacial de los cuadrantes del diagrama de dispersión del indicador de Hansen (TPCU 2007 versus SITM-MIO 2019).	66
Figura 27, Diagrama de dispersión del R-IPTP del TPCU (2007) versus SITM-MIO (2019).	68
Figura 28, Representación espacial de los cuadrantes del diagrama de dispersión del R-IPTP (TPCU 2007 versus SITM-MIO 2019).	68

Lista de tablas

Tabla 1, Valores de C según tipología del vehículo.	30
Tabla 2, Valores de C según tipología de vehículo por empresa del TPCU.	30
Tabla 3, Variables territoriales TPCU (2007) y SITM-MIO (2019).	36
Tabla 4, Inventario del TPCU en el año 2007.	38
Tabla 5, Inventario del SITM-MIO en el año 2019.	38
Tabla 6, Estadística descriptiva del inventario del TPCU (2007) y del SITM-MIO (2019).	40
Tabla 7, Indicadores de accesibilidad en común entre TPCU y SITM-MIO.	40
Tabla 8, Estadística descriptiva de los indicadores de accesibilidad calculados.	48
Tabla 9, Coeficiente de correlación de Pearson de los indicadores de accesibilidad calculados.	49
Tabla 10, Resumen de los resultados estadísticos de los indicadores en el TPCU (2007) y en el SITM-MIO (2019).	50
Tabla 11, Representación numérica de los cuadrantes del diagrama de dispersión del indicador de densidad (TPCU 2007 versus SITM-MIO 2019).	61
Tabla 12, Representación numérica de los cuadrantes del diagrama de dispersión del indicador de densidad ponderada (TPCU 2007 versus SITM-MIO 2019).	63

Tabla 13, Representación numérica de los cuadrantes del diagrama de dispersión del indicador de Hansen (TPCU 2007 versus SITM-MIO 2019).....67

Tabla 14, Representación numérica de los cuadrantes del diagrama de dispersión del R-IPTP (TPCU 2007 versus SITM-MIO 2019).....69

Resumen

Se analizó la variación de la accesibilidad territorial asociada a la transición del Transporte Público Colectivo Urbano (TPCU) en el año 2007 hacia el Sistema de Transporte Masivo Integrado de Occidente (MIO) en el año 2019, por medio del cálculo de cinco (5) medidas: densidad, densidad ponderada, tiempo global absoluto, Hansen y provisión de transporte público relativo (R-IPTP). Se utilizó el software ArcGIS para las representaciones cartográficas de los resultados y el software GeoDa para el análisis estadístico-espacial. Entre los resultados relevantes se destaca que el 17,93% de las unidades espaciales mostraron valores altos del indicador de densidad para ambos sistemas, mientras que el 56,31% registraron valores bajos para los dos momentos, infiriendo que en los barrios al oeste y centro de la ciudad contaban y aún cuentan con un kilometraje deficiente de rutas. Se obtuvo que el 80,95% de las unidades espaciales continúan registrando valores bajos de provisión del transporte público, sobre las zonas periféricas de la ciudad. El proyecto pretende generar un insumo que contribuya a la toma de decisiones para mejorar el desempeño del sistema de transporte en la ciudad.

Palabras clave: Accesibilidad, Análisis espacial, TPCU, SITM-MIO.

Abstract

The variation of territorial accessibility associated with the transition from Urban Collective Public Transport (TPCU) in 2007 to the Western Integrated Mass Transit System (MIO) in 2019 was analyzed by calculating five (5) measures: density, weighted density, absolute global time, Hansen and relative public transport provision (R-IPTP). ArcGIS software was used for the cartographic representations of the results and GeoDa software for the statistical-spatial analysis. Among the relevant results, 17.93% of the spatial units showed high values of the density indicator for both systems, while 56.31% registered low values for both times, inferring that the western and central neighborhoods of the city had and still have a deficient mileage of routes. It was found that 80.95% of the spatial units continue to register low values of public transport provision in the peripheral areas of the city. The project aims to generate an input that will contribute to decision-making to improve the performance of the city's transportation system.

Key words: Accessibility, Spatial analysis, TPCU, SITM-MIO.

Introducción

El incremento de la movilidad y la accesibilidad se han convertido en uno de los elementos más significativos de la transformación metropolitana. Las ciudades muestran un escenario caracterizado por una intensa movilidad y también de la mayor velocidad a la que se desplazan con un uso extensivo del territorio al poder cubrir mucha más distancia en sus desplazamientos y multiplicar el espacio de vida de su población, lo que genera cada vez más atención en controlar y planificar de una manera más influyente, eficiente y regulada la accesibilidad (Muñoz, 2006) . El presente proyecto se refiere al tema del análisis de la evolución de la accesibilidad a la red de transporte público colectivo urbano en la ciudad de Santiago de Cali, utilizando diferentes factores que permitan describir la estructura y la morfología de las rutas de TPCU y del SITM-MIO en la ciudad de Cali en una ventana de tiempo y así analizar las asociaciones que puedan existir en el comportamiento de la accesibilidad y su posible relación en términos de comportamiento a variables socioeconómicas.

La característica principal de este tipo de proyectos es que al llevarse a cabo, primero se necesita hacer una revisión a fondo para poder organizar y evaluar la información con los que se puede contar y hacer un análisis con los mismos factores, esto debido a que la ciudad de Santiago de Cali en los últimos años ha sufrido diversas intervenciones a la movilidad y a la red de transporte publico colectivo urbano, así como el constante aumento de la infraestructura vial a medida del crecimiento de la ciudad, lo que ha afectado de manera directa la accesibilidad al transporte público colectivo urbano y los factores de comportamiento de esta. Para analizar la problemática es necesario el mencionar sus causas, y una de ellas es la actual disminución de usuarios que utilizan el TPCU y un nivel de insatisfacción creciente, además del aumento del parque automotor de vehículos particulares y motocicletas, con esta investigación se analizará si existe una relación entre estos indicadores actuales y el cambio de la accesibilidad a la red de transporte de TPCU en Cali.

La investigación de esta problemática se realiza por el interés de evaluar todas las posibles asociaciones que puedan llegar a existir de la accesibilidad y su comportamiento a través de una ventana de tiempo usando las redes de transportes TPCU, y cómo ha cambiado a medida del crecimiento de la ciudad. Por otra parte, establecer los principales indicadores o factores que permitan asociar estos cambios a variables socioeconómicas y demográficas. Esto se hace con el fin de reunir esa información a manera de investigación bibliográfica y estructurarla para generar una herramienta de valoración que pueda aportar a la mejora de esta problemática mediante un documento con datos reales para hacer más dinámico el control de la accesibilidad y de planeación al TPCU y al MIO que sea capaz de identificar problemas, realizar seguimientos y mantener un control de la movilidad en la ciudad de Cali.

1. Planteamiento del problema

1.1 Descripción del problema

Actualmente la mayoría de las ciudades pasaron a ser consideradas áreas metropolitanas, esto significa que exceden los límites de una sola jurisdicción, aportando complejidad a los desafíos a los cuales se afrontan. Según un reporte de (PNUD, 2014), el 54% de la población es urbana y la tendencia es creciente, proyectándose que alcanzará el 70 % en el 2050, es por esto por lo que, con el aumento de la población urbana de los últimos años, las ciudades se han convertido en un conglomerado de retos en el desarrollo, oportunidades y habilidad.

En este sentido, los flujos que operan en el interior de estas ciudades constituyen un pilar vital en reconceptualizar la movilidad, según (Cruz-Muñoz, 2018), en materias de movilidad y de transporte, es bien sabido el efecto en la productividad laboral, el desgaste físico y mental, que generan los traslados en malas condiciones, así como en los costos de transporte de los habitantes.

A un contexto local, Santiago de Cali es una ciudad que, en los últimos 30 años, según cifras de (Departamento Administrativo de Planeación Municipal, 2019) pasó de tener 1.565.056 habitantes a una cifra proyectada a 2020 de 2.459.789 habitantes en sólo su cabecera municipal, representando un aumento del 57% aproximadamente en su población, sigue las tendencias mundiales y encasilla al área metropolitana de Cali entre las 150 mayores conurbaciones del planeta (Alcaldía De Santiago de Cali, 2016).

La situación de movilidad y accesibilidad del transporte en la ciudad de Cali ha sido cambiante en los últimos 25 años, donde la ciudadanía ha experimentado los diferentes cambios en su forma de transportarse dentro del municipio a raíz del crecimiento en todos los aspectos de la ciudad, afectando de manera positiva o negativa sus actividades diarias, estos cambios se ven reflejados en diferentes estudios que monitorean el crecimiento de la ciudad y la evolución de la movilidad en la ciudad (Alcaldía De Santiago de Cali, 2010).

A partir de la década de 1990 la ciudad experimenta un periodo de prosperidad económica acompañado de grandes campañas de cultura ciudadana que quedaron enmarcadas en la sociedad caleña después de los juegos Panamericanos de 1971, que tenían el concepto de movilidad de una manera muy aceptable a términos de oferta automotora, de demanda y de servicio. Además, se evidencia en el reporte de (Cali en Cifras, 2000), por medio de reportes anuales cómo a partir del año 1993

aumenta gradualmente el número de buses, busetas, taxis y camperos, lo que al ciudadano benefició mucho como se evidencia en el reporte de (Melo G.L, 2012). Donde había una gran aceptación a la diversidad de empresas y rutas de transporte público que satisfacían la demanda de caleños en sus diferentes actividades diarias en las que interviniera directa o indirectamente la movilidad y el transporte.

Los registros de vehículos matriculados en la ciudad de Cali pasaron de poco más de 110.000 entre vehículos particulares, servicio público y motos a casi 700.000 en el año 2018 de estos mismos vehículos. (Reportes de Cali en cifras 2000-2018) Además del aumento de las empresas prestadoras de TPCU (transporte público urbano colectivo) que en 1999 llegó hasta 59 empresas y en 2006 se registraban 30 empresas (Departamento Administrativo de Planeación Municipal, 2019). Lo que muestra la oferta cambiante de TPCU en la ciudad de Cali y que quedó aún más reducido en los años recientes debido a la unión en sociedades entre empresas de TPCU para la consolidación del Sistema Integrado de Transporte Masivo MIO en el que, de 62 rutas en el año 2010, el sistema cuenta en 2018 con 97 rutas, que cubren 16 de las 22 comunas que tiene Cali, con una flota actual de 917 vehículos operativos.

Sin embargo, el sistema de transporte masivo ha sufrido una disminución en la cantidad de usuarios y un nivel de insatisfacción que se puede ver en el reporte (Encuesta de Percepción Ciudadana, 2019) en el que el 54% de los encuestados a 2019 se transporta en MIO, tiene un desplazamiento promedio de 49.3 minutos (el más alto de medios de transporte) y percibe que las trayectorias aumentaron más tiempo, además de la insatisfacción con el sistema de 32% frente a la alta satisfacción de los otros medios de transporte (moto, particular, bicicleta, transporte informal/ pirata, taxi, bus de empresa, bus o buseta y a pie) (Departamento Administrativo de Planeación Municipal, 2019).

La facilidad de adquirir un automóvil, una motocicleta, entre otros vehículos particulares, ha generado un aumento en el parque automotor, porque las personas buscan conseguir un mayor confort en sus recorridos dentro de la ciudad y, dada la facilidad de obtención de estos, han decidido adquirir una mayor cantidad de vehículos particulares, lo que se traduce en un mayor crecimiento del parque automotor en la ciudad y una mayor congestión en las calles del municipio. Esto último ocupando un papel importante en el conjunto de actividades económicas de la población, ya que uno de los factores estructurantes del territorio es la infraestructura, ligada entonces al uso del transporte. Las redes de transporte tienen la capacidad de incidir en la forma, la cohesión, los límites, la conexión e interacción (flujos) de un territorio, por lo tanto, el problema de la distribución espacial es aplicable a los desequilibrios en las mismas (Gomez et al., 2009).

1.2 Formulación del problema

Ante las debilidades anteriormente señaladas, con respecto a los servicios ofrecidos por el TPCU y el MIO, en el municipio, con el desarrollo de este proyecto se pretende resolver el interrogante de ¿Cómo una investigación, que permita identificar las posibles asociaciones que existen entre el crecimiento geográfico y demográfico en la ciudad de Cali, y los cambios que han experimentado la oferta y la demanda del Transporte Público Colectivo Urbano (TPCU), y el Sistema de Transporte Masivo Integrado de Occidente (MIO), puede dar elementos de juicio a la administración pública para planificar una mejor movilidad y accesibilidad dentro de la capital vallecaucana?

1.3 Justificación

Conforme han pasado los años, en la ciudad de Santiago de Cali se ha percibido un crecimiento demográfico y geográfico que a su vez, ha generado el aumento de las necesidades de las personas por acceder a diferentes lugares dentro del municipio, por lo que también se han incrementado los diversos tipos de transporte particulares y de uso público; en este último participó, en sus inicios con un volumen amplio de buses, el Sistema de Transporte Colectivo Urbano (TPCU), el cual fue disminuyendo con la aparición del Sistema de Transporte Masivo Integrado de Occidente (MIO), transformándose los recorridos de las rutas ya conocidas por los caleños y construyendo terminales, estaciones y puntos de paradas a lo largo de la ciudad.

Si bien estos cambios en los servicios de transporte público ofertados fueron pensados con el propósito de mejorar la movilidad de los usuarios, no se analizaron las posibles consecuencias que podían traer consigo a corto, mediano y largo plazo, pues ante la baja oferta de buses colectivos y la débil calidad del servicio del MIO, los usuarios de estos medios de transporte público se han visto obligados a afrontar largas esperas, caminatas, viajes demorados y en ocasiones incómodos, para trasladarse de un lugar a otro a causa de sus diferentes intereses o necesidades.

Se considera entonces que una de las principales causas de la presencia de debilidades en el Sistema de Transporte Público en Cali puede ser, la falta de información estructurada que permita valorar las actuaciones a-priori de la ejecución de actividades antes de hacerlas, el no seguimiento de estas actuaciones y el desconocimiento de una inequidad en el acceso al transporte por parte de las personas pertenecientes a ciertas zonas de la capital; haciendo que en la planeación no se tengan en cuenta, en su totalidad, el cubrimiento de las necesidades de los usuarios.

Es por esto que en este proyecto se plantea la realización de una investigación, con productos gráficos e informáticos, basados en datos históricos ya existentes de los cambios en las redes de rutas seguidas por los buses colectivos y el MIO, y en los posibles efectos que haya tenido en estos el crecimiento de la ciudad de Cali, que permitan a la administración pública contar con elementos con los que pueda valorar más la dinámica del TPCU y del MIO, para así identificar problemas, debilidades y fortalezas, ejecutar planes que garanticen una mejor oferta de este servicio y a su vez, un incremento de la demanda, realizar seguimientos y mantener un control de la movilidad y la accesibilidad de los usuarios.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar la variación en la accesibilidad territorial de los ciudadanos de Santiago de Cali, asociado a la transición del Transporte Público Colectivo Urbano (TPCU) hacia el Sistema de Transporte Masivo Integrado de Occidente (MIO).

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar en variables territoriales el TPCU y el MIO en los intervalos de tiempo estudiados.
- Identificar los indicadores de accesibilidad en común entre el TPCU y el MIO
- Modelar por medio de indicadores de accesibilidad territorial los sistemas de transporte a estudiar para evaluar su implementación.
- Realizar un análisis estadístico-espacial de los indicadores calculados, para los sistemas de transporte estudiados, a través del tiempo.

3. Marco contextual

3.1 Marco conceptual

En este módulo se definen los conceptos más relevantes en relación con la investigación propuesta, para contextualizar sobre esta y mejorar su entendimiento:

Accesibilidad:

La accesibilidad se define en el contexto de la geografía del transporte como la medida de la capacidad de un lugar para ser alcanzado, o para alcanzar diferentes lugares. La capacidad y la estructura de la infraestructura del transporte son elementos clave en la determinación de la accesibilidad. En este sentido, la accesibilidad o acceso hace referencia a la capacidad para alcanzar los bienes, servicios, actividades o destinos que las personas desean.

Buses complementarios:

Microbuses de color verde, con capacidad para 48 pasajeros y que circulan por los corredores pretroncales y alimentadores, parando solamente en sitios definidos sobre la calzada. Difieren de los buses padrones y articulados en que no cuentan con aire acondicionado, y que nunca paran en los vagones de las estaciones, sino en una bahía destinada para ellos. Su acceso se hace mediante el uso de la tarjeta de viaje, la cual se valida al ingresar al bus. Tras esto, el usuario cuenta con un tiempo limitado para ingresar a una estación sin que se le descuente un nuevo pasaje. Igualmente, cuando la persona sale de la estación, cuenta con un tiempo limitado para ingresar a un complementario.

Capacidad (Oferta de transporte):

Es el número total de sillas autorizadas a las empresas para ser ofrecidas a los usuarios, en un periodo de tiempo y en una ruta determinada (Reglamentación de Servicio Público de Transporte Terrestre Automotor Colectivo Metropolitano, 2001).

Corredores troncales:

Son aquellos sobre los cuales circulan los buses articulados en carriles de uso exclusivo del sistema. El acceso de los pasajeros se hace a través de las estaciones de parada ubicadas en los separadores centrales de la vía.

Correlación espacial:

Es el grado en el que una entidad es similar a otros objetos cercanos. Dado un conjunto de entidades y un atributo asociado, evalúa si el patrón expresado está agrupado, disperso o es aleatorio. (Getis & Ord, 1992)

Demanda de movilidad:

Cantidad de desplazamientos que la población de un ámbito territorial genera en un determinado período, en general o para acceder a un lugar o equipamiento.

Desplazamiento:

Trayectoria entre dos puntos. Distancia por recorrer para ir de un lugar a otro. En movilidad puede ser utilizado como sinónimo de viaje.

Frecuencia:

Es el número de veces por unidad de tiempo en que se repite el paso de un vehículo en un lapso determinado (Reglamentación de Servicio Público de Transporte Terrestre Automotor Colectivo Metropolitano, 2001).

Indicadores de accesibilidad:

La accesibilidad se mide en función del coste, tiempo, riesgo o impedimentos para alcanzar las oportunidades. Además, la accesibilidad resulta compleja de medir debido a la gran cantidad de factores que intervienen.

Movilidad:

La movilidad hace referencia al desplazamiento de personas o bienes, en ningún momento establece vinculación con lugares de partida o destino, asumiendo por tanto que los viajes son desplazamientos desde un punto de partida hasta otro de destino, pero sin ser estos condicionantes del desplazamiento. Además, bajo el concepto de movilidad se asume como beneficioso para la sociedad cualquier incremento de la longitud total del viario o el incremento de la velocidad media con el que se lleva a cabo el desplazamiento.

Nivel de servicio:

Son las condiciones de calidad bajo las cuales la empresa presta el servicio de transporte, teniendo en cuenta las especificaciones y características técnicas, capacidad, disponibilidad y comodidad de los equipos, la accesibilidad de los usuarios al servicio, régimen tarifario y demás circunstancias que previamente se consideren determinantes, tales como paraderos y terminales (Reglamentación de Servicio Público de Transporte Terrestre Automotor Colectivo Metropolitano, 2001).

Ruta:

Es el trayecto comprendido entre un origen y un destino, unidos entre sí por una vía, con un recorrido determinado y unas características en cuanto a horarios, frecuencias, paraderos y demás aspectos operativos (Reglamentación de Servicio Público de Transporte Terrestre Automotor Colectivo Metropolitano, 2001).

Significancia:

Es la descripción de una medida matemática que muestra la diferencia entre grupos. Se dice que la diferencia es estadísticamente significativa cuando es mayor de lo esperable que ocurra solamente por casualidad (Dallal, 2005).

Sistema de rutas:

Es el conjunto de rutas necesarias para satisfacer la demanda de transporte de un área geográfica determinada (Reglamentación de Servicio Público de Transporte Terrestre Automotor Colectivo Metropolitano, 2001).

Sistema Integrado de Transporte Masivo:

La construcción del SITM de Cali se propuso en 1997 a través del CONPES 2932. Después, a través del CONPES 3166 de 2002, se planteó la participación de la nación y se estableció la meta de construir un sistema de 243 kilómetros, distribuidos en 49 km de corredores troncales, 78 km de corredores pretroncales y 116 km de corredores complementarios (Cal y Mayor, 1994). El CONPES 3369 de 2005 modificó el cronograma del proyecto y dividió el avance en fases. A través del CONPES 3504 de 2007 se estipula extender la cobertura de la demanda de transporte público que tiene el SITM al 100%.

Con este se añaden extensiones a la infraestructura planeada inicialmente. El Sistema de Transporte Masivo Integrado de Occidente – MIO inició operaciones en marzo de 2009. El ente gestor es Metro Cali S.A. y el operador de recaudo la Unión Temporal de Recaudo y Tecnología. El SITM tiene contratos para la operación de los buses con cuatro empresas: Blanco y Negro Masivo que tiene una participación de 29% en la oferta, el Grupo integrado de Transporte GIT que participa con el 33% de los buses, Unimetro con el 18% y la Empresa de transporte masivo con el 20% restante.

Sistema de transporte público:

Según es un sistema integral de medios de transporte de uso generalizado, que es capaz de dar solución a las necesidades de desplazamiento de las personas, por lo que se puede considerar una actividad económica de primer nivel y parte esencial de las ciudades.

Los autobuses son prácticos y eficientes en rutas de corta y media distancia, siendo frecuentemente el medio de transporte más usado a nivel de transportes públicos, por constituir una opción económica. Las compañías de transporte buscan establecer una ruta basada en un cambio o aproximado de pasajeros en el área a ser tomada. Una vez establecida la ruta, se construyen las paradas de autobuses a lo largo de esa ruta.

Sin embargo, dada su baja capacidad de pasajeros, no son eficientes en rutas de mayor uso. Los autobuses, en rutas altamente usadas, producen mucha contaminación, debido al mayor número de autobuses que son necesarios para el transporte eficiente de pasajeros en esa ruta. En este caso, es mejor el ferrocarril.

Los actores que interactúan en el proceso del servicio de transporte colectivo urbano en una ciudad son los entes gubernamentales que regulan y controlan; los operadores o empresas, y el usuario, quien califica el servicio que recibe o se le presta según su percepción, y por lo cual paga una tarifa.

Tarifa:

Es el precio que pagan los usuarios por la utilización del servicio público de transporte en una ruta y nivel de servicio determinado (Reglamentación de Servicio Público de Transporte Terrestre Automotor Colectivo Metropolitano, 2001).

3.2 Marco teórico

En este módulo se muestran el conjunto de modelos y ecuaciones que se tuvieron en cuenta previo a la selección final de los indicadores y las técnicas estadísticas de análisis de los datos que se usaron en el desarrollo del proyecto de investigación.

3.2.1 Indicadores de accesibilidad

A continuación, se describirán entonces los indicadores y medidas de accesibilidad genéricas que se contemplan en la literatura, abordándose la medida de la accesibilidad, cuya cuantificación es una herramienta básica para la planificación espacial y del transporte (Halden, 2002), además de ser el instrumento más habitual para valorar la conectividad territorial (Campos, 2016).

3.2.2.1 Medidas topológicas

Generalmente, la accesibilidad se ha cuantificado mediante indicadores basados en distancias, tiempos, costos y variables socioeconómicas de los núcleos intercomunicados. Existen indicadores absolutos y relativos, de los cuales los usados en este proyecto son los siguientes:

Generalmente, la accesibilidad se ha cuantificado mediante indicadores basados en distancias, tiempos, costos y variables socioeconómicas de los núcleos intercomunicados. Existen indicadores absolutos y relativos, de los cuales los usados en este proyecto son los siguientes:

3.2.2.1.1 Indicadores absolutos

3.2.2.1.1.1 Indicador absoluto de tiempo global

Según (Rodrigue et al., 2016) la medida más básica de accesibilidad implica la conectividad de una red, donde esta se representa por una matriz que expresa la conectividad de cada nodo con respecto a sus nodos adyacentes, por lo que es conocida como “grado del nodo”. Así, la suma de los valores de conectividad manifiesta el grado de accesibilidad de cada nodo, de acuerdo con la ecuación 1:

$$C_1 = \sum_{j=i}^n C_{ij} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde C_{ij} corresponde a el tiempo de viaje desde el centroide del barrio i hacia el centroide del barrio j haciendo uso de la red de rutas de cada sistema de transporte.

3.2.2.1.1.2 Curvas isócronas

Con los tiempos C_{ij} desde un punto de referencia i hasta cada uno de los demás puntos j , se pueden graficar sobre un plano curvas de igual tiempo, llamadas isócronas (Ordosgoitia et al., 2000).

3.2.2.1.2 Indicadores relativos

3.2.2.1.2.1 Factor de ruta o indicador de trazado

El cálculo del Factor de Ruta, ver ecuación 2, es uno de los indicadores más claros para medir la calidad de conexión que proporciona una determinada infraestructura viaria en distancia y en tiempo. En este caso la mejor accesibilidad está directamente relacionada con el trazado de la red, siendo óptima cuando el itinerario que minimiza el tiempo de recorrido coincide a su vez con el de menor longitud y además presenta un nivel de servicio adecuado (buen trazado, calidad de la carretera, ausencia de puertos, etc.) (López-Escolano et al., 2013).

$$FR_i = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{dm_{ij}}{de_{ij}}}{n} \quad (\text{Ec. 2})$$

Para cuantificar el valor de este indicador (FR_i) de i a j , es necesario obtener la relación entre el camino con el mínimo tiempo de desplazamiento (dm_{ij}) siguiendo los itinerarios más cortos y valorando en tiempo de desplazamiento, de acuerdo con las ponderaciones para cada tramo de carretera.

3.2.2.1.2.2 Índice de trazado - velocidad

El índice de trazado-velocidad I_{vi} , ver ecuación 3, de cada punto i del territorio relaciona los tiempos reales t_{ij} por la red con los tiempos ideales t_{ij}^o recorridos por las líneas rectas que unen los puntos extremos de cada pareja ij origen-destino (Ordosgoitia et al., 2000).

$$Iv_i = \frac{\sum_{j=1}^n t_{ij}}{\sum_{j=1}^n t_{ij}^o} \quad (\text{Ec. 3})$$

Los indicadores relativos son mayores que la unidad y entre más cerca estén de ésta, mejor será el indicador. El indicador de trazado-velocidad se podría plantear de dos maneras distintas según cómo se calculen los tiempos ideales. Una forma, la considerada aquí, es calcular el tiempo ideal como el tiempo por la línea recta a una velocidad deseada. Otra forma es el tiempo por la red a una velocidad deseada. Cualquiera es útil siempre que se sepa qué se está comparando (Ordosgoitia et al., 2000).

3.2.2.1.2.3 Indicador de densidad

Mide la densidad de infraestructuras de comunicación de una zona en km/km² (Izquierdo, R. 1994). Permite obtener información sobre la disponibilidad de infraestructura vial que hay en cada barrio para posteriormente generar mapas descriptivos sobre el comportamiento de la red en el territorio, para su cálculo debe ejecutarse la ecuación 4.

$$D = \frac{\text{Km de red}}{\text{Área zona de estudio}} \frac{\text{Km}}{\text{Km}^2} \quad (\text{Ec. 4})$$

3.2.2.1.2.4 Índice de densidad ponderada

Además, (Izquierdo, R. ,1994) propone el índice de densidad ponderada, ver ecuación 5, para considerar las variables relacionadas con la oferta del servicio, como la cantidad de servicios ofrecidos (número de rutas) sobre las vías de cada barrio de la ciudad y la capacidad de los vehículos que prestan servicio en estas rutas.

$$D_{pond} = \frac{\text{Km corredor} * \text{Total rutas en el corredor} * C}{\text{Área del barrio}} \quad (\text{Ec. 5})$$

3.2.2.2 Medidas agregadas

3.2.2.2.1 Índice de provisión de transporte público

Este indicador es estimado como un índice de accesibilidad topológica en función de la infraestructura (Jaramillo et al., 2012). Para calcularlo se debe tener en cuenta la ecuación 6.

Donde A-IPTP_j es el índice absoluto de la oferta de transporte público para la ubicación j, n es el número de modos y/o servicios de transporte público disponibles. S_{ij} es el número de paradas para el modo i en el distrito j. W_{ci} es el factor de ponderación para la capacidad del modo i. W_{fi} es la ponderación del factor de frecuencia del modo i. A_j es la zona de la ubicación j. Y P_j es la población de la ubicación j.

$$A - ITP_j = \frac{1}{A_j} \sum_{i=1}^n S_{ij} W_{ci} W_{fi} \quad (\text{Ec. 6})$$

3.2.2.2.2 índice relativo de provisión de transporte público (R-IPTP)

En el trabajo de (Jaramillo et al., 2012), también se elaboró el índice relativo de prestación de transporte público (R-IPTP) incluyendo en el denominador la población de cada distrito analizado (P_j) para cuantificar el servicio de prestación de transporte per cápita. La expresión utilizada para el cálculo del R-IPTP se muestra en la ecuación 7.

$$R - ITP_j = \frac{1}{A_j P_j} \sum_{i=1}^n S_{ij} W_{ci} W_{fi} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde R-IPTP_j es el índice relativo de provisión de transporte público para la ubicación j, n es el número de modos y/o servicios de transporte público disponibles. S_{ij} es el número de paradas para el modo i en el distrito j. W_{ci} es el factor de ponderación para la capacidad del modo i. W_{fi} es la ponderación del factor de frecuencia del modo i. A_j es el área en kilómetros cuadrados de la zona de la ubicación j. Y P_j es la población de la ubicación j.

3.2.2.2.3 Indicador de Hansen

Propuesto por (Hansen, 1959), evalúa la atracción de la población para una zona, considerando la cantidad de áreas dispuestas para el desarrollo y combinando el índice de accesibilidad con la disponibilidad de áreas, ver ecuaciones 8 y 9. Permite ver los posibles desplazamientos de los habitantes de un nodo (barrio) teniendo en cuenta las áreas con mayor desarrollo.

$$A_i = \sum_{j=1}^n A_{ij} \quad (\text{Ec. 8})$$

$$A_{ij} = \frac{E_j}{d^{b_{ij}}} \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde A_{ij} es el nivel de accesibilidad de la zona i respecto a la zona j, E_j es el total de empleos en la zona, d_{ij} es la distancia entre las zonas i y j, n es el número de zonas del área de estudio y b es el parámetro de calibración.

3.2.2.3 Análisis estadístico de datos

El Análisis Estadístico de Datos consiste en emplear técnicas de la estadística para procesar e interpretar los datos recopilados, para así inferir sobre los resultados obtenidos (Hernández, 2012). Entre las medidas estadística se encuentran:

3.2.2.3.1 Medidas de distribución

3.2.2.3.1.1 Frecuencia absoluta

Es el número de veces que aparece un valor, se representa con f_i donde el subíndice representa cada uno de los valores. La suma de las frecuencias absolutas es igual al número total de datos, representado por N (Hernández, 2012). Para calcularla, se deben tener en cuenta las expresiones de las ecuaciones 10 y 11.

$$f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_n = N \quad (\text{Ec. 10})$$

Equivalente a:

$$\sum n_i = 1 f_i = N \quad (\text{Ec. 11})$$

3.2.2.3.1.2 Frecuencia relativa

Es el resultado de dividir la frecuencia absoluta de un determinado valor entre el número total de datos, ver ecuación 12, se representa por n_i . La suma de las frecuencias relativas es igual a 1. Lo cual puede verse fácilmente si se factoriza N (Hernández, 2012).

$$n_i = \frac{f_i}{n} \quad (\text{Ec. 12})$$

3.2.2.3.2 Medidas de posición

Las medidas de posición son unos valores alrededor de los cuales se agrupan los valores de la variable, y que resumen la posición de la distribución sobre el eje horizontal.

Existen dos tipos de medidas de posición: las centrales y las no centrales. De las medidas de posición central o promedios, las más utilizadas son: la media aritmética, la mediana y la moda. Las medidas de posición no central son los cuantiles (Hernández, 2012).

3.2.2.3.2.1 La media aritmética

La media aritmética ($\bar{x}$) se define como la suma de todos los valores observados de la distribución, $\sum X_i N_i$ dividida por el número total de observaciones N (Hernández, 2012). Agrupando los valores que se repiten, se forma la expresión de la ecuación 13.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i n_i}{N} \quad (\text{Ec. 13})$$

3.2.2.3.2.2 La moda

En una distribución, la moda será el valor, o dato, que más se repite, es decir, aquel que tenga mayor frecuencia absoluta f_i (Hernández, 2012).

3.2.2.3.2.3 La mediana

La mediana de un conjunto de datos impar es el número medio en el conjunto (ordenando los valores de manera ascendente o descendente), pero si hay un número par de datos, la mediana es el promedio de los dos números medios (Hernández, 2012).

3.2.2.3.3 Medidas de dispersión absoluta

Las medidas de dispersión absoluta miden cuánto se dispersan, en términos globales, los valores de la variable respecto a alguna medida de posición (ver apartado 3.2.2.3.2). Además de indicar la variabilidad o dispersión de la distribución, sirven para matizar la representatividad de las medidas de tendencia central (Hernández, 2012). Dentro de las medidas de dispersión absoluta más relevantes se encuentran:

3.2.2.3.3.1 La varianza

La varianza es una medida de dispersión que representa la variabilidad de una serie de datos respecto a su media. Formalmente se calcula como la suma de los residuos al cuadrado divididos entre el total de observaciones. La unidad de medida de la varianza será siempre la unidad de medida correspondiente a los datos, pero elevada al cuadrado. La varianza siempre es mayor o igual que cero. Al elevarse los residuos al cuadrado es matemáticamente imposible que la varianza salga negativa, y de esa forma no puede ser menor que cero (Hernández, 2012). La ecuación 14 define el cálculo de la varianza.

$$Var(x) = \frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde X es la variable sobre la que se pretende calcular la varianza, x_i es la observación número i de la variable X. i puede tomará valores entre 1 y n. n es el número de observaciones y $\bar{x}$ es la media de la variable X.

3.2.2.3.3.2 La desviación estándar

La desviación estándar (S) es la medida de dispersión más común, que indica qué tan dispersos están los datos con respecto a la media. Mientras mayor sea la desviación estándar, mayor será la dispersión de los datos (Hernández, 2012). Esta medida está dada por la ecuación 15.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (\text{Ec. 15})$$

3.2.2.3.3.3 Rango

El rango es un valor numérico que indica la diferencia entre el valor máximo y el mínimo de una población o muestra estadística (Hernández, 2012). Para calcular el rango de una muestra o población estadística se utiliza la ecuación 16.

$$R = Máx_x - Mín_x \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde R es el rango, Máx es el valor máximo de la muestra o población, Mín es el valor mínimo de la muestra o población estadística y x es la variable sobre la que se pretende calcular esta medida.

3.2.2.3.3.4 Coeficiente de variación

El coeficiente de variación, también denominado coeficiente de variación de Pearson es una medida estadística que informa acerca de la dispersión relativa de un conjunto de datos (Hernández, 2012). Su cálculo, ver ecuación 17, se obtiene de dividir la desviación típica entre el valor absoluto de la media del conjunto y por lo general se expresa en porcentaje para su mejor comprensión.

$$CV = \frac{\sigma_x}{|\bar{x}|} \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde X es la variable sobre la que se pretende calcular la varianza, σ_x es la desviación típica de la variable X y $|\bar{x}|$ es la media de la variable X en valor absoluto con $\bar{x} \neq 0$.

3.2.2.3.3.5 Medida de simetría y asimetría

La asimetría es el grado en que los datos no son simétricos. El hecho de que el valor de la asimetría sea 0, positivo o negativo, revela información sobre la forma de los datos (Hernández, 2012). Un coeficiente de asimetría muy sencillo, aunque en algunos casos bastante impreciso, es el coeficiente de asimetría de Pearson:

Basándose en el hecho de que en una distribución simétrica unimodal se verifica que: $x = Mo = Me$, Karl Pearson propuso como coeficiente de asimetría el mostrado en la ecuación 18.

$$Ap = \frac{\bar{x} - Mo}{s'} \quad (\text{Ec. 18})$$

Si la distribución presenta asimetría positiva, la media está desplazada a la derecha de la moda, por lo que se verifica que: $\bar{x} - Mo > 0$.

Por el contrario, si la distribución es asimétrica negativa, $\bar{x} - Mo < 0$.

Por lo tanto, el signo de Ap indica el de la asimetría:

- Si $Ap = 0$, la distribución es simétrica.

- Si $Ap > 0$, la distribución es asimétrica positiva (a la derecha).
- Si $Ap < 0$, la distribución es asimétrica negativa (a la izquierda).

3.2.2.3.3.6 Medida de curtosis o apuntamiento

Las medidas de curtosis se aplican a distribuciones campaniformes, es decir, unimodales simétricas o con ligera asimetría (Hernández, 2012). En esencia, las medidas de curtosis tratan de estudiar la distribución de frecuencias en la “zona central” de la distribución.

3.2.2.3.3.7 Coeficiente de correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson es una prueba que mide la relación estadística entre dos variables continuas (Hernández, 2012). Si la asociación entre los elementos no es lineal, entonces el coeficiente no se encuentra representado adecuadamente.

El coeficiente de correlación puede tomar un rango de valores de +1 a -1. Un valor de 0 indica que no hay asociación entre las dos variables. Un valor mayor que 0 indica una asociación positiva. Es decir, a medida que aumenta el valor de una variable, también lo hace el valor de la otra. Un valor menor que 0 indica una asociación negativa; es decir, a medida que aumenta el valor de una variable, el valor de la otra disminuye. Para su cálculo, debe ejecutarse lo expresado en la ecuación 19:

$$r_{xy} = \frac{\sum z_x z_y}{N} \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde x es igual a la variable número uno, y pertenece a la variable número dos, z_x es la desviación estándar de la variable uno, z_y es la desviación estándar de la variable dos y N es número de datos.

3.2.3 Herramientas y Softwares

En esta sección se lleva a cabo una descripción de los diferentes procesamiento que se ejecutarán y los programas y herramientas utilizadas para realizar el tratamiento espacial y estadístico de los datos:

3.2.3.1 Análisis espacial de datos

El análisis espacial se centra en el estudio, de manera separada, de los componentes del espacio, definiendo sus elementos constitutivos y la manera como éstos se comportan bajo ciertas condiciones. Para esto, el análisis espacial se vale de un conjunto de herramientas técnicas que, de acuerdo con lo anterior, sólo pueden dar respuesta a una parte de la dinámica del espacio, mas no a su totalidad Gamir, et al (1995). Es aquí donde se introduce el mapa, convirtiéndose en una herramienta fundamental en el momento de analizar los fenómenos, puesto que tiene la

capacidad de abstraer la realidad para hacerla más entendible y conjugar dos tipos de objetos: los concretos y los conceptuales (Rimbert, 1991).

3.2.3.1.1 Los Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el Análisis Espacial no son sinónimos, a pesar de que gran cantidad de fuentes bibliográficas relacionan de manera estrecha estos dos términos. La importancia de los SIG radica en la facilidad que ofrece al investigador para procesar información espacial y representarla mediante un modelo análogo de la realidad que presenta las entidades espaciales a partir del punto, la línea y el polígono e información temática (Ruiz, 1995).

Los Sistemas de Información Geográfica desarrollan un conjunto de funciones que constituyen el principal aporte al análisis espacial, éstas se clasifican en cuatro grandes grupos o subsistemas: el de captación de información o entrada de datos, el de almacenamiento y recuperación de la información, el de manipulación y análisis, y el de representación de datos. El tercer subsistema comprende el conjunto de técnicas de análisis espacial, modelos de superposición, procesamiento, estadística espacial y demás procedimientos para la manipulación de la información geográfica (Ruiz, 1995). Es precisamente aquí en donde los datos geográficos dejan de ser simplemente inventarios para mostrar otros aspectos de la realidad subyacentes a la mirada desprevenida del paisaje.

3.2.3.1.1.1 ArcGIS

ArcGIS es una aplicación SIG de escritorio para crear y trabajar con datos espaciales. Proporciona herramientas para visualizar, analizar, compilar y compartir datos en entornos 2D y 3D (ESRI, 2002). Este software de procesamiento espacial se selecciona debido a sus características y a que como autores del proyecto nos encontramos más familiarizados con su uso.

3.2.3.1.1.2 GeoDa

Geoda es una herramienta de software gratuita y de código abierto, que sirve como introducción al análisis de datos espaciales. Está diseñado para facilitar nuevos conocimientos del análisis de datos, mediante la exploración y el modelado de patrones espaciales.

En este software se puede trabajar con datos de tipo vectorial en diferentes formatos: shapefiles, geodatabases, GeoJson, mapinfo, GML, KML, y otros formatos de datos vectoriales compatibles con la biblioteca GDAL.

3.2.3.1.1.2.1 Diagrama de Caja y Bigotes (Box Plot)

Es un gráfico representativo de las distribuciones de un conjunto de datos, en cuya construcción se usan cinco medidas descriptivas de estos, a saber: mediana, primer cuartil, tercer cuartil, valor máximo y valor mínimo (Duncan, 1991; Okabe, Satoh &

Sugihara, 2009). Esta presentación visual, asocia las cinco medidas que suelen trabajarse de forma individual. Al mismo tiempo, presenta información sobre la tendencia central, dispersión y simetría de los datos de estudio. Además, permite identificar, con claridad y de forma individual, observaciones que se alejan de manera poco usual del resto de los datos. A estas observaciones, se les conoce como valores atípicos (Graham & Glaister, 2003). Por su facilidad de construcción e interpretación, también ayuda a comparar a la vez varios grupos de datos, sin perder información ni saturarse de ella.

3.2.3.1.1.2.2 Diagrama de dispersión

También conocido como gráfico de dispersión, gráfico de puntos, diagrama de XY, diagrama de dispersión o Scattergram.

Los diagramas de dispersión usan una colección de puntos colocados usando coordenadas cartesianas para mostrar valores de dos variables. Al mostrar una variable en cada eje, se puede detectar si existe una relación o correlación entre las dos variables.

Se pueden interpretar varios tipos de correlación a través de los patrones mostrados en los diagramas de dispersión. Estos son: positivo (los valores aumentan juntos), negativo (un valor disminuye a medida que el otro aumenta), nulo (sin correlación), lineal, exponencial y en forma de U. La fuerza de la correlación puede determinarse por la proximidad de los puntos entre sí en el gráfico. Los puntos que terminan muy lejos del conjunto general de puntos se conocen como valores atípicos.

En la figura 1 se muestra la interpretación del diagrama de dispersión al realizar la comparación entre dos variables de interés.

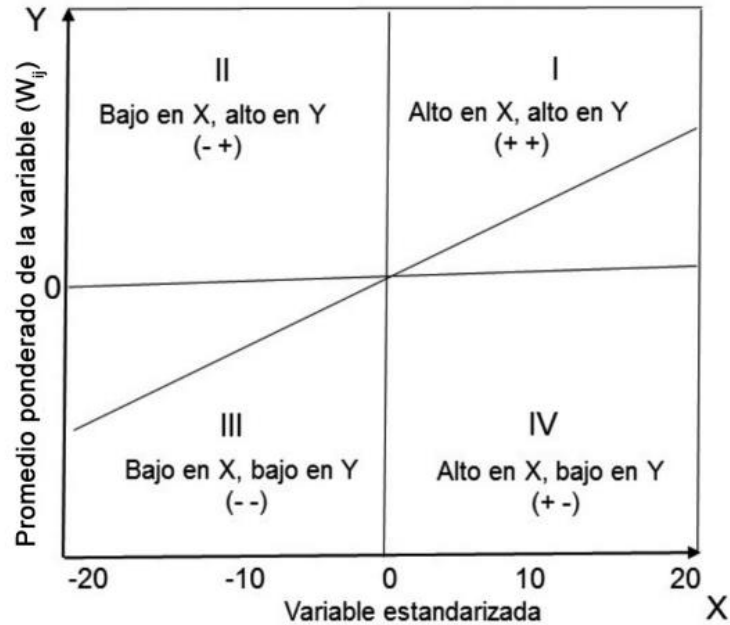


Figura 1, Interpretación de un diagrama de dispersión.

Fuente: (Rodríguez Licea & García, 2016): Las cadenas productivas de carne en México.

3.2.3.1.1.2.3 Mapas temáticos: Cuantiles

Los mapas temáticos, en general, consisten en la representación cartográfica de una variable geográfica. Esta representación de la variable, en un mapa, puede llevarse a cabo mediante símbolos y colores, que pongan de manifiesto el valor de una variable en cada una de las unidades geográficas consideradas (países, regiones, etc.) (Anselin, 1995). Puede utilizarse un color/ símbolo diferente para cada valor o para cada intervalo de valores de la variable.

Dentro de los mapas temáticos, se cuenta con los mapas de cuantiles, que representan el comportamiento de una variable espacialmente distribuida, para lo cual, los datos se dividen y se agrupan en una serie de categorías denominadas cuantiles, que en lo posible contienen igual número de observaciones. Cuando las categorías se dividen en 4, 5, 6, se les denomina, respectivamente: cuartiles, quintiles, sextiles y así sucesivamente.

3.3 Marco referencial

El sector del transporte urbano juega un papel importante en la consolidación de los procesos de globalización y de competitividad alrededor de las ciudades del mundo. En este sentido, se está presenciando una transformación dentro de este sector,

acentuada por el crecimiento de la población urbana, es así como el análisis a la accesibilidad a esta actividad económica y de servicios se ha convertido en un factor determinante para la implementación de mejoras y cambios en estos sistemas. Estos análisis de interacción espacial se han realizado históricamente por medio de índices y de diversos modelos de gravedad con el que permiten modelar la accesibilidad a diferentes entidades geográficas como puestos de salud, parques o puntos específicos, sin embargo, en los últimos años este tipo de modelos se ha implementado con el fin de evaluar la planificación del transporte en determinadas escalas (Tobón & Galvis, 2009).

El desarrollo de los sistemas de Bus Rapid Transit (BRT) en todo el mundo ha sido testigo de un enorme crecimiento en los últimos años, sobre todo en ciudades de todo el mundo en desarrollo. Estos grandes proyectos de transporte en toda la ciudad a menudo son fundamentales para los planes de revitalización urbana más grandes que tienen la intención de fomentar el crecimiento económico y alterar la imagen de la ciudad tanto para los residentes como para los forasteros. Crucial para el éxito de tales ambiciones es un sistema que brinde acceso equitativo a todos los residentes y que brinde acceso a una gran cantidad de oportunidades urbanas. (Cahill & Casas, 2012) exploró el panorama de accesibilidad espacial creado por el sistema BRT recientemente implementado en Cali, Colombia, en términos de acceso al sistema en sí y acceso a tres actividades distintas alrededor de la ciudad. En particular, se exploró la distribución equitativa de los patrones de accesibilidad en relación con los estratos socioeconómicos del barrio. Los hallazgos indicaron que el acceso a pie al sistema BRT es mayor para los grupos de ingresos medios y más limitado para los vecindarios en los estratos socioeconómicos más altos y bajos. En el estudio, concluyeron que los valores de accesibilidad a las actividades están ligados en gran medida al patrón de distribución espacial de las actividades; más equitativo para sitios recreativos intencionalmente dispersos, y menos para hospitales espacialmente agrupados.

(Ordosgoitia et al., 2000), realizó un análisis de accesibilidad de las vías en la región del occidente colombiano, mediante el cálculo de indicadores absolutos de tiempos desde un punto (isócronas), indicador de trazado (indicador relativo de distancias) e indicador de trazado-velocidad (indicador relativo de tiempos). Tal procedimiento, realizado con ayuda de un Sistema de Información Geográfica, permitió detectar las deficiencias actuales del sistema vial en un territorio de 380 núcleos urbanos, con cerca de 12 millones de habitantes. Se calcularon de nuevo los indicadores simulando la ejecución de 7 grandes proyectos de infraestructura vial y se evaluaron sus efectos en el territorio desde el punto de vista de la accesibilidad. El análisis de los indicadores de accesibilidad resultó ser una herramienta útil en la planificación para medir, de alguna forma, el impacto de una o varias actuaciones en una red.

(Bravo & Hurtado, 2016), llevaron a cabo un análisis del impacto en la accesibilidad de nuevos proyectos del sistema integrado de transporte masivo en Santiago de Cali, para

esto, tomaron datos pertinentes y parámetros del indicador utilizado de los diferentes barrios alrededor de la ciudad, como lo es la población, el área, el número de paradas que hagan parte del sistema de transporte MIO en conjunto con sus rutas, para luego asociar, la base de esta investigación, la cual es , la accesibilidad con la provisión del transporte en cada uno de los barrios o zonas de estudio, lo cual se toma como una relación directa entre estos dos parámetros, estableciendo que a mayor número de paradas en un barrio por área, mayor será la accesibilidad de la población ubicada en dicha área al transporte público (SITM MIO), dando como resultado datos muy positivos, debido a que zonas las cuales carecían o era muy poca la cobertura en cuanto a paradas por área de transporte público, aumentan las paradas y aumenta el servicio de la zona y por ende es mejor la accesibilidad, por este hecho se puede ver que la implementación de los diferentes proyectos estudiados mejoran la accesibilidad del transporte alrededor de la ciudad.

(Ordoñez Castillo, 2018), llevó a cabo un estudio en el que ejecutó el cálculo de un sistema de indicadores a cerca de la cobertura y accesibilidad del transporte público urbano en el municipio de Facatativá, analizando las 8 rutas presentes en el transporte público urbano de este municipio, a partir de la elaboración cartográfica de dichas rutas y con ayuda de las diferentes herramientas de análisis espacial evaluó los indicadores calculados para calificar y conocer un poco más del transporte público, determinando corredores viales importantes, ausencia de la prestación del servicio, tiempos de viaje, conectividad, distancias y recorridos, etc. El autor enfatiza en que el cálculo de estadísticas para los indicadores propuestos permite conocer las diferentes características del servicio y sus rutas, además de identificar fallas en el sistema de transporte público urbano, ayudando de cierta manera en la toma de decisiones que aporten a la eficiencia y mejoramiento de la cobertura del servicio a lo largo y ancho del municipio.

(Jaramillo Botero, 2015) examinó la relación entre la exclusión social y el transporte en Santiago de Cali y demostró que aún hay espacio para mejorar en aspectos de cobertura espacial y para una mayor atención a los factores que explican la necesidad social de transporte que no suelen ser considerados dentro de la planificación. Dentro de la investigación, se elaboró un índice de necesidades de transporte social y se presentó otro índice que demuestra la provisión de transporte público de tal manera que resalta la diferencia entre ambos, expresando la brecha espacial entre la necesidad y la oferta. Los resultados indicaron que el sistema BRT puede mejorar sus servicios implementando medidas específicas que tomen en cuenta los factores socioeconómicos que explican en gran medida las necesidades de transporte social de Santiago de Cali.

(Astudillo et al., 2021) emplearon herramientas de análisis espacial para evaluar la equidad espacial de las condiciones de acceso al sistema de transporte público para la población con enfermedad neurodegenerativa en la ciudad de Santiago de Cali, Colombia. Estimaron la equidad espacial a través de un valor único empleando la curva

de Lorenz y el coeficiente de Gini. Con este trabajo, se buscó poder facilitar el seguimiento a la provisión de servicios generando insumos para establecer estrategias de planificación y operación del sistema de transporte. Se encontró un considerable grado de desigualdad para la provisión de transporte público, debido a múltiples factores, como la disponibilidad de caminata de los pacientes y la proximidad entre la residencia del paciente a una parada y/o un corredor vial del sistema de transporte.

En el estudio realizado por (Geurs & van Wee, 2004), se implementó una metodología basada en la medición de la accesibilidad teniendo en cuenta diferentes componentes socio-demográficas tales como la ubicación y características de la demanda, la ubicación y características de las oportunidades, la capacidad del transporte de pasajeros y la localización y características de la infraestructura, para así calcular los indicadores de cercanía, intermediación y rectitud, sujetos al servicio del transporte público, para calificar el mismo.

Por otro lado, con respecto al análisis espacial de datos, en el estudio realizado por (Rodríguez Licea & García, 2016), se llevó a cabo la identificación de conglomerados para impulsar las cadenas productivas de carne en México. El objetivo de este trabajo fue realizar un análisis de correlación espacial regional de la producción de carne en canal por especie en México. El estudio se realizó durante el periodo 2000 -2012. A través del análisis exploratorio de datos, de la estimación del índice de Moran y de la prueba de LISA, se buscó evidencias de dependencia espacial e identificar conglomerados que impulsaran la integración de las cadenas productivas. El análisis exploratorio aportó evidencia de que los estados del norte pueden formar conglomerados que impulsen la producción de carne de bovino, porcino y pollo; y el incremento en la producción de carne de ovino y caprino, podría darse entre estados de la región centro y del norte, respectivamente. Los índices positivos obtenidos para la carne de bovino, ovino y caprino, mostraron que la vecindad de estados productores no afectaría la conformación de conglomerados para incrementar la producción; mientras que, la autocorrelación negativa para la carne de porcino y pollo hizo suponer que la situación de vecindad de un estado productor se vería afectada por los agrupamientos regionales de sus vecinos. Con la prueba de LISA, se identificaron grupos estadísticamente significativos que soportaron la evidencia de que la concentración espacial de la producción favorece la conformación de clúster y la integración de cadenas productivas únicamente para la carne de bovino, ovino y caprino.

Finalmente, en el trabajo de (Sicilia et al., 2017), se expusieron, de manera compacta, los aspectos teóricos más relevantes de econometría espacial en la etapa de exploración estadística de datos, mediante las técnicas del análisis exploratorio de datos espaciales (AEDE), así como la fase previa a la formulación del modelo econométrico espacial. Con este estudio, brindan herramientas para describir y visualizar distribuciones espaciales, que permitan darle validez a un modelo econométrico. La metodología

utilizada se desarrolló a partir del AEDE y sus aplicaciones; para tal fin, se analizaron las técnicas gráficas y estadísticas del AEDE que ofrece el software GeoDa 1.0.1, desarrollado por el profesor Luc Anselin de la Arizona State University, en dos dimensiones:

1. El análisis de datos univariante, es decir, se estudian las características de distribución espacial con respecto a una sola variable.
2. El análisis de datos multivariante, que involucra más de dos variables. Finalmente, concluyeron que el AEDE debe constituir el primer eslabón en un análisis para la toma de decisiones en investigaciones de tipo ambiental, social y económica, cuyas técnicas principales a través de la estadística y la representación gráfica, posibilitan el análisis de las distribuciones y agrupamientos espaciales.

4. Metodología

4.1 Localización

La zona de estudio seleccionada, ver figura 2, para este trabajo fue la ciudad de Santiago de Cali, que es un distrito colombiano, capital del departamento de Valle del Cauca y la tercera ciudad más poblada de Colombia. Está situada en la región Sur del Valle del Cauca, geográficamente la ciudad se ubica en el Valle del Río Cauca formado por la cordillera occidental y la cordillera central de la región andina, con una altura promedio de 1000 msnm. Es la única gran ciudad de Colombia que posee un acceso rápido al Océano Pacífico, dista 114 km de Buenaventura, principal puerto del país. La ciudad forma parte del área metropolitana de Cali, junto con los municipios contiguos a esta. Fue fundada el 25 de julio de 1536 por Sebastián de Belalcázar, lo que la convierte en una de las ciudades más antiguas de América. La ciudad es uno de los principales centros económicos e industriales de Colombia, además de ser el principal centro urbano, cultural, económico, industrial y agrario del suroccidente del país y el tercero a nivel nacional después de Bogotá y Medellín. Como capital departamental, alberga las sedes de la Gobernación del Valle del Cauca, la Asamblea Departamental, el Tribunal Departamental, la fiscalía general, instituciones y organismos del estado, y también es la sede de empresas oficiales como la municipal EMCALI.

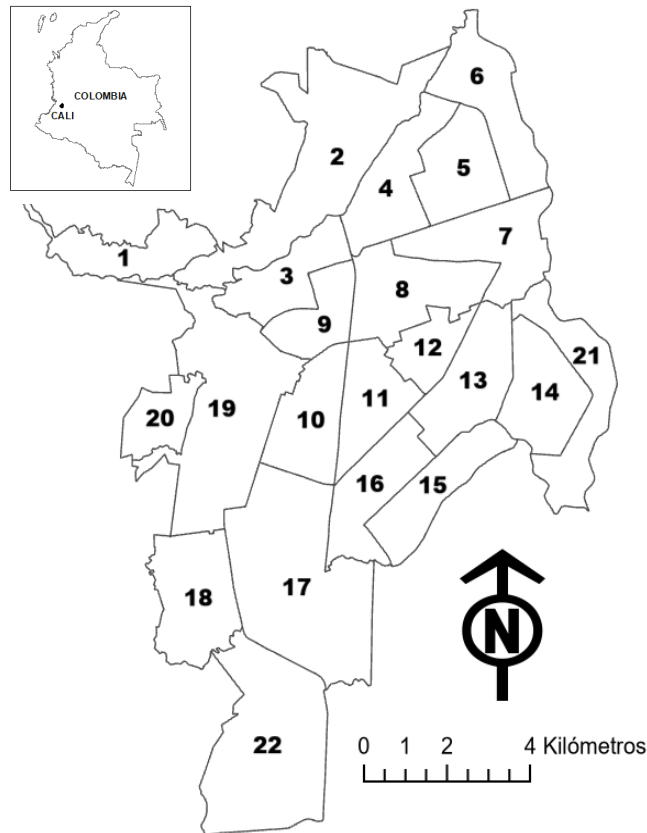


Figura 2, Localización de la zona de estudio.

Fuente: Infraestructura de datos espaciales de Santiago de Cali – IDESC (2021).

4.2 Métodos y procedimientos

Definida la zona de estudio, en este apartado se llevará a cabo la descripción metodológica de todas las actividades y procesos que se ejecutaron para dar cumplimiento a cada uno de los objetivos propuestos en este proyecto, objetivos con los que finalmente se alcanzó el objetivo general:

4.2.1 Caracterizar en variables territoriales el TPCU y el MÍO en los intervalos de tiempo estudiados.

4.2.1.1 Identificación de las variables territoriales

Para realizar un análisis de la accesibilidad, calificar y comparar el servicio del transporte público colectivo urbano (TPCU) y del sistema integrado de transporte masivo (SITM-MIO), se llevó a cabo la búsqueda de información análoga y digital existente hasta el momento, con el objetivo de reunir una amplia cantidad de datos que permitiera establecer el rango de tiempo que se analizaría y seleccionar los índices oportunos, comunes para ambos sistemas.

Para la obtención de datos del TPCU, se realizó una solicitud de un conglomerado de información que aún existiera en la secretaría de movilidad de Cali, en la que se consiguió la siguiente información:

- Documento técnico de la Unión Temporal LOGITRANS LTDA y MOVILIDAD SOSTENIBLE LTDA que contiene los estudios y diseños que se realizaron para la reestructuración de rutas del sistema de TPCU.
- Archivo .KMZ que contiene la base de datos con el inventario al año 2007 de las rutas del TPCU clasificadas por empresa.
- Información del Censo 2005 sobre variables de estratificación y población.

Respecto a la información del SITM-MIO, la solicitud se hizo a través de METROCALI SA, empresa que está encargada de implementar en la ciudad el sistema de transporte masivo, la información suministrada fue la siguiente:

- Base de datos geográfica con las rutas clasificadas semestralmente desde el año 2019 hasta el año 2020.
- Base de datos de paradas oficiales del SITM-MIO.
- Base de datos de la encuesta origen destino del año 2015, en formato SQL.
- Archivos PDF con información técnica de la encuesta aplicada.
- Información del Censo 2018 sobre información de estratificación y población.

Adicionalmente, es de resaltar que mayormente para los datos de las rutas del TPCU, se consultaron las resoluciones que el archivo histórico de la alcaldía en su página web aún conservaba con el fin de corroborar la estructura mostrada en el archivo KMZ suministrado.

4.2.1.2 Definición del rango de tiempo analizado

La definición del rango de tiempo al que estuvo sujeto el análisis del cambio en el sistema de transporte público en el municipio de Santiago de Cali, se definió de acuerdo con la información oficial con la que se contó, seleccionando finalmente el año 2007 para el estudio del TPCU y el año 2019 para el SITM-MIO, dejando una ventana de diferencia de más de 10 años, para comparar ambos servicios.

4.2.1.3 Generación de una base de datos completa sobre el TPCU en el año 2007 y el SITM-MIO en el año 2019

Para poder caracterizar en variables territoriales el TPCU y el SITM-MIO, se hizo uso del software ArcGIS para visualizar la información espacial y numérica recopiladas, trabajando sobre el sistema de referencia WGS-84.

4.2.1.3.1 Corrección de los archivos vectoriales con información del TPCU y el SITM-MIO

Se creó un archivo vectorial de tipo línea correspondiente a las rutas del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el 2019, haciendo la corrección de los vértices de cada una, ya que el trazado de las redes no coincidía espacialmente con la red vial del mapa base de la ciudad de Cali. Siguiendo, se ingresó la información de las variables territoriales recopiladas acerca de las rutas, atributos tales como capacidad, frecuencia y longitud, fueron ingresadas en los dos sistemas. Esto se realizó con el propósito de poder generar salidas gráficas de las rutas de cada sistema en los años correspondientes.

Con las rutas corregidas, también se corrigió el archivo vectorial tipo punto con información sobre las paradas del SITM-MIO en el 2019, ajustándolas al mapa base del municipio. Dado que para el TPCU no se tenía información sobre las paradas, estas se generaron cada 350 metros sobre la red de rutas del sistema en el año 2007.

A continuación, se descargó de la IDESC la capa vectorial tipo polígono de los barrios de la ciudad, contando con un total de 335 unidades espaciales para cada año analizado. La tabla de atributos de este archivo se alimentó con información referente a cada sistema en cada año respectivamente, de tal manera que se pudiesen encontrar datos sobre la población, el área y el número de rutas por cada fecha escogida.

4.2.1.3.2 Generación de variable de paradas del sistema de TPCU 2007

Las paradas del TPCU en el 2007 se crearon en base a la red de rutas de este año, haciendo uso de la herramienta “Construir puntos” de ArcGIS, estableciendo que se crearan cada 350 metros, guardando los resultados en un archivo vectorial de tipo punto, generando una red de puntos colocados sobre la capa que se tenía corregida de la red del TPCU. Esto se consideró en base a un promedio de las distancias de parada entre las rutas alimentadoras del SITM-MIO.

La distancia entre paradas del TPCU es un factor a tener en cuenta, debido a que por las características del sistema, no tiene paradas definidas a diferencia del SITM-MIO que si tiene, debido a que estos vehículos de transporte público colectivo no tenían paradas definidas, ya que dependía del usuario señalar al conductor dónde detenerse, por lo cual, fue necesaria una investigación histórica de paradas comunes de control de rutas del TPCU, y a partir de reportes de rutas como el de (STTM-Cali, 2004) se llegó a la conclusión de que las paradas del TPCU se producían cada 350 metros, valor muy parecido al que la mayoría de rutas pretroncales del SITM-MIO tienen, lo cual convierte a la información de las busetas en una variable con alto rango de confiabilidad para hacer el análisis propuesto.

4.2.2 Identificar los indicadores de accesibilidad en común entre el TPCU y el MIO

Posterior a la revisión bibliográfica de autores que hicieron uso de distintos indicadores de accesibilidad con propósitos semejantes a los de este trabajo; para comparar el servicio del TPCU y del SITM-MIO, se seleccionaron y calcularon indicadores que permitieran calificar la calidad en accesibilidad de ambos sistemas de transporte con interpretaciones matemáticas de los datos obtenidos de la correlación entre cada sistema y la población. De esta manera, tras la revisión de la literatura, y aunque existen una gran cantidad de indicadores, unos resultaron ser de mayor utilidad que otros.

Por esta razón se hizo una recopilación de los indicadores de accesibilidad con mayor relación e incidencia en el proyecto, con el fin de seleccionar y calcular aquellos con mayor aporte a la evaluación de la accesibilidad que el TPCU ofrecía y el sistema MIO ofrece a los habitantes de Cali. A continuación, se presentan los indicadores de accesibilidad seleccionados y calculados, haciendo uso de las herramientas de Microsoft Office Excel, teniendo en cuenta su relación con el proyecto y la información que se recopiló para cada sistema en cada año analizado.

4.2.2.1 Indicador de densidad (Izquierdo, R. (1994))

Se entiende como la medida de la densidad de infraestructuras de comunicación de una zona (km/km^2), el cual puede tener muchas variaciones según la ponderación que se haga de las vías o servicio de distinta categoría. El índice de densidad (D) se obtuvo a partir de la ecuación 4, donde el numerador era el kilometraje de la red de rutas que transitaban por cada unidad espacial (barrio) y el denominador era el área en kilómetros cuadrados de cada unidad espacial (barrio).

Adicionalmente, con base en este indicador se decidió introducir una ponderación con la finalidad de considerar variables relacionadas con la oferta del servicio, como la cantidad de servicios ofrecidos (número de rutas) sobre las vías de cada barrio de la ciudad y la capacidad de los vehículos que prestan servicio en estas rutas. Esta densidad ponderada se planteó mediante la ecuación 5.

El factor C en la ecuación 5 se tomó como la capacidad del mayor vehículo que sirva en la zona de estudio, en este caso en cada uno de los barrios de la ciudad, dependiendo de las rutas que presten servicio en el sector. En la tabla 1 se pueden observar las capacidades de los vehículos del SITM-MIO de acuerdo con la tipología de estos y en la tabla 2 las capacidades de los buses del TPCU de cada empresa.

SISTEMA INTEGRADO DE TRANSPORTE MASIVO MIO (SITM-MIO)	
TIPOLOGÍA	C
ARTICULADO	160
PADRÓN	80
COMPLEMENTARIO	51

Tabla 1, Valores de C según tipología del vehículo.

Fuente: Metro Cali S.A (2016)

TRANSPORTE PÚBLICO COLECTIVO URBANO (TPCU)	
TIPOLOGÍA	C
VERDE BRETaña	31
ERMITA	19
COOMEPAI	19
FLORIDA	34
GRIS SAN FERNANDO	32
AMA CREMA	32
BLANCO Y NEGRO	37
AZUL CREMA	29
CREMA Y ROJO	33
MONTEBELLO	18
RIO CALI	18
SANTIAGO DE CALI	35
VERDE PLATEADA	37
VERDE SANFER	29
PALMIRA SA	25
GRIS ROJA	34
ALFONSO LOPEZ	34
AZUL PLATEADA	30
CAÑAVERAL	33
DECEPAZ	18
PANCE	19
RECRE LTDA	23
SULTANA DEL VALLE	17
URB CALI SA	31
VILLANUEVA BELEN	33

Tabla 2, Valores de C según tipología de vehículo por empresa del TPCU.

Fuente: Estudio Técnico Unión Temporal LOGITRANS (2007)

En la tabla 2 se puede observar una diferencia marcada entre las capacidades de los buses del TPCU en el año 2007 y la capacidad de los buses de tipo complementario (ver tabla 1) del SITM-MIO en el año 2019, donde para el 2007 los buses con mayor capacidad eran los pertenecientes a la empresa Blanco y Negro, con un promedio de 37 pasajeros.

4.2.2.2 Indicador absoluto de tiempo global (Sarmiento, I., Muñoz, J. Y Ángel, C., 2000)

Es un indicador que mide la suma de tiempos de desplazamiento desde un punto a todos los demás. El punto de menor sumatoria de tiempo es el mejor comunicado. Este indicador tiende a favorecer los puntos ubicados hacia el centro de una red por su localización geográfica, dado que los tiempos de viaje desde estos nodos hasta los otros son menores. Para el cálculo de este índice se ejecutó lo planteado en la ecuación 1, haciendo uso de los centroides de cada barrio y las paradas, del TPCU y del SITM-MIO respectivamente. Donde C_{ij} es igual al tiempo mínimo de recorrido de i a j utilizando la red.

El cálculo de este indicador se llevó a cabo mediante la extensión Network Analyst del programa ArcGIS Pro, simulando la matriz origen-destino de tiempos mínimos entre centroides de barrios por medio de la red del sistema integrado de transporte masivo (SITM-MIO) y la red del sistema de transporte público colectivo urbano (TPCU), para todos los barrios de Cali. Al realizar la sumatoria de tiempos para cada centroide, se obtiene un vector de tiempos de viaje (Escobar García, D. y García Orozco, F., 2012). Los resultados obtenidos fueron representados mediante curvas de tiempos iguales, o isócronas.

Para la elaboración de la matriz origen destino, se establece el siguiente orden:

1. Preparar una capa de la red de cada sistema, para que sirva como la capa del Network Dataset, que se crea con ayuda de la extensión importar de Network Analyst de ArcGIS.
2. Una vez se crea el Network Dataset, se procede a seleccionar la opción “Generar Matriz de Coste Origen - Destino”. En este apartado, se nos pide suministrar información de importar orígenes y destinos.
3. A continuación, se procede a importar los orígenes como las paradas de cada sistema, sea el TPCU o del SITM-MIO, y los destinos son los centroides de cada unidad, o sea los barrios, a los cuales se les quiere simular a través de la red anteriormente mencionada, las distancias y tiempos a través de cada origen a todos los destinos para después, obtener los tiempos de desplazamiento por barrio.
4. Una vez se importan los orígenes y destinos, se seleccionan parámetros opcionales pero que aumentan más la realidad, como la hora del modelamiento, la fecha, el sistema de transporte con el que se quiere hacer el modelamiento y su forma de representación, que en este caso se escogió como líneas rectas.

El resultado de este modelamiento se muestra en la figura 3, para el TPCU en el 2007 y para el SITM-MIO en el 2019.

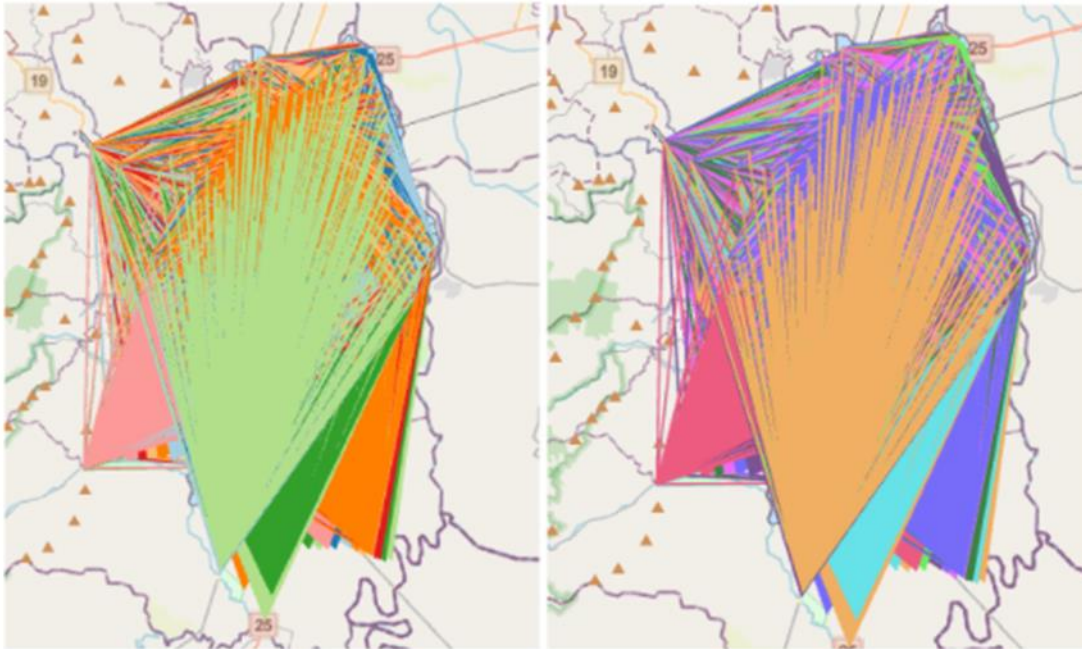


Figura 3, Matriz origen-destino – año 2007 - TPCU (izq.) y Matriz origen-destino – año 2019 – SITM-MIO (der.)

5. Una vez se obtienen los datos en la tabla de atributos de esta matriz, se procede a revisar con ayuda de las tablas dinámicas de las hojas de cálculo, los tiempos y las distancias por cada barrio.
6. Estos datos son útiles para los cálculos del índice de Hansen y el indicador de tiempo global, ya que, a partir de los tiempos generales, se clasificó el tiempo máximo y mínimo para realizar el mapa de isócronas.

4.2.2.3 Indicador de Hansen (Hansen, W., 1959)

Para evaluar la atracción de la población para una zona, Hansen consideró la cantidad de áreas disponibles para el desarrollo, y propuso la combinación del índice de accesibilidad con la disponibilidad de áreas para determinar el potencial de desarrollo de una región. Este potencial es definido como el producto del valor de accesibilidad integral por el área disponible y se calcula siguiendo las ecuaciones 8 y 9.

Donde A_{ij} es el nivel de accesibilidad de la zona i (barrio) respecto a la zona j (barrio), E_j es el total de habitantes en cada barrio, que para este proyecto se escogió como variable de atracción. Generalmente, el índice de accesibilidad de Hansen utiliza variables de empleo o variables relacionadas a actividades socioeconómicas pero debido a la no disponibilidad de la información, se optó por usar la variable de población, que, de igual manera, se usa como factor de atracción para el índice. d_{ij}

es la distancia entre las zonas i (barrio) y j (barrio), n, es el número de zonas del área de estudio (335 barrios) y b es el parámetro de calibración.

Para este indicador, se optó por tomar el término dij como el tiempo en minutos entre centroides, el cual se obtuvo del análisis del indicador inmediatamente anterior, dado que tanto el tiempo como la distancia son factores de impedancia para los viajes. De igual forma, se tomó el parámetro de calibración b como 1, dado que su imprecisión con otro valor diferente a 1, incrementa en la medida en que este valor sea mayor.

4.2.2.4 índice relativo de provisión de transporte público (R-IPTP) (Jaramillo et al., 2012)

Para cuantificar la prestación del servicio de transporte para cada uno de los barrios de la ciudad de Cali, basados en el estudio realizado por Jaramillo et al., 2012, se llevó a cabo el cálculo del índice relativo de provisión de transporte público (R-IPTP), para el TPCU en el año 2007 y el SITM-MIO en el año 2019, usando la ecuación 7, desglosada en las ecuaciones 20 y 21.

$$W_{ci} = \frac{C_i}{C_{min}} \quad (\text{Ec. 20})$$

$$W_{fi} = \frac{f_i}{f_{min}} \quad (\text{Ec. 21})$$

Donde Wci es el cociente, para cada barrio, entre la capacidad (Ci) de cada vehículo que brinda el servicio en la zona y la capacidad mínima (Cmin) entre estos; Wfi es el cociente, para cada barrio, entre la frecuencia de cada vehículo que brinda el servicio en la zona (fi) y la frecuencia mínima entre estos (fmin); Pj es la población por barrio, Aj el área del barrio, Sij el número total de paradas por barrio y n, es el número de rutas que operan en la unidad espacial, para cada año respectivamente.

4.2.3 Modelar por medio de indicadores de accesibilidad territorial los sistemas de transporte a estudiar para evaluar su implementación.

Con los cálculos obtenidos para cada indicador, aplicado a cada sistema de transporte, en el año 2007 y 2019 respectivamente, se procedió a migrar los resultados de las hojas de cálculo a las bases de datos cartográficas del TPCU y del SITM-MIO, con el propósito de consolidar la información ya existente sobre cada sistema de transporte y sus respectivos indicadores de accesibilidad.

Organizado lo anterior, se utilizaron las herramientas del software de procesamiento espacial ArcGIS Pro para generar salidas gráficas, representando los resultados en cinco (5) cuantiles (Muy Bajo, Bajo, Medio, Alto y Muy Alto), y modelar el análisis estadístico y análisis espacial, que permitiera visualizar el comportamiento de cada indicador en el TPCU en el año 2007 y en el SITM-MIO en el año 2019.

De esta manera se pudo analizar tanto estadística como espacialmente y en base a los estudios consultados en este trabajo, la existencia o no de una relación entre el crecimiento geográfico y demográfico de la ciudad y la transformación de los sistemas de transporte público, en cuanto a cobertura, tiempos, oferta y demanda del servicio.

Así mismo, se ejecutó el cálculo de las funciones estadísticas descritas en el apartado 3.2.2.3.2, para cada uno de los resultados arrojados por los indicadores, con el propósito de inferir sobre el comportamiento de estos en el TPCU y en el SITM-MIO en ambas ventanas temporales.

4.2.4 Realizar un análisis estadístico-espacial de los indicadores calculados, para los sistemas de transporte estudiados, a través del tiempo.

De acuerdo con los resultados obtenidos para cada indicador, en formato numérico y espacial, tanto para el TPCU en el año 2007 como para el SITM-MIO en el año 2019, se llevó a cabo un análisis estadístico - espacial (*ver apartado 3.2.2.4.1.2*), haciendo uso de las herramientas del software GeoDa.

Para realizar esto, se siguieron los siguientes pasos:

1. Se cargó la base de datos anteriormente construida, usando únicamente la capa destinada al análisis espacial, que previamente se definió como la combinación de los resultados de todos los índices y variables territoriales de cada año y cada sistema.
2. Con la información cargada, se crearon los diagramas de caja y bigotes o box-plot para cada uno de los indicadores calculados en ambos periodos, esto con el fin de determinar gráficamente, outliers o datos atípicos (*ver figura 4*), que, vistos desde un punto de vista espacial, pudieran ser justificados con la infraestructura de cada sistema o con otra variable territorial. Cada uno de estos diagramas también generan información numérica sobre algunas medidas estadísticas (valor mínimo, valor máximo, análisis por cuartiles, media, mediana, desviación estándar y rango intercuartílico).

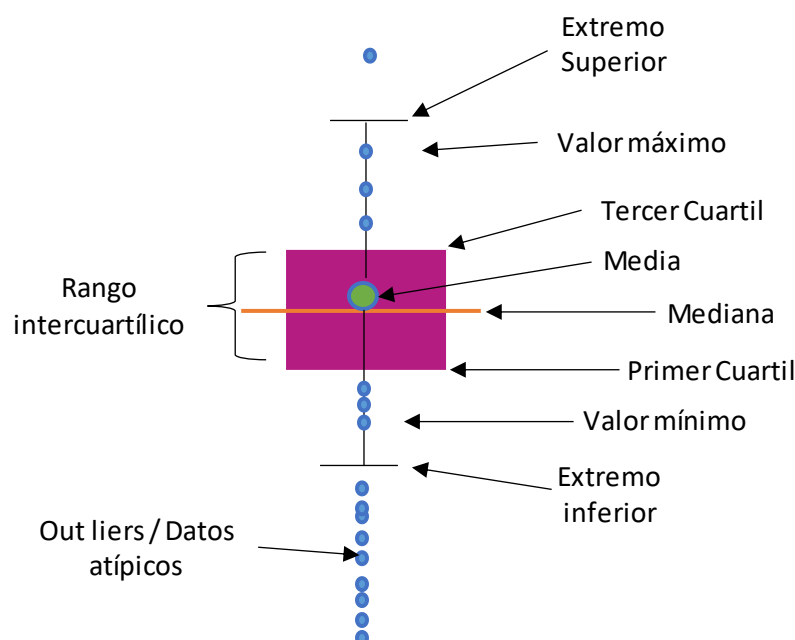


Figura 4, Interpretación del diagrama de caja y bigotes.

3. Siguiendo a esto, se realizaron diagramas de dispersión entre los indicadores analizados en el 2007 y en el 2019, obteniendo 4 en total, comparando así el R-IPTP del 2007 y el R-IPTP del 2019, el indicador de densidad del 2007 y del 2019, el índice de densidad ponderada del 2007 y del 2019 y finalmente el indicador de Hansen del 2007 y del 2019. Esto para analizar la correlación de los datos de los resultados, y, ayudados con la estandarización de los datos, fue posible inferir en base a lo propuesto por (Buzai & Baxendale, 2006), en el que se analiza por cada cuadrante, el cambio positivo o negativo entre cada sistema a través del tiempo.

5. Resultados

En este apartado, se presentan los resultados de cada uno de los objetivos propuestos en el proyecto tras ejecutar la metodología. A continuación, se muestran las tablas, figuras y anexos que dieron cumplimiento a cada uno de los cuatro objetivos del trabajo realizado.

5.1 Caracterizar en variables territoriales el TPCU y el MIO en los intervalos de tiempo estudiados.

Una vez, realizada la investigación bibliográfica tanto en formato análogo como digital, se realizó una conglomeración de la información, filtrado y clasificación por utilidad, que llevó al establecimiento de variables territoriales que pudiesen ser comparables

entre los dos sistemas en los periodos de tiempo seleccionados, tiempos que derivaron también de la existencia de la información, disponibilidad y confiabilidad.

Después de organizar sistema a sistema las variables, se clasificaron en entidades vectoriales tipo punto, polilínea y polígono, representando las variables seleccionadas, las mismas para ambos periodos. En la tabla 3 se muestra un resumen de las variables territoriales que se escogieron en base a la información recopilada, indicando sus unidades de medida, el tipo de dato y su representación vectorial.

Nombre dato	Unidad	Tipo de dato	Representación vectorial
Barrios de la ciudad	-	Texto	Polígono
Área por barrio	<i>Km2</i>	Decimal	Polígono
Número de rutas del sistema de transporte por barrio	Conteo	Entero	Línea
Longitud de corredor vial de cada sistema por barrio	Km	Decimal	Línea
Número de paradas por barrio	Conteo	Entero	Punto
Capacidades de rutas	-	Entero	Línea
Frecuencias	Min	Decimal	Línea
Comuna	-	Entero	Polígono
Estrato	-	Entero	Polígono
Población	-	Entero	Polígono

Tabla 3, Variables territoriales TPCU (2007) y SITM-MIO (2019).

En el Anexo 1 se encuentra la información organizada de las variables territoriales para cada barrio de la ciudad de Cali, teniendo en cuenta el comportamiento del sistema de transporte analizado en cada unidad espacial en su respectivo año.

De acuerdo con lo anterior, se llevó a cabo la construcción de una base de datos geográfica (Geodatabase), con el propósito de poder visualizar espacialmente la información recopilada. Esto nuevamente se realizó para el TPCU en el 2007 y para el SITM-MIO en el 2019 independientemente, teniendo en cuenta que son dos sistemas diferentes analizados en diferentes años.

Esta base de datos cuenta con las tres representaciones básicas de los datos vectoriales: barrios de la ciudad de Cali representados como polígonos con información asociada al territorio y variables socioeconómicas; paradas de los sistemas de transporte, representadas como puntos y la red de rutas de cada sistema representada como una entidad de tipo línea con información sobre capacidades, frecuencias y longitudes de cada ruta.

En la figura 5 se presenta la estructura de la base de datos geográfica elaborada para conglomerar las variables territoriales y socioeconómicas recopiladas en la búsqueda de información:

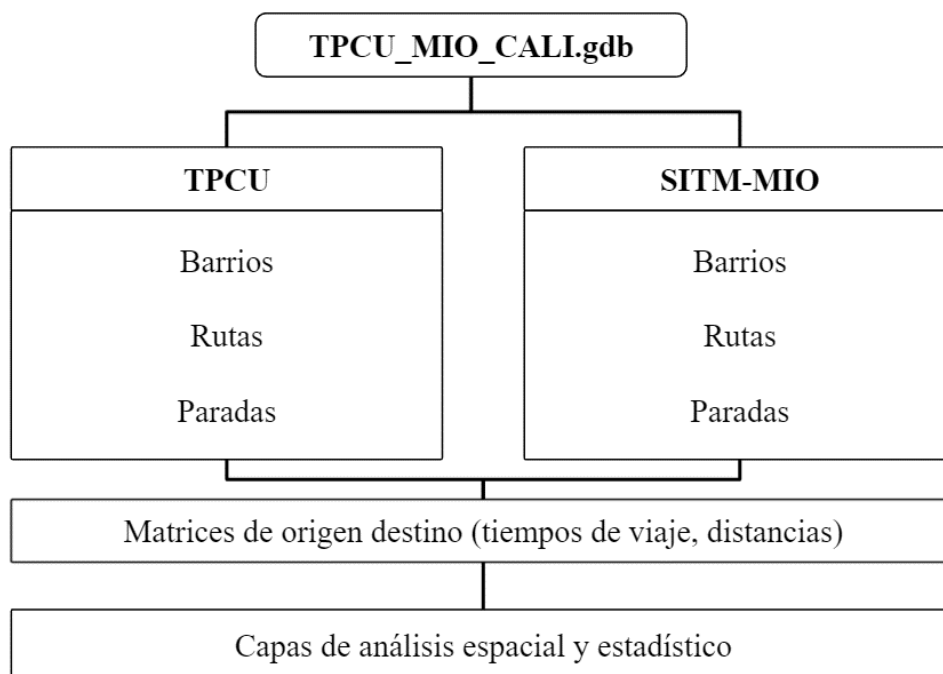


Figura 5, Esquema de la información consolidada en la base de datos geográfica.

Como se observa en la figura 5, dentro de la base de datos también se adjuntan los insumos generados del proceso de los cálculos de los índices, como la matriz origen-destino y las capas destinadas para el análisis estadístico-espacial. En el Anexo 2, se adjunta la base de datos geográfica creada, con la información previamente descrita.

De acuerdo con los datos recopilados, se generó un inventario de las características del sistema de transporte público colectivo urbano (TPCU) en el año 2007 y del sistema integrado de transporte masivo (SITM-MIO) en el año 2019, resumiendo algunas de las variables tenidas en cuenta para ambos en este trabajo. En la tabla 4, se nombran las 23 empresas que prestaban el servicio de transporte público en el año 2007, el número de rutas de cada una, su flota, frecuencia media y capacidades. Para este año, el TPCU contaba con un total de 4746 vehículos, con una frecuencia promedio de 6,51 minutos y una capacidad promedio de 28 pasajeros.

Con la incorporación del SITM-MIO, para el año 2019 se contaba con un total de 101 rutas, divididas en rutas expresas, troncales, pretroncales y alimentadoras, ver tabla 5. En este caso, el SITM-MIO sólo está administrado y regulado por Metro Cali.

Para tener una representación espacial de la dinámica de la red de rutas del TPCU en el año 2007 y del SITM-MIO en el año 2019, y las paradas de cada sistema respectivamente, en la figura 6 se puede observar la distribución de la red de rutas del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el 2019, dentro de la ciudad de Santiago de Cali. Así mismo, en la figura 7 se muestran las paradas de cada sistema en el año correspondiente.

Empresa	Número de rutas	Flota	Frecuencia media	Capacidad
Alameda	5	158	6,2	32
Alfonso López	5	217	5,6	34
Amarillo crema	6	169	6,6	32
Azul crema	1	38	9,0	29
Azul plateada	5	177	9,2	30
Blanco y negro	11	501	7,8	37
Cañaveral	4	120	7,2	33
Coomoepal	15	586	5,8	19
Crema y rojo	3	75	5,0	33
Decepaz	5	220	3,8	18
Ermita	9	325	5,7	19
Gris San Fernando	6	140	6,1	32
Montebello	11	371	4,9	18
Pance	9	319	5,0	19
Papagayo	8	172	6,8	33
Recreativo	6	308	5,8	23
Rio Cali	4	187	5,0	18
Roj Gris	3	66	8,9	34
Sultana del valle	2	49	5,0	17
Verde bretaña	4	181	6,0	31
Verde plateada	2	75	10,5	37
Verde San Fernando	3	100	6,6	29
Villanueva Belén	5	192	7,2	33
Promedios	5,7	206,3	6,5	27,8

Tabla 4, Características del TPCU en el año 2007.

Tipo de ruta	Rutas	Total
Expresas	E21, E27, E27B, E31, E37, E41, E52	7
Troncales	T31, T40, T42, T47B, T50, T57A	6
Pretroncales	P10A, P10B, P10D, P12A, P14A, P17, P21A, P21B, P43, P47A, P24A, P24B, P24C, P27C, P27D, P30A, P40A, P40B, P84A, P84B, P47B, P47C, P51, P52A, P52D, P71, P72, P80A, P82	29
Alimentadoras	A01A, A02, A03, A04, A05, A06, A10, A11, A11B, A12A, A12B, A12C, A12D, A13A, A13B, A13C, A14A, A14B, A17A, A17B, A17C, A17D, A17E, A18, A19A, A19B, A21, A22, A23, A24, A32, A33, A34, A35A, A36, A37A, A37B, A41A, A41C, A42B, A44A, A44B, A44C, A45B, A47, A52, A53, A55, A57, A70, A71, A72A, A72B, A73, A75, A76, A77, A78A, A85	59
TOTAL RUTAS		101

Tabla 5, Promedios del SITM-MIO en el año 2019.



Figura 6, Red del TPCU – 2007 (izq.) y red del SITM-MIO – 2019 (der.).

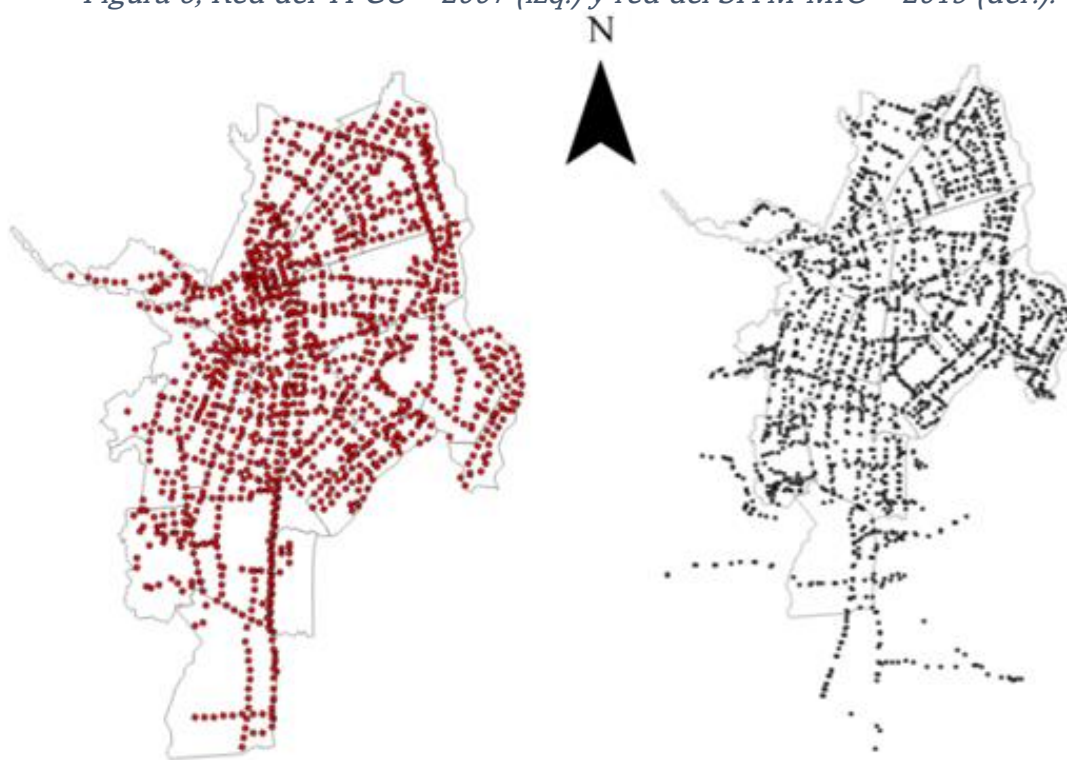


Figura 7, Paradas del TPCU en el año 2007 (izq.) y del SITM-MIO en el año 2019 (der.).

En el Anexo 3, se adjuntan las salidas gráficas de las 132 rutas del TPCU en el año 2007 y de las 101 rutas del SITM-MIO en el 2019, para proporcionar un insumo cartográfico que permita ampliar la información representada en la figura 6. Finalmente, con la caracterización de los dos sistemas de transporte en los años analizados, en la tabla 6 se muestra un resumen de la estadística descriptiva del inventario realizado para el TPCU en el 2007 y para el SITM-MIO en el 2019.

	TPCU - 2007	SITM-MIO - 2019
Rutas	132 rutas	101 rutas
Long. Mínima	9,28 Km	3,03 Km
Long. Máxima	58,34 Km	54,01 Km
Total de Km de red	4.080,74 Km	1.583,85 Km
Asimetría (Long.)	0,31	1,02
Curtosis (Long.)	2,91	3,65
Total de paradas	1423 paradas	4866 paradas

Tabla 6, Estadística descriptiva del inventario del TPCU (2007) y del SITM-MIO (2019).

5.2 Identificar los indicadores de accesibilidad en común entre el TPCU y el MIO

A partir de la información recopilada y seleccionada para el TPCU en el año 2007 y para el SITM-MIO en el año 2019, y acorde a la revisión bibliográfica realizada, se eligieron un total de 4 indicadores de accesibilidad para calcular y analizar el comportamiento de cada sistema de transporte. En la tabla 7 se describen cuáles fueron los indicadores calculados, esto teniendo en cuenta que se contaba con las mismas variables territoriales para ambos sistemas.

En la tabla 7, se resumen los indicadores usados para el proyecto, en el que se clasifican por medidas topológicas, como lo son los índices de densidad y densidad ponderada, que son indicadores que califican a nivel topológico con sus respectivas variables territoriales. En este caso, ambos indicadores de densidad permiten obtener información sobre la disponibilidad de la infraestructura vial que hay cada unidad espacial (cada barrio), con el fin de generar después los mapas descriptivos sobre el comportamiento de la red en el territorio.

El indicador de tiempo global se seleccionó debido a que, con la información recopilada, se pueden generar mapas que visualicen los tiempos en los que los usuarios se pueden desplazar desde un punto de la ciudad hacia otro, teniendo en cuenta en este caso la

longitud de la red vial de cada sistema. Además de que el efecto de transbordo que tiene el SITM-MIO no era necesario considerarse puesto que, se analizaban las rutas de manera independiente, en las mismas condiciones que el TPCU.

Respecto a los indicadores de accesibilidad y provisión, estos se escogieron debido a la información disponible de un atributo de atracción como la población, que se emuló en el caso del índice de accesibilidad de Hansen, con el fin de ver las zonas con mayor accesibilidad en base a la red dispuesta de cada sistema y en este caso, la variable de atracción de la población.

Finalmente, respecto al indicador de provisión, se escogió el índice relativo debido a que se relaciona directamente con la infraestructura vial, flota, estaciones y paradas de cada red que existan en cada barrio, permitiendo analizar la accesibilidad de los usuarios a cada sistema de transporte.

En el Anexo 4, se adjuntan las hojas de cálculo de Microsoft Office Excel donde se consolidan los resultados del cálculo de los indicadores de accesibilidad seleccionados, para el TPCU en el 2007 y para el SITM-MIO en el 2019.

5.3 Modelar por medio de indicadores de accesibilidad territorial los sistemas de transporte a estudiar para evaluar su implementación.

Calculados cada uno de los indicadores de accesibilidad para cada sistema de transporte, se llevó a cabo la representación cartográfica de los resultados, para poder comparar visualmente el comportamiento de cada indicador al variar el sistema y el año de análisis.

En base a los resultados obtenidos, estos se dividieron en cinco (5) cuantiles o categorías para los cinco (5) indicadores calculados: Muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto; para así poder determinar la calidad de los servicios por sectores de la ciudad e identificar los barrios con condiciones favorables o desfavorable

Medidas topológicas				
Indicador	Autor	Ecuación	Variable territorial requerida	Desventajas del índice
Indicador de densidad	Izquierdo, R. (1994)	$D = \frac{Km \text{ de red}}{\text{Área zona de estudio}} \frac{Km}{Km^2}$	* Kilometraje de cada ruta en el barrio * Área de cada barrio	El valor de este índice es muy sensible al área de la unidad geográfica y provisión de red vial.
Indicador de densidad ponderada	Izquierdo, R. (1994)	$D_{pond} = \frac{Km \text{ corredor} * \text{Total rutas en el corredor} * C}{\text{Área del barrio}}$	* Km de ruta en el barrio * Área de cada barrio * Número de rutas por barrio * Capacidad máxima	*Puede tener muchas variaciones según la ponderación que se haga de las vías o servicio de distinta categoría.
Indicador absoluto de tiempo global	Rodrigue, Comtois & Slack (2016)	$C_1 = \sum_{j=i}^n C_{ij}$	* Tiempos mínimos de recorrido * Centroides de cada barrio * Paradas de cada sistema de transporte	*Tiende a favorecer los puntos ubicados hacia el centro de una red por su localización geográfica.
Medidas de accesibilidad y provisión				
Indicador de Accesibilidad de Hansen	Hansen, W.G. (1959)	$A_i = \sum_{j=1}^n A_{ij} \quad A_{ij} = \frac{E_j}{d_{ij}^b}$	* Población por barrio * Distancias entre barrios	*No tiene en cuenta la infraestructura de comunicaciones en la zona de estudio.
Índice relativo de provisión del transporte público (R-IPTP)	Jaramillo et al. (2012)	$W_{ci} = \frac{C_i}{C_{min}} \quad W_{fi} = \frac{f_i}{f_{min}}$ $R - IPTP_j = \frac{1}{A_{fj}} \sum_{i=1}^n S_{ij} W_{ci} W_{fi}$	* Capacidad de cada ruta por barrio * Frecuencia de cada ruta por barrio * Área de cada barrio * Población de cada barrio * Número de paradas por barrio	*Es un indicador especialmente sensible a la infraestructura del sistema y su área, lo que afecta barrios donde hay terminales de transporte.

Tabla 7, Indicadores de accesibilidad en común entre TPCU y SITM-MIO

5.3.1 Indicador de densidad

Los resultados obtenidos en formato vectorial para el indicador de densidad en cada unidad espacial se muestran en la figura 8, observando el comportamiento del índice para el TPCU en el año 2007 y para el SITM-MIO en el año 2019.

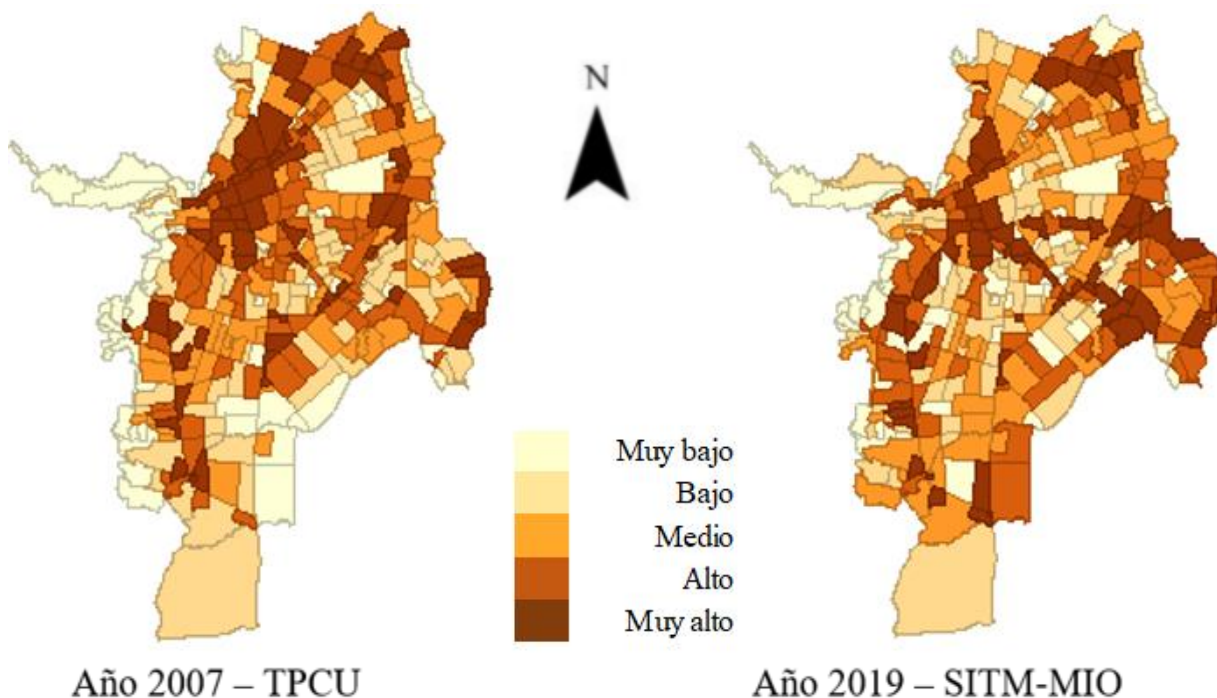


Figura 8, Indicador de densidad del TPCU (2007) y del SITM-MIO (2019).

De acuerdo con lo mostrado en la figura 8, se pueden realizar las siguientes observaciones:

Las unidades espaciales categorizadas como “Muy alto” son aquellas que contaban con un alto nivel de accesibilidad, indicando que había una alta concentración de rutas del TPCU transitando por la red vial de los barrios ubicados en el centro de la ciudad, al igual que en algunos barrios al sur (comuna 18), norte (comuna 2) y oriente de Cali. Para este indicador, la longitud de las vías atendidas por el sistema y el área de cada uno de los barrios ejercieron una gran influencia en los resultados. Así mismo, para este año las unidades espaciales categorizadas como “Muy bajo” y “Bajo”, contaban con una baja longitud de vías atendidas por el TPCU, destacando en su mayoría los barrios ubicados al oeste de la ciudad y en menor proporción algunos barrios del sur, norte y oriente del municipio.

Para el año 2019, los barrios que se categorizaron como “Muy alto” contaban con un alto nivel de accesibilidad. En este caso, las rutas del SITM-MIO se concentraban en mayor proporción en los barrios del centro de la ciudad y en algunos barrios del norte,

sur y oriente de Cali. Por otro lado, las unidades espaciales dentro de las categorías de “Muy bajo” y “Bajo”, se distribuyeron hacia el oeste y suroeste de la ciudad, contando con una baja longitud de vías atendidas por el SITM-MIO, al igual que algunos barrios del centro y suroriente del municipio.

En algunos casos específicos, como en el barrio El Cedro, ubicado en el centro de la ciudad, pasó de estar en una categoría “Alta” del indicador de densidad para el TPCU en el año 2007 a una categoría “Muy baja” para el mismo indicador en el SITM-MIO en el año 2019. Sin embargo, barrios como El Aguacatal al oeste de Cali, La Flora al norte de Cali, Planta de tratamiento y Urbanización El Ángel del Hogar al oriente de Cali, pasaron de estar en categorías de “Muy baja” y “Baja” dentro del indicador para el TPCU en el año 2007 a categorías de “Media” y “Muy alta” para el SITM-MIO en el año 2019, barrios ubicados en zonas donde hay mayor número de troncales del sistema.

5.3.2 Indicador de densidad ponderada

Los resultados obtenidos para el indicador de densidad ponderada en cada unidad espacial se muestran en la figura 9, observando el comportamiento del índice para el TPCU en el año 2007 y para el SITM-MIO en el año 2019.

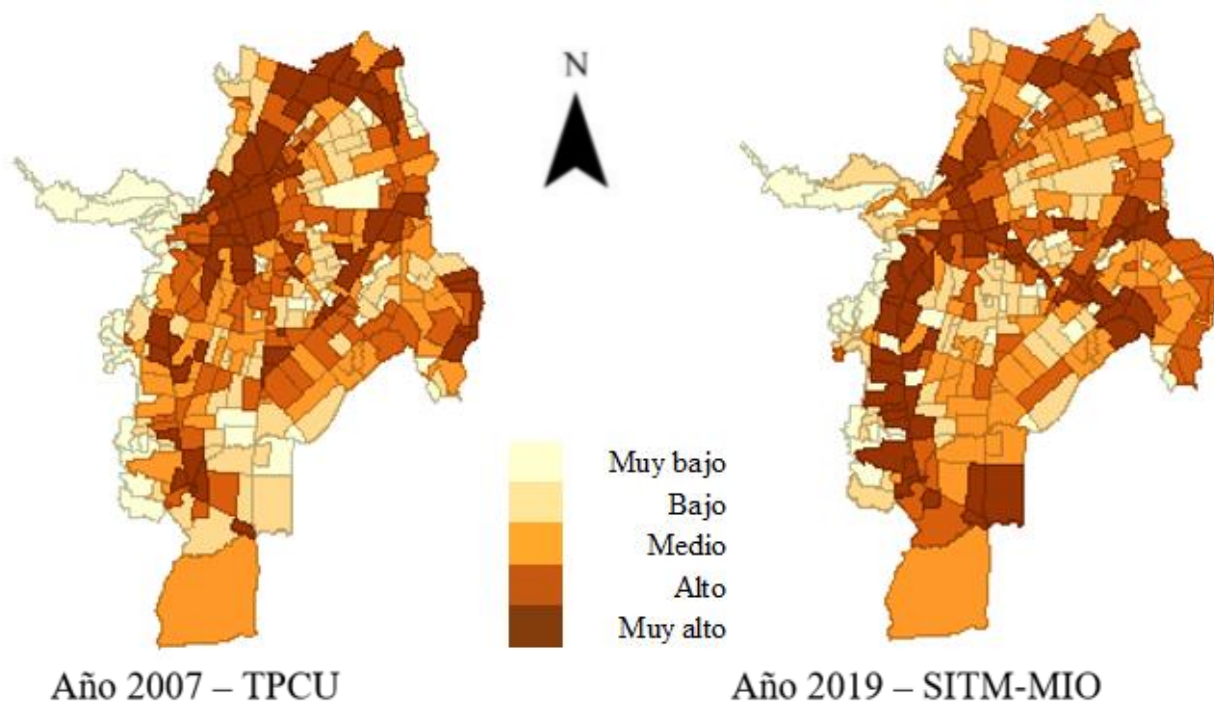


Figura 9, Indicador de densidad ponderada del TPCU (2007) y del SITM-MIO (2019).

Con respecto a lo mostrado en la figura 9, se pueden realizar las siguientes observaciones:

En el año 2007, dentro de la categoría “Muy alta”, destacaron en su gran mayoría aquellas unidades espaciales ubicadas en el centro de Cali, y algunas situadas en el norte, sur y oriente de la ciudad. En base a esto, se puede afirmar que los usuarios que residían en estos sectores contaban con una mayor oferta del servicio del TPCU, es decir, transitaban una mayor cantidad de rutas por las vías de estos barrios y los buses tenían una capacidad amplia para movilizar a varios pasajeros. Caso contrario ocurría en los barrios ubicados al oeste del municipio y en algunas unidades al sur de Cali, donde se puede observar una “Muy baja” y “Baja” oferta del servicio de transporte, manifestando que existía una menor cantidad de rutas transitando por las vías de estos barrios, con capacidades menores para movilizar a varios usuarios.

En cuanto al comportamiento del indicador de densidad ponderada para el SITM-MIO en el año 2019, las unidades espaciales ubicadas dentro de la categoría de “Muy Alto” se distribuían sobre el corredor vial de la calle 5, desde la carrera 100 hasta la carrera 1, donde se encuentran dispuestas varias estaciones del SITM-MIO, haciendo que se concentraran una gran cantidad de rutas ofertadas por el sistema, y que los barrios a sus alrededores tuviesen un mayor acceso al servicio, teniendo en cuenta también que los tipos de buses dominantes en las terminales son articulados, con una capacidad de 160 pasajeros. De manera semejante ocurre con los barrios en torno a la Terminal Menga al norte de Cali y a la Terminal Calipso al oriente de la ciudad. En cuanto a las unidades espaciales que se encuentran en las categorías de “Muy bajo” y “Bajo”, se observan en su mayoría ubicadas al oeste de la ciudad, centro y norte, infiriendo que, además de que transitan una menor cantidad de rutas por las vías de los barrios, estas son en su mayoría rutas pretroncales y alimentadoras, con capacidades de 80 y 51 pasajeros respectivamente.

5.3.3 Indicador absoluto de tiempo global

Con el cálculo del indicador absoluto de tiempo global, mediante las matrices origen-destino de cada servicio de transporte en cada año, se generó el mapa de curvas isócronas de tipo vectorial para el TPCU en el año 2007 y para el SITM-MIO en el año 2019. En la figura 10 se muestra el coste promedio en tiempo (minutos) desde las paradas de cada sistema (orígenes) hacia el centroide de cada barrio (destinos) representados por medio de curvas isócronas.

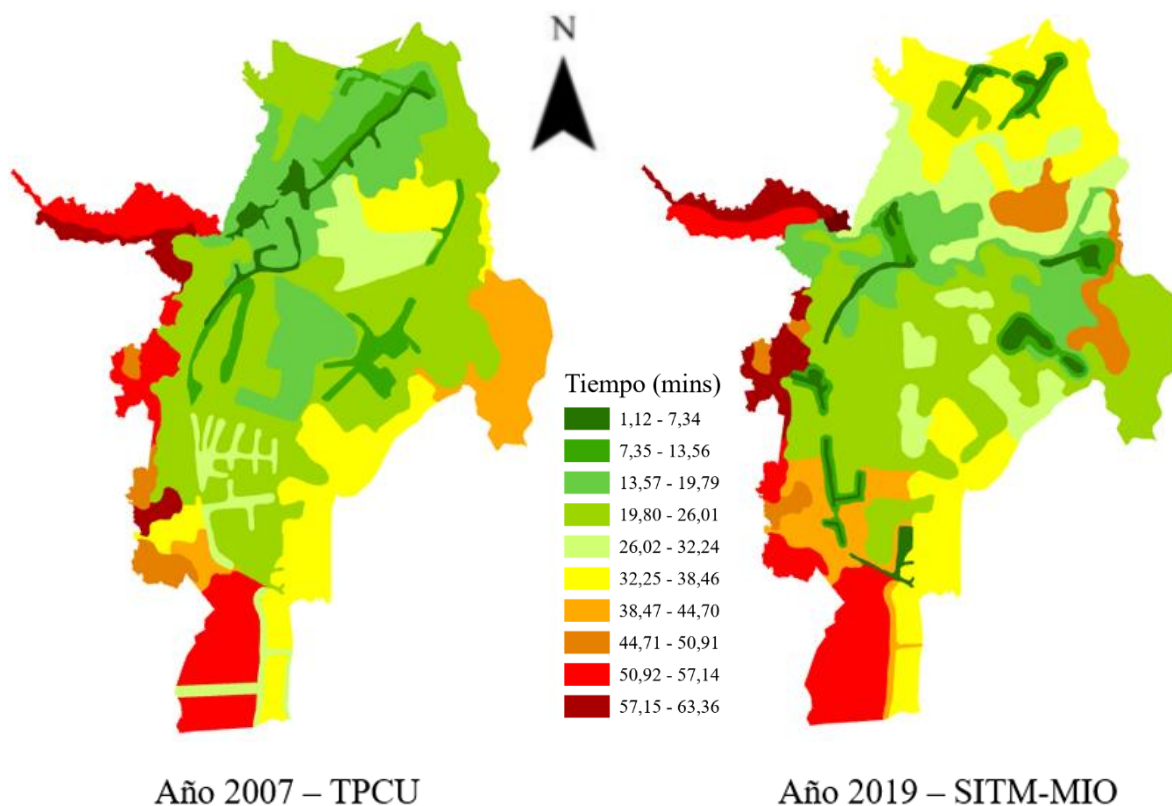


Figura 10, Curvas isócronas del TPCU (2007) y del SITM-MIO (2019).

De acuerdo con lo mostrado en la figura 10, se pueden realizar las siguientes observaciones:

Para el TPCU en el 2007 las unidades espaciales con menor sumatoria de tiempos de desplazamiento (1,12 a 7,34 minutos), y por ende con mayores niveles de accesibilidad, se concentraban en el centro de la ciudad, sobre la calle 5 entre carrera 60 y carrera 1, en algunos barrios al oriente de Cali y en una zona pequeña al norte del municipio. En casi toda la zona urbana, los tiempos de viaje promedio oscilaban entre los 26 y 32 minutos, indicando que existía un alto nivel de accesibilidad entre cada una de las paradas del sistema y los centroides de los barrios. En contraste, los barrios con mayores dificultades eran aquellos ubicados a los extremos de la ciudad, específicamente al oeste y suroriente con tiempos de viaje promedio entre 50 y 57 minutos, al igual que algunos localizados hacia el noroeste con tiempos de desplazamiento promedio entre 64 y 75 minutos. Al sur de la ciudad, los tiempos de viaje oscilaban entre los 25 y los 36 minutos, aumentando progresivamente entre los 37 y 45 minutos conforme las unidades espaciales se concentraban hacia los extremos sur del municipio.

Por otro lado, para el SITM-MIO en el 2019 las unidades espaciales con menor sumatoria de tiempos de desplazamiento y por ende con mayores niveles de accesibilidad, se distribuían sobre varias zonas alrededor de los corredores troncales

de la carrera 1 al norte, la troncal de Aguablanca en el oriente y la calle 5 entre carrera 60 y carrera 1. Así mismo, casi toda el área urbana del municipio tuvo un tiempo de viaje promedio entre los 25 y los 36 minutos, existiendo un alto nivel de accesibilidad entre cada una de las paradas del sistema y los centroides de los barrios. Sin embargo, las unidades espaciales ubicadas a los extremos de la ciudad presentaron bajos niveles de accesibilidad, destacando algunos sectores al noroeste y suroriente de Cali, con tiempos de viaje promedio entre 64 y 75 minutos.

El análisis realizado es similar a los resultados obtenidos en el trabajo de Huertas y Serrano en el 2017, donde las zonas con valores con menor sumatoria de tiempos de desplazamiento también coinciden con las zonas donde existen terminales del SITM-MIO.

5.3.4 Índice de accesibilidad de Hansen

Los resultados obtenidos para el indicador de Hansen en cada unidad espacial se muestran en la figura 11, observando el comportamiento del índice para el TPCU en el año 2007 y para el SITM-MIO en el año 2019, usando como variable de atracción la población por barrio en cada año analizado.

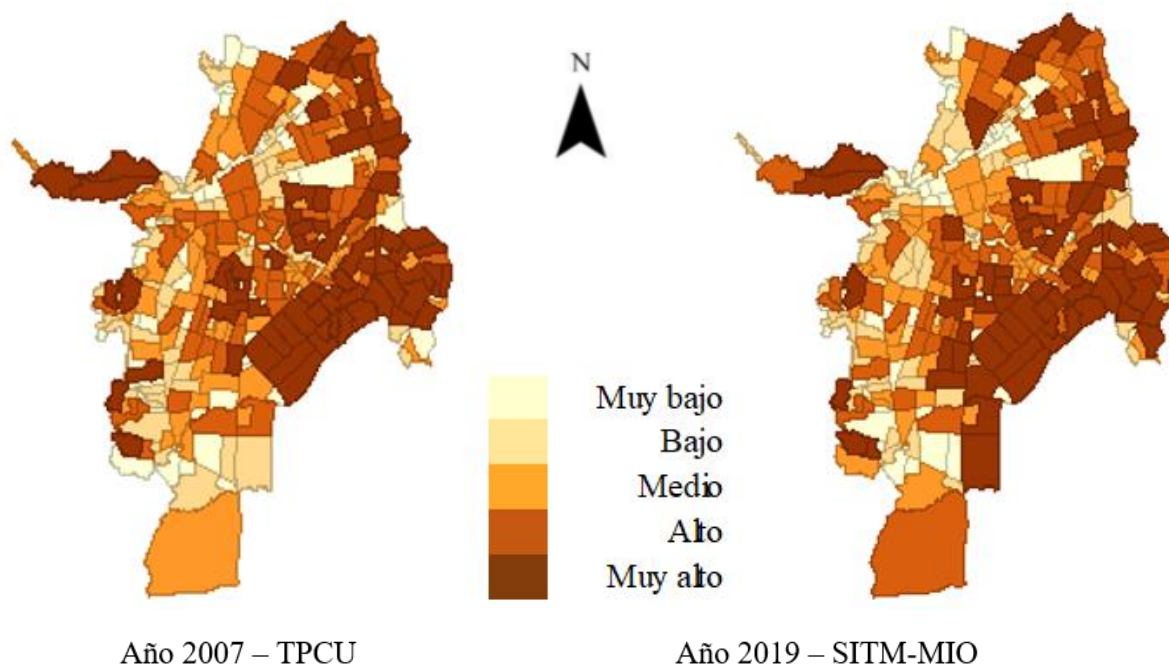


Figura 11, Indicador de Hansen del TPCU (2007) y del SITM-MIO (2019).

Con respecto a lo observado en la figura 11, para los sistemas analizados en el 2007 y en el 2019, se presenta una alta concentración de población en los barrios ubicados al oriente de la ciudad, al igual que al oeste y norte, y en una menor proporción hacia el sur del municipio.

Así mismo, entre estas unidades espaciales existen distancias cortas de desplazamiento, indicando que cuentan con un mejor grado de proximidad, esto sin tener en cuenta la infraestructura del transporte.

Ante estos resultados, habría sido ideal calcular el indicador de Hansen haciendo uso de una variable de atracción como lo son los lugares de empleo o estudio, esto con el propósito de poder medir la accesibilidad existente y potencial con base en la consideración de la posición relativa de un lugar concreto con relación al conjunto del sistema, sin embargo, debido a que no se pudo tener acceso a datos de empleo para el año 2007 en la ciudad de Cali, se optó por trabajar con la variable de población por barrio en los dos años analizados y así poder dar una aproximación, si bien no de los motivos de viaje y las distancias recorridas, de las zonas donde se concentran la mayor cantidad de habitantes usuarios del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el 2019 y que, de acuerdo con lo analizado en los dos indicadores anteriores, contaban con una menor cobertura de estos sistemas de transporte es decir, con bajas posibilidades de acceso a oportunidades (expresadas en términos de empleo o estudio), entendiendo que estas actividades se concentran más hacia el centro de la ciudad, donde el indicador de Hansen arrojó valores más bajos, precisando que no hay una alta presencia de población en esos barrios, pero las unidades espaciales que se encuentran ahí o alrededor son las que cuentan con mejores posibilidades de acceso.

5.3.5 Índice relativo de provisión de transporte público R-IPTP

Los resultados obtenidos para el índice relativo de provisión de transporte público R-IPTP en cada unidad espacial se muestran en la figura 12, observando el comportamiento del índice para el TPCU en el año 2007 y para el SITM-MIO en el año 2019.

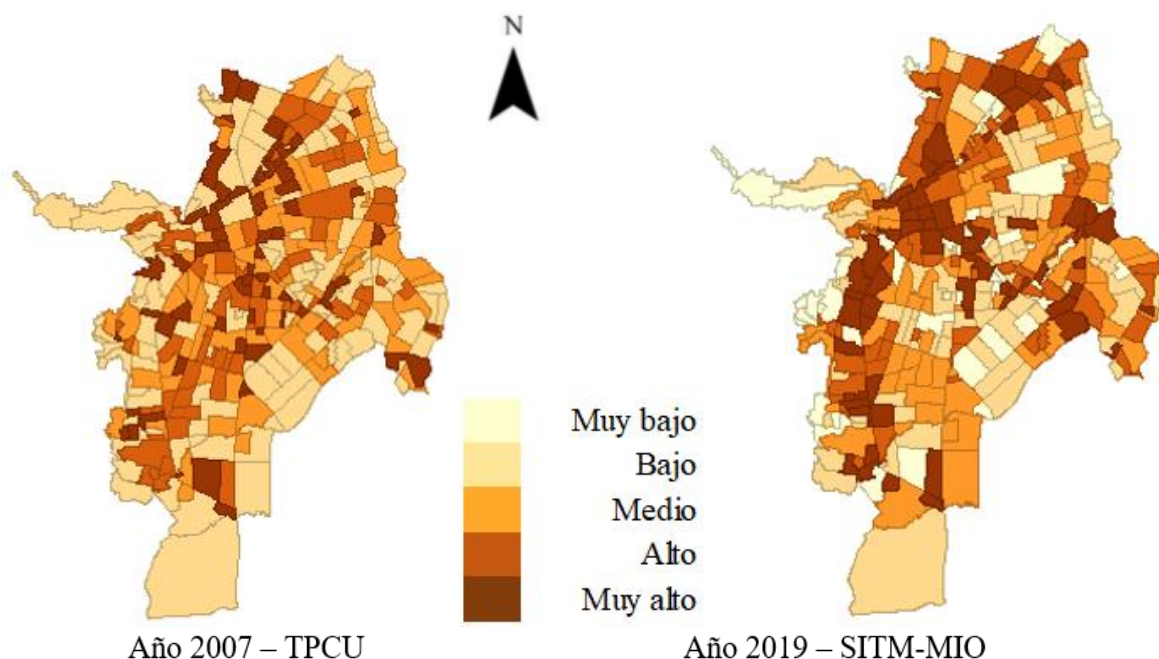


Figura 12, Índice relativo de provisión de transporte público R-IPTP del TPCU (2007) y del SITM-MIO (2019).

Con respecto a lo mostrado en la figura 12, se pueden realizar las siguientes observaciones:

Para el año 2007 la distribución de las zonas era poco uniforme, analizando que, en los barrios ubicados en las laderas de la ciudad, al oeste, sur y oriente, existía una baja provisión del servicio del TPCU, mientras que en las zonas centrales del municipio el indicador es más alto, infiriendo que estas unidades espaciales contaban con una mejor provisión del servicio del TPCU.

Si bien para el año 2019 la distribución de las zonas era más uniforme, se evidencia que en los barrios ubicados al oeste de la ciudad existía una muy baja provisión del servicio del SITM-MIO, en contraste con las unidades espaciales ubicadas sobre la calle 5 entre la carrera 100 y la carrera 1, donde destacan los barrios del centro, y algunas zonas al norte y oriente del municipio, donde existe una mayor concentración de estaciones del SITM-MIO, haciendo que la provisión del servicio sea mejor en términos de las frecuencias y capacidades de las rutas ofertadas. Este último resultado coincide con el ranking realizado en el trabajo de (Jaramillo et al., 2012) donde categorizaron por comunas el R-IPTP y los valores más altos obtenidos para este indicador correspondieron a las comunas 3 y 9 de Cali, en las que se encuentran los barrios del centro de la ciudad.

Posterior al cálculo, modelamiento y análisis de los resultados de los indicadores, se procesaron los valores obtenidos para cada indicador en el TPCU en el año 2007 y en el SITM-MIO en el año 2019, calculando ciertas medidas básicas de estadística para poder inferir sobre el comportamiento de los datos en cada sistema. En la tabla 9 se muestra el balance final de las operaciones ejecutadas, encontrando la media, mediana, varianza, desviación estándar, valor máximo y valor mínimo, rango, coeficiente de variación, medida de asimetría y curtosis de cada indicador en cada sistema en el año correspondiente.

	2007 - TPCU					2019 - SITM-MIO				
	Densidad	Densidad ponderada	Absoluto de tiempo global	Accesibilidad de Hansen	Relativo de provisión de transporte público	Densidad	Densidad ponderada	Absoluto de tiempo global	Accesibilidad de Hansen	Relativo de provisión de transporte público
Media	75,21	158508,64	19,82	2,57	0,99	14,53	18482,86	20,11	2,15	0,25
Mediana	58,72	81518,43	19,27	1,82	0,12	10,67	5445,25	18,26	1,53	0,04
Varianza	4403,58	7,87E+10	20,67	6,22	15,37	175,40	1,37E+09	92,89	4,01	0,86
Desviación estándar	66,36	280519,39	4,55	2,49	3,92	13,24	36980,97	9,66	2,00	0,93
Mínimo	0,33	23,19	13,89	0,00	0,00	0,09	4,37	1,12	0,00	0,00
Máximo	466,91	2,68E+06	35,09	14,98	52,75	111,95	2,60E+05	69,59	13,84	9,47
Rango	466,58	2,68E+06	21,20	14,98	52,75	111,86	2,60E+05	68,47	13,84	9,47
Coefficiente de variación	0,88	1,77	0,23	0,97	3,93	0,91	2,00	0,48	0,93	3,71
Medida de asimetría	2,63	5,35	0,74	2,26	9,69	2,76	3,72	1,84	2,17	7,05
Curtosis	8,47	37,25	-0,07	6,16	111,92	12,03	15,93	5,44	6,30	54,76

Tabla 8, Estadística descriptiva de los indicadores de accesibilidad calculados.

De acuerdo con los valores de la tabla 8, se pueden realizar las siguientes observaciones:

La media del índice de densidad (75,206), del indicador de Hansen (2,574) y del R-IPTP (0,997) fueron mayores para el TPCU en el año 2007 en contraste con la media de estos en el SITM-MIO en el año 2019. Mientras que, la media del índice de densidad ponderada del SITM-MIO (18482,862) fue mayor que la del TPCU (158508,643), debido a que las capacidades de la flota de los vehículos del SITM-MIO son mayores a las que se tenían dispuestas por el TPCU.

Con respecto a los valores del coeficiente de variación para los indicadores en ambos sistemas, en el R-IPTP la distribución de los datos presentó una mayor dispersión para ambos años, haciendo que en los diagramas de dispersión del análisis estadístico-espacial de este índice se pueda presentar una correlación débil o muy débil entre los resultados de cada unidad espacial en el TPCU en el año 2007 y en el SIT-MIO en el año 2019.

En base al cálculo del coeficiente de correlación de Pearson para los indicadores de accesibilidad del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el 2019, (ver tabla 9), se presentaron resultados mayores a cero (> 0) en el indicador de densidad, en el índice

de densidad ponderada y en el índice de accesibilidad de Hansen para los dos sistemas en los correspondientes años, infiriendo que existe una correlación positiva con las variables comparadas, teniendo una asociación alta. Sin embargo, para el R-IPTP en los dos casos el coeficiente de correlación de Pearson fue menor a cero (< 0), indicando una correlación negativa con las variables comparadas, área por barrio y población por barrio.

	2007 - TPCU					2019 - SITM-MIO				
	Densidad	Densidad ponderada	Absoluto de tiempo global	Accesibilidad de Hansen	Relativo de provisión de transporte público	Densidad	Densidad ponderada	Absoluto de tiempo global	Accesibilidad de Hansen	Relativo de provisión de transporte público
	Km de corredor por barrio	Km de corredor por barrio	Área por barrio	Población por barrio	Área por barrio	Km de corredor por barrio	Km de corredor por barrio	Área por barrio	Población del barrio	Población por barrio
Variables comparadas										
Coefficiente de correlación de Pearson	0,47	0,59	0,03	0,95	-0,067	0,49	0,58	0,04	0,963	-0,167

Tabla 9, Coeficiente de correlación de Pearson de los indicadores de accesibilidad calculados.

5.4 Realizar un análisis estadístico-espacial de los indicadores calculados, para los sistemas de transporte estudiados, a través del tiempo.

Con la exploración realizada previamente en el objetivo anterior, verificando el comportamiento estructural de los datos, también se lleva a cabo una verificación de los resultados ejecutando procedimientos estadísticos, para analizar espacialmente cómo era el servicio del TPCU en el año 2007 y del SITM-MIO en el año 2019 por medio de los resultados obtenidos tras el cálculo de los indicadores de accesibilidad seleccionados para cada periodo. A continuación, se generaron:

5.4.1 Mapas y diagramas de caja y bigotes o box plot para cada indicador del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el 2019.

Este procesamiento se ejecutó con el propósito de analizar cómo se distribuían los datos en función de cada indicador de accesibilidad para cada sistema en el año correspondiente (ver tabla 10).

Sistema	TPCU - 2007					SITM-MIO - 2019				
Estadística	Densidad	Densidad ponderada	Absoluto de tiempo global	Hansen	R-IPTP	Densidad	Densidad ponderada	Absoluto de tiempo global	Hansen	R-IPTP
Min.	0,33	23,19	13,89	0,00	0,00	0,09	4,37	1,12	0,00	0,00
Máx.	466,91	2683607,33	35,09	14,98	52,75	111,95	260291,34	69,59	13,84	9,47
Q1 (Cuartil 1)	28,81	20329,59	15,95	0,99	0,01	5,80	1061,91	15,03	0,86	0,01
Mediana	55,53	76088,59	19,30	1,83	0,09	9,82	5042,28	18,47	1,53	0,03
Q3 (Cuartil 3)	92,11	174734,89	22,76	3,13	0,50	17,51	13893,38	23,01	2,89	0,12
Rango intercuartilico	63,30	154405,61	6,81	2,15	0,49	11,71	12831,47	7,98	2,03	0,12
Media	71,58	151912,52	19,86	2,57	0,92	13,64	17370,37	20,10	2,15	0,23
Desviación estándar	66,26	276926,95	4,55	2,50	3,78	13,30	36127,43	9,66	2,01	0,90

Tabla 10, Resumen de los resultados estadísticos de los indicadores en el TPCU (2007) y en el SITM-MIO (2019).

5.4.1.1 Indicador de densidad

En la figura 13 se muestra el box plot del indicador de densidad del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el 2019 y en la figura 14 se muestran los barrios con valores atípicos situados por encima del límite superior del Box plot del indicador de densidad del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el año 2019.

Para el sistema analizado en el 2007, existen 88 unidades espaciales con indicadores de densidad con un grado moderado de dispersión por debajo de la mediana (55,53), siendo barrios ubicados al oeste, suroeste y noroeste de la ciudad, entre el primer cuartil y el límite inferior en el box plot, y por encima de la mediana entre el tercer cuartil y el límite superior existen 64 unidades espaciales con indicadores de densidad con un grado moderado de dispersión por encima de la mediana, siendo los barrios concentrados sobre la calle 5 entre la carrera 100 y la carrera 1. En este diagrama se identificaron 22 barrios con valores atípicos, situados por encima del límite superior, ubicados en el centro de Cali y 166 barrios entre el primer cuartil (28.81) y el tercer cuartil (92.11) distribuidos hacia el norte, sur y oriente de la ciudad.

Por otro lado, sobre el comportamiento del indicador de densidad en el SITM-MIO en el año 2019, se encuentra que existen 85 unidades espaciales con indicadores de densidad con un grado moderado de dispersión por debajo de la mediana (9,82), ubicadas al oeste de Cali, al igual que barrios como Parcelaciones Pance en el sur y Villa Mercedes en el oriente. Por encima de la mediana entre el tercer cuartil y el límite superior existen 60 unidades espaciales con indicadores de densidad con un grado moderado de dispersión por encima de la mediana, siendo los barrios concentrados sobre la calle 5 entre la carrera 100 y la carrera 1, al norte y oriente de Cali. En este diagrama se identificaron 21 barrios con valores atípicos (ver figura 14), situados por encima del límite superior, ubicados en bajas proporciones en el centro, sur y oriente de la ciudad, y 173 barrios entre el primer cuartil (5.80) y el tercer cuartil (17.51) distribuidos hacia el norte, sur y oriente de la ciudad. En base a lo analizado, el indicador

de densidad para ambos sistemas de transporte fue elevado en aquellas unidades espaciales donde transitaban una mayor cantidad de rutas (del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el 2019) sobre sus corredores viales, y por ende contaban con un mejor nivel de accesibilidad. Caso contrario ocurrió para ambos sistemas en los barrios al oeste de la ciudad, donde los valores de los indicadores de densidad fueron bajos en los dos periodos, aunque para el SITM-MIO en el 2019 el nivel de accesibilidad mejoró en contraste con el TPCU en el 2007 en esta misma zona de la ciudad.

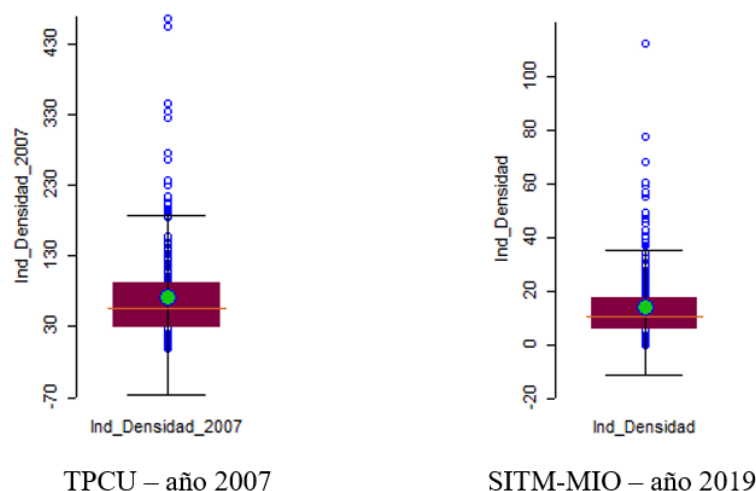


Figura 13, Box plot del indicador de densidad del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el año 2019.

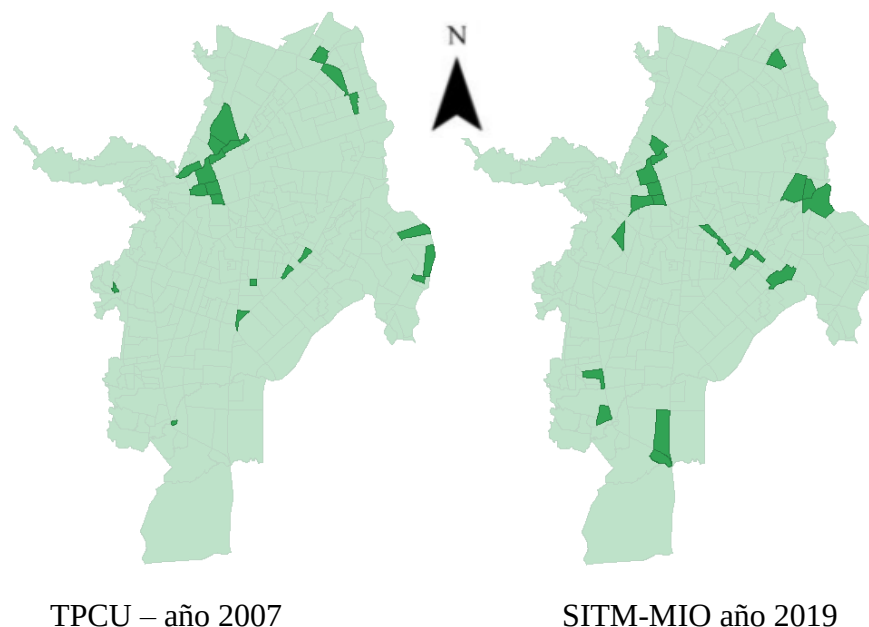


Figura 14, Barrios con valores atípicos situados por encima del límite superior del Box plot del indicador de densidad del TPCU en el 2007 (23) y del SITM-MIO en el año 2019 (21).

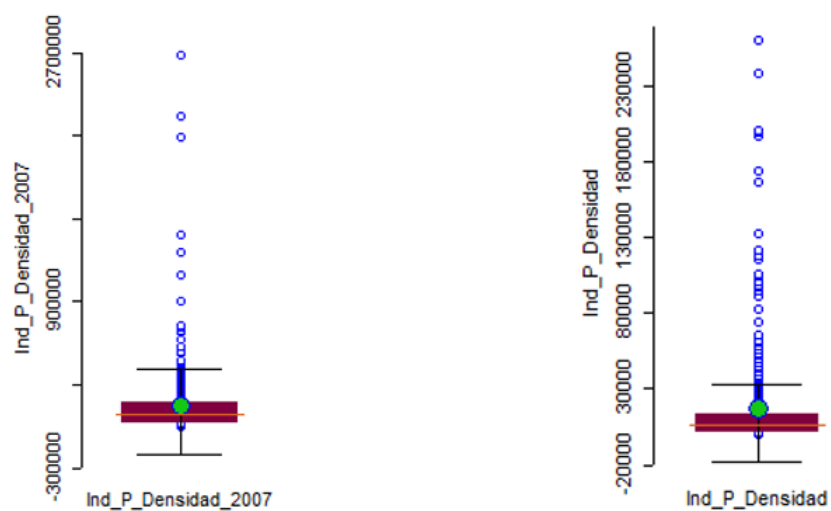
5.4.1.2 Indicador de densidad ponderada

En la figura 15 se muestra el box plot del indicador de densidad ponderada del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el 2019, y en la figura 16 se muestran los barrios con valores atípicos situados por encima del límite superior del Box plot del indicador de densidad ponderada del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el año 2019.

Para el sistema analizado en el 2007 existen 94 unidades espaciales con indicadores de densidad con un grado moderado de dispersión por debajo de la mediana (76088,59), siendo barrios ubicados en mayor proporción al oeste, suroeste y suroriente de la ciudad, entre el primer cuartil y el límite inferior en el box plot, y por encima de la mediana entre el tercer cuartil y el límite superior existen 61 unidades espaciales con indicadores de densidad con un grado moderado de dispersión por encima de la mediana, siendo los barrios concentrados sobre la calle 5 entre la carrera 100 y la carrera 1, y sobre la calle 70 entre carrera 28D y carrera 1. En este diagrama se identificaron 24 barrios con valores atípicos, situados por encima del límite superior, ubicados en su mayoría en el centro de Cali y 160 barrios entre el primer cuartil (20329,59) y el tercer cuartil (174734,89) distribuidos hacia el norte, sur y oriente de la ciudad.

En lo que respecta al comportamiento del indicador de densidad ponderada en el SITM-MIO en el año 2019, se encuentra que existen 108 unidades espaciales con indicadores de densidad con un grado moderado de dispersión por debajo de la mediana (5042,28), ubicadas al oeste de Cali. Por encima de la mediana entre el tercer cuartil y el límite superior existen 34 unidades espaciales con indicadores de densidad con un grado moderado de dispersión por encima de la mediana, siendo los barrios concentrados sobre la calle 5 entre la carrera 100 y la carrera 61, y la calle 70 entre carrera 28D y la autopista sur. En este diagrama se identificaron 48 barrios con valores atípicos, situados por encima del límite superior (ver figura 16), ubicados sobre la calle 5 entre la carrera 100 y la carrera 1, Ciudad de los Álamos, Calima, Metropolitano del Norte, Sector Puente del Comercio, Villa del Sol, Los Alcázares y San Luis al norte de Cali y 170 barrios entre el primer cuartil (1061,91) y el tercer cuartil (13893,38) distribuidos hacia la zona central de la ciudad.

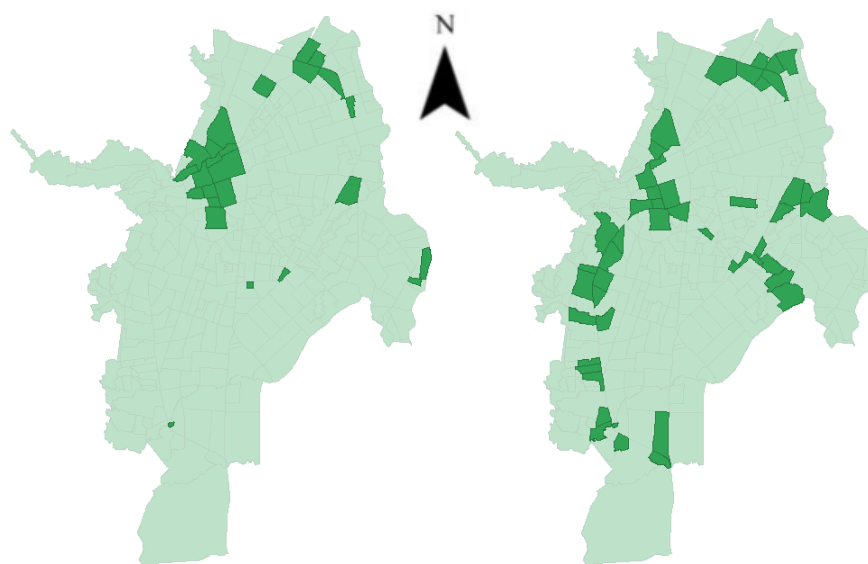
Teniendo en cuenta lo anterior, si bien los dos sistemas de transporte en los correspondientes años analizados presentaron valores bajos del indicador de densidad ponderada en mayor concentración en las unidades espaciales ubicadas al oeste de la ciudad, en el SITM-MIO era más elevado el número de barrios con bajos niveles de accesibilidad, indicando que en esa zona, además de transitar una menor cantidad de rutas sobre sus corredores viales, la capacidad de los buses para transportar pasajeros era baja.



TPCU – año 2007

SITM-MIO – año 2019

Figura 15, Box plot del indicador de densidad ponderada del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el año 2019.



TPCU – año 2007

SITM-MIO año 2019

Figura 16, Barrios con valores atípicos situados por encima del límite superior del Box plot del indicador de densidad ponderada del TPCU en el 2007 (25) y del SITM-MIO en el año 2019 (47).

5.4.1.3 Indicador absoluto de tiempo global

En la figura 17 se muestra el box plot del indicador absoluto de tiempo global del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el 2019, y en la figura 18 se muestran los barrios con valores atípicos situados por encima del límite superior del Box plot del indicador absoluto de tiempo global del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el año 2019.

Para el sistema analizado en el 2007 existen 85 unidades espaciales con indicadores absolutos de tiempo global con un grado moderado de dispersión por debajo de la mediana (19,30), siendo barrios ubicados en mayor proporción al centro, sur y oriente de la ciudad, entre el primer cuartil y el límite inferior en el box plot, y por encima de la mediana entre el tercer cuartil y el límite superior existen 79 unidades espaciales con indicadores absolutos de tiempo global con un grado moderado de dispersión por encima de la mediana, siendo los barrios concentrados al norte de la ciudad y distribuidos en menor proporción hacia el suroeste y oriente de Cali. En este diagrama se identificaron 2 barrios con valores atípicos, situados por encima del límite superior: el barrio San Nicolás en el centro y el barrio Cañaveralejo – Seguros Patria en el sur.

En lo que respecta al comportamiento del indicador absoluto de tiempo global en el SITM-MIO en el año 2019, se encuentra que existen 83 unidades espaciales con indicadores absolutos de tiempo global con un grado moderado de dispersión por debajo de la mediana (18,47), ubicadas en mayor proporción en el centro y oriente de la ciudad, y en menor proporción en el norte de Cali. Por encima de la mediana entre el tercer cuartil y el límite superior existen 66 unidades espaciales con indicadores absolutos de tiempo global con un grado moderado de dispersión por encima de la mediana, siendo los barrios concentrados al norte, oeste y suroriente de la ciudad. En este diagrama se identificaron 20 barrios con valores atípicos, situados por encima del límite superior (ver figura 18), ubicados en mayor proporción en el oeste, sur y suroeste de la ciudad.

Teniendo en cuenta lo anterior, si bien los dos sistemas de transporte en los correspondientes años analizados presentaron valores bajos del indicador de densidad ponderada en mayor concentración en las unidades espaciales ubicadas al oeste de la ciudad, en el SITM-MIO era más elevado el número de barrios con bajos niveles de accesibilidad, indicando que en esa zona, además de transitar una menor cantidad de rutas sobre sus corredores viales, la capacidad de los buses para transportar pasajeros era baja.

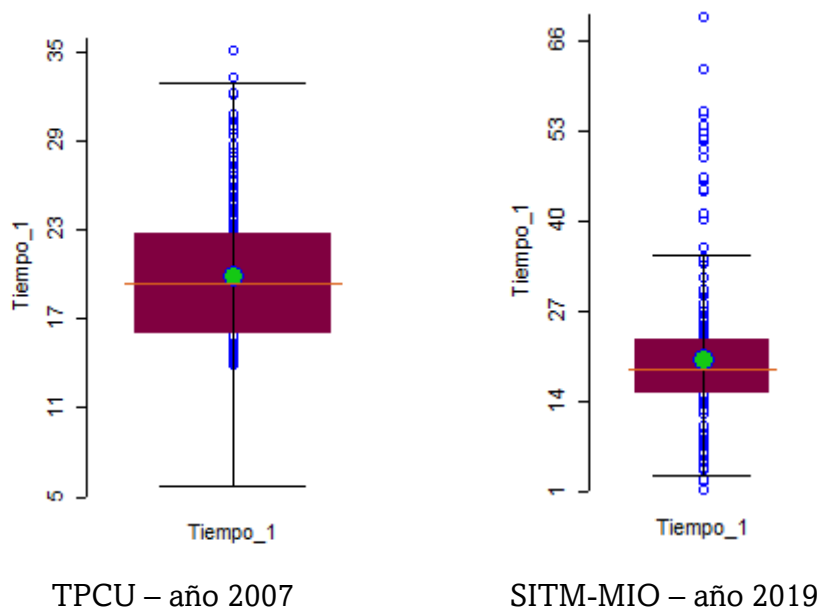


Figura 17, Box plot del indicador de tiempo global del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el año 2019.

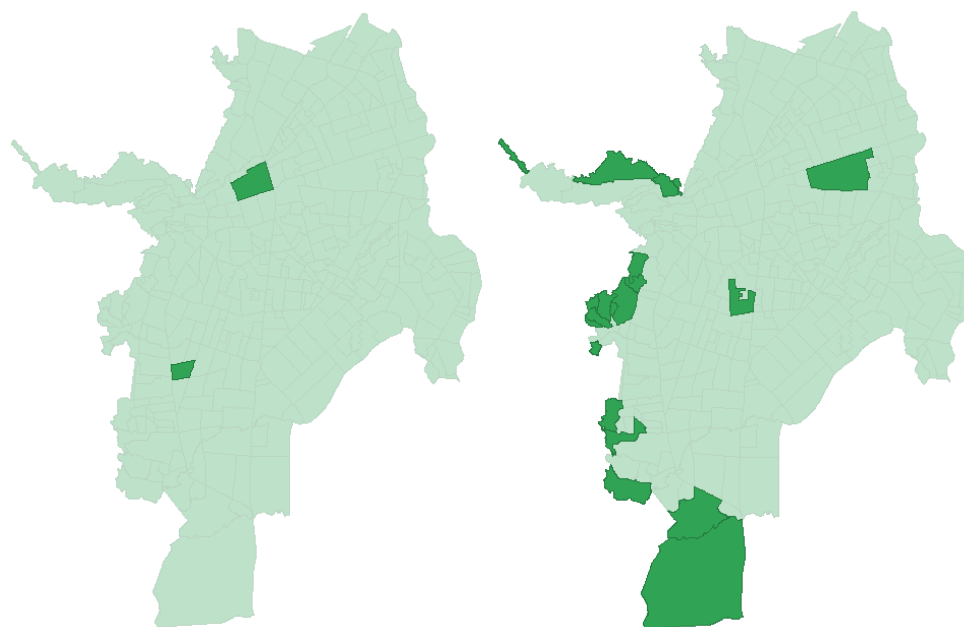


Figura 18, Barrios con valores atípicos situados por encima del límite superior del Box plot del indicador absoluto de tiempo global del TPCU en el 2007 (2) y del SITM-MIO en el año 2019 (20).

5.4.1.4 Índice de accesibilidad de Hansen

Teniendo en cuenta que la variable de atracción utilizada para el cálculo de este indicador fue el número de habitantes por barrio en el 2007 para el TPCU y en el 2019 para el SITM-MIO, debido a que no se logró tener acceso a la información sobre empleos por barrio para el primer año, en la figura 19 se muestra el diagrama de caja y bigotes del indicador de Hansen para el TPCU en el 2007 y para el SITM-MIO en el 2019. Así mismo, en la figura 20 se muestran los barrios con valores atípicos del indicador de Hansen situados por encima del límite superior del box plot.

En la figura 19 se muestran los resultados del indicador obtenidos para el TPCU en el año 2007, donde en 85 barrios se registraron resultados con un grado moderado de dispersión por debajo de la mediana (1,83), destacando las unidades espaciales ubicadas en el centro de la ciudad, donde el número de personas residentes y los tiempos de viaje entre las unidades espaciales son bajos, sin considerar una estructura de transporte. En contraste, 63 barrios registraron resultados con un grado moderado de dispersión por encima de la mediana, encontrando que, en barrios como Vista Hermosa al oeste de Cali, Ciudad de los Álamos y Brisas de los Álamos al norte, José Manuel Marroquín I y Ciudadela del Río al oriente, existe una mayor cantidad de población residente y los tiempos de desplazamiento entre estas unidades espaciales es elevado, sin tener en consideración una estructura de transporte.

Por otro lado, en lo que respecta a los resultados de este indicador para el SITM-MIO en el año 2019, en 94 unidades espaciales se obtuvieron resultados con un grado moderado de dispersión por debajo de la mediana (1,53), destacando aquellas ubicadas sobre el corredor de la calle 5 entre la carrera 100 y la carrera 1, donde el número de residentes es bajo, al igual que los tiempos de viaje entre ellas, mientras que en 62 barrios se registraron resultados con un grado moderado de dispersión por encima de la mediana, concentrados en mayor proporción al oriente y nororiente de la ciudad, indicando que existe una mayor cantidad de población residente y que los tiempos de viaje entre las unidades espaciales es elevado.

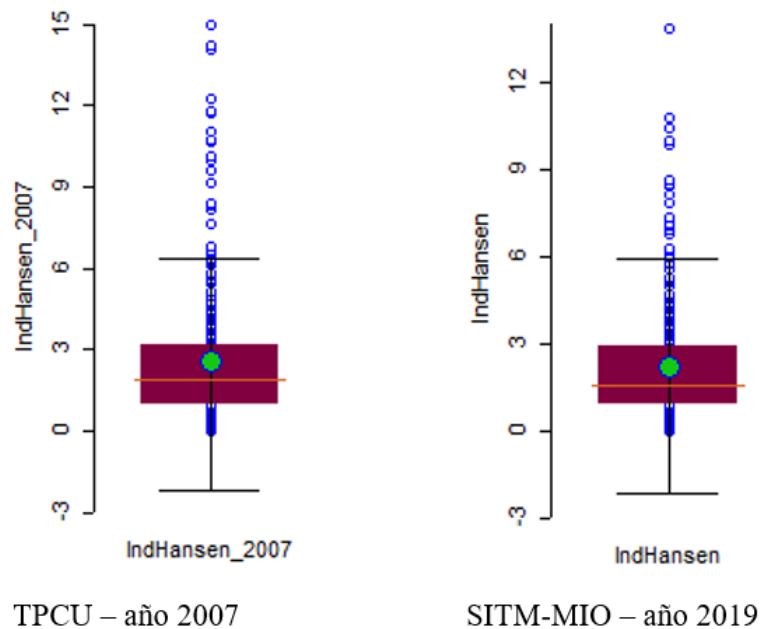


Figura 19, Box plot del índice de accesibilidad de Hansen del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el año 2019.

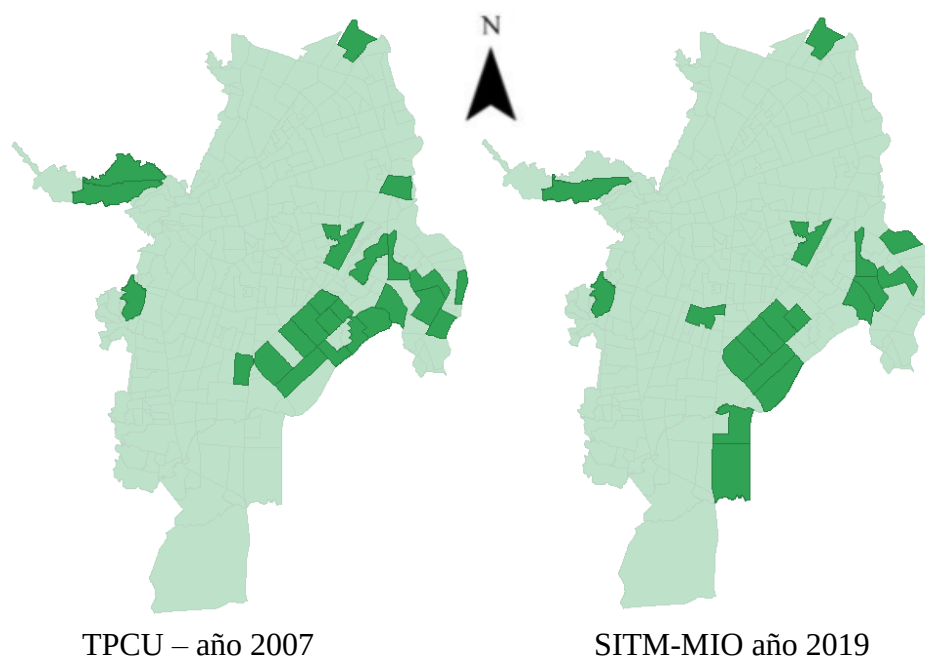


Figura 20, Barrios con valores atípicos situados por encima del límite superior del Box plot del indicador de Hansen del TPCU en el 2007 (24) y del SITM-MIO en el año 2019 (19).

5.4.1.5 Índice relativo de provisión de transporte público R-IPTP

En la figura 21 se muestra el box plot del índice relativo de provisión de transporte público (R-IPTP) del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el 2019 y en la figura 22 se muestran los barrios con valores atípicos del índice relativo de provisión de transporte público (R-IPTP) situados por encima del límite superior del box plot.

Para el sistema analizado en el 2007 existen 76 unidades espaciales con valores de R-IPTP por debajo de la mediana (0,09), siendo barrios ubicados en mayor proporción al oeste y suroeste de la ciudad, y más dispersos hacia el norte y oriente de Cali, entre el primer cuartil y el límite inferior en el box plot, y por encima de la mediana entre el tercer cuartil y el límite superior existen 41 unidades espaciales con valores del R-IPTP con un grado moderado de dispersión por encima de la mediana, siendo los barrios concentrados sobre el corredor vial central de Cali.

Con respecto al comportamiento del indicador para el SITM-MIO en el año 2019, existen 188 unidades espaciales con valores de R-IPTP por debajo de la mediana (0,03), siendo barrios ubicados en mayor proporción al oeste, suroeste, norte y oriente de la ciudad, entre el primer cuartil y el límite inferior en el box plot, y por encima de la mediana entre el tercer cuartil y el límite superior existen 38 unidades espaciales con valores del R-IPTP con un grado moderado de dispersión por encima de la mediana.

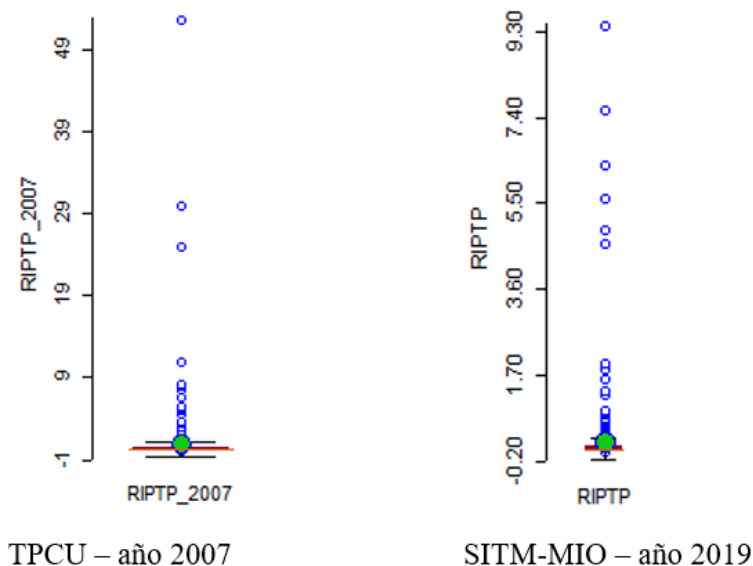


Figura 21, Box plot del índice relativo de provisión de transporte público (R-IPTP) del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el año 2019.

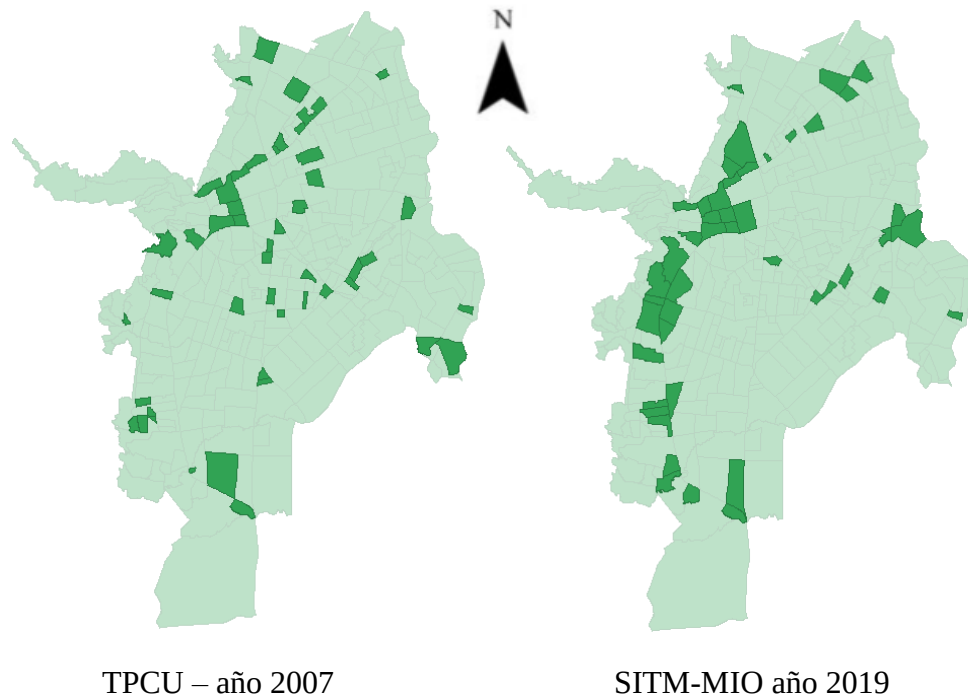


Figura 22, Barrios con valores atípicos situados por encima del límite superior del Box plot del índice relativo de provisión de transporte público (R-IPTP) del TPCU en el 2007 (49) y del SITM-MIO en el año 2019 (46).

5.4.2 Diagramas de dispersión (Indicadores de accesibilidad TPCU 2007 versus SITM-MIO 2019)

Este procesamiento se llevó a cabo con el fin de poder analizar cómo era la relación de cada uno de los 4 indicadores calculados variando el sistema de transporte y el año, de manera que se pudo observar el comportamiento de: el indicador de densidad (TPCU 2007 vs SITM-MIO 2019), el indicador de densidad ponderada (TPCU 2007 vs SITM-MIO 2019), el indicador de accesibilidad de Hansen (TPCU 2007 vs SITM-MIO 2019) y el R-IPTP (TPCU 2007 vs SITM-MIO 2019) e interpretar en base a la figura 1 del documento, donde la variable independiente (x) fueron los indicadores en el SITM-MIO en el 2019 y la variable dependiente los indicadores en el TPCU en el 2007.

5.4.2.1 Indicador de densidad

En la figura 23 se muestra el diagrama de dispersión del indicador de densidad del SITM-MIO en el 2019 versus el indicador de densidad del TPCU en el 2007, y en la figura 24 se observa el comportamiento del indicador en cada cuadrante.

De acuerdo con la vista del cuadrante I, ver figura 23, se puede interpretar que en 82 barrios de la ciudad de Cali, distribuidos sobre la calle 5 entre la carrera 100 y la carrera 1, y algunos hacia el norte y nororiente de la ciudad, se obtuvieron resultados altos para el TPCU en el año 2007 y para el SITM-MIO en el 2019, indicando que el 17,93% de las unidades espaciales analizadas contaban con una alta concentración de rutas

transitando por su red vial mientras que, en base a la vista del cuadrante III, 170 barrios presentaron valores bajos del indicador en ambos sistemas en cada año analizado, infiriendo que el 56,31% de las unidades espaciales no contaban con una alta concentración de rutas transitando por su red vial.

Pero para poder detectar una variación favorable o desfavorable del indicador de densidad en cada sistema, se analiza el comportamiento de los datos en el cuadrante II, donde 46 barrios, concentrados en el centro de Cali y sobre la autopista Simón Bolívar, pasaron de tener indicadores de densidad altos con el TPCU en el año 2007 a tener una reducción con el SITM-MIO en el año 2019, lo cual puede estar ligado a que, si bien en ambos sistemas existían altos niveles de accesibilidad topológica, el SITM-MIO transitaba mayormente sobre las vías principales, mientras que el TPCU lo hacía también sobre las vías internas de estas unidades espaciales, abarcando así un mayor kilometraje vial de prestación del servicio. Finalmente, en el cuadrante IV sobresalen 37 barrios que registraban valores bajos del indicador para el TPCU en el 2007 pero aumentaron para el SITM-MIO en el 2019, tales fueron los casos de unidades espaciales como Valle del Lili al sur de Cali y Alfonso López II, Planta de Tratamiento y Valle Grande al oriente de la ciudad, donde el kilometraje de la red vial por donde transitaban los buses del sistema era mayor, mejorando el nivel de accesibilidad.

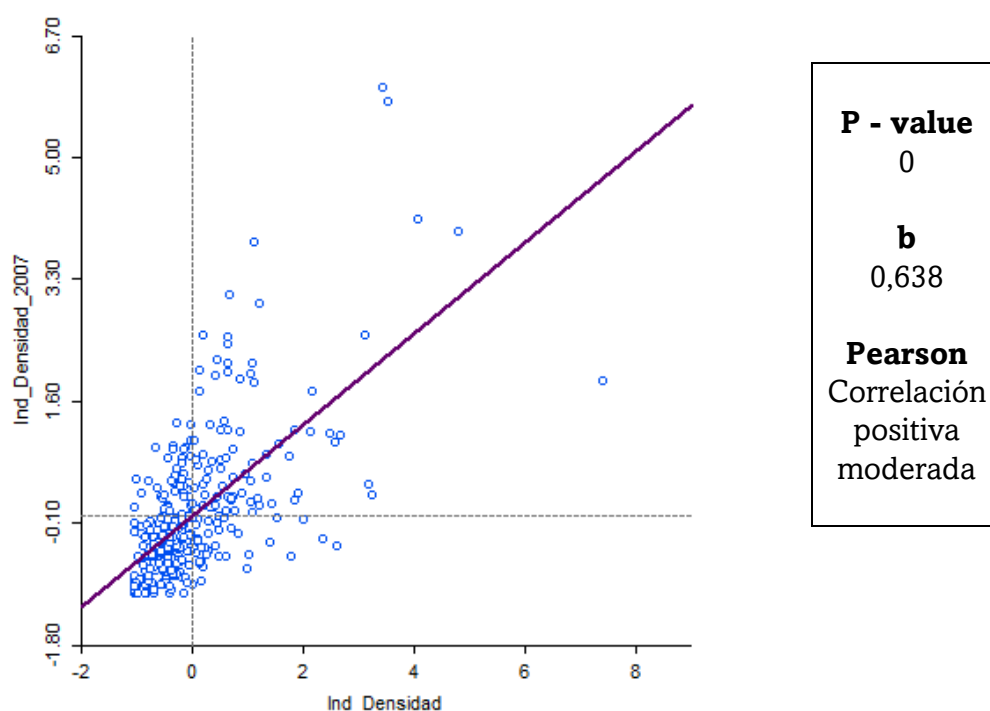


Figura 23, Diagrama de dispersión del indicador de densidad del TPCU (2007) versus SITM-MIO (2019).

Cuadrante I - AA

Cuadrante II - AB

Cuadrante III – BB

Cuadrante IV - BA

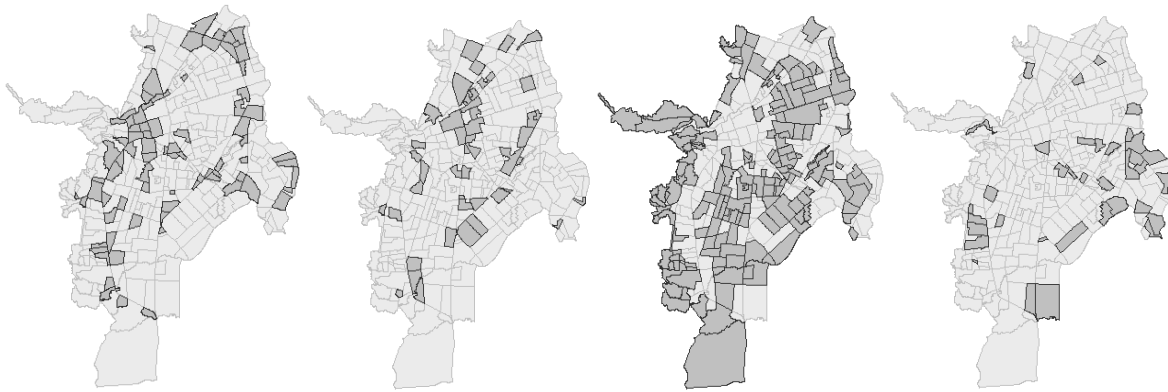


Figura 24, Representación espacial de los cuadrantes del diagrama de dispersión del indicador de densidad (TPCU 2007 versus SITM-MIO 2019).

En la tabla 11 se consolidaron los resultados extraídos a partir del análisis de cada cuadrante, esto con el propósito de realizar un conteo de la cantidad de barrios por cuadrante, el área de estos y el porcentaje de área respecto a toda la ciudad, para inferir al respecto.

Cuadrante I - AA	Cuadrante II - AB	Cuadrante III - BB	Cuadrante IV - BA
Número de barrios			
82	46	170	37
Área (Km2)			
21,5	15,4	68,19	15,91
Porcentaje de área respecto a toda la ciudad			
17,77%	12,73%	56,36%	13,15%

Tabla 11, Representación numérica de los cuadrantes del diagrama de dispersión del indicador de densidad (TPCU 2007 versus SITM-MIO 2019).

5.4.2.2 Indicador de densidad ponderada

En la figura 25 se muestra el diagrama de dispersión del indicador de densidad ponderada del SITM-MIO en el 2019 versus el indicador de densidad ponderada del TPCU en el 2007, y en la figura 26 se observa el comportamiento del indicador en cada cuadrante. En la tabla 12 se consolidaron los resultados extraídos a partir del análisis de cada cuadrante.

De acuerdo con lo observado en el diagrama de la figura 25, en el cuadrante I (ver figura 26) sobresalieron 45 unidades espaciales con resultados altos para ambos sistemas en los años analizados, las mismas concentradas sobre el corredor vial de la calle 5 entre carrera 100 y carrera 1, y algunas hacia el norte y oriente de la ciudad, donde existía

una elevada oferta de buses con capacidades altas para transportar a los usuarios del TPCU en el 2007 y del SITM-MIO en el 2019. Mientras que, en el cuadrante III resaltaron 61,73% de los barrios de Cali, concentrados al oeste, sur, oriente y zona central de la ciudad, indicando que los resultados del indicador de densidad ponderada en estas zonas fueron bajos para ambos sistemas en los dos periodos de tiempo, contando con una menor cantidad de rutas transitando por los corredores viales y capacidades bajas de transporte de usuarios.

Por otro lado, en el cuadrante II se muestran las 61 unidades espaciales que contaban con valores altos del indicador para el TPCU en el año 2007 pero que para el SITM-MIO en el año 2019 tuvieron una reducción, tal es el caso de algunos de los barrios ubicados en el centro de la ciudad, norte y oriente, en los que transitaban mayor cantidad de rutas por los corredores viales con capacidades altas de transporte de usuarios en el 2007, en comparación al año 2019. Sin embargo, la situación del indicador de accesibilidad mejoró para el SITM-MIO en el año 2019, pues de acuerdo con el cuadrante IV, 28 barrios pasaron de tener valores bajos con el TPCU en el 2007, a tener valores altos con el SITM-MIO en el 2019, esto teniendo en cuenta que en las zonas resaltadas existe la presencia de estaciones del sistema, haciendo que haya una mayor oferta del transporte para los usuarios alrededor.

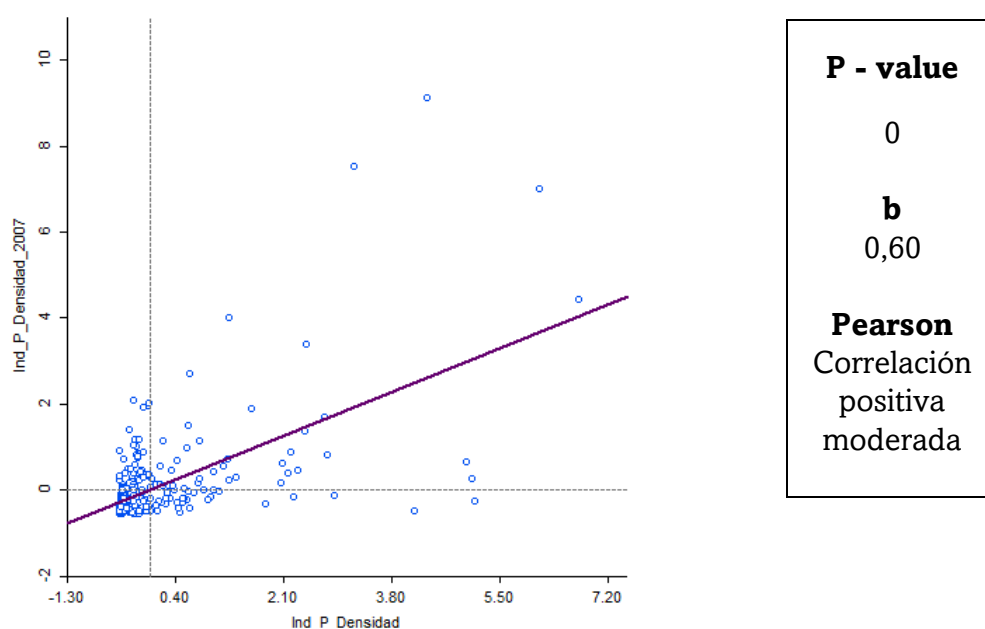


Figura 25, Diagrama de dispersión del indicador de densidad ponderada del TPCU (2007) versus SITM-MIO (2019).

Cuadrante I - AA

Cuadrante II - AB

Cuadrante III – BB

Cuadrante IV - BA

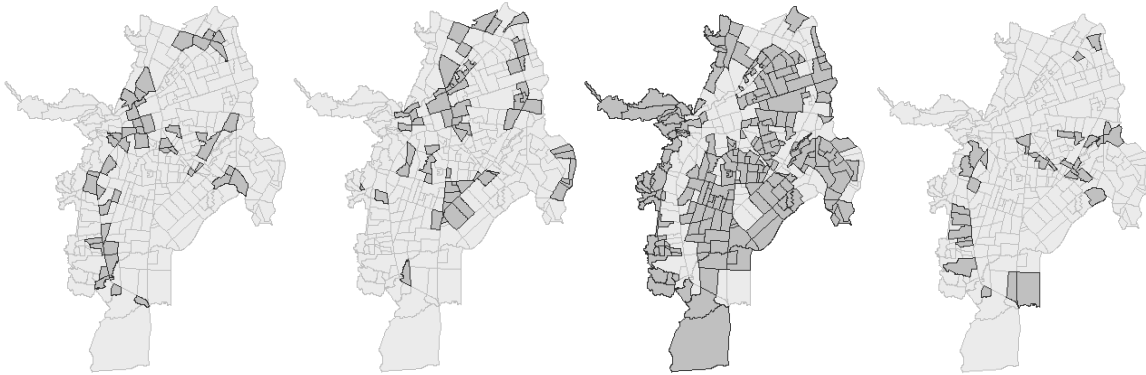


Figura 26, Representación espacial de los cuadrantes del diagrama de dispersión del indicador de densidad ponderada (TPCU 2007 versus SITM-MIO 2019).

Cuadrante I - AA	Cuadrante II - AB	Cuadrante III - BB	Cuadrante IV - BA
Número de barrios			
45	61	201	28
Área (Km2)			
14,6	19,8	74,75	11,85
Porcentaje de área respecto a toda la ciudad			
12,07%	16,36%	61,78%	9,79%

Tabla 12, Representación numérica de los cuadrantes del diagrama de dispersión del indicador de densidad ponderada (TPCU 2007 versus SITM-MIO 2019).

5.4.2.3 Indicador absoluto de tiempo global

En la figura 27 se muestra el diagrama de dispersión del indicador absoluto de tiempo global del SITM-MIO en el 2019 versus el indicador absoluto de tiempo global del TPCU en el 2007, y en la figura 28 se observa el comportamiento del indicador en cada cuadrante. En la tabla 13 se consolidaron los resultados extraídos a partir del análisis de cada cuadrante.

De acuerdo con lo observado en el diagrama de la figura 27, en el cuadrante I (ver figura 28) sobresalieron 90 unidades espaciales con resultados altos para ambos sistemas en los años analizados, las mismas concentradas en el norte y oeste de la ciudad, y algunas hacia el suroeste y suroriente, indicando que los usuarios de ambos medios de transporte, ubicados en estas zonas, tardan menos tiempo en acceder al servicio. Mientras que, en el cuadrante III resaltaron 35,37% de los barrios de Cali, distribuidos hacia el centro, sur, suroeste y oriente de la ciudad, indicando que los ciudadanos ubicados en estos sectores tardaban más tiempo en trasladarse para poder acceder al servicio de transporte de ambos sistemas.

Por otro lado, en el cuadrante II se muestran las 62 unidades espaciales que contaban con valores altos del indicador para el TPCU en el año 2007 pero que para el SITM-MIO en el año 2019 tuvieron una reducción, tal es el caso de algunos de los barrios ubicados en el centro de la ciudad, norte, sur y oriente, en los que los tiempos de recorrido de los ciudadanos era mayor. Finalmente, en el cuadrante IV sobresalieron 40 unidades espaciales, en las cuales el indicador fue desfavorable para el TPCU en el año 2007, pero tuvo una mejora con el SITM-MIO en el año 2019, en barrios ubicados al oeste, sur y centro de Cali.

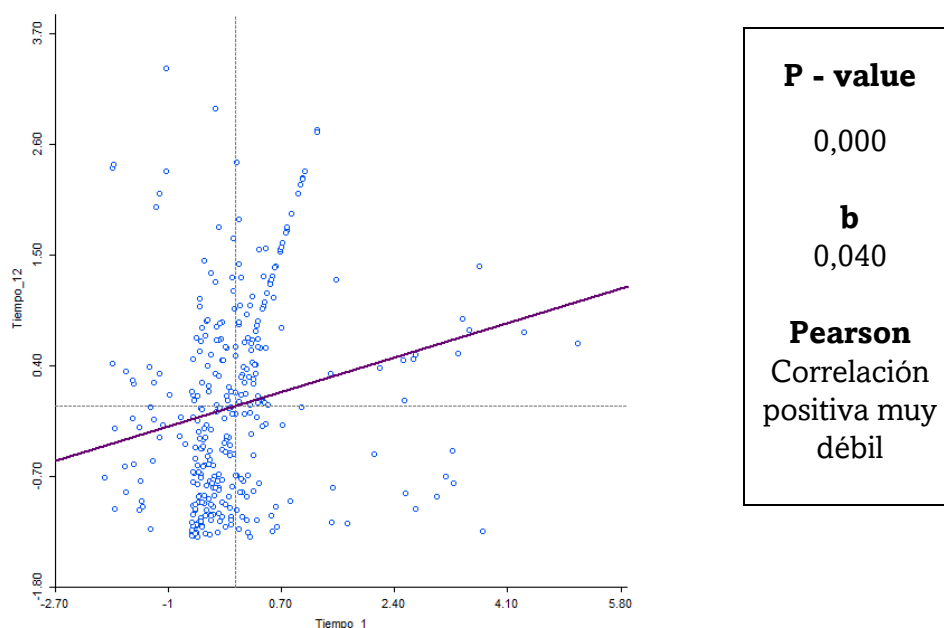


Figura 27, Diagrama de dispersión del indicador absoluto de tiempo global del TPCU (2007) versus SITM-MIO (2019).

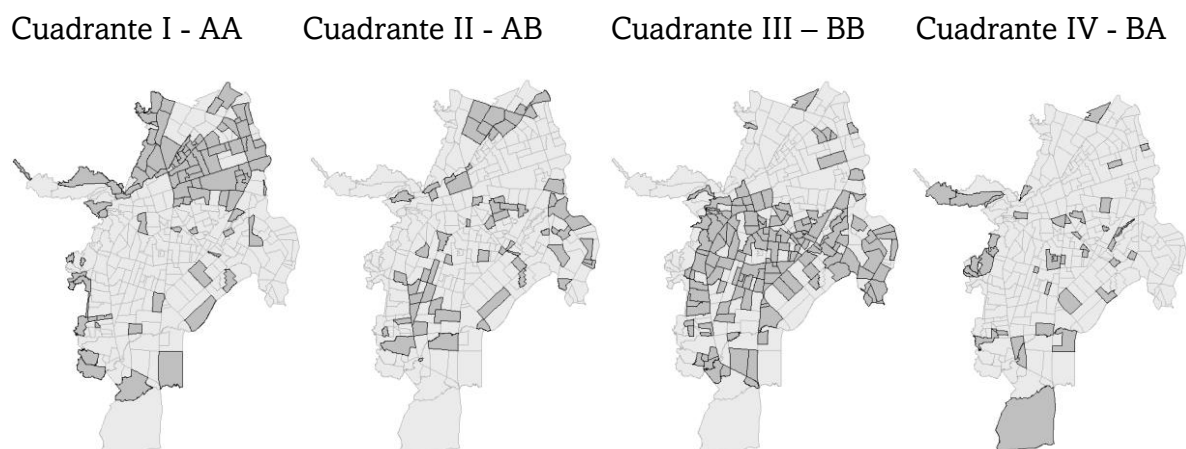


Figura 28, Representación espacial de los cuadrantes del diagrama de dispersión del indicador absoluto de tiempo global (TPCU 2007 versus SITM-MIO 2019).

Cuadrante I - AA	Cuadrante II - AB	Cuadrante III - BB	Cuadrante IV - BA
Número de barrios			
94	62	143	36
Área (Km2)			
35,40	21,20	42,80	21,60
Porcentaje de área respecto a toda la ciudad			
29,26%	17,52%	35,37%	17,85%

Tabla 13, Representación numérica de los cuadrantes del diagrama de dispersión del indicador de densidad ponderada (TPCU 2007 versus SITM-MIO 2019).

5.4.2.4 Índice de accesibilidad de Hansen

En la figura 29 se muestra el diagrama de dispersión del indicador de accesibilidad de Hansen del SITM-MIO en el 2019 versus el indicador de accesibilidad de Hansen del TPCU en el 2007, y en la figura 30 se observa el comportamiento del indicador en cada cuadrante. En la tabla 14 se consolidaron los resultados extraídos a partir del análisis de cada cuadrante.

De acuerdo con lo observado en el diagrama de dispersión de la figura 29, en el cuadrante I (ver figura 30) se resaltan las unidades espaciales que en el 2007 se caracterizaban por tener un comportamiento mayoritariamente residencial, donde la estructura que tenía el sistema TPCU en ese momento era adecuada para mostrar que como variable de atracción o de peso, que es la población, estas zonas contaban con una estructura de sistema de transporte acorde a la población. Ahora, viendo la evolución al año 2019, la variable cambió, en este caso al ser población, se entiende que hubo un crecimiento poblacional, y que, la estructura del nuevo sistema MIO, es acorde a que esta variable de peso, es decir la población, tenga una accesibilidad adecuada a estas zonas. En el cuadrante II de acuerdo con las zonas señaladas, se infiere que, como se ha venido comprobando, las zonas centrales de Cali están más encaminadas en un uso del suelo mayoritariamente comercial y de servicios, lo que ocasionó que la variable de peso, población, haya disminuido, lo que se traduce en el 2019 como zonas donde la accesibilidad desmejoró respecto al 2007, época en la que había mayor concentración de población que en el 2019. En el cuadrante III se marcaron 204 unidades espaciales donde la concentración de población era baja en el 2007 y en el 2019, indicando que, si bien el nivel de accesibilidad al TPCU era débil, continuó mostrándose la misma tendencia en el acceso al SITM-MIO en el 2019.

Finalmente, en el cuadrante IV se evidencia cómo ha sido el desarrollo de la ciudad en los últimos años, mejorando la variable de peso para el año 2019 debido a que en estas zonas es donde la ciudad ha venido expandiéndose según las disposiciones del área en desarrollo, impulsando en su mayoría el uso del suelo residencial por encima del

comercial, laboral, ocio y servicios, lo cual, para la variable de peso del indicador, se considera una mejora.

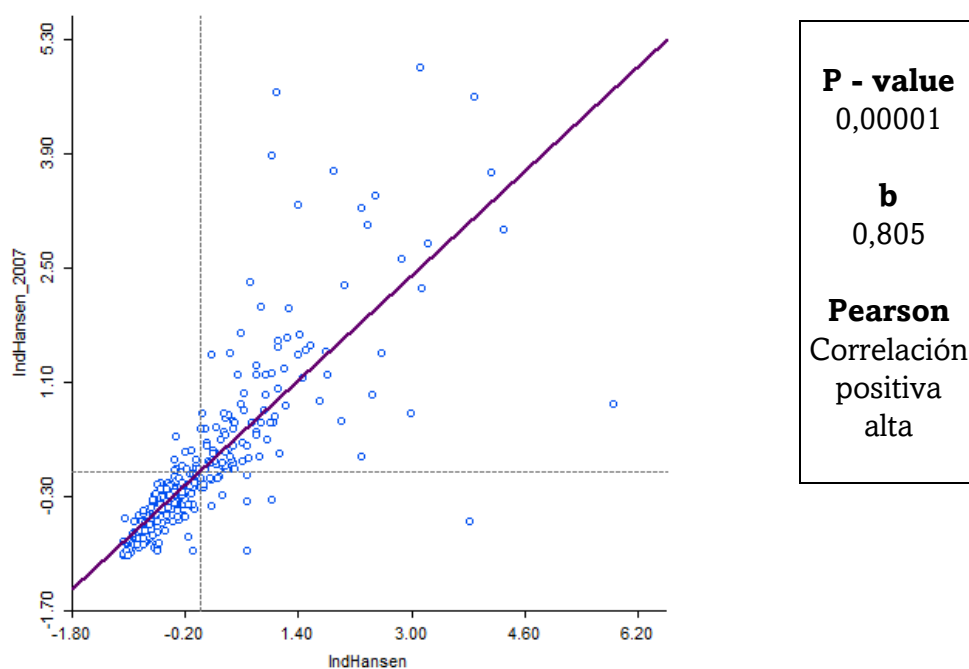


Figura 29, Diagrama de dispersión del indicador de Hansen del TPCU (2007) versus SITM-MIO (2019).

Cuadrante I - AA

Cuadrante II - AB

Cuadrante III – BB

Cuadrante IV - BA



Figura 30, Representación espacial de los cuadrantes del diagrama de dispersión del indicador de Hansen (TPCU 2007 versus SITM-MIO 2019).

Cuadrante I - AA	Cuadrante II - AB	Cuadrante III - BB	Cuadrante IV - BA
Número de barrios			
101	14	204	16
Área (Km2)			
51,30	5,62	47,98	16,10
Porcentaje de área respecto a toda la ciudad			
42,40%	4,64%	39,65%	13,31%

Tabla 14, Representación numérica de los cuadrantes del diagrama de dispersión del indicador de Hansen (TPCU 2007 versus SITM-MIO 2019).

5.4.2.5 Índice relativo de provisión de transporte público R-IPTP

En la figura 31 se muestra el diagrama de dispersión del R-IPTP del SITM-MIO en el 2019 versus el R-IPTP del TPCU en el 2007, y en la figura 32 se observa el comportamiento del indicador en cada cuadrante. En la tabla 15 se consolidaron los resultados extraídos a partir del análisis de cada cuadrante.

En la figura 31 se observa el comportamiento de los datos en el diagrama de dispersión, donde el R-IPTP para el TPCU en el 2007 y para el SITM-MIO en el 2019 era alto de acuerdo con lo mostrado en el cuadrante I (ver figura 32), donde en 19 barrios, distribuidos en el centro de Cali, se presentaron valores altos del indicador para cada sistema en cada año analizado, infiriendo que si bien ya se mantenía una alta provisión del servicio del TPCU en el 2007 para estas unidades espaciales, la tendencia continuó con el servicio del SITM-MIO en el 2019. Sin embargo, en el cuadrante III se resaltaron 236 barrios de la ciudad, es decir que el 80,95% de las zonas analizadas presentaron valores bajos del indicador para el TPCU en el 2007 y para el SITM-MIO en el 2019, sobresaliendo todos los barrios de Cali, a excepción de los ubicados en el centro. Por otro lado, en el cuadrante II se observa un contraste, en el que 45 unidades espaciales pasaron de tener valores altos del indicador con el TPCU en el 2007, a mostrar una reducción con el SITM-MIO en el 2019, resaltando aquellas zonas donde la provisión del transporte del SITM-MIO es baja. Sin embargo, de acuerdo con lo mostrado en el cuadrante IV, 35 de las 335 unidades espaciales presentaron un incremento en el indicador para el SITM en el año 2019, destacándose los barrios ubicados, en su mayoría, sobre el corredor de la calle 5 entre carrera 100 y carrera 1, corredor en el que se encuentran situadas varias estaciones del sistema, haciendo que la provisión del transporte mejorara para estos barrios.

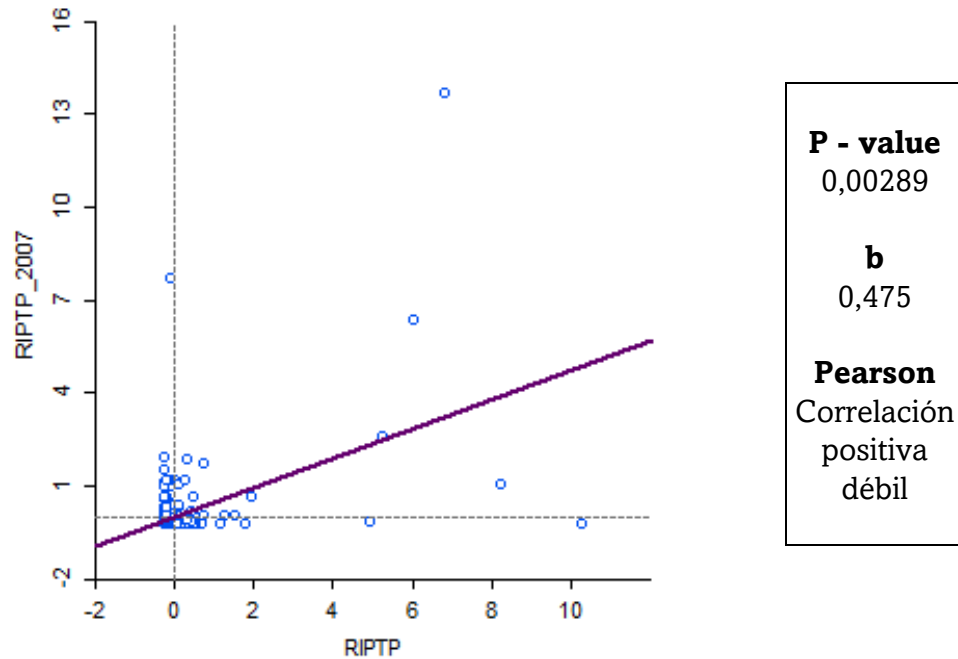


Figura 31, Diagrama de dispersión del R-IPTP del TPCU (2007) versus SITM-MIO (2019).

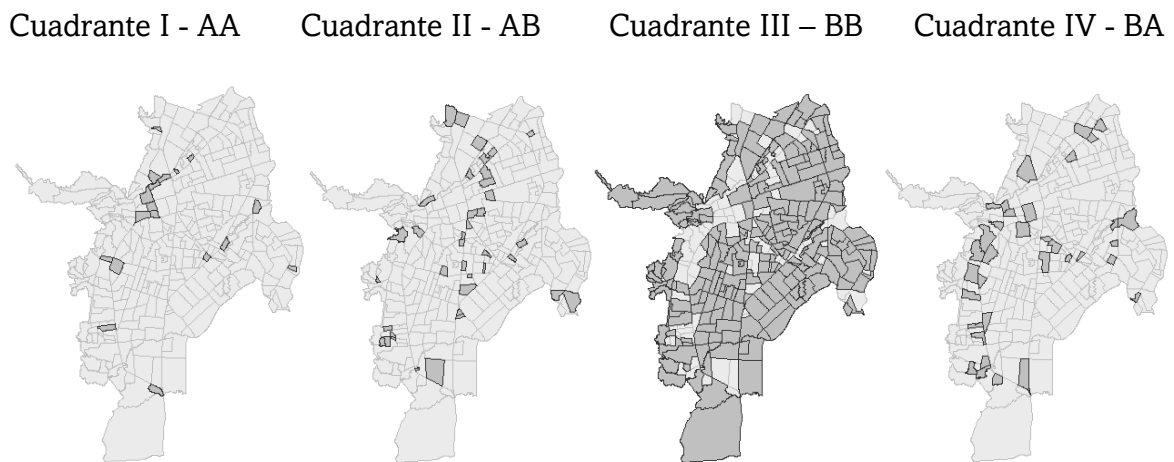


Figura 32, Representación espacial de los cuadrantes del diagrama de dispersión del R-IPTP (TPCU 2007 versus SITM-MIO 2019).

Cuadrante I - AA	Cuadrante II - AB	Cuadrante III - BB	Cuadrante IV - BA
Número de barrios			
19	45	236	35
Área (Km2)			
3,25	8,70	97,23	11,82
Porcentaje de área respecto a toda la ciudad			
2,69%	7,19%	80,36%	9,77%

Tabla 15, Representación numérica de los cuadrantes del diagrama de dispersión del R-IPTP (TPCU 2007 versus SITM-MIO 2019).

6. Discusiones de los resultados

Con los resultados obtenidos al calcular los indicadores de accesibilidad seleccionados en este proyecto se muestra que las zonas centrales de la ciudad presentan una sobredotación de infraestructura de transporte público, con gran mayoría servicios de transporte público de gran cantidad y calidad, a comparación de las zonas más aisladas y alejadas del centro de la ciudad, donde predominan los estratos económicos más bajos, altos niveles de analfabetismo y desempleo que reflejan que son zonas sin acceso a vehículos motorizados o privados, en este sentido se puede concluir que se presenta una disparidad relativa en la ciudad respecto a la provisión del transporte público.

Con este estudio se demuestra que los aspectos socioeconómicos tienen predominancia en la justificación de las necesidades del transporte público, lo que puede permitirnos asegurar que el creciente aumento de propiedad de vehículos motorizados y privados no soluciona la problemática de la provisión del transporte público sino estrategias que mejoren la situación en las zonas donde los cálculos de los índices presentan valores bajos, implantando nuevas rutas o líneas de transporte público, mejorando la accesibilidad para discapacitados, mejora de tarifas, tarifas preferenciales que fomenten el uso del sistema, y mejorar variables socioeconómicas como el empleo y la desigualdad social.

Con el funcionamiento del SITM-MIO, un sistema de transporte masivo tipo BRT, si bien la ciudad lentamente entró en un proceso de modernización estructural en cuanto al sistema de transporte público, es evidente a partir de los resultados que la ciudad no es completamente operativa, lo que genera efectos como transporte informal, aumento del parque automotor privado y constantes malestares entre la población sobre la prestación del servicio, lo que claramente es una evidencia que la planificación del sistema no fue del todo correcta, por lo que se recomienda comenzar a coordinar políticas del transporte público junto con políticas sociales para lograr la reducción de las necesidades de movilidad motorizada o informal, y mejora del servicio de transporte.

7. Conclusiones y recomendaciones

Para ciudades con dinámicas de transporte público tan cambiantes y polémicas en los últimos años como ha sido Santiago de Cali, este tipo de investigaciones y trabajos se consideran herramientas útiles para la toma de decisiones debido a que establece conexiones entre variables socioeconómicas, la infraestructura de cada sistema de transporte, características de vehículos con las zonas donde estos sistemas tienen fortalezas y debilidades sobre el territorio, lo que se considera determinante en futuras acciones que faciliten implementaciones de estrategias que mejoren la prestación y cobertura del servicio.

Para el desarrollo del proyecto fue fundamental contar con la misma información sobre el TPCU y sobre el SITM-MIO, por lo que se tuvo que realizar una búsqueda de datos con diferentes entidades y contactos directos. Para el SITM-MIO esta búsqueda se hizo más sencilla debido a que actualmente existen más canales digitales donde se tiene acceso a las bases de datos sobre el sistema: rutas, paradas, frecuencias, tiempos, entre otros datos relevantes mientras que, para realizar el mismo ejercicio con el TPCU se tuvieron que consultar varias lecturas, solicitar y corregir la información vectorial sobre las rutas del sistema, crear las paradas también en formato vectorial, haciendo uso de las herramientas del software ArcGIS, entre otros procesamientos, con el propósito de poder contar con la misma información para ambos sistemas y así poder analizarlos y compararlos bajo las mismas condiciones.

Teniendo en cuenta lo anterior, en base a la información recopilada, se pudieron seleccionar los años que serían analizados: 2007 para el TPCU y 2019 para el SITM-MIO y escoger los cinco (5) indicadores de accesibilidad calculados. Debido a que la unidad espacial de análisis fue a nivel de barrio, se pudo visualizar cómo se comportaba cada indicador, en el año y sistema de transporte correspondiente, en cada barrio de la ciudad, haciendo que se pudiera calificar de manera más precisa la prestación del servicio en cada unidad espacial.

Aunque, si bien se calcularon cinco (5) indicadores de accesibilidad, hubiese sido ideal haber calculado el indicador de accesibilidad de Hansen teniendo en cuenta una variable de atracción como empleo o estudio (motivos de viaje de los ciudadanos), para analizar el comportamiento de cada sistema de transporte en el año correspondiente sin embargo, solo se pudo acceder a esta información para el SITM-MIO en el año 2019, debido a la constante actualización de estos datos, mientras que a causa de la antigüedad del sistema TPCU, no fue posible contar con información de los motivos de viaje de los usuarios en el año 2007, razón por la que se optó por utilizar la variable de población por barrio para el cálculo de este índice.

Por otro lado, se resalta la importancia de los softwares SIG en la realización de este tipo de proyectos, permitiendo realizar análisis de redes, áreas de servicio y

herramientas de análisis espacial que permite organizar de manera espacial toda la información calculada, lo que convierte a estas herramientas en un insumo indispensable en la planeación y control de este tipo de sistemas.

Como recomendación, para estudios posteriores con los que se pretenda profundizar en el tema, se sugiere abordar indicadores en los que se pueda tener en cuenta aspectos más detallados sobre la percepción que tienen los usuarios sobre el transporte público, como la calidad del servicio, las diferencias que encuentran entre el servicio que les ofrecía el TPCU y que les ofrece el SITM-MIO, y los tiempos de espera, con el propósito de que se puedan generar resultados más detallados, confiables y ajustados a la verdadera dinámica de la población, para así generar más insumos que sirvan como herramientas de decisión a las entidades de planificación encargadas.

Respecto a las limitaciones, la de por sí complicada recopilación de información se agrava por el hecho de que el sistema TPCU, tenía al año 2007 controles divididos entre privados ejerciendo un servicio público, lo que con la desaparición de estas empresas deriva en que la información se reduce aún más.

Finalmente, como recomendación final, este análisis se recomienda hacer en sistemas cuya estructura sea similar, en este caso, los tiempos de trasbordo del SITM-MIO, no se pudieron tener en cuenta en ningún índice, además de los datos de frecuencias del TPCU que más que ser calculados en base a aforos, se obtuvo de estudios cuyas condiciones de levantamiento no fueron esclarecidas.

8. Fuentes y bibliografía

- Alcaldía De Santiago de Cali. (2010). *Encuesta de Percepción Cali Cómo Vamos 2010 Cali*.
- Alcaldía De Santiago de Cali. (2016). *Cali Cómo Vamos? - 2016*.
- Anselin, L. (1995). Local Indicators of Spatial Association-LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93-115.
- Astudillo, C.A., Jaramillo, C., & Murillo-Hoyos, J. (2021). Accesibilidad y equidad espacial al transporte público para pacientes con enfermedad neurodegenerativa en Santiago de Cali, Colombia. *Investigaciones Geográficas*, (76), 179-193. <https://doi.org/10.14198/INGEO.17589>
- Bravo, B., & Hurtado, A. (2016). *ANÁLISIS DEL IMPACTO EN LA ACCESIBILIDAD DE NUEVOS PROYECTOS DEL SISTEMA INTEGRADO DE TRANSPORTE MASIVO EN SANTIAGO DE CALI*. Universidad Javeriana.
- Buzai, G. D., & Baxendale, C. A. (2006). Análisis exploratorio interactivo de datos espaciales mediante diagramas de dispersión - 2D y 3D. In *Análisis socioespecial con Sistemas de Información Geográfica* (1era edici, pp. 247–261).
- Cahill, E., & Casas, I. (2012). Evaluating the spatial equity of bus rapid transit-based accessibility patterns in a developing country: The case of Cali , Colombia. *Transport Policy*, 20, 36–46. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.12.001>
- Cal y Mayor, R. (1994). Ingeniería de tránsito: Fundamentos y aplicaciones. In *Ingeniería de Tránsito* (pp. 29–37).
- Cali en Cifras. (2000). Cali en cifras. *Cali: Departamento Administrativo de Planeación*, 1–206. file:///C:/Users/usuario/Downloads/Cali en cifras 2018-2019.pdf
- Campos, A. P. (2016). Valoración Y Representación Cartográfica De La Accesibilidad Viaria En La España Peninsular: 1960-2014. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, 18(January). <https://doi.org/10.21138/gf.486>
- Cruz-Muñoz, F. (2018). La Movilidad Urbana: Dimensiones Y Desafíos. *EURE (Santiago)*, 44(133), 277–281. <https://doi.org/10.4067/s0250-71612018000300277>
- Dallal, G. E. (2005). *The Little Handbook of Statistical Practice*.
- Departamento Administrativo de Planeación Municipal. (2019). Cali en Cifras 2018-2019. *Cali En Cifras 2018 - 2019*, 22.
- DUNCAN, R. P. (1991). Competition and the Coexistence of Species in a Mixed Podocarp stand. *Journal of Ecology*, 79(4), 1073-1084.
- Encuesta de Percepción Ciudadana. (2019). *Percepción Ciudadana*.

Escobar García, D. y García Orozco, F. (2012). Impacto regional: caso de aplicación de análisis de accesibilidad territorial. *Épsilon*, n. 18, p. 71-86, junio 2012. ISSN 1692-1259. Consultado el 29 de mayo de 2017. Disponible en: <https://revistas.lasalle.edu.co/index.php/ep/article/view/2204>

ESRI. (2002). *¿Qué es ArcGIS?*

Gomez, E., Cardozo, D., Parras M.A., México, V. D. E., México, V. De, Transporte, R., & Metropolitana, Z. (2009). *Revista Transporte y Territorio ISSN 1852-7175 Programa Transporte y Territorio Instituto de Geografía Facultad de Filosofía y Letras Universidad de Buenos Aires*. 112–143.

GRAHAM, D. J., & Glaister, S. (2003). Spatial Variation in Road Pedestrian Casualties: The Role of Urban Scale, Density and Land-use Mix. *Urban Studies*, 40(8) , 1591-1607.

Getis, A., & Ord, J. K. (1992). *The Analysis of Spatial Association*. 24(3).

Geurs, K. T., & van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: Review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12(2), 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005>

Halden, D. (2002). Using accessibility measures to integrate land use and transport policy in Edinburgh and the Lothians. *Transport Policy*, 9(4), 313–324. [https://doi.org/10.1016/S0967-070X\(02\)00017-3](https://doi.org/10.1016/S0967-070X(02)00017-3)

Hansen, W. G. (1959). *ACCESIBILITY AND RESIDENTIAL GROWTH*.

MÉTODOS DE ANÁLISIS DE DATOS (6th ed.). Universidad de la Rioja, Servicio de publicaciones. https://www.unirioja.es/cu/zehernan/docencia/MAD_710/Lib489791.pdf

Jaramillo Botero, A. (2015). Movilidad en caldas. *Anales de Ingeniería*, 934, 30.

Jaramillo, C., Lizárraga, C., & Grindlay, A. L. (2012). Spatial disparity in transport social needs and public transport provision in Santiago de Cali (Colombia). *Journal of Transport Geography*, 24, 340–357. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.04.014>

López-Escolano, C., Pueyo Campos, Á., Postigo Vidal, R., & Alonso Logroño, M. P. (2013). VALORACIÓN Y REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA DE LA ACCESIBILIDAD VIARIA EN LA ESPAÑA PENINSULAR: 1960-2014. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.

Reglamentación de servicio público de transporte terrestre automotor colectivo metropolitano, 31 (2001).

Rimbert, S. 1991. La cartografía, imagen de la superficie terrestre. En: Imagen didáctica, eds. Costa, J. Moles, A. 183-201. Barcelona: CEAC

Ruiz, M. 1995. Sistemas de información geográfica y análisis espacial. En: Prácticas de

- análisis espacial, eds. Gamir, A. et al. 249-384. Barcelona: Oikos-Tau.
- Muñoz, F. (2006). El tiempo del territorio, los territorios del tiempo. *Nogué y Romero EDS*, 1, 107–121.
- Ordoñez Castillo, C. C. (2018). *“SISTEMA DE INDICADORES ACERCA DE LA COBERTURA Y ACCESIBILIDAD DEL TRANSPORTE PÚBLICO URBANO EN EL MUNICIPIO DE FACATATIVÁ.”* Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Ordosgoitia, I. S., Muñoz Ríos, J. D., & Ángel Soto, C. A. (2000). Análisis de la Accesibilidad Vial en la Región del Occidente Colombiano. *IV Congreso de Ingeniería Del Transporte, June 2000*.
- Rodrigue, J. P., Comtois, C., & Slack, B. (2016). The geography of transport systems. In *The Geography of Transport Systems* (Issue January). <https://doi.org/10.4324/9781315618159>
- Rodríguez Licea, G., & García, A. (2016). *Identificación de conglomerados para impulsar las cadenas productivas de carne en México. June.* <https://doi.org/10.15517/am.v27i2.24388>
- Sicilia, D. C., Bernardo, G., Rivera, P., & Navarro, G. (2017). *Métodos gráficos de análisis exploratorio de datos espaciales con variables espacialmente distribuidas.*
- Tobón A, A., & Galvis G, D. (2009). Análisis sobre la evolución reciente del sector de transporte en Colombia. *Perfil De Coyuntura Económica*, (13), 147–163. Recuperado a partir de <https://revistas.udea.edu.co/index.php/coyuntura/article/view/3302>

9. Lista de anexos

Anexo 1: Información organizada de las variables territoriales para cada barrio de la ciudad de Cali, teniendo en cuenta el comportamiento del sistema de transporte analizado en cada unidad espacial en su respectivo año.

Anexo 2: Base de datos geográfica en formato GDB en la que se encuentra consolidada toda la información espacial empleada en este trabajo.

Anexo 3: Se adjunta carpeta con las salidas gráficas ruta por ruta de los dos sistemas de transporte a través del tiempo, así como mapa de Cali con las vías representativas.

Anexo 4: Hojas de cálculo con los índices calculados para ambos sistemas.

Enlace de carpeta con los anexos enumerados:

<https://drive.google.com/drive/folders/1E9oUSpDCinQZfKJewyTtAxIudPNPvpOB?usp=sharing>