



Grupo de Investigación en Innovación y Gestión de Cadenas de Abastecimiento - INCAS
Departamento de Ingeniería Industrial - Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia

Trabajo de investigación
Para optar al título de Magíster en Ingeniería
Línea Ingeniería Industrial

Presentado por:
ALMA KARINA RODRIGUEZ QUINTERO

Asesores:
GLORIA MILENA OSORNO OSORIO
PABLO ANDRÉS MAYA DUQUE

Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Antioquia
Marzo 2016



Mis agradecimientos...

A Dios por permitirme alcanzar este nuevo logro en mi vida.

A mi esposo, a quien amo profundamente. Por su apoyo y paciencia durante este proceso. Mi fuente de inspiración.

A mis padres José Rodríguez y Alma Rodríguez, a mis hermanos Maurelis, José y Gerson Rodríguez. Su paciencia y dedicación me han acompañado cada instante. Su apoyo incondicional ha impulsado mi vida.

A los profesores Pablo Maya y Gloria Osorno quienes me acogieron y brindaron su conocimiento y apoyo durante estos años. Por sus valiosos aportes para el desarrollo de este informe. Igualmente, les agradezco al grupo de Investigación INCAS y a los profesores del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de Antioquia por su apoyo en el desarrollo de este proyecto.

Finalmente, le agradezco a Coomeva Emergencias Médicas quienes colaboraron y participaron en el desarrollo de esta investigación.



MODELO DE SIMULACIÓN PARA ANALIZAR EL PROBLEMA DE RELOCALIZACIÓN DE LAS AMBULANCIAS DE UN SERVICIO DE EMERGENCIA MÉDICO (SEM).

Los Servicios de Emergencias Médicas-SEM son sistemas responsables de la estabilización y transporte pre-hospitalario de pacientes con urgencia y emergencia médicas. Por esta razón generalmente la diferencia entre la vida y la muerte de los pacientes ante la ocurrencia de un evento se ve afectada por la capacidad de un SEM de responder adecuadamente cuando se le solicita un servicio. Para lograr esto un SEM debe ubicar sus vehículos de tal manera que se garantice un óptimo desempeño. Sin embargo, esta es una decisión que no es fácil tomar. Los acelerados cambios de los entornos, variaciones de la demanda dependiendo del día de la semana o época del año y adicionalmente, en algunos casos, restricciones operacionales debido a la disponibilidad de los recursos hacen que los SEM tengan la necesidad de cambiar constantemente la ubicación de sus vehículos. Esto se conoce en la literatura como problemas de relocalización de vehículos. Teniendo en cuenta lo anterior, en el presente trabajo se desarrolló un modelo de simulación de eventos discretos que permite evaluar políticas de relocalización de un SEM. Para esto se utilizó como sistema de referencia el servicio de Coomeva Emergencia Médica. El cual es un servicio de atención médica a domicilio y atención de urgencias y emergencia las 24 horas del día. Se encontró que aunque en algunos casos es posible que debido a la política actual del SEM de estudio, de ubicar los vehículos en los barrios donde se prestó el último servicio, se presenten mayores tiempos de respuesta, cuando analizamos todo los servicios se observa que con esta política se generan menores porcentajes de cancelaciones y de tiempos de espera. Además, la política actual permite una mayor disponibilidad de los vehículos para atender las solicitudes de los pacientes, debido a que están disponibles inmediatamente después de terminar un servicio. A diferencia de esto, cuando los vehículos deben desplazarse a una base después de finalizar un servicio, se presenta un aumento significativo en los tiempos de viaje, lo cual afecta la disponibilidad de los vehículos y aumenta los porcentajes de cancelaciones y los tiempos de espera de los pacientes.

Palabras claves: Servicios de Emergencia Médicas, relocalización, optimización, simulación.



TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	6
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA	7
2.1. Descripción básica de las actividades que se realizan en un SEM.....	7
2.2. Clasificación de los problemas de relocalización.....	9
2.3. Políticas de relocalización.....	9
2.4. Componentes para el diseño de los modelos.....	11
2.5. Métodos de solución utilizados para abordar problemas de relocalización de los vehículos de un SEM.....	11
2.6. Medidas de desempeño utilizadas para analizar problemas de relocalización en un SEM....	14
2.7. Conclusiones de la revisión de la literatura.....	15
3. METODOLOGÍA	16
4. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE ATENCIÓN DEL SEM.....	16
4.1. Análisis descriptivo de la información del SEM de estudio.....	18
4.2. Recepción de la llamada.....	18
4.2.1. Información del paciente.....	18
4.2.2. Información del evento.....	19
4.3. Asignación y despacho de vehículo	24
4.4. Atención y traslado al hospital	26
4.5. Conclusiones del análisis descriptivo de la información.....	27
5. MODELO DE SIMULACIÓN	28
5.1. Definición de los elementos del modelo.	30
5.2. Supuestos del modelo.....	31
5.3. Modelo de simulación	31
5.3.1. Recepción de la llamada y caracterización del evento.	31
5.3.2. Asignación y despacho del vehículo.	34
5.3.3. Atención y/o traslado al hospital.	36
5.4. Verificación del modelo de simulación.....	38
5.4.1. Pruebas de continuidad o condiciones iniciales	38



Grupo de Investigación en Innovación y Gestión de Cadenas de Abastecimiento - INCAS
Departamento de Ingeniería Industrial - Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia

5.4.2.	Pruebas de degeneración o condiciones extremas.....	40
5.4.3.	Trazado.....	40
5.5.	Validación del modelo de simulación.....	41
5.5.1.	Validación con personal de Coomeva Emergencias Médicas.....	41
5.5.2.	Test de Turing.....	42
5.5.3.	Validación paso a paso.....	42
5.5.4.	Validación con datos históricos.....	43
5.6.	Conclusiones de la construcción, validación y verificación del modelo de simulación.....	43
6.	POLÍTICAS DE RELOCALIZACIÓN.....	44
6.1.	Descripción de las políticas simuladas.....	44
6.2.	Análisis de las políticas de relocalización.....	46
6.2.1.	Porcentajes de cancelaciones.....	46
6.2.2.	Tiempos de servicio.....	48
7.	CONCLUSIONES.....	53
7.1.	Conclusiones de la construcción, validación y verificación del modelo de simulación.....	53
7.2.	Conclusiones de los resultados de la implementación de las políticas de relocalización.....	53
7.3.	Mejora en la calidad información.....	54
7.4.	Recomendaciones en el proceso de atención.....	55
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	56
9.	ANEXOS.....	60



1. INTRODUCCIÓN

Los Servicios de Emergencias Médicas-SEM son sistemas responsables de la estabilización y transporte pre-hospitalario de pacientes con urgencia y emergencia médicas. Por esta razón generalmente la diferencia entre la vida y la muerte de los usuarios ante la ocurrencia de un evento se ve afectada por la capacidad de un Servicios de Emergencias Médicas de responder adecuadamente cuando se le solicita un servicio.

Se han identificado que existen muchas variables en la operación de los Servicios de Emergencias Médicas que afectan la capacidad del servicio y por lo tanto, el tiempo de respuesta para responder a un evento, algunas de ellas por ejemplo son las ubicaciones de las bases, cantidad de recursos (vehículos y personal) y programación de turno [1]–[8]. Así mismo, las decisiones a nivel estratégico (largo plazo) y operativo (corto plazo), las cuales son tomadas por los administradores y funcionarios, respectivamente, también afectan el tiempo de respuesta. Una de las decisiones más complejas son las relacionadas con la localización y relocalización de los vehículos que prestan los servicios de atención médica.

La localización consiste en la ubicación de un vehículo en un punto fijo, de tal manera que se encargue de una zona de atención, y al cual debe volver al finalizar la prestación de un servicio. La relocalización, por otro lado, se da cuando se cambia la ubicación asignada a un vehículo con el propósito de mejorar en tiempo real la cobertura del Servicio de Emergencias Médicas. Mientras que los problemas de localización suelen ser resueltos a nivel estratégico, los problemas de relocalización son principalmente de nivel operativo y deben ser resueltos en un corto periodo de tiempo. Esto último hace que generalmente los problemas de relocalización sean más complejos que los de localización [9]–[11].

El proceso relocalización de los vehículos de los Servicios de Emergencias Médicas generalmente se realiza en forma manual, es decir, el despachador de acuerdo a su experiencia informa a las ambulancias cual debe ser su nueva ubicación [12]. Sin embargo, al revisar la literatura se encuentra que aspectos como los cambios de turno que son frecuentes en la mayoría de los Servicios de Emergencias Médicas a nivel mundial, el agotamiento y reducción de la habilidad mental que se puede presentar en días de alta demanda y los acelerados cambios de los entornos hacen necesario que los encargados de tomar estas decisiones se apoyen en metodologías que les permitan obtener óptimas soluciones para los problemas de relocalización.

Para analizar los problemas de relocalización, los investigadores utilizan modelos matemáticos de optimización [13], de simulación [14] y metaheurísticas. Entre los modelos de simulación existentes se encuentran la simulación de eventos discretos, la simulación basada en agentes y la dinámica de sistemas. El considerar cuál de los esquemas utilizar, depende del nivel de abstracción que se quiera tener del sistema [15]. En el presente trabajo de investigación se utilizó simulación de eventos discretos, ya que esta se emplea cuando se requiere un nivel medio o bajo de abstracción del sistema, es decir, cuando se quiere estudiar el sistema desde un nivel operativo o táctico [15]. Tal es el caso de los problemas de relocalización.

Con base en lo anterior, en la segunda sección del presente documento se presenta la revisión de la literatura de los estudios realizados sobre los problemas de relocalización de los vehículos de los SEM, tercera sección se presenta la metodología que permitió abordar el problema de investigación, en la cuarta sección se realiza una caracterización del proceso de atención del SEM seleccionado para el estudio y un análisis descriptivo y estadístico de la información sobre la prestación del servicio que tiene disponible dicho SEM, en la quinta sección se presenta el modelo de simulación de eventos discretos, su desarrollo, verificación y validación, en la sexta sección se presentan las políticas de relocalización y



localización que fueron modeladas y los resultados de los diferentes políticas y finalmente, en la séptima sección se presentan las recomendaciones y conclusiones.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se realizó por la autora, una revisión de la literatura de los estudios realizados sobre los problemas de relocalización de los vehículos de los SEM en los últimos 15 años, este artículo fue previamente publicado y puede consultarse en [16]. A continuación se describirá un resumen de dicha revisión.

2.1. Descripción básica de las actividades que se realizan en un SEM

En el proceso de la atención de una emergencia [17], [18] se realizan un grupo de actividades que generalmente inician con la recepción de una llamada y la solicitud de la información necesaria para identificar la necesidad de enviar un vehículo al lugar del evento. Posterior a esto, de ser necesario el envío del recurso (vehículo) se evalúa la disponibilidad y se despacha el vehículo. En esta última actividad, hay algunos criterios posibles para la decisión, por ejemplo, la elección de la ambulancia disponible más cercana o una “respuesta regionalizada”, la cual consiste en la asignación de un área de servicio específica para cada recurso.

Cuando el vehículo llega al sitio del evento la tripulación realiza la atención pre-hospitalaria; luego, de ser necesario, se asigna y desplaza al paciente hacia el centro de atención de salud que cuente con los recursos disponibles para su tratamiento y sea el más cercano al lugar del evento. Al llegar al centro de salud la tripulación hace entrega del paciente y de la documentación que le sea requerida. Una vez se finaliza esta actividad el vehículo vuelve a estar disponible para responder a un nuevo evento. Cuando la tripulación finaliza la prestación del servicio, el despachador les informa la próxima localización de la ambulancia en una base o lugar de espera para que esta pueda responder en el menor tiempo posible a la solicitud de un nuevo servicio.

En la **Figura 1** se muestra una representación las actividades anteriormente mencionadas.

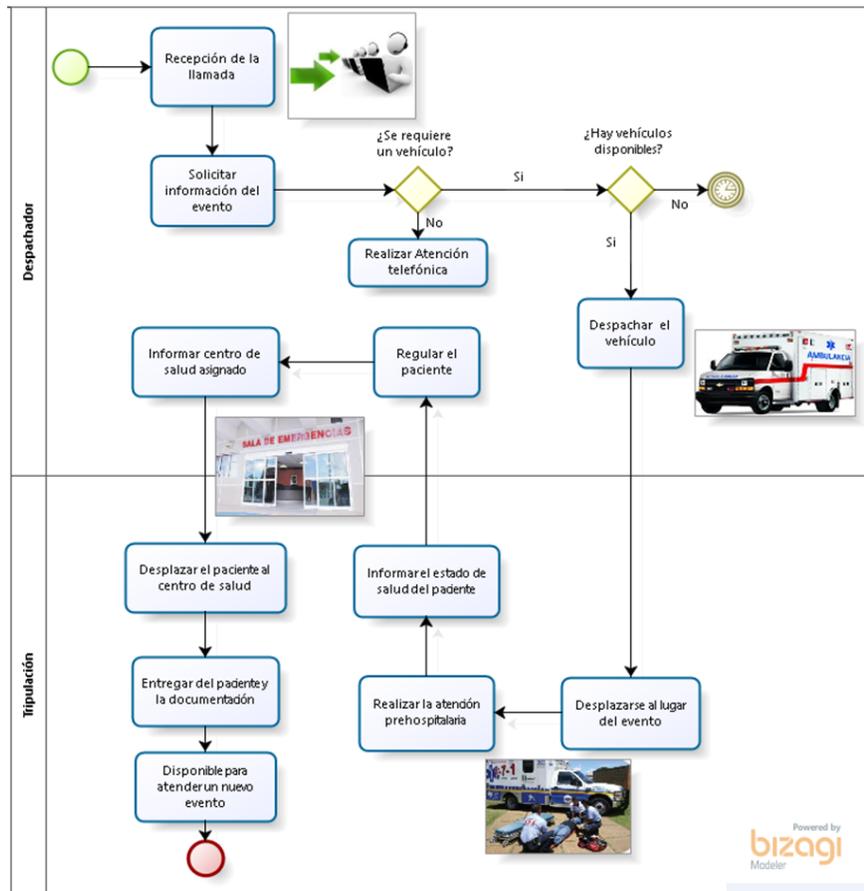


Figura 1: Proceso de solicitud de un servicio a un Servicio de Emergencias Médicas.

De la **Figura 1**, independiente del SEM que se analice las actividades se clasifican en dos grandes grupos: *actividades centrales* y *actividades externas*. [19], [20]. En primer lugar se encuentran las *actividades centrales*, las cuales tienen como objetivo realizar la recepción de la llamada y tomar las decisiones para dar una apropiada respuesta a cada evento. Estas actividades generalmente son realizadas por un operador o despachador y se realizan en una instalación fija o centro de comunicación. En segundo lugar están las *actividades externas* las cuales tienen como objetivo dar una adecuada atención pre-hospitalaria a los pacientes que solicitan los servicios del SEM y son realizadas por la tripulación de los vehículos.

En el proceso de atención representado en la **Figura 1** se pueden presentar dos condiciones que afectan el desempeño del SEM y las cuales deben ser solucionadas dentro de las actividades centrales. Estas condiciones se dan cuando se despacha un vehículo para atender un evento y cuando el vehículo vuelve a estar disponible para atender un evento. En la primera uno o varios vehículos dejan de estar disponibles porque son enviados a atender un evento. En este caso, se puede presentar que los vehículos que quedan disponibles no están ubicados en las bases apropiadas para responder a nuevas solicitudes en tiempos de respuesta que garantice el bienestar de los pacientes. En la segunda condición, uno o varios vehículos que se encontraban como no disponibles recuperan su estatus de disponibilidad porque terminaron la prestación del servicio. En este caso, si el despachador no tiene en cuenta los cambios en el servicio mientras estos vehículos no estaban disponibles, es posible enviarlos a bases que no garanticen una óptima localización para dar respuesta a nuevas solicitudes [21].



La relocalización de vehículos de los SEM es el resultado de todas aquellas decisiones y políticas que se toman y se establecen con el objetivo de que las dos situaciones descritas anteriormente no se presenten y se garantice en todo momento una óptima respuesta a nuevas solicitudes. Algunos autores hacen referencia a este tema con el nombre de problemas de relocalización [9], [22] y se estudian dividiéndolo en dos categorías las cuales se describen a continuación.

2.2. Clasificación de los problemas de relocalización

La investigación en el campo de los problemas de relocalización es reciente y hasta el momento teniendo en cuenta la forma como se aplique la política de relocalización se hace referencia a dos tipos de problemas de relocalización: dinámicos y multi-periodo [19], [23].

Los *problemas de relocalización dinámica* tienen como principal característica que solo consideran la aplicación de políticas de relocalización de las ambulancias cuando hay una disminución en la flota porque se envía uno o varios vehículos a dar respuesta a un evento y/o cuando uno o varios vehículos que se encontraban como no disponibles recuperan su estatus de disponibilidad porque terminaron la prestación del servicio [2], [12], [17], [21]–[35]. Por otro lado, en los *problemas de relocalización multi-periodo* además de aplicar políticas de relocalización cuando hay una variación en el tamaño de la flota, también se aplican políticas de relocalización teniendo en cuenta factores externos al SEM, como son: las variaciones de la velocidad en el transcurso del día, las actividades que se realizan durante el día (horario laboral vs horario de descanso), la semana (días de semana vs fines de semana), el año (días laborales vs días festivos) y el comportamiento del tráfico durante horas pico y no pico [20], [32], [36]–[39]. Aunque se ha reportado que se obtienen mejores resultados cuando se estudian los problemas de relocalización de forma multi-periodo [20], [30], la mayor parte de los estudios revisados consideran los problemas de relocalización de forma dinámica. Esto se debe a que en muchos casos no se tiene disponible información en tiempo real de los SEM.

2.3. Políticas de relocalización

Con las políticas de relocalización se busca dar respuesta a las preguntas ¿cuándo? y ¿cómo? se realiza la relocalización. En la **sección 2.1.** se identificó que existen dos momentos del proceso de atención en los que es posible considerar la reubicación de los vehículos. El primero se da cuando un vehículo es asignado para atender un evento y el segundo, cuando un vehículo ha terminado la prestación de un servicio.

Cuando un vehículo es asignado para responder un evento el número de vehículos ocupados aumenta. En este caso el despachador considera que vehículos (si los hay) deben cambiar de ubicación a otra base. Esto debido a que el vehículo despachado puede haber dejado algunas zonas críticas descubiertas. Una política que se suele utilizar es considerar la relocalización solo cuando se cumple la condición que una llamada es recibida y un vehículo es despachado. En el estudio de Gendreau et al. [25] se encuentra una aplicación de esta política. Los autores reportaron que de todas las llamadas simuladas durante un periodo de 7 horas por día, el 38% requiere por lo menos la relocalización de una ambulancia. Como resultados reportaron que todas las llamadas fueron cubiertas en 15 minutos y que el 98% de las llamadas clasificadas como urgentes fueron atendidas en menos de 7 minutos, con una media de 3.5 minutos, con lo cual se cumplía el objetivo buscado por el SEM de estudio.

Cuando la tripulación del vehículo del SEM ha finalizado un servicio el vehículo puede regresar a cualquier base abierta, no necesariamente a su base anterior. Algunos autores utilizan la política de considerar la reubicación en este punto del proceso. Dichas políticas tienen como fin mantener o mejorar la cobertura del servicio [40], [41]. Por ejemplo, Maxwell et al. [27] consideran una ambulancia como

disponible para la reubicación sólo inmediatamente después de que termine la transferencia de un paciente a un centro de salud o cuando finaliza la prestación de un servicio en la escena porque no se realiza el traslado al hospital. Adicionalmente, aplican una política de relocalización (para responder al ¿cómo?) en la que las ambulancias que están inactivas en las bases o en movimiento no se consideran para la reubicación. En otro estudio, Maxwell et al. [33] con el uso de la simulación y aplicando las mismas políticas lograron una mejora del rendimiento de aproximadamente el 4% del SEM de Edmonton. Aunque este porcentaje podría parecer pequeño, los autores mostraron que los beneficios de reposicionamiento del SEM fueron similares a los obtenidos mediante la adquisición de dos vehículos adicionales y por lo tanto representan ahorros significativos para el servicio. En este mismo estudio los autores consideraron un segundo escenario abajo una política de relocalización en también permitía la relocalización de los vehículos inactivos una mejora adicional del 3%. Un resultado similar se obtuvo en el SEM de estudio de Alanis et al. [40] en el que esta política de relocalización generó mejoras de rendimiento equivalentes a tener 8 ambulancias adicionales operando las 24 horas del día. Otros autores que utilizan la política de considerar el reposicionamiento cuando el vehículo finaliza la prestación de un servicio son Schmid [31] y Jagtenberg et al. [29].

Por otro lado, existen estudios en los que se tienen en cuenta los dos políticas anteriores [21], [28], [42], tal es el caso de Van Buuren et al. [28] en el que se considera la reubicación cuando un vehículo es asignado para un evento y cuando un vehículo termina la prestación de un servicio.

Algunos autores no consideran la relocalización en etapas del proceso de atención, sino cuando una medida de desempeño objetivo presenta variaciones. Tal es el caso de [43]–[45] que aplican la política de considerar relocalizaciones solo cuando el porcentaje de cobertura de una zona disminuye en un valor establecido por el SEM. Otra medida de desempeño que se ha utilizado con este fin es el nivel de preparación de una zona [26].

Con respecto a la cantidad de vehículos que pueden participar de una relocalización, en la literatura se encuentra la política de permitir solo la relocalización de un vehículo [33] y la de permitir la relocalización de toda la flota. Con respecto a esta última, en el SEM de estudio de Yue et al. [24], los autores encontraron que su aplicación produjo mejoras significativas que incluían la reducción de las llamadas perdidas en un 50%. Sin embargo los autores no analizaron los costos de reubicación. Por otro lado, con la aplicación de esta misma política, en el SEM de estudio de Nair et al. [41] el rendimiento del servicio se veía afectado considerablemente.

En el SEM de estudio de Rajagopalan et al. [32] los autores encontraron que es importante aplicar políticas que limiten el número de veces que un mismo vehículo puede ser relocalizado en un tiempo determinado. Lo anterior para evitar por ejemplo sucesivas relocalizaciones de un mismo vehículo. En [12], [17], [20], [23]–[25], [30], [35], [36], [38], [41], [43], [44], [46] se aplica la política de tener en cuenta el costo por cada reubicación que realiza un vehículo, es decir, entre más relocalizaciones realice un vehículo, mayor será el costo de este. De esta manera es posible, por ejemplo indicar al vehículo con mayor costo de relocalización que no participe en las próximas relocalizaciones y en vez de este se utiliza el vehículo con menor costo. En el SEM de estudio de Van den Berg [30] se analizó el impacto que tenía en el modelo la aplicación de sanciones por relocalización y concluyeron que aunque sin penalización es posible aumentar la cobertura en 0.69 puntos porcentuales, en su caso particular, se requerían 12 bases y 37 relocalizaciones adicionales, lo que incurría en mayores gastos para el sistema.

Céspedes et al. [17] basados en lo anterior plantearon dos políticas para la selección de los vehículos que participarían en la relocalización. En la primera política cuando solo debe relocalizar un vehículo, el criterio para escoger el vehículo que realizará el cambio se basa principalmente en seleccionar de un grupo de candidatos el vehículo con menor costo. En la segunda política, cuando se requiere la relocalización de varios vehículos a varios puntos de localización, el criterio de decisión consiste en identificar de los vehículos candidatos (menor costo) cuales están más cerca de los puntos de destino, es

decir, se escoge aquellos candidatos que presente el menor tiempo de viaje entre el punto actual y el punto de destino y así sucesivamente hasta que todas los vehículos requeridos hayan sido relocalizados.

Otras políticas utilizadas en la literatura [41] son: limitar el número ambulancias que se puedan ubicar en cada base, evitar que los vehículos se reubiquen constantemente entre las mismas dos bases y evitar que los vehículos realicen viajes muy largos durante las relocalizaciones.

En la revisión de la literatura también se identificaron algunas características de los modelos que los autores utilizaron para la solución de los problemas de relocalización. Entre las características que se identificaron se encuentran los componentes para el diseño de los modelos, los métodos de solución y las medidas de desempeño utilizadas. A continuación se presenta un resumen de dichas características.

2.4. Componentes para el diseño de los modelos.

En general la mayoría de los estudios consideran los mismos componentes para el diseño de los modelos, estos son: objetivos considerados de en los modelos, la demanda, las reglas de despacho, las características de los vehículos, las velocidades, distancias y tiempos de viaje y las reglas para la selección del hospital. La descripción de cada uno de estos componentes y la forma como se incluyen en los modelos se describen de manera más detallada en [16]. Mientras que la diferencia entre las investigaciones está dada por el nivel de detalle con que se consideran estos componentes. En la revisión se encontró que este último aspecto es muy importante cuando se analizan problemas de relocalización [38]. Por ejemplo, van den Berg et al. [30] realizaron un modelo en el que tienen en cuenta los tiempos de viaje, la demanda de los servicios y la disponibilidad de los vehículos. Los autores realizaron experimentos considerando dos escenarios. En el primero tuvieron en cuenta la influencia del tiempo en las variables anteriormente mencionadas y en el segundo las variables tenían valores fijos que no dependían del tiempo. Una de las conclusiones más importantes es que es posible obtener mejores resultados cuando se tienen en cuenta las variaciones del tiempo. Con el primer escenario la cobertura aumento en un 1.35 % con respecto al segundo escenario. Otro problema reportado por estos autores es que al no tener variables dependientes del tiempo se presenta una inadecuada utilización de los recursos, ya que la demanda a cubrir, por ejemplo, durante las horas de la noche es diferente a la de la mañana.

2.5. Métodos de solución utilizados para abordar problemas de relocalización de los vehículos de un SEM

Para no llevar a cabo la experimentación directa en un sistema real, que en la mayoría de los casos no es posible debido a situaciones de carácter económico, técnico, jurídico o político que dificultan dicha práctica, los analistas recurren a una serie de herramientas como las que se presentan en la **Tabla 1**; en esta también se incluyen los objetivos de las investigaciones reconociendo el método de solución que se utilizó para su cumplimiento. Se observa que en la literatura revisada no se identifican sesgos hacia un método de solución en particular.

Tabla 1: Métodos de solución utilizados para estudiar los diferentes objetivos de investigación de los problemas de relocalización de los vehículos de un SEM

Método de solución	Objetivo de la investigación	Referencia
Simulación	Aumentar el grado de preparación en el área de responsabilidad.	[26]
	Maximizar la demanda cubierta en un tiempo T.	[25], [36]
	Evaluar políticas de relocalización de los vehículos del SEM	[37], [47]
Simulación eventos discretos	Reducir el porcentaje de arribos tardíos a la prestación del servicio	[29]
	Maximizar la demanda cubierta	[2], [21], [39], [40], [48]

	Minimizar el número de ambulancias y sus ubicaciones para cada grupo de tiempo	[32]
	Evaluar políticas de relocalización de los vehículos del SEM	[2], [4], [20], [27], [28], [45], [49], [50]
Optimización a partir de modelos matemáticos	Minimizar el tiempo de respuesta	[31], [37]
	Reducir al mínimo el número de bases abiertas	[30]
	Maximizar la demanda cubierta en un tiempo T.	[21]–[23], [30], [34], [35], [40], [41], [43], [44], [46]
	Minimiza el número de relocalizaciones	[12], [30], [43], [44]
	Minimizar el número de vehículos ubicados en cada base	[43]
	Minimizar el coste total (o distancia) de las rutas de reubicación entre bases	[20], [23], [35], [41]
	Evaluar políticas de relocalización de los vehículos del SEM	[31], [34], [45]
	Minimizar el número de llamadas que no son atendidas en un tiempo T de servicio deseado	[12]
Meta heurística - Heurísticas	Maximizar la demanda cubierta en un tiempo T.	[17], [25], [38], [42], [46]
	Minimizar el número de ambulancias y sus ubicaciones para cada grupo de tiempo	[32]
	Aumentar el grado de preparación en el área de responsabilidad	[26]
	Minimizar el tiempo total de relocalización.	[46]
	Evaluar políticas de relocalización de los vehículos del SEM	[28]

Todos los métodos de solución permiten experimentar con los sistemas sin recurrir a costos elevados o situaciones de alto riesgo. Además, pueden ser utilizados para identificar las deficiencias en las procesos de relocalización de los SEM que no serían evidentes sino hasta la ocurrencia de un evento [14]. A continuación se presentan la forma como estos métodos de solución se han utilizado.

El primer método de solución que se presenta en la **Tabla 1** es la simulación. Una aplicación de este método lo presenta Gendreau et al. [25] quienes utilizaron un modelo de relocalización de doble cobertura para maximizar la demanda cubierta, es decir garantizar la cobertura de la demanda al menos dos veces dentro de un radio de acción en el cual el vehículo se puede mover en un tiempo T establecido. Adicionalmente, tienen en cuenta los costos de reubicación. Para resolver este problema los autores utilizaron un modelo de simulación que implementaba metaheurística de Búsqueda Tabú en el proceso de relocalización. Además de las limitaciones de cobertura y capacidad de las ubicaciones, el modelo tiene en cuenta una serie de consideraciones prácticas, como son: evitar repetidos viajes de ida y vuelta entre las mismas dos bases, no mover el mismo vehículo para relocalizaciones sucesivas y evitar largos viajes entre los sitios de ubicación inicial y final.

La simulación de eventos discretos es el tipo de simulación más utilizado para resolver problemas de relocalización. Permite describir de manera directa e indirecta situaciones en las que una o varias entidades (usuarios, ambulancias, médicos, etc.) deben esperar y a continuación brinda o recibir un servicio para después salir del sistema. Es decir los dos eventos principales que controlan el modelo de simulación son las llegadas y las salidas [51], [52].

Zhen *et al.* [20] utilizaron *simulación de eventos discretos*, la cual les permitió evaluar políticas de relocalización de ambulancias teniendo en cuenta la adaptación a la dinámica cambiante de los entornos en el tiempo. Para esto utilizaron información relacionada con los cambios de la velocidad de las

ambulancias entre áreas, las condiciones de tráfico y el comportamiento de la demanda con el tiempo. El objetivo del modelo fue la disminución del tiempo de respuesta y la minimización del costo total de la reubicación entre las estaciones de espera de las ambulancias en la ciudad. Este costo era expresado como la distancia total recorrida por las ambulancias. Algunas de las limitaciones que reportan los autores del modelo es que no se tiene en cuenta las características heterogéneas de las ambulancias con respecto a la experiencia del piloto, los equipos disponibles, las capacidades de la tripulación, etc.

La programación matemática se utiliza para encontrar la solución a problemas de optimización tales como maximizar la demanda cubierta o minimizar el número de relocalizaciones. Por ejemplo, Gendreau *et al.*[22] maximizaron el valor esperado de la demanda utilizando un *modelo matemático de optimización* denominado como *problema de relocalización de máxima cobertura esperada (Maximal Expected Coverage Relocation Problem -MECRP)*. Su objetivo era diseñar una política de reubicación que permitiera asegurar una cobertura máxima de la demanda mientras se controlaba el número de relocalizaciones. Algunos autores utilizan programas enteros en tiempo real cada vez que se va a tomar una decisión de relocalización [25], [41], [53]. La función objetivo de estos programas busca maximizar el total de la demanda cubierta y minimizar los costos de relocalización de las ambulancias. Este enfoque es intensivo computacionalmente y requiere para su implementación un entorno de computación paralelo para que sea lo suficientemente rápido.

Céspedes *et al.* [17] abordaron un problema de relocalización de ambulancias con el fin de maximizar el número de personas cubiertas. Para lograr esto utilizan la *Metaheurística Búsqueda Tabú* cuya filosofía se basa en la explotación de diversas estrategias inteligentes para la resolución de problemas [54]. Este trabajo se realizó con la premisa de que las soluciones a los problemas de relocalización se deben realizar en tiempo real y en el menor tiempo posible. Por tal motivo, también analizaron el tiempo computacional consumido en la solución del problema. Su principal característica es que solo considera la reubicación de las ambulancias cuando hay una disminución en la flota porque se envía uno o varios vehículos a dar respuesta a un evento. En esta investigación se concluyó que es importante incluir la utilización de herramientas de geoposicionamiento que brinde información para apoyar las decisiones de reubicación y obtener óptimas soluciones en tiempo real.

En la literatura revisada se encontró que en el uso de los modelos matemáticos existen limitaciones importantes para resolver problemas actuales, los cuales son cada vez más complejos. Yue *et al.* [24] muestran que a menudo los modelos matemáticos no logran caracterizar completamente la dinámica del despacho de las ambulancias y atención de eventos. En particular, no logran captar las características como los tiempos de viaje en función del tiempo, los patrones de congestión y la alta variabilidad en el tiempo de viaje. Dicha complejidad ha generado un mayor uso de la simulación. Por ejemplo, Ingolfsson *et al.* [2] exponen que el uso de la simulación (en comparación con cualquiera de las técnicas de programación matemática) les permitió modelar diversos elementos importantes para el análisis del SEM de Edmonton/Canadá, como fueron las tasas de llegadas variables en el tiempo, las prioridades de atención telefónica, las políticas de reubicación de las ambulancias, y la entrega de los vehículos entre tripulaciones durante los cambios de turno. Tal vez la mayor ventaja de la simulación es su alta flexibilidad con respecto a las modificaciones de los supuestos del modelo. Por otra parte, son apreciados por los administradores por su carácter gráfico-informativo, lo cual facilita la explicación y el entendimiento de las políticas de relocalización [28], [49].

Cualquiera que sea el método de solución que se escoja para abordar un problema de relocalización, adicional al tiempo de respuesta, el cual se mencionó en la introducción, los investigadores plantean diversas medidas de desempeño que les permiten evaluar el cumplimiento de los objetivos o les ayudan a determinar la efectividad de una política de relocalización. En la siguiente sección, se presentan las medidas de desempeño encontradas en la literatura y utilizadas en los SEM.



2.6. Medidas de desempeño utilizadas para analizar problemas de relocalización en un SEM

En la literatura referente a los problemas de relocalización aplicados a los SEM se encuentran diferentes medidas de desempeño las cuales son utilizadas para evaluar estos sistemas y la efectividad de las políticas de relocalización. Algunas de estas medidas son: el nivel de preparación de las zonas [26], el porcentaje de arribos tardíos [29], los costos por reubicación [12], [20], [24], [25], [38], las horas extras de los equipos [2], el número de bases utilizadas (abiertas) en un tiempo T [30], [46], la tasa de utilización de los vehículos [2], [4], [20], [27], [28], [39], [40], [50], las distancia de reubicación [22], [46], el número o porcentaje llamadas pérdidas [22], [24], [27], [33]. y el número de relocalizaciones [12], [23], [24], [26], [30], [38], [43]. La descripción de manera más detallada de cada una de estas medidas se describen en [16].

La medida de desempeño más utilizada por los autores, debido a que es la medida, desde el punto de vista de los pacientes, que mejor representa el desempeño de un SEM, es el tiempo de respuesta. La cual se define como el período entre la recepción de una llamada y la primera llegada de un vehículo al lugar del evento [4], [37]. Generalmente los pacientes asocian un menor tiempo de respuesta con la reducción del sufrimiento, el aumento de la probabilidad de supervivencia y por lo tanto aumenta la confianza en el servicio [1]. Existen diferentes formas para medir y evaluar el tiempo de respuesta. Algunos autores lo determinan realizando un promedio de los tiempos de respuesta de todos los vehículos y se evalúa si este tiempo disminuye o aumenta con relación a un tiempo de referencia [17], [20], [22], [26], [29], [31], [45], [50]. Otros autores prefieren evaluarlo considerando el porcentaje de servicios atendidos dentro de un tiempo de respuesta objetivo T [2], [4], [12], [21]–[28], [30], [35]–[40], [46]. Este último caso se suele referenciar con el nombre de cobertura en un tiempo estándar T.

Aunque no se considera como una medida de desempeño de un SEM, para algunos autores es importante añadir otra medida asociada al tiempo que consume los modelos para arrojar las soluciones. Esta medida es el tiempo computacional [12], [17], [21], [22], [29], [30], [38], [45] y es utilizada para determinar la escalabilidad de los modelos [29] y como medida de comparación para analizar la eficiencia entre dos o más modelos bajo unas mismas políticas de relocalización [12], [21], [30].

Con el desarrollo de nuevas tecnologías de telecomunicaciones e informática se ha hecho posible el desarrollo y utilización de diferentes métodos para estudiar los problemas de relocalización de los vehículos de los SEM apoyados en herramientas que antes no estaban disponibles, como son los sistemas de posicionamiento geográfico (GPS) y sistemas de información geográfica (SIG). Todo esto ha permitido obtener y procesar en tiempo real los datos necesarios para trabajar los problemas de relocalización de vehículos. Además, con la implementación de sistemas GPS y SIG avanzados, los cuales son cada vez más utilizados, para los SEM es posible controlar la posición y el estado de los vehículos en un momento dado [45].

La principal ventaja de estos sistemas es la obtención de información con un alto grado de desagregación la cual es muy útil para los modelos. Un ejemplo de esta información son la variación de la velocidad y tiempos de viaje por horas del día, día de la semana y zona donde se presta el servicio, así como información geográfica relacionada con las ubicaciones de los centros de salud, bases de espera de los vehículos y la demanda de los servicios. Con esta información es posible representar con mayor detalle y por lo tanto con un mayor nivel de realismo los SEM que se están estudiando, especialmente en zonas donde hay una alta variabilidad de los tiempos de viaje y de demanda [38], [46]. Schmid et al. [38] reportaron un aumento del 10% en la calidad de las soluciones cuando se utilizan información obtenida con sistemas GPS y SIG.



Entre los softwares SIG más utilizados para analizar los problemas de relocalización de los vehículos de un SEM se encuentran TeleAtlas [28], [31], [38], Geocode [37], Google Maps [46], MapQuest [42] y ArcGIS [17]. Con todos estos softwares se pueden obtener las ventajas antes mencionadas. Su principal limitación es que generalmente los costos económicos para su utilización se incrementan con el tamaño de los datos a analizar.

Otra ventaja de los SIG es la presentada por Henderson et al. [49] quienes utilizaron los SIG no solo para obtener los datos de entrada del modelo sino también para mostrar los resultados de las simulaciones en diferentes escenarios.

2.7. Conclusiones de la revisión de la literatura

De los trabajos revisados es posible concluir que para los problemas de relocalización no existen soluciones o políticas de relocalización que puedan ser aplicadas a todos los SEM. Existen casos en que una política de relocalización exitosa para un SEM pueda ser perjudicial si se aplica a otro. Esto debido a que las características geográficas, políticas y regulaciones varían dependiendo de la ciudad y de los SEM [2], [25], [29], [30]. Por ejemplo, Van den Berg et al. [30] para el SEM que estudiaron encontraron que la cobertura se podía mejorar si se pasaba de un sistema de bases de espera a un sistema con una sola base, mientras que Andersson et al. [26] para otro SEM encontraron que la cobertura se podría mejorar si se abrían nuevas bases de espera.

También fue posible identificar que para la solución de los problemas de relocalización de los vehículos en un SEM, se utiliza principalmente como métodos de solución, la simulación de eventos discretos y la programación matemática. Se encontró también que generalmente los autores atribuyen la calidad de las soluciones a la disponibilidad de datos históricos confiables. Para estos últimos, los estudios más recientes resaltan la importancia del uso de herramientas modernas como lo son los sistemas de posicionamiento geográfico (GPS) y sistemas de información geográfica (SIG). Todo esto ha permitido obtener y procesar en tiempo real los datos necesarios para trabajar los problemas de relocalización de vehículos.

La mayoría de los estudios consideran en el diseño de los modelos componentes de: la demanda, las reglas de despacho, las características de los vehículos, las velocidades, distancias y tiempos de viaje y las reglas para la selección del hospital. La diferencia entre las investigaciones está dada por el nivel de detalle con que se consideran estos componentes. Para modelar los problemas de relocalización de los vehículos de los SEM es importante contemplan restricciones basadas en la cobertura, la capacidad de las bases de espera, evitar tiempos de viaje largos, la cantidad de vehículos a despachar y el número de vehículos disponibles. Con respecto a las medidas de desempeño utilizadas para la evaluación de políticas de relocalización se encontró, que si bien se utilizan todas las medidas de desempeño presentadas anteriormente, es conveniente en las investigaciones relacionadas con relocalización reportar siempre el tiempo de respuesta ya que, desde el punto de vista de los usuarios, es la medida que mejor representa el desempeño de un SEM.

Finalmente, en la literatura revisada se encontró que en el uso de los modelos matemáticos existen limitaciones importantes para resolver problemas actuales, los cuales son cada vez más complejos. Yue et al. [24] muestran que a menudo los modelos matemáticos no logran caracterizar completamente la dinámica del despacho de las ambulancias y atención de eventos. En particular, no logran captar las características como los tiempos de viaje en función del tiempo, los patrones de congestión y la alta variabilidad en el tiempo de viaje. Dicha complejidad ha generado un mayor uso de la simulación. Es por esto que de las sugerencias mencionadas en los estudios revisados se concluye que es necesario realizar trabajos futuros con el uso de la simulación acoplando Sistemas de Información Geográficos–SIG. Lo anterior debido a que con estas herramientas es posible obtener información en tiempo real y

con un alto grado de desagregación. Adicionalmente, la simulación ofrece una alta flexibilidad con respecto a las modificaciones de los supuestos del modelo. Por otra parte, son apreciados por los administradores por su carácter gráfico-informativo, lo cual facilita la explicación y el entendimiento de las políticas de relocalización.

En el presente trabajo se pretende contribuir al estado del arte mediante la implementación de un modelo de simulación de eventos discretos para el análisis del problema de relocalización de un SEM de la ciudad de Medellín. Además, se tuvieron en cuenta algunas consideraciones mencionadas anteriormente como son el uso de SIG y GPS para la obtención de la información del sistema, el uso de variables dependientes de la hora del día como por ejemplo la tasa de llegada de las llamadas y las velocidades de los vehículos del servicio.

3. METODOLOGÍA

En este trabajo se construyó el modelo de simulación utilizando los siguientes pasos:

- *Análisis del sistema real:* en esta etapa se estudia el contexto del problema, se identifican los objetivos del proyecto, se define el sistema que sería modelado, las características y componentes del mismo.
- *Recolección y análisis de datos:* se utilizan las bases de datos de sistema real para profundizar en el conocimiento del servicio y tomar decisiones que permitan un modelado más detallado del sistema.
- *Formulación e implementación del modelo:* Una vez definidos con exactitud los resultados que se esperan obtener del modelo, se define y construye el modelo que sería implementado en ordenador. En la formulación se definen todas las variables, sus relaciones lógicas y los diagramas de flujo que describen de forma completa el modelo. Posterior a esto, se realiza la implementación del modelo planteado siguiendo la estructura del diagrama de flujo. Y finalmente, con base en el análisis de los datos del sistema real también se identifican las funciones de distribución y las variables que serán utilizadas en el modelo.
- *Verificación y validación del sistema:* El proceso de verificación consiste en comprobar que el modelo implementado en el ordenador se comporta de acuerdo a su diseño. Posteriormente es necesario validar el modelo de simulación con el sistema real.
- *Experimentación y análisis de las salidas:* Una vez se concluya que el modelo de simulación corresponde con el sistema real, se plantean escenarios, realizando variaciones en el modelo, con el fin de conocer cómo responde el sistema ante dichas variaciones. Finalmente, se analizan las salidas obtenidas y se formulan las conclusiones y recomendaciones sobre estos resultados.

A continuación se presenta una descripción de los resultados obtenidos en cada una de estas etapas.

4. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE ATENCIÓN DEL SEM

Para analizar el problema de relocalización de los vehículos, se utilizará como sistema de referencia el servicio de Coomeva Emergencia Médica. El cual es un servicio de atención médica a domicilio y atención de urgencias y emergencia las 24 horas del día. De ahora en adelante se hará referencia a Coomeva Emergencia Médica como el SEM de estudio o simplemente SEM. El proceso para la atención de un servicio en el SEM inicia con la recepción de la llamada desde el call center o Central de despachos por parte de un despachador. Para cada solicitud de un servicio el despachador inicialmente registra información relacionada con los datos del paciente, como por ejemplo, nombre completo, número de identificación, edad, dirección, teléfono y motivo de consulta. Dependiendo de la gravedad del paciente y de los requerimientos del mismo se clasifica el evento en: atención telefónica, traslado, consulta,



emergencia y urgencia. Posterior a esto, registra información relacionada con el evento, como por ejemplo, tipo de servicio que se solicita, tipo y número del vehículo que se asigna, cancelaciones y motivo de cancelación, nombre del despachador, nombre del médico de turno y finalmente los tiempos de recepción de la llamada, despacho del vehículo, inicio y fin de la atención y traslado al hospital.

La *atención médica telefónica* es la atención brindada vía telefónica por el médico de la central de despacho, con el fin de resolver inquietudes y brindar orientación relacionada con la salud, con el uso del servicio o con el uso adecuado de medicamentos previamente formulados por profesional médico [55]. Este servicio no requiere asignación de un vehículo. El *Traslado* es el transporte de pacientes en ambulancias, ya sean medicalizadas o básicas, a un hospital o centro de salud con la finalidad de que estos sean atendidos en la fase hospitalaria[55]. La *consulta* es una atención para patologías no complejas que no comprometen la vida del paciente[55]. Una *urgencia* es un evento de aparición súbita, que no implica riesgo inmediato para la vida, pero que requiere de atención médica de manera oportuna para evitar que la condición del paciente empeore[55]. Una *emergencia* es la alteración de la integridad física, funcional o psíquica por cualquier causa que compromete la vida o funcionalidad de la persona y que requiere de la protección inmediata de servicios de salud, a fin de conservar la vida y prevenir consecuencias críticas presentes o futuras[55].

En algunos casos, el proceso de asignación y traslado del vehículo al lugar del evento puede tardar, esto debido a que no hay disponibilidad de vehículos para dar respuesta a un evento. Durante este tiempo, los pacientes pueden llamar a cancelar el servicio o también, es posible que decidan no esperar y trasladar al paciente con sus propios medios al centro de salud o con otra entidad prestadora de servicios de emergencias médicas. También puede ocurrir que el paciente presente mejorías del estado de salud. En los casos mencionados anteriormente, se reporta en la base de datos la cancelación del servicio, la hora y el motivo de cancelación.

Cuando el despachador recibe la solicitud de un servicio, asigna un vehículo que le dará respuesta a ese evento teniendo en cuenta el estado de salud del paciente, si requiere traslado o no y la disponibilidad de los vehículos. Para cumplir estos servicios, en especial los servicios que necesitan de vehículos, como son traslados, consultas, urgencias y las emergencias, el SEM de estudio cuenta con una flota de vehículos que está compuesta de tres tipos: vehículos de consulta, ambulancias TAB (Ambulancia de transporte asistencial básico) y ambulancias TAM (Ambulancias de transporte asistencial medicalizado). Teniendo en cuenta el tipo de servicio que solicitan los usuarios se define la prioridad y si es necesario un vehículo, se define cual es el tipo de vehículo que se debe considerar para la atención del servicio. Las tripulaciones se configuran de acuerdo al tipo de vehículo que se le asigne: para vehículos de consulta y ambulancias TAB, la tripulación está compuesta por un operador y un médico, mientras que para ambulancias TAM la tripulación está compuesta por dos operadores y un médico.

Cuando el vehículo llega al lugar del evento, la tripulación pasa algún tiempo en el sitio con el paciente, esto lo realiza con el objetivo de acceder a la ubicación del paciente, estabilizar al paciente, y si es necesario, prepararlo para el transporte a un centro de salud.

En reuniones realizadas con el personal del SEM de estudio para conocer el servicio, indicaron que la elección del hospital de destino depende de la entidad de salud a la cual está afiliado el paciente. Teniendo en cuenta esto, cuando el evento es una emergencia, se traslada al paciente al centro de salud más cercano. En otros casos, se realiza primero la regulación del paciente (llamada al centro de salud para autorizar el ingreso del paciente) y luego se traslada el paciente al centro de salud. Por políticas del SEM de estudio solo las ambulancias pueden realizar traslados de pacientes. Aunque existen casos de emergencia en los que se hace necesario trasladar el paciente en vehículos de consulta (0.4% del total de servicios), esto no es una práctica adecuada, debido a que un vehículo de consulta no cuenta con todos los equipos que se requieren para el transporte de un paciente. Además, según la normatividad colombiana (resolución 2003



de 2014) solo se permite la habilitación para el traslado de pacientes en transporte asistencial básico y transporte asistencial medicalizado.

Cuando se realiza el traslado, la ambulancia pasa algún tiempo en el hospital con el objetivo de realizar la transferencia de la paciente al hospital, completar el papeleo, y, posiblemente, la limpieza / reposición de existencias.

Existen casos en los que es posible que aunque se autorice el traslado del paciente, la tripulación del SEM de estudio debe esperar largos periodos de tiempo (se reportaron hasta 17 horas) hasta que en el centro de salud reciban al paciente. Cuando esto sucede, la tripulación debe esperar a que se finalice el traslado y trámites necesarios para el mismo.

Finalmente, se lleva a cabo una “búsqueda de parqueo” para determinar el mejor lugar de estacionamiento a la espera para la siguiente llamada. En la mayoría de los casos, el despachador asigna como lugar de espera al vehículo la zona donde se asignó el último servicio, pero también se puede dar el caso en el que el despachador de acuerdo a una lista de lugares prioritarios de espera derivada del análisis de la demanda anual del servicio, asigne el lugar de espera al vehículo.

A continuación se presenta un análisis descriptivo de la información que se registra en la base de datos de Coomeva Emergencias Médicas durante la prestación de un servicio.

4.1. Análisis descriptivo de la información del SEM de estudio

La información necesaria para el desarrollo del modelo de simulación se ha obtenido realizando un trabajo de campo con entrevistas semiestructuradas que permitió caracterizar el proceso de atención del Servicio de Emergencias Médicas de Coomeva Emergencia Médica anteriormente descrito y con el análisis de una base de datos de los años 2012 a 2014 de dicho servicio. La base de datos cuenta con el registro de 288.477 solicitudes de servicios atendidos.

Para el análisis de la información se dividió el proceso de atención de una solicitud en tres etapas, primera es la recepción de la llamada y solicitud de información del evento, la segunda es la asignación y despacho de vehículo y por último, la atención y traslado al hospital.

4.2. Recepción de la llamada

Teniendo en cuenta la información relacionada con el paciente que solicita el despachador y la gestión que él realiza de la solicitud, registra información relacionada con el evento.

4.2.1. Información del paciente

Con relación a la información que se recolecta inicialmente sobre paciente, las direcciones de los servicios solicitados al SEM de estudio permitieron analizar el comportamiento geográfico de la demanda. Para dicho análisis se tomó de la base de datos de los años 2012 a junio 2014 un total de 211.128 direcciones.

Todas las solicitudes de los servicios registradas cuentan con la dirección, sin embargo aunque el SEM de estudio cuenta con un procedimiento establecido para el registro de la dirección, los despachadores no lo utilizan. Por lo anterior, se realizó un proceso de depuración y organización de dicha información utilizando Excel que demandó un esfuerzo y tiempo considerable. Finalmente, se lograron obtener 207.161 datos de direcciones georreferenciadas utilizando el API de Google Maps y el software ArcGIS.

En el **Anexo 1** se presenta de manera más detallada los resultados de esta georreferenciación. En la **Figura 2** se observa los resultados de la georreferenciación en el software ArcGIS.

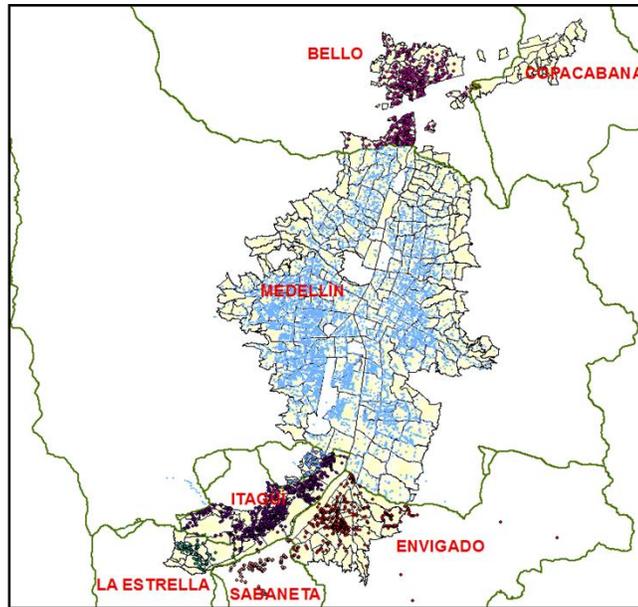


Figura 2: Georreferenciación de la ubicación de las solicitudes de los servicios. Software ArcGIS

En la **Tabla 2** se presenta un resumen por municipio. Con relación a la ciudad de Medellín en la cual se solicitan el 85% de los servicios, de un total de 249 barrios oficiales y 20 áreas institucionales el SEM de estudio presta sus servicios en 254. Las áreas institucionales son grandes sectores con algunas características de barrio, pero su población no es permanente y carece de viviendas, ejemplo los campus universitarios.

Tabla 2: Resumen de los resultados de la georreferenciación por municipio

Municipio	Número de barrios donde solicitaron servicio	Número total de barrios	Cantidad de servicios solicitados	Porcentaje
Bello	56	82	4.908	2,4%
Copacabana	4	23	542	0,3%
Envigado	35	39	12.868	6,2%
Itagüí	60	64	9.117	4,4%
La estrella	17	23	999	0,5%
Medellín	254	249 barrios y 20 áreas institucionales	176.356	85,1%
Sabaneta	1	1	2.371	1,1%
Total	427	533	207.161	100

4.2.2. Información del evento

Durante la recepción de la llamada el despachador realiza una primera clasificación del servicio, a esta primera clasificación se denominan código inicial. Pero también, es posible que la clasificación inicial

cambie cuando el médico que atiende el servicio evalúa el estado de salud del paciente, a esta segunda clasificación se le llama código final, ver **Figura 3**.

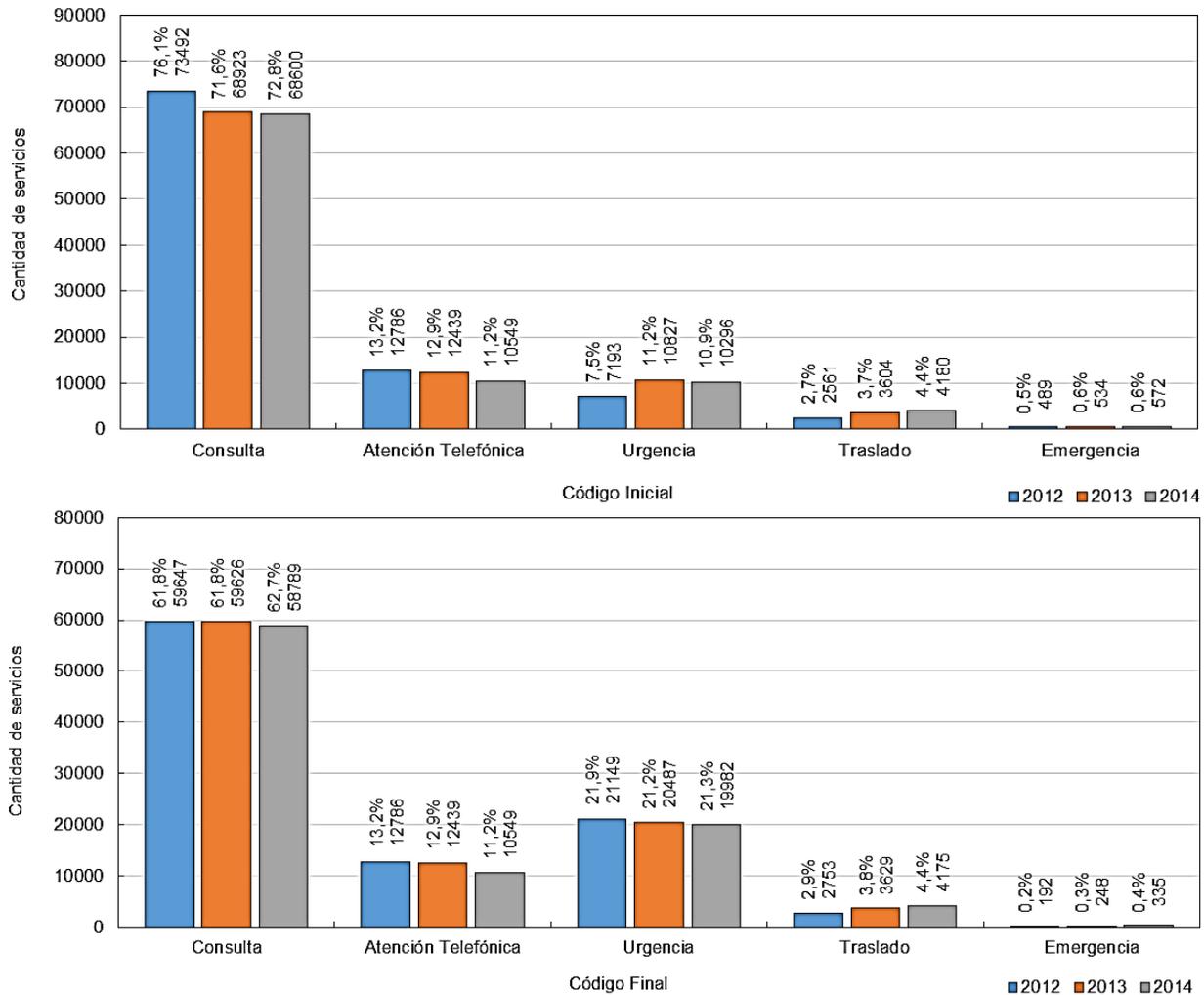


Figura 3: Clasificación de los servicios por tipo de evento. Los porcentajes encima de las barras indican la proporción con respecto al total de servicios atendidos de cada año.

Teniendo en cuenta que es posible que la clasificación inicial de un servicio cambie durante la atención, se evaluó el porcentaje de cambio para cada uno de los tipos de evento y se identificó que: cuando se clasifica inicialmente un servicio como consulta, un 5.1% pasan a ser clasificados como urgencias y un 0.2% pasa a ser emergencia. Cuando se clasifica inicialmente un servicio como emergencia, un 15.4% pasan a ser clasificados como consultas y un 35.5% a ser clasificados como urgencias. Cuando se clasifica inicialmente un servicio como urgencia, un 68.1% pasan a ser consultas y un 1.4% como emergencias. Y por último, cuando inicialmente se clasifica un servicio como traslado, un 0.9% pasa a ser consulta, 0.1% pasa a ser emergencia y un 1.1% pasa a ser urgencia.

Estos cambios hacen que en algunas ocasiones sea necesario enviar un vehículo diferente para atender el servicio. Por ejemplo, cuando un evento inicialmente es clasificado como una consulta y se envía un vehículo de consulta para atenderlo, en algunas ocasiones, puede suceder que el estado de salud del paciente se complique y sea necesario trasladarlo a un centro hospitalario. En este caso, se debe cambiar el tipo de vehículo y enviar una ambulancia para realizar el traslado.

Esta clasificación es importante debido a que dependiendo del tipo de servicio es el tiempo de respuesta. Como promesa de servicio el SEM de estudio ofrece a los usuarios un tiempo de respuesta máximo según el tipo de evento, de la siguiente manera, para una consulta es de 120 minutos, para una urgencia es de 30 minutos y para una emergencia es de 15 minutos.

Además, se realizó un análisis de la demanda por horas del día, días de la semana y meses del año. En las **Figura 4** se presenta la demanda por mes para los años de análisis, mientras que en la **Figura 5** se presenta el total de servicios solicitados en dichos años clasificados de acuerdo al día de la semana en que se solicitó el servicio.

Al comparar simultáneamente las gráficas arriba mencionadas, teniendo en cuenta la variación de la demanda en los tres años de estudio, se observa que en general el comportamiento de la demanda no presenta cambios significativos. El total de servicios solicitados para el año 2012 fue de 96.535, mientras que para el año 2013 fue de 96.522, lo que equivale a una disminución del 0.01%. Para el año 2014 el total de servicios solicitados fue de 95.420, lo que indica una disminución con respecto al 2013 del 1.1%. Las mayores diferencias se presentan cuando se analizan los meses de febrero (mes 2) y agosto (mes 8) en la **Figura 4**. En el año 2012 para el mes de febrero se presentaron 8253 solicitudes mientras que para el año 2013 y 2014 se presentaron 6975 y 7379 solicitudes, respectivamente. Es decir, una diferencia del 15% y 10%.

Al realizar el mismo ejercicio teniendo en cuenta la variación de la demanda por mes (**Figura 5**), en general, el comportamiento tampoco presenta cambios significativos como se observa en la proporción con respecto al total de servicios de cada año. Utilizando el programa R se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de la demanda y se obtuvo que los cambios en la demanda durante los diferentes meses, no son significativos, en otras palabras, no hay diferencias estadísticas significativas entre la cantidad de servicios solicitados durante los diferentes meses de los años de estudio.

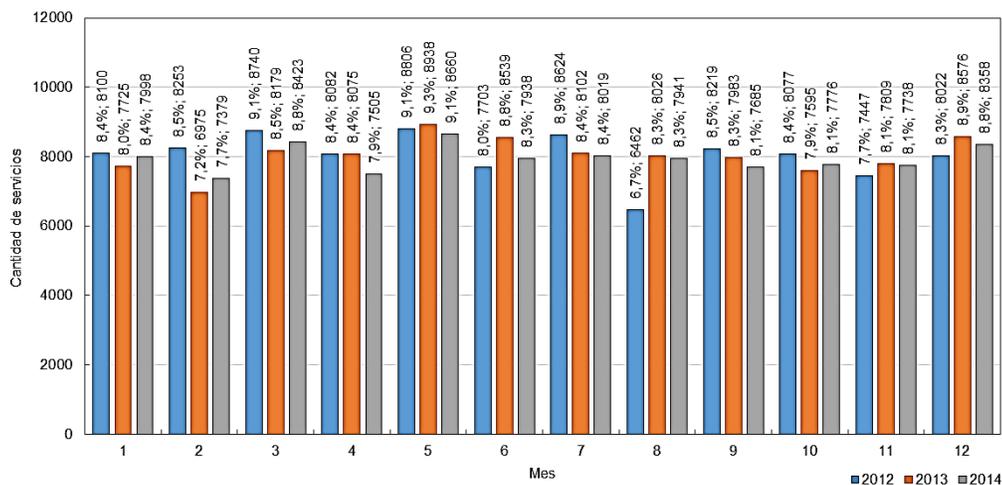


Figura 4: Cantidad de servicios solicitados por mes. Los porcentajes encima de las barran indican la proporción con respecto al total de servicios atendidos de cada año.

Por otro lado, se realizó el análisis de la demanda por días de la semana (**Figura 5** y **Figura 6**). Las mayores diferencias se presentan entre los días sábado y lunes, con una diferencia del 17%. Se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar si existía diferencia estadística significativa entre la cantidad de servicios solicitados por días de la semana. Al realizar el análisis, se encontró que si existen

diferencias significativas entre las cantidad de servicios solicitados por días de la semana. Con base en este resultado, se utilizó la prueba de Tukey, **Figura 7**, para encontrar diferencias significativas entre pares de medias y se obtuvo como resultado que existen diferencias significativas de medias entre los domingos y los sábados con el resto de días excepto el viernes y entre el lunes y viernes.

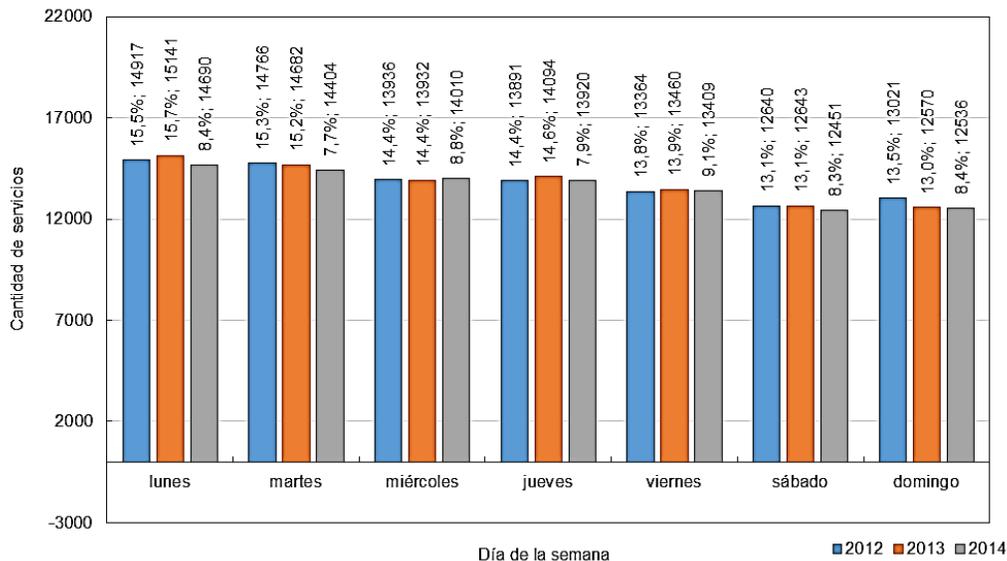


Figura 5: Cantidad de servicios solicitados por días de la semana. Los porcentajes encima de las barras indican la proporción con respecto al total de servicios atendidos de cada año.

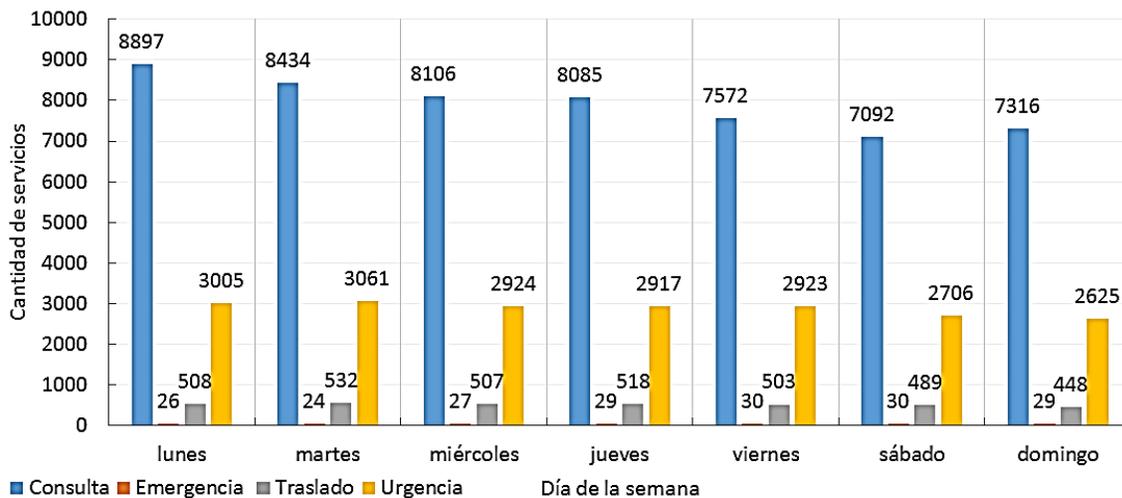


Figura 6: Cantidad de servicios por tipo de servicio y día de la semana. Año 2013

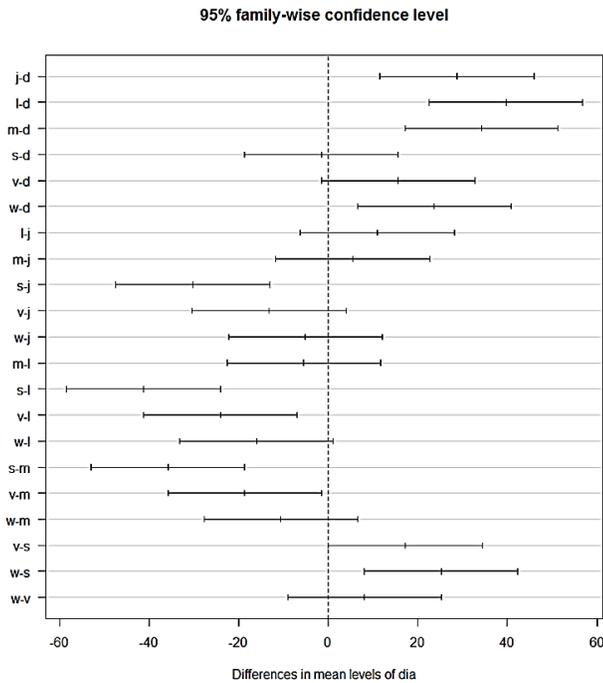


Figura 7: Prueba de Tukey. Las letras en la Gráfico indican l: lunes, m: martes, w: miércoles, j: jueves, v: viernes, s: sábado, d: domingo.

Quando se analizó la demanda de acuerdo a la hora del día, se observó que hay mayor solicitud de servicios en el día entre los 8:00 a.m. y las 7:00 p.m., presentándose dos picos de alta demanda entre las 9:00 a.m. y las 11:00 a.m. y otro pico entre las 5:00 p.m. y las 7:00 p.m. Este comportamiento no cambia de acuerdo al año **Figura 7**. Este comportamiento se repite para todos los años en la muestra.

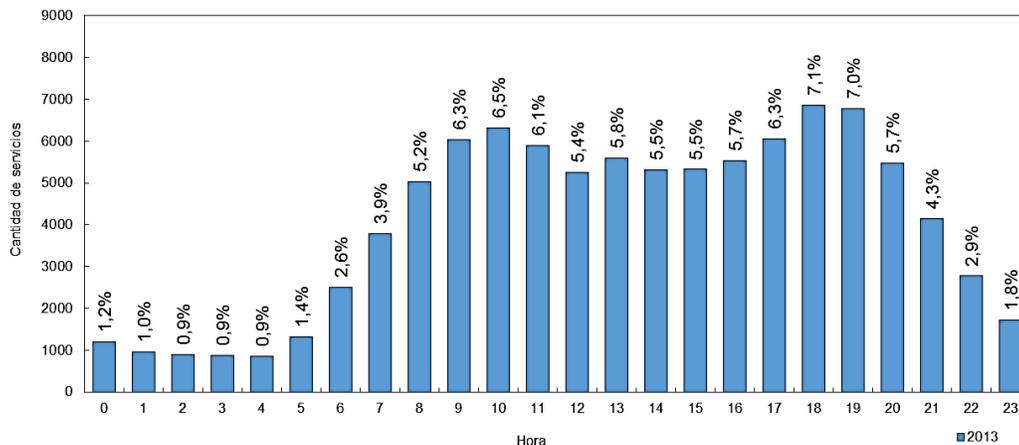


Figura 8: Cantidad de servicios solicitados por hora del día. Los porcentajes encima de las barras indican la proporción con respecto al total de servicios atendidos en el año 2013

En conclusión, a pesar de que no existe diferencia estadista significativa entre la cantidad de servicios solicitados en los diferentes meses del año, cuando realizamos el análisis por días de la semana y por horas del día el resultado es diferente. Se encontró que existen diferencias significativas de medias entre los domingos y los sábados con el resto de días excepto el viernes y entre el lunes y viernes. Este análisis se tuvo en cuenta en el modelo de simulación, por lo tanto, el ajuste de las distribuciones se realizó con

las demandas de servicios solicitados de lunes a jueves. El mismo procedimiento ilustrado en este documento puede emplearse con el fin de emplear el modelo para los días restantes.

4.3. Asignación y despacho de vehículo

Aproximadamente un 58% de los servicios solicitados al SEM de estudio que requieren un vehículo son atendidos por vehículos de consulta, un 16% son atendidos por ambulancias TAM y un 26% son atendidas por ambulancias TAB, ver **Figura 9**.

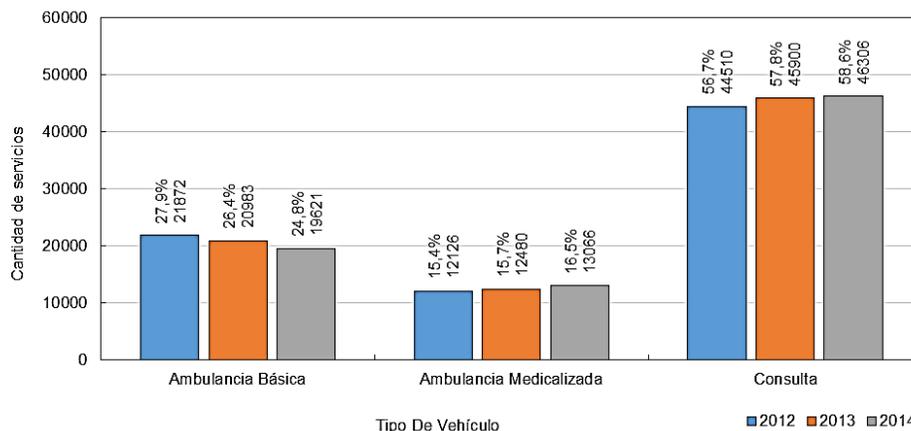


Figura 9: Clasificación de los servicios de acuerdo al tipo de vehículo utilizado para la atención. Los porcentajes encima de las barras indican la proporción con respecto al total de servicios atendidos que requirieron vehículo en cada año

Por políticas del SEM de estudio, los vehículos de consulta tienen hasta dos turnos diarios de 7 horas cada uno, mientras que las ambulancias generalmente tienen hasta tres turnos diarios de 8 horas cada uno. En la **Figura 10**, se presenta de acuerdo a la programación actual de los vehículos del SEM, la cantidad de vehículos disponibles en cada hora del día. Entre las 12:00 a.m. y las 6:00 a.m. solo se encuentran disponibles las ambulancias.

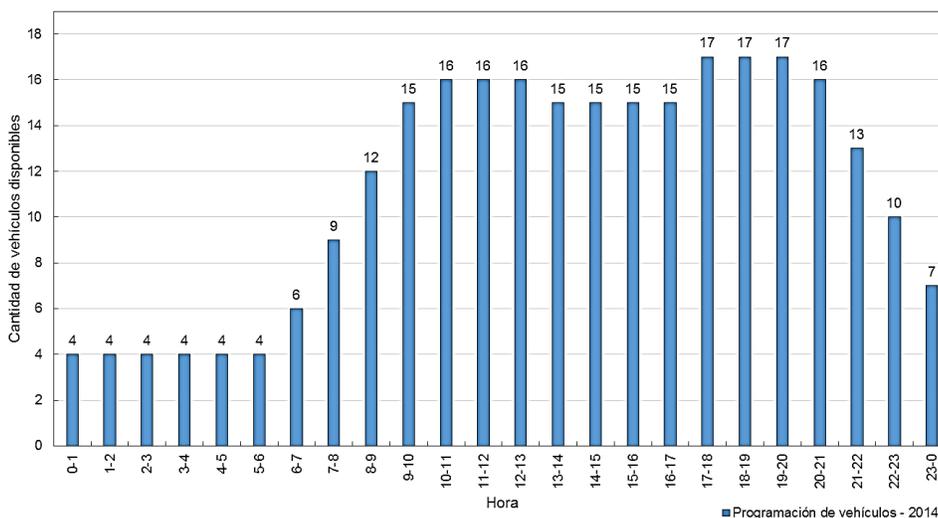


Figura 10: Cantidad de vehículos disponibles para cada hora del día.

La asignación del vehículo depende del tipo de evento y solo las ambulancias pueden realizar traslados de pacientes. A continuación se presenta un resumen de los tipos de vehículos que utiliza el SEM para dar respuesta a cada tipo de evento. Ver **Figura 11**.

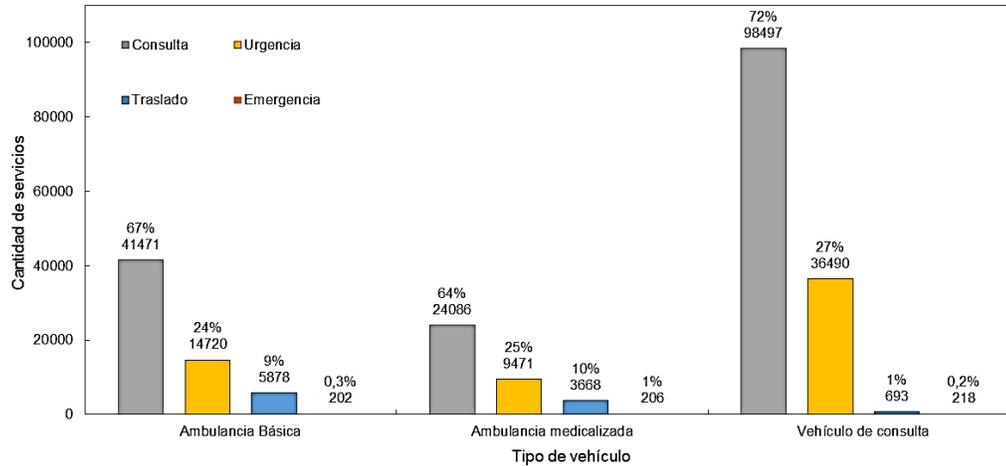


Figura 11: Tipo de vehículo asignado para cada tipo de evento. Los porcentajes encima de las barras indican la proporción con respecto al total de servicios atendidos por cada tipo de vehículo en los años 2012 a 2014.

Adicionalmente, cada vehículo es diferenciado del resto utilizando un código único. Los vehículos del 101 al 116 son carros de consulta, los vehículos 301 y 302 son ambulancias TAM, los del 401 al 405 son ambulancias TAB. A continuación se presenta la cantidad de servicios atendidos por cada vehículo. Ver **Figura 12** y **Figura 13**. Algunos de los vehículos y de las ambulancias son utilizados como vehículos de reposición. Estos vehículos de reposición son utilizados en casos en los que haya algún daño mecánico en el vehículo asignado al inicio de turno a la tripulación o durante el turno. Algunos de estos vehículos son por ejemplo el 112 y 113.

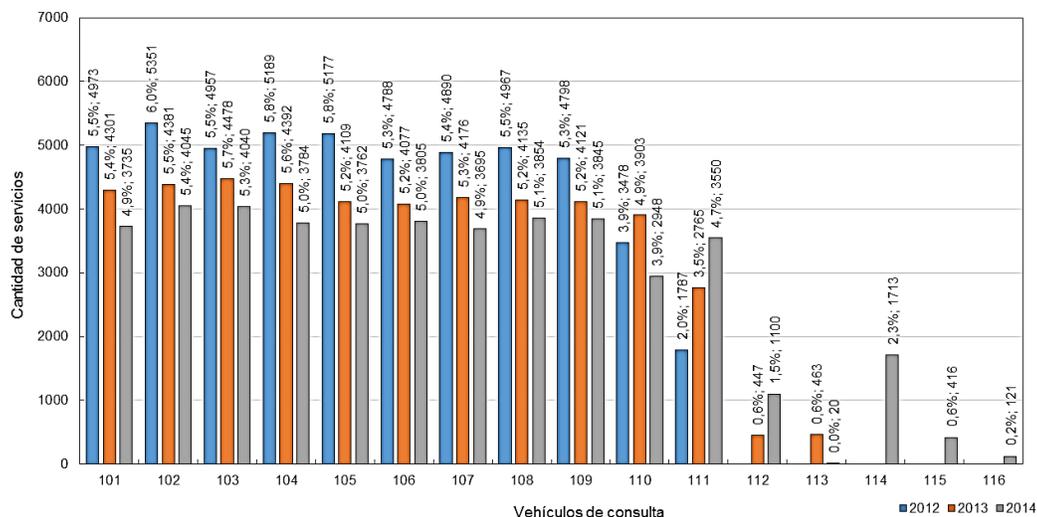


Figura 12: Cantidad de servicios atendidos por cada vehículo de consulta. Los porcentajes encima de las barras indican la proporción con respecto al total de servicios atendidos en cada año que requirieron vehículo.

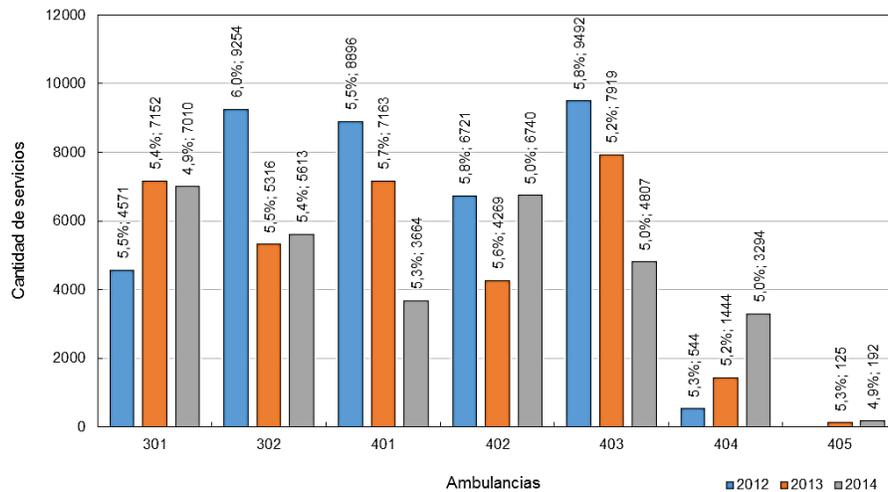


Figura 13: Cantidad de servicios atendidos por cada ambulancia. Los porcentajes encima de las barras indican la proporción con respecto al total de servicios atendidos en cada año que requirieron vehículo.

Con relación a los servicios cancelados, de un total de 96.534 servicios solicitados en el 2012, 96.522 en el 2013 y 95.420 del 2014, un 5.5% aproximadamente en cada año fueron cancelados; en el 2012 fueron 5402 cancelaciones, 2013 fueron 4714 cancelaciones y en el 2014 fueron 5769 cancelaciones. Entre los principales motivos de cancelación de los usuarios fue por demora en el servicio y mejoría de los pacientes.

4.4. Atención y traslado al hospital

Además de los estándares para los tiempos de respuesta, el SEM de estudio también tiene establecidos tiempos máximos para la atención médica dependiendo del tipo de servicio, de la siguiente manera, para una consulta es de 25 minutos, para una urgencia es de 45 minutos y para una emergencia es de 40 minutos. Con relación a los traslados, del total de servicios solicitados al SEM aproximadamente un 4% requieren traslado a un hospital o centro de salud.

Para realizar el análisis de los hospitales o centros de salud a los que se realizaron traslados de los pacientes se tomó la información del lugar de traslado de la base de datos y se georreferenciaron utilizando el Google Maps y el software ArcGIS. Esto permitió identificar los barrios a los que pertenecen los centros de salud. En el **Anexo 2** se presenta un resumen de dicho análisis.

Además de lo anterior se identificó que los cinco centros de salud donde se realizan mayor cantidad de traslados en el SEM de estudio son la clínica Las Américas, la clínica León XIII - IPS Universitaria, UBA Coomeva HGM, Sura Los Molinos y la clínica Las Vegas, ver **Figura 14**.

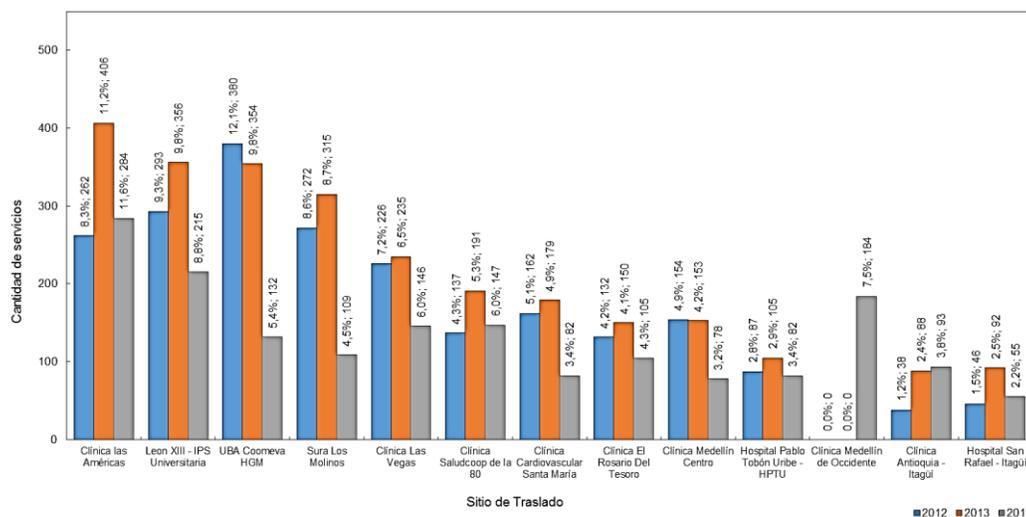


Figura 14: Sitio de Traslado. Los porcentajes encima de las barras indican la proporción con respecto al total de traslados realizados cada año.

4.5. Conclusiones del análisis descriptivo de la información

Inicialmente se realizó la caracterización del proceso de atención del SEM de Coomeva Emergencias Médicas y se realizó un análisis descriptivo de la información sobre la prestación del servicio. La caracterización del proceso nos permitió la identificación de todos los factores y recursos que intervienen en el proceso de atención del servicio y estas fueron un insumo muy importante para la realización del modelo de simulación eventos discretos que nos permitió el análisis del problema de relocalización de los vehículos del servicio. Teniendo en cuenta la información presentada anteriormente a continuación se describen las conclusiones:

- Al estudiar la cantidad de servicios solicitados de acuerdo a cada tipo de evento se encontró que aproximadamente un 71% de los pacientes solicitan el servicio de consulta.
- Al realizar el análisis de varianza (ANOVA) de la demanda en los diferentes meses del año y se encontró que no existen diferencias estadísticas significativas entre la cantidad de servicios solicitados. Por otro lado, al realizar el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de Tukey para determinar si existía diferencia estadística significativa entre la cantidad de servicios solicitados por días de la semana, se obtuvo que existen diferencias significativas de medias entre los domingos, los sábados y los viernes con el resto de días.
- Al analizar la demanda de acuerdo a la hora del día, se observó que hay mayor solicitud de servicios en el día entre los 8:00 a.m. y las 7:00 p.m., presentándose dos picos de alta demanda entre las 9:00 a.m. y las 11:00 a.m. y otro pico entre las 5:00 p.m. y las 7:00 p.m. Este comportamiento no cambia de acuerdo al año.
- Al realizar el análisis de la demanda por tipo de vehículo que se utiliza para dar respuesta a la solicitud, se identificó que aproximadamente un 58% de los servicios solicitados al SEM de estudio que requieren un vehículo son atendidos por vehículos de consulta. Esto se debe posiblemente a que en el SEM de estudio existe una mayor cantidad de vehículos de este tipo. El servicio cuenta con un total de 16 vehículos de consulta, 2 ambulancias TAM y 5 ambulancias TAB.
- Del total de 288.477 servicios solicitados al SEM de estudio aproximadamente un 4% requieren traslado a un centro de salud.



5. MODELO DE SIMULACIÓN

La simulación de eventos discretos es un conjunto de relaciones matemáticas, lógicas y probabilísticas que integran el comportamiento de un sistema bajo estudio cuando se presenta un evento determinado [56]. El objetivo de estos modelos es el de entender, analizar y mejorar las condiciones de operación relevantes del sistema que se está estudiando.

Para poder realizar un modelo de simulación de eventos discretos es necesario entender algunos componentes de dicho modelo. A continuación se describen cada uno de ellos:

Un *sistema* es un conjunto de elementos que se interrelacionan para funcionar como un todo; desde el punto de vista de la simulación, tales elementos deben tener una frontera clara. Por ejemplo, podemos hablar del sistema de atención de los pacientes en un Servicio de Emergencias Médicas. Los sistemas pueden dividirse en elementos que son importantes para la construcción de un modelo de simulación; entre ellos tenemos entidades, eventos actuales y futuros, localizaciones, recursos, atributos y variables [56].

Las *entidades* son los elementos que se van a simular a través del modelo y quienes son impactados por los eventos. Se pueden mover a través del modelo o estar estáticas en el sistema y tienen la capacidad de poder interactuar con otras entidades. Una entidad es la responsable de que el estado del sistema cambie [56]. En este modelo se tiene como entidades los pacientes que solicitan el servicio al SEM de estudio.

Un *evento* es un cambio en el estado actual del sistema [56]; en este modelo se han identificado como eventos la llegada de una llamada, la asignación del vehículo y traslado al lugar donde se encuentra ubicado el paciente, la atención de un servicio, la reubicación de los vehículos después de asignar uno para atender un evento, la ubicación de un vehículo al finalizar un servicio, el traslado del paciente al hospital y la cancelación de un servicio.

Las *localizaciones* son todos aquellos lugares en los que la entidad puede detenerse para ser transformada o esperar a serlo. Dentro de estas localizaciones tenemos hospitales y lugar donde está ubicado el paciente que solicita el servicio [56].

Los *recursos* son aquellas personas, máquinas o cualquier otro elemento que proporciona un servicio o efectúa operaciones sobre las entidades [56]. En este modelo tendríamos como recursos los diferentes tipos de vehículos que se utilizan para la prestación del servicio. Mientras un paciente esté utilizando un recurso concreto, es posible que dicho recurso no esté disponible para ser empleado por otro paciente, dependiendo de la capacidad del sistema. Este hecho puede producir colas (en las que los pacientes tienen que esperar hasta que el recurso esté disponible).

Los *atributos* son las características de las entidades (ubicación, tipo de evento, etc.) y cada entidad tiene unos valores diferentes (todas tienen los mismos tipos de atributos, pero con valores diferentes). Estos valores son definidos al inicio de la simulación y pueden ser actualizados a medida que los eventos van apareciendo. Por ejemplo, si la entidad es un paciente, los atributos serían el tipo de eventos (traslado, consulta, urgencia o emergencia). Los atributos son muy útiles para diferenciar entidades sin necesidad de generar una entidad nueva, y pueden asignarse al momento de la creación de la entidad, o asignarse y/o cambiarse durante el proceso [56].

Teniendo en cuenta lo anterior y para estudiar el problema de relocalización de los vehículos del servicio se realizó un modelo de simulación de eventos discretos utilizando el programa Simul8. El cual es un

software comercial de simulación de eventos discretos para la planificación, diseño, optimización y reingeniería de los sistemas de suministro de producción, fabricación, logística o servicios reales[57].

El proceso de simulación del Servicio de Emergencias Médicas de estudio se dividió en 3 etapas. Estas etapas son: *recepción de la llamada*, *asignación y despacho del vehículo* y *finalmente, la atención y traslado al hospital*. En la **Figura 15** se presenta el diagrama del proceso de simulación y luego se explican las etapas y las actividades que se realizan en cada una de ellas. El diagrama del proceso se realizó usando el programa Bizagi Process Modeler.

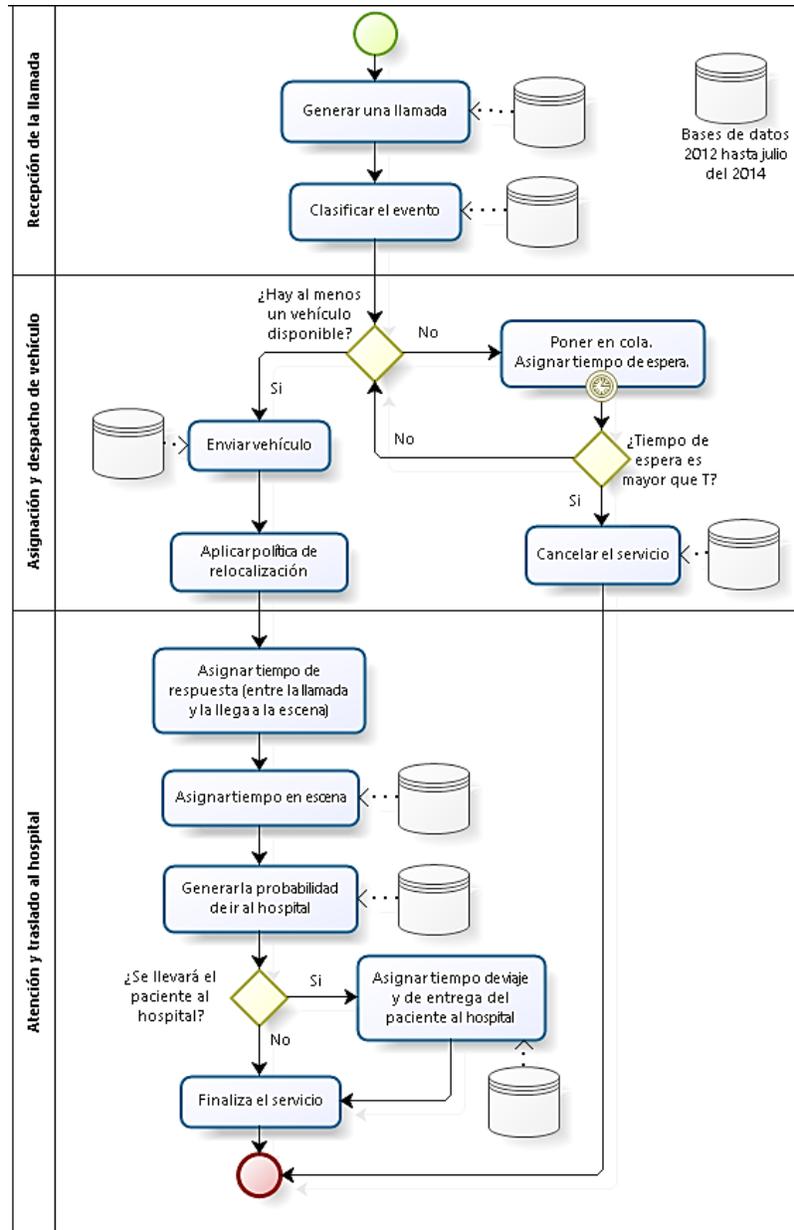


Figura 15: Diagrama del proceso de simulación

Con relación al tiempo de simulación, se simuló una semana de 4 días interconectados (lunes, martes, miércoles y jueves) y se realizaron 1000 corridas.

Durante la franja de tiempo entre las 6:00 a.m. y las 12:00 a.m. están disponibles los tres tipos de vehículos con los que cuenta el SEM de estudio, vehículos de consulta, ambulancias TAM y Ambulancias TAB. Entre las 12:00 a.m. y las 6:00 a.m. solo hay disponibilidad de ambulancias.

5.1. Definición de los elementos del modelo.

Para la construcción del modelo de simulación del Servicio de Emergencia Médico de Coomeva Emergencias Médicas, se definieron los siguientes elementos.

VARIABLES EXÓGENAS: son las independientes o de entrada del modelo. Puede considerarse que estas variables actúan sobre el sistema, pero no reciben acción alguna de parte de él.

- Tasa de llegada [pacientes/minuto]: esta variable corresponde al número de pacientes que solicitan el servicio al SEM.
- Vehículos: corresponde a los vehículos que realizan la atención de las solicitudes de los servicios del SEM. En el modelo de simulación se tuvieron en cuenta tres tipos de vehículos con los que cuenta el SEM.
- Tiempo de viaje [minutos]: se define como el periodo de tiempo que tarda el vehículo en transportarse de un lugar a otro. Este tiempo se calcula teniendo en cuenta la distancia entre los centroides de los barrios y la velocidad para cada tipo de vehículo por hora del día. En el modelo estos transportes son entre la ubicación del vehículo cuando se le asigna una atención y la ubicación del paciente, y entre la ubicación del paciente y la ubicación del centro de salud o hospital al que es llevado.
- Tiempo de atención de servicio [minutos]: se define como el tiempo que tarda un equipo en realizar la atención de un evento.
- Tiempo en el hospital [minutos]: el tiempo que dura el equipo en hacer entrega del paciente al centro de salud. En algunos casos este puede tardar debido a la disponibilidad que tenga el hospital en recibir al paciente.
- Tiempo de espera [minutos]: tiempo al que está dispuesto un paciente a esperar para la prestación de un servicio.

VARIABLES DE ESTADO: describen el estado de un sistema o uno de sus componentes, ya sea al comienzo, al final o durante un periodo. Estas variables interactúan con las variables exógenas del sistema y con las endógenas, de acuerdo con las relaciones funcionales supuestas para el sistema.

- Pacientes en el sistema: representa la cantidad de pacientes en el sistema.
- Pacientes en cada cola: permite observar el número de pacientes que se acumulan formando colas, en este modelo se consideran las colas por cada tipo de servicio, cola de traslado, cola de emergencia, cola de urgencia y cola de consulta.
- Tasa de utilización de los vehículos [porcentaje]: es una variable que permite identificar la disponibilidad que tiene un equipo durante una jornada de trabajo. Se define como la relación entre el tiempo de servicio y el tiempo total que labora un equipo de rescate.
- Número de llamadas atendidas por cada vehículo: es una medida que permite equilibrar las cargas de trabajo entre los equipos de rescate.

VARIABLES ENDÓGENAS: son las dependientes o salidas del sistema y son generadas por la interacción de las variables exógenas con las del estado, de acuerdo con las características de operación del último.

- Tiempo promedio de permanencia [minutos]: permite conocer el tiempo promedio que permanece el paciente en el sistema.
- Porcentaje de cancelación de los servicios.

Parámetros: son valores que son constantes durante la simulación de acuerdo a un criterio u objetivo específico.

- Porcentaje de pacientes para cada servicio [porcentaje]: los pacientes que ingresan al sistema se clasifican de acuerdo al tipo de servicio en pacientes de consulta, emergencia, urgencia y traslado.
- Porcentaje de pacientes que van al hospital [porcentaje]: porción del total de pacientes que requieren traslado a un hospital o centro de salud.
- Distancias entre cada ubicación [metros]: esta variable hace referencia a la distancia en metros entre los centroides de los barrios de los municipios del Valle de Aburrá.
- Velocidades de los vehículos [metros/minutos]: es el promedio de la velocidad de acuerdo al tipo de vehículo (ambulancias y vehículos de consulta) para cada hora del día.

5.2. Supuestos del modelo

Considerando que un modelo es una abstracción de la realidad y con el fin de mantener el nivel de complejidad apropiado que permita su uso en la práctica, es necesario establecer algunos supuestos que acotan el alcance del modelo y delimitan las conclusiones e inferencias que de él se obtienen. A continuación se presentan los supuestos que se asumieron en el modelo de simulación.

- Para el proceso de inicio de turno de los vehículos se realiza en el barrio donde se encuentra ubicado el centro comercial punto clave (barrio Colombia) el cual es la base del SEM de estudio.
- Las cancelaciones solo se realizan en las colas de espera y antes de la atención del servicio.
- En la localización de los eventos, vehículos y hospitales se supuso que estos se ubican en los centroides de los barrios.

No se tuvieron en cuenta:

- Los tiempos de limpieza o desinfección del vehículo, los cuales en algunos casos son necesarios después de la realización del traslado del paciente al centro de salud.
- Las fallas de los vehículos y ausentismo de la tripulación.
- Los traslados de pacientes en vehículos de consulta.
- Cambios de los vehículos cuando se ha realizado la asignación.
- Cambio de clasificación del evento que puede ser elaborado por el médico que realiza la atención del paciente.
- El servicio de atención telefónica, ya que este servicio no requiere de la utilización de un vehículo.

5.3. Modelo de simulación

A continuación se describen cada una de las etapas del modelo.

5.3.1. Recepción de la llamada y caracterización del evento.

En esta etapa del proceso de simulación inicialmente se genera la llamada y a continuación se caracteriza de acuerdo al tipo de servicio, probabilidad de ir al hospital, la ubicación del evento y por último, se asigna el tiempo que está dispuesto a esperar la entidad para ser atendida.

a. Generación de la llamada.

Se analizaron las diferencias entre las solicitudes de los días lunes, martes, miércoles y jueves (ver análisis estadístico **numeral 3.1.2.**) de los servicios de urgencias, emergencias, consultas y traslados por cada hora del día. En la

Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos. Se encontró que dicha diferencia tiene un comportamiento exponencial y en la

Tabla 3 se presenta el valor de la media (en minutos) de las distribuciones y el valor-p. Con respecto a este último, los valores mayores a 0.05 indican que los datos provienen de la distribución seleccionada con 95% de confianza, o en otras palabras, no hay evidencia estadística que refute que los datos no provienen de la distribución seleccionada con 95% de confianza.

Tabla 3: Ajuste de las diferencias entre llamadas de cada servicio

Hora del día	Distribución	Media (min)	Valor-p
0:00	Exponencial	15,69	0,98
1:00	Exponencial	15,47	0,42
2:00	Exponencial	19,31	0,63
3:00	Exponencial	14,35	0,79
4:00	Exponencial	16,69	0,24
5:00	Exponencial	12,47	0,57
6:00	Exponencial	7,96	0,44
7:00	Exponencial	5,34	0,84
8:00	Exponencial	4,47	0,16
9:00	Exponencial	3,80	0,55
10:00	Exponencial	3,71	0,67
11:00	Exponencial	4,21	0,87
12:00	Exponencial	4,46	0,23
13:00	Exponencial	3,97	0,82
14:00	Exponencial	4,21	0,21
15:00	Exponencial	4,32	0,12
16:00	Exponencial	4,19	0,54
17:00	Exponencial	4,09	0,42
18:00	Exponencial	3,40	0,14
19:00	Exponencial	3,55	0,92
20:00	Exponencial	4,35	0,57
21:00	Exponencial	5,89	0,56
22:00	Exponencial	8,50	0,89
23:00	Exponencial	11,68	0,28

b. Caracterización del evento

Para la caracterización del evento se tuvo en cuenta el tipo de servicio que se solicitó, la ubicación del mismo, el tiempo que estuvo dispuesto a esperar el paciente para ser atendido y la probabilidad de ser trasladado al hospital.

- Clasificación del tipo de evento

En la simulación se utilizaron los porcentajes de clasificación de los servicios, presentado en el análisis estadístico. Teniendo en cuenta esto, un 71 % de los pacientes solicitaron el servicio de consulta, un 24.4% solicitaron el servicio de urgencias, el 4.3% solicitaron el servicio de traslado y finalmente, el 0.3% solicitaron el servicio de emergencia.

- **Ubicaciones de los eventos.**

En la **Tabla 2** en la **sección 3.1.1.** se presentó el resumen de los resultados obtenidos en la georreferenciación por municipio. La mayor cantidad de solicitudes de servicios se identificó que fue en el barrio Patio Bonito, Medellín con un total de 8.983 (4.3%), seguido del barrio Laureles, Medellín con un total de 7.125 solicitudes (3.4%) y del barrio Colombia, Medellín con un total de 6.163 solicitudes (2.9%). En el **Anexo 1** se presentan los resultados obtenidos en la georreferenciación por cada municipio, barrio, comuna y cantidad de servicios solicitados. En la **Figura 16** se presenta un resumen por municipios de porcentaje de demanda del servicio.

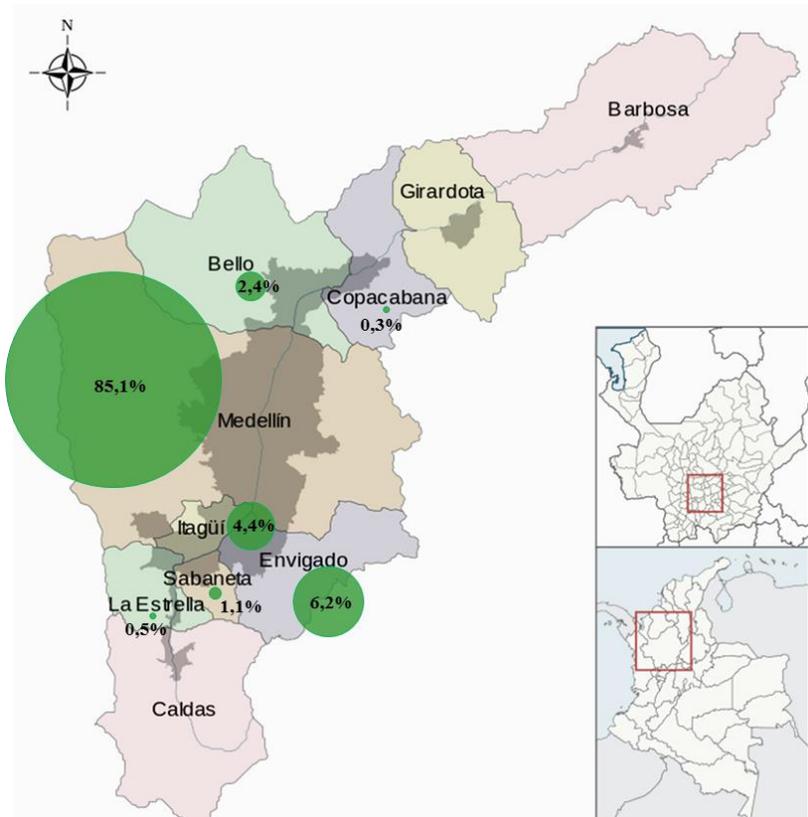


Figura 16: Mapa del Valle de Aburra con los porcentajes de la cantidad de servicios solicitados en cada municipio

- **Tiempo máximo de espera**

Según lo reportado en la base de datos, aproximadamente, un 5.5% del total de servicios solicitados cada año fueron cancelados. En la simulación solo se tuvieron en cuenta los servicios que fueron cancelados por el usuario, los que fueron por mejoría del usuario y los que fueron atendidos por otras instituciones. Teniendo en cuenta lo anterior, se analizaron los tiempos de espera de los pacientes hasta el momento en que realizaron la cancelación del servicio y estos se ajustaron a una distribución Weibull. En la **Tabla 4** se presentan los parámetros de la distribución.

Tabla 4: Ajuste tiempo de espera de los usuarios

Distribución	Parámetro 1	Parámetro 2	Valor-p
Weibull	forma=1,53776	escala=103,862	0.69
Normal	Media= 93,5829	Des.est.= 61,2158	0.14

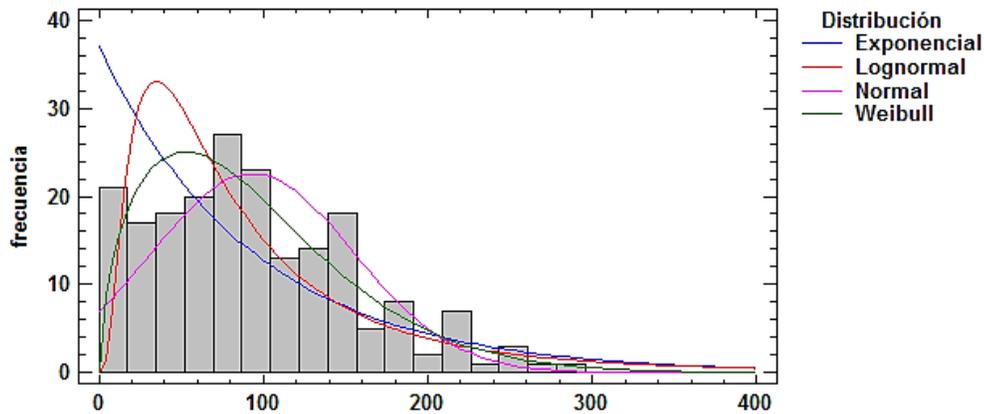


Figura 17: Ajuste de los tiempos de espera de los usuarios.

- Probabilidad de traslado al hospital

Del análisis de la información se encontró que del total de servicios solicitados al SEM de estudio aproximadamente un 4% requieren traslado a un hospital o centro de salud.

5.3.2. Asignación y despacho del vehículo.

La información relacionada con la asignación del vehículo se encuentra registrada en la base de datos. Según el análisis, un 57.6% de los vehículos utilizados para dar respuesta a la solicitud de servicios fueron vehículos de consulta, un 26.9% fueron ambulancias básicas y un 15,5% fueron ambulancias medicalizadas.

En la etapa de asignación y despacho del vehículo en el modelo de simulación se incluyó información relacionada con los vehículos y política de asignación.

- Características de los vehículos

En el modelo de simulación se trabajó con 2 ambulancias TAM, 3 ambulancias TAB y 11 vehículos de consulta, los cuales son los vehículos que prestan servicios en el Valle de Aburrá, según lo reportado en la base de datos. Para cada vehículo se incluyó la programación de los turnos y se realizó un análisis de las velocidades reportadas en el GPS. Además, se programaron 10 minutos al inicio de cada turno para el proceso de cambio de tripulación y dotación de medicamentos e insumos y 15 minutos al finalizar el turno para el regreso a la base del SEM de estudio.

En el SEM de estudio de acuerdo al análisis de la demanda que realiza el administrador anualmente, se programan los turnos de la tripulación y los vehículos. En la **Tabla 5** se presenta la programación de turnos que se incluyó en el modelo.

Tabla 5: programación de turnos para cada vehículo

Vehículo	Hora del día																							
	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
301	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Blue	Green																
302	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Blue	Blue	Yellow														
401	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey								
402	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Blue	Blue	Blue						
403	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey
101							Green	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	Blue						
102																								
103																								
104																								
105																								
106																								
107																								
108																								
109																								
110																								
111																								

Adicional a lo anterior, se realizó un análisis de las velocidades reportadas en el GPS por hora del día y tipo de vehículo. Dicho análisis permitió identificar que el promedio de velocidades reportadas en el GPS para los vehículos de consulta es menor que para las ambulancias, 29 km/h y 36 km/h, respectivamente.

En la **Figura 18** y **Figura 19** se observa el comportamiento de las velocidades reportadas en el GPS por los vehículos del SEM de estudio. En el modelo de simulación se crearon dos distribuciones para las velocidades de los vehículos, una para los vehículos de consulta y otra para las ambulancias. Estas distribuciones incluyen el promedio de velocidades para cada hora del día.

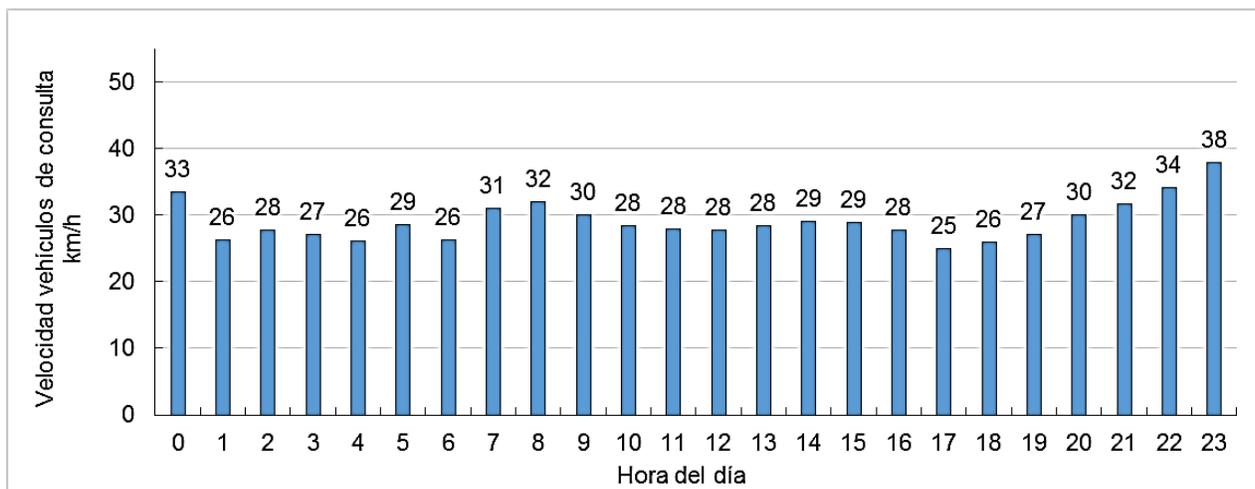


Figura 18: Velocidades de los vehículos de consulta por hora del día

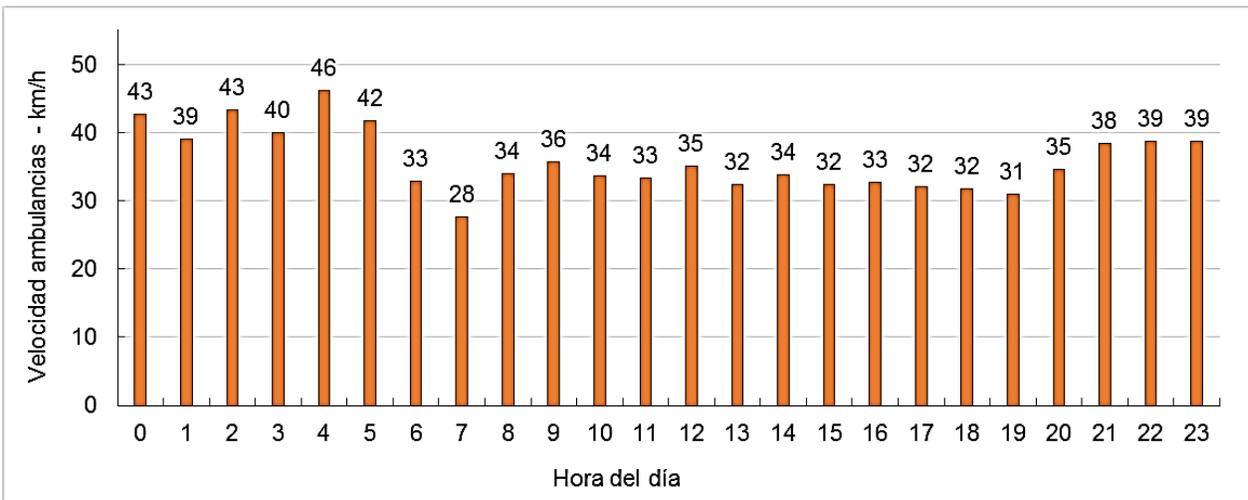


Figura 19: Velocidades de las ambulancias por hora del día

- Política de asignación del vehículo

La asignación del vehículo se realizó teniendo en cuenta el tipo de servicio que se está atendiendo. Para los servicios que requieren traslado al hospital, se asigna la ambulancia TAM o TAB disponible más cercana a la ubicación del paciente. En los otros casos se asigna el vehículo (consulta, TAM o TAB) más cercano. En literatura se encontró que esta política, el vehículo disponible más cercano, es la más utilizada en la asignación de vehículos [2], [20], [22], [25]–[27].

5.3.3. Atención y/o traslado al hospital.

Durante esta etapa del proceso, se calcularon el tiempo de servicio de un evento el cual incluye los tiempos en cola hasta que se le asigna un vehículo, el tiempo de viaje a la ubicación del paciente, el tiempo de atención en el lugar del evento y si es necesario el tiempo de viaje al hospital y el tiempo de traslado.

- Tiempos de viaje a la ubicación del paciente

Para evaluar la distancia entre dos ubicaciones, por ejemplo, entre la ubicación del paciente y la del vehículo, se utilizó una matriz de las distancias en metros desde los centroides de 444 barrios de los diferentes municipios del Valle de Aburrá.

Dicha matriz se construyó utilizando las coordenadas (latitud, longitud) de los centroides de los barrios y realizando la consulta de las distancias en Google Maps. Además, se estimó pertinente considerar la dirección de las calles con el fin de obtener mejores estimados de los tiempos de viajes, por lo tanto no se recorre el mismo trayecto ida-regreso entre dos barrios, por lo anterior, la matriz de distancia no es simétrica.

Con las distancias entre la ubicación del vehículo y el paciente y las velocidades de los vehículos de acuerdo a la hora del día, se calcularon los tiempos de viaje.

- **Tiempo de atención en el lugar de la escena**

Aunque el SEM de estudio cuenta con un tiempo estándar para la atención médica dependiendo del tipo de servicio, para la asignación del tiempo de atención en el modelo de simulación, se tuvo en cuenta la información de la base de datos del servicio, los cuales se clasificaron de acuerdo a tipo de evento.

Se realizó un análisis de ANOVA del tiempo de atención de un servicio, y se encontró que el tiempo de atención se ve afectado por el tipo de vehículo que se utiliza para dar respuesta y el tipo de servicio que se presta. Por lo anterior, el ajuste de las distribuciones se realizó teniendo en cuenta el tipo de vehículo y el tipo de servicio. Ver **Tabla 6**.

Tabla 6: Tiempo de atención (min).

	Distribución	Media	Desviación estándar	Valor-p
Vehículo consulta				
Consulta	Lognormal	23,5489	8,52313	0,136
Traslado	Lognormal	48,5884	32,1462	0,99
Emergencia	Lognormal	40,3385	41,9908	0,31
Urgencia	Lognormal	41,0728	17,6001	0,065
Ambulancia TAM				
Consulta	Lognormal	23,1177	9,97832	0,63
Traslado	Lognormal	79,8578	53,7166	0,52
Emergencia	Lognormal	36,692	28,8564	0,65
Urgencia	Lognormal	41,2911	22,5549	0,07
Ambulancia TAB				
Consulta	Lognormal	22,8368	8,12767	0,43
Traslado	Lognormal	68,7897	54,5811	0,36
Emergencia	Lognormal	28,3096	27,6745	0,86
Urgencia	Lognormal	36,8675	19,0353	0,07

- **Tiempo de viaje al hospital y tiempo de traslado.**

Cuando se genera un traslado al hospital en el modelo de simulación se genera el lugar al que se realiza el traslado, posterior a esto, se calcula la distancia desde la ubicación del paciente al centro de salud y por último, se calcula el tiempo que dura el proceso de traslado y entrega del paciente. Para la asignación del tiempo de viaje al hospital en el modelo de simulación, se utilizó la matriz de distancias entre centroides de los barrios y las velocidades de los vehículos de acuerdo a la hora del día, **Figura 18** y **Figura 19**. Del análisis realizado en el **numeral 3.3 (Figura 20)**, se identificaron los lugares a los que generalmente se trasladan los pacientes del SEM de estudio.

Con relación al tiempo que dura el proceso de traslado, se realizó un análisis de la información reportada en la base de datos y se encontró de estos tiempos se ajustan a una distribución exponencial con media 154.15 min (valor p = 0.068). Ver **Figura 20**.

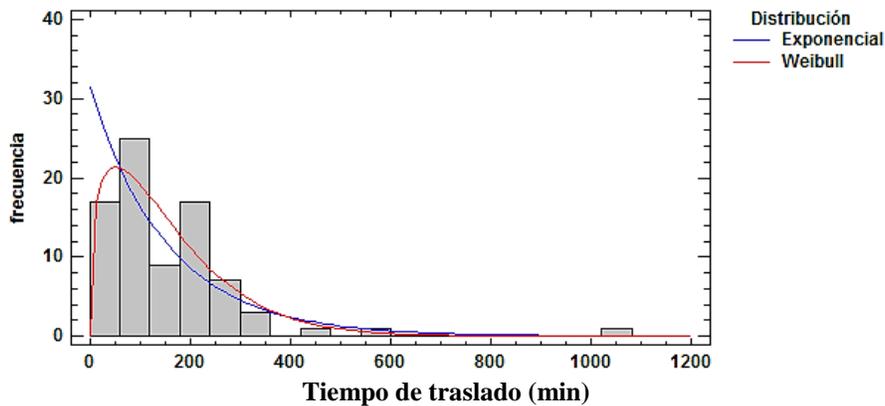


Figura 20: Ajuste tiempos de traslado al hospital.

Una vez que se ha construido el modelo de simulación es importante verificar, por un lado, que el conjunto de ecuaciones no contiene errores y validar, por otro, que el modelo responde de forma fiable a las especificaciones planteadas en la fase de análisis del modelo conceptual [58]. Teniendo en cuenta esto, a continuación se presenta la verificación y validación del modelo de simulación del problema de relocalización de los vehículos del SEM de estudio.

5.4. Verificación del modelo de simulación.

Las pruebas de verificación deben mostrar si el modelo de simulación corresponde a la descripción del modelo conceptual, que el modelo no tiene errores de programación y que su implementación y estructura son correctas [58], [59], para ello se han realizado diferentes pruebas que pretenden estimar la correcta construcción del modelo mediante los resultados arrojados por el modelo en cada una de las condiciones evaluadas. Para estas pruebas se simulan una semana de cuatro días.

5.4.1. Pruebas de continuidad o condiciones iniciales

Consisten en correr la simulación varias veces con ligeras variaciones en los parámetros de entrada o condiciones iniciales del modelo para ver si esto genera cambios lógicos y resultados esperados. Para un parámetro dado, un pequeño cambio en su valor inicial generalmente produce solo pequeños cambios en la salida. Un cambio brusco en la salida debe ser investigado [60], [61].

Se han modificado las condiciones iniciales de elementos como la distribución de la demanda, los porcentajes de clasificación de los servicios y los tiempos de atención. Luego, se verificó para cada uno de los cambios el impacto que tienen esas modificaciones en algunos elementos relevantes del modelo. Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 7**.

Es de notar que el aumento en un 50% en las tasa de llegada produjo un aumento en la cantidad de servicios cancelados el cual paso de un 5.6% a un 35%. Adicionalmente el aumento de la demanda se ve reflejado en el aumento de la cantidad de pacientes en cada una de las colas de los cuatro tipos de servicios, en el aumento significativo del porcentaje de utilización de los vehículos y en la disminución de la cantidad de servicios atendidos por cada tipo de servicio en el tiempo que tiene el SEM de estudio como estándar.

Con relación a los cambios en los porcentajes de la demanda, para los cuales se asignó un 25% para cada uno de los cuatro tipos de servicios, aunque la cantidad de servicios solicitados es la misma se produjo un aumento en el porcentaje de servicios cancelados y en las colas de espera. Además se presentó un aumento en el porcentaje de utilización de las ambulancias y una disminución en el porcentaje de utilización de los vehículos de consulta. Todo lo anterior posiblemente se produjo debido a que solo se realizan traslados de pacientes en ambulancias y se maneja prioridad de atención de acuerdo al tipo de servicios, de la siguiente manera, primero se atienden las emergencias, luego las urgencias, seguido de las consultas y traslados.

Por último, cuando se aumentó el tiempo de atención de cada paciente a 60 minutos, se produjo un aumento en el número de cancelaciones. Del total de servicios solicitados un 55% no espero la prestación del servicio, esto debido a que los tiempos de espera eran altos. También, se presentó una disminución en los porcentajes de utilización de los vehículos, debido al alto porcentaje de cancelaciones.

De lo anterior podemos concluir que los cambios que se realizaron en las condiciones iniciales del modelo generaron resultados esperados.

Tabla 7: Resultados prueba de continuidad.

Parámetro	Condiciones iniciales	Aumento en la distribución de la demanda (50%)	Cambios en el porcentaje de clasificación de los servicios (25% cada uno)	Aumento en los tiempos de atención (60 minutos)
Número de entidades que entran [pacientes]	1030	2064	1030	1030
Número de entidades que son atendidas [pacientes]	957	1324	698	445
Tiempo máximo en la cola emergencias [minutos]	0,4	1	124,8	1
Tamaño máximo de cola de emergencias [minutos]	1	1	8,8	1
Tiempo máximo en la cola Urgencias [minutos]	20,1	27,7	166,7	63,2
Tamaño máximo de cola de Urgencias [pacientes]	3,4	6	8,9	6,6
Tiempo máximo en la cola traslados [minutos]	130	291	280	266,7
Tamaño máximo de cola de traslados [pacientes]	3,2	6,6	13,5	4,3
Tiempo máximo en la cola consultas [minutos]	73,2	154,3	198,4	243,8
Tamaño máximo de cola de consultas [pacientes]	11,5	41,4	13,5	27,8
Porcentaje promedio de cancelaciones	5,9%	35%	31%	55,7%
Porcentaje de pacientes de emergencia atendidos en menos de 10 minutos	0%	0%	12%	0%
Porcentaje de pacientes de urgencias atendidos en menos de 15 minutos	52%	40%	27%	16%

Porcentaje de pacientes de consulta atendidos en menos de 20 minutos	56%	45%	34%	75%
--	-----	-----	-----	-----

5.4.2. Pruebas de degeneración o condiciones extremas.

Consiste en chequear el modelo usando valores extremos. A pesar de que estos valores extremos no representen casos típicos, pueden ayudar a encontrar errores en los cuales no se hubiera pensado de otra forma [60], [61]. En esta prueba se utilizaron valores extremos la entrada de demanda al sistema. Se simuló con una demanda igual **1 paciente por minuto** y una **demanda igual a cero**, los resultados del modelo son congruentes, ver **Tabla 8**. En el primer escenario, aumenta significativamente el porcentaje de cancelaciones en un 78%, las colas para cada tipo de servicio y el porcentaje de utilización de los vehículos. En el segundo escenario, no se registran entradas en el modelo, los tiempos de espera de las colas y la tasa de utilización de los vehículos son cero.

De lo anterior podemos concluir que los cambios en el modelo, con el uso de condiciones extremas, el modelo generó resultados esperados.

Tabla 8: Resultados de degeneración o condiciones extremas.

Variables	Condiciones extremas	
	Demanda 1440 por día (1 paciente cada minutos)	Demanda igual a cero
Número de entidades que entran [pacientes]	5759	0
Número de entidades que son atendidas [pacientes]	1219	0
Tiempo máximo en la cola emergencias [minutos]	2,3	0
Tamaño máximo de cola de emergencias [pacientes]	1,2	0
Tiempo máximo en la cola Urgencias [minutos]	145,6	0
Tamaño máximo de cola de Urgencias [pacientes]	29,6	0
Tiempo máximo en la cola traslados [minutos]	337	0
Tamaño máximo de cola de traslados [pacientes]	10,9	0
Tiempo máximo en la cola consultas [minutos]	404,2	0
Tamaño máximo de cola de consultas [pacientes]	87,1	0
Porcentaje promedio de cancelaciones	78,4%	0

5.4.3. Trazado

Un trazado es una lista de eventos ordenada por tiempo y sus variables asociadas que permite observar cómo se está comportando la simulación [60], [61]. Debido a que los trazados representan un costo de procesamiento adicional, se deben incluir como una opción que se pueda activar o desactivar. El trazado se puede hacer a diferentes niveles de detalle y el usuario debe poder seleccionar el nivel que desee.

Para realizar esta prueba de verificación, junto con la herramienta Monitor Simulation (Advanced) de simul8 se observaron cada uno de los eventos programados y los tiempos en que estos debían ocurrir, esto permitió observar que el comportamiento de la simulación era acorde con lo programado, ver **Figura 21**.

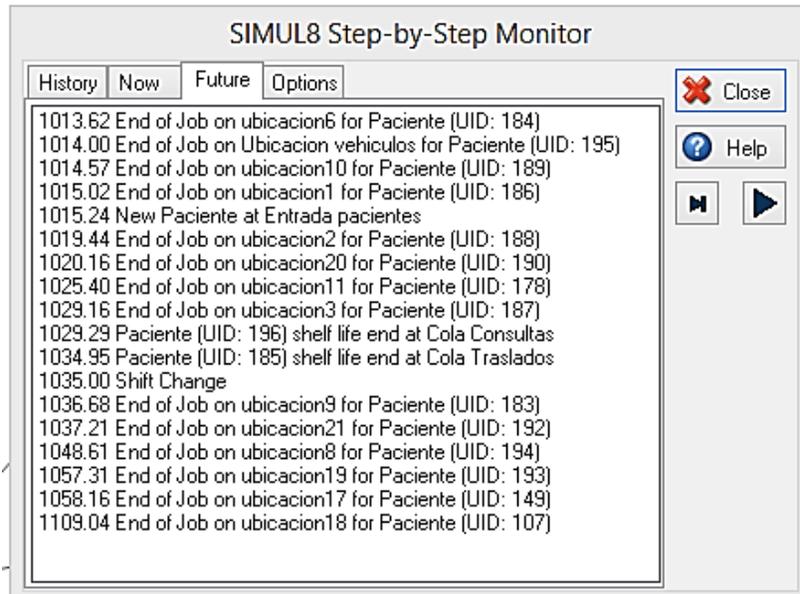


Figura 21: Prueba de trazado: Eventos -simul8.

Una vez que el modelo de simulación se ha verificado, se debe determinar si es una correcta representación del sistema real.

5.5. Validación del modelo de simulación.

La validación permite determinar si el modelo de simulación conceptual es una representación adecuada del sistema que se estudia. Si un modelo está validado, las decisiones hechas con el modelo son similares a las de la experiencia física. [59]–[61]. Por lo tanto, la validación es un proceso con el cual se pretende mejorar gradualmente la confianza en el modelo.

Cuando se tiene confianza en la capacidad del modelo para reproducir los comportamientos previstos del sistema, se puede utilizar como herramienta de análisis y aprendizaje, así como, para ofrecer soluciones al problema, facilitar mejoras y proponer recomendaciones. A continuación se presentan las técnicas de validación que se utilizaron:

5.5.1. Validación con personal de Coomeva Emergencias Médicas

Esta técnica de validación consiste en tener personas con conocimientos sobre el comportamiento del SEM de estudio que evalúen la concepción y el comportamiento del modelo en comparación con el sistema real [4], [39].

Para la aplicación de esta técnica se presentó los componentes del modelo, la información que se utilizó para su construcción y se explicó el funcionamiento del mismo, al coordinador del SEM de Coomeva



Emergencias Médicas, el cual es el encargado de administrar los recursos del servicio y programar su disponibilidad.

Entre los comentarios del coordinador están que el modelo refleja el comportamiento del SEM de estudio. También se habló que existen muchas variables externas al servicio, que involucran algunas situaciones que se presentan en el día a día y que no son posibles modelar. Por ejemplo: el inicio tardío de un turno por demora en el último servicio asignado o debido a que un integrante de la tripulación llega tarde al turno.

Con relación al proceso de asignación del lugar de espera el servicio en los últimos meses está aplicando una política diferente para una de las ambulancias. Siempre debe haber una ambulancia disponible en el Hospital General (Centro), la cual se utiliza cuando solicitan una urgencia y las otras están ocupadas atendiendo un evento.

Además, se discutió sobre la necesidad de conocer y registrar algunos de los eventos que se presentan en servicio y que no fueron posible modelar debido a la falta de información, como por ejemplo, averías de las ambulancias, proceso de limpieza y desinfección de los vehículos, descanso de la tripulación y abastecimiento de combustible.

5.5.2. Test de Turing

Este test consiste en presentar a los expertos (conocedores del servicio de emergencia médica) datos reales y simulados, esperando que ellos puedan discriminar cuales datos son reales y cuales simulados [58].

Los resultados de algunas variables fueron presentados al coordinador del SEM de estudio, el cual tiene un alto conocimiento y experiencia en el proceso de prestación de servicios de emergencias médicas de Coomeva Emergencias Médicas. Entre las variables que se presentaron se encuentran la cantidad de servicios solicitados por día, los porcentajes de clasificación de estos servicios por tipo de evento, los porcentajes de los servicios atendidos por cada tipo de vehículo y los porcentajes de servicios atendidos y los cancelados.

Al revisar los resultados anteriores, el coordinador no logro discriminar los datos que son del análisis de los históricos (reales) y los simulados. Por lo tanto se puede concluir que los resultados del modelo reflejan el comportamiento del sistema real.

5.5.3. Validación paso a paso

En esta técnica se realiza un seguimiento de los movimientos de los vehículos y de la ocurrencia de etapa, con el fin de validar la exactitud de la lógica del modelo [2], [4].

En el modelo se realizó seguimiento a diferentes variables, se observaron los tiempos de viaje, la selección del vehículo, las distancias entre localizaciones, los cambios en las ubicaciones de los vehículos, las velocidades utilizadas para el cálculo de los tiempos de viaje y la selección del centro de salud.

En el modelo se observó el comportamiento de los cambios de ubicaciones de los vehículos, cuando atendía un paciente en el lugar del evento y cuando realizaba el traslado del paciente al centro de salud.

Además, se evaluó si internamente el modelo estaba seleccionando de forma adecuada las distancias entre dos ubicaciones, esto se realizó debido a que esta información es importante para calcular el tiempo de atención de un servicio. Cada vez que se asignaba un vehículo aparecía un pantallazo que indicaba el número del vehículo seleccionado y la distancia entre el paciente y dicho vehículo. Esta información se comparó con la matriz de distancias y se confirmó que los resultados eran acordes con lo programado en el modelo.

Todo esto permitió concluir que el modelo está realizando estas actividades de acuerdo a como se programó.

5.5.4. Validación con datos históricos

Si existen datos históricos es posible utilizar una parte de los datos para construir el modelo y los datos restantes se utilizan para determinar si el modelo se comporta como lo hace sistema [2], [4], [21], [36], [39], [48], [50]. Teniendo en cuenta esto, se utilizaron los datos del año 2014 para la comparar los resultados que arroja el modelo con los datos reales del sistema.

Para la aplicación de esta técnica de validación se utilizaron los resultados relacionados con la cantidad de servicios atendidos por semana. Para comparar los datos históricos con los simulados se utilizó el MAPE o Media absoluta del porcentaje de error, el cual mide el tamaño del error en términos porcentuales. Con relación a la cantidad de servicios atendidos por semana se evaluó el MAPE de 102 semanas del año comparados con los resultados de la simulación y como resultado se obtuvo en MAPE de 5.5%. Lo que indica que la cantidad de demanda simulada es acertada en un 94.5%

Se utilizó la misma metodología para comparar los tiempos de servicio de 10 semanas del sistema real con los simulados y se obtuvo como resultado un MAPE de 3.8% en promedio.

Estos resultados nos indican que la cantidad de servicios solicitados por semana y los tiempos de servicio simulados en el modelo reflejan muy bien el comportamiento del sistema real, esto debido a que el valor del MAPE es pequeño.

5.6. Conclusiones de la construcción, validación y verificación del modelo de simulación.

Inicialmente se definieron las variables que se utilizaron en el modelo de simulación de eventos discretos del problema de relocalización de los vehículos de Coomeva Emergencias Médicas y se presentaron los supuestos que se tuvieron en cuenta en el modelo. Posterior a esto se presentó el diagrama del modelo de simulación y se describieron las tres etapas en las que se divide el modelo, la primera es la recepción de la llamada y caracterización del evento, la segunda es la asignación y despacho de vehículo y por último, la atención y traslado al hospital. Todo lo anterior permitió analizar cada uno de los componentes del modelo. Teniendo en cuenta la información presentada anteriormente a continuación se describen las conclusiones:

Recepción de la llamada y caracterización del evento:

- Para la generación de la llamada se observó que las distribuciones de tiempo entre llamadas se modelan como una distribución exponencial cuyo parámetro varía dependiendo de la hora del día.
- Con relación a la clasificación del evento en el modelo se utilizó los resultados obtenidos del análisis estadístico en el cual un 71 % de los pacientes solicitaron el servicio de consulta, un 24.4% solicitaron el servicio de urgencias, el 4.3% solicitaron el servicio de traslado y finalmente, el 0.3% solicitaron el servicio de emergencia.



- Se realizó un análisis de los tiempos de espera de los pacientes hasta el momento en que realizaron la cancelación del servicio y estos se ajustaron a una distribución Weibull.

Asignación y despacho de vehículo:

- Con el uso de la información de las direcciones reportadas en la base de datos, 207161 direcciones fueron georreferenciadas utilizando el API de Google Maps y el software ArcGIS.
- En el modelo se caracterizaron los vehículos teniendo en cuenta los turnos de servicio, el tipo de vehículo y las velocidades. Con relación a esta última característica, se realizó un análisis de las velocidades reportadas en el GPS de acuerdo al tipo de vehículo y se identificó que en promedio para los vehículos de consulta la velocidad fue menor, que para las ambulancias, 29 km/h y 36 km/h, respectivamente.

Atención y traslado al hospital:

- Se realizó un análisis de ANOVA del tiempo de atención de un servicio, y se encontró que el tiempo de atención se ve afectado por el tipo de vehículo que se utiliza para dar respuesta y el tipo de servicio que se presta. Por lo anterior, el ajuste de las distribuciones se realizó teniendo en cuenta el tipo de vehículo y el tipo de servicio.
- Con relación al tiempo que dura el proceso de traslado, se realizó un análisis de la información reportada en la base de datos y se encontró de estos tiempos se ajustan a una distribución exponencial con media 154.15 min.

Una vez realizado el modelo de simulación se realizó la verificación y validación del mismo. Para esto se utilizaron técnicas de verificación como pruebas de prueba de continuidad o condiciones iniciales, pruebas de degeneración o condiciones extremas y prueba de trazado. De la verificación podemos concluir que ante los cambios realizados el modelo genero resultados esperados. Para la validación se utilizaron técnicas como validación con el personal del Coomeva Emergencias Médicas, test de Turing, validación paso a paso y validación con datos históricos. De estas pruebas podemos concluir que:

- Entre los comentarios del coordinador están que el modelo refleja el comportamiento del SEM de estudio. También se habló que existen muchas variables externas al servicio, que involucran algunas situaciones que se presentan en el día a día y que no son posibles modelar. Por ejemplo: el inicio tardío de un turno por demora en el último servicio asignado o debido a que un integrante de la tripulación llega tarde al turno.
- La cantidad de servicios solicitados por semana y los tiempos de servicio simulados en el modelo reflejan muy bien el comportamiento del sistema real, esto debido a que el valor del MAPE es pequeño.

6. POLÍTICAS DE RELOCALIZACIÓN

6.1. Descripción de las políticas simuladas

Se diseñaron cuatro políticas para la ubicación de los vehículos después de finalizar la prestación de un servicio, teniendo en cuenta la opinión de los expertos del Servicio de Emergencias Médicas de estudio, así como las sugerencias de las personas que conforman el grupo de trabajo y los hallazgos de la revisión de la literatura. Para la aplicación de estas políticas se consideró que la asignación de la ubicación de un vehículo solo se puede realizar después de terminar la prestación de un servicio. Es decir, no se tuvieron en cuenta en la relocalización los vehículos inactivos en las bases y en movimiento. Adicionalmente, a una base solo se le puede asignar un solo vehículo. A continuación se describen estas políticas.

- **Política 1: Esperar en el barrio de la última atención.** Esta política es con la que actualmente está trabajando el SEM de estudio y consiste en que cuando un vehículo acude a prestar un servicio en un determinado barrio, debe permanecer en dicho barrio una vez finalizado el servicio. Es decir, cada uno de los barrios donde se realiza la solicitud de un servicio es utilizado como base. El vehículo solo puede desplazarse fuera de ese barrio si se le asigna un servicio que así lo requiera. En adelante se utilizará la abreviación P1 para referirse a esta política.
- **Política 2: Ir a la base prioritaria más cercana.** Dado que el SEM de estudio cuenta con 16 vehículos para la prestación de los servicios, se consideró la posibilidad establecer 16 bases, las cuales estarían ubicadas en los 16 barrios con mayor demanda. Una vez finalizado la prestación de un servicio, se identifica dentro de la lista de las bases prioritarias cuál está disponible y que a la vez sea la más cercana. Con esta política se busca tener siempre vehículos disponibles cerca de los lugares donde es más probable la solicitud de servicios, de tal manera que se pueda mejorar el tiempo de respuesta. También se busca disminuir los tiempos de relocalización. En la **Tabla 9** se presenta un resumen de las bases seleccionadas. En adelante se utilizará la abreviación P2 para referirse a esta política.

Tabla 9: Bases prioritarias. Ver anexo 1 para consultar el nombre de los barrios.

Número de base	Número del Barrio	Comuna	Número de base	Número del Barrio	Comuna
1	89	12	9	240	14
2	93	12	10	255	11
3	101	16	11	257	16
4	104	16	12	259	15
5	105	16	13	262	15
6	226	14	14	270	11
7	227	14	15	271	11
8	238	14	16	336	Envigado

- **Política 3: Disponer siempre que sea posible de un vehículo en cada una de las tres comunas con mayor demanda.** Por recomendación de los expertos del SEM de estudio se establecieron tres comunas prioritarias, adicional a los 16 barrios prioritarios descritos en la política anterior, las cuales se seleccionaron teniendo en cuenta la demanda. Como se observa en la **Tabla 9** las comunas con más demanda son el Poblado-14, Belén-16 y Laureles Estadio-11. Una vez seleccionadas estas tres comunas, se estableció como política de relocalización que cuando un vehículo finaliza un servicio, el despachador debe verificar si en dichas comunas hay por lo menos un vehículo disponible. De no ser así, el vehículo que finaliza el servicio debe ser asignado al barrio más cercano de esa comuna prioritaria y que a su vez también hace parte del listado de barrios prioritarios descrito en **Tabla 9**. Cuando hay por lo menos un vehículo disponible en cada una de las comunas prioritarias se aplica P2. En adelante se utilizará la abreviación P3 para referirse la política 3.
- **Política 4: Cada vehículo tiene una base fija.** En esta política se asignó a cada uno de los vehículos una base a la cual deben regresar después de terminar la prestación de un servicio. Mediante la georreferenciación de los servicios prestados por el SEM de estudio, se identificaron los 16 barrios donde hay una mayor demanda y se asignó un vehículo a cada barrio. En la **Tabla 10** se presenta las bases que fueron asignadas a cada uno de los vehículos. Como se definió en la revisión de la literatura este tipo de política no corresponde a una política de relocalización sino de localización, pero resulta útil considerarla para efectos comparativos.

Tabla 10: Ubicación fija de los vehículos. Ver anexo 1 para consultar el nombre de los barrios.

Número de vehículo	Barrio/Base	Comuna	Número de vehículo	Barrio/Base	Comuna
1	238	14	9	93	12
2	226	14	10	336	Envigado
3	227	14	11	262	15
4	257	16	17	240	14
5	105	16	18	101	16
6	104	16	19	255	11
7	270	11	20	89	12
8	271	11	21	259	15

6.2. Análisis de las políticas de relocalización

Para analizar los resultados de la simulación de las políticas descritas anteriormente se compararon diferentes medidas de desempeño que nos permitieron evaluar el impacto de las políticas diseñadas sobre el servicio. Las medidas de desempeño que se analizaron fueron los porcentajes de cancelaciones, los tiempos de servicio, los tiempos de esperas y los tiempos de viaje.

6.2.1. Porcentajes de cancelaciones

Inicialmente se compararon los porcentajes de cancelaciones de servicios. Como se puede observar en la **Figura 22**, el número de cancelaciones aumentó cuando se aplicaron políticas diferentes a la actual del SEM de estudio. Al comparar el porcentaje promedio de cancelaciones de P1 con P2, P3 y P4 se encontró un aumento de un 8.1%, 14.7% y 53,7%, respectivamente. Esto posiblemente se presentó debido a que en P2, P3 y P4 los vehículos deben trasladarse a nuevas ubicaciones una vez terminado la prestación de un servicio, incrementando el tiempo en que no están disponibles los vehículos.

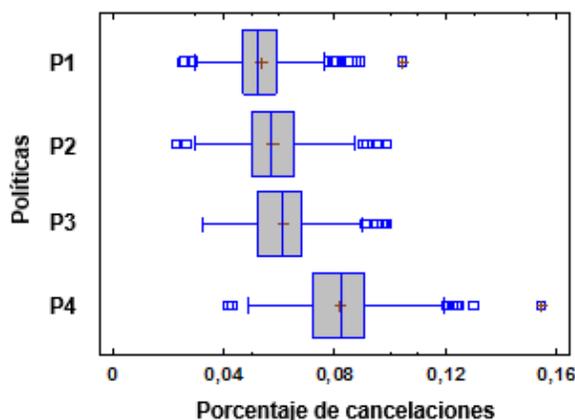


Figura 22. Gráfico de caja y bigote: Porcentajes de cancelaciones (resultados de 1000 corridas)

Al realizar el análisis de varianza (ANOVA) de los porcentajes de cancelaciones en cada uno de las políticas evaluadas, se encontró que existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los 4 grupos de variables con un nivel del 95,0% de confianza. Ver **Tabla 11**

Tabla 11: Tabla ANOVA porcentajes de cancelados

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,481752	3	0,160584	1104,25	0
Intra grupos	0,581111	3996	0,000145423		
Total (Corr.)	1,06286	3999			

Como se mencionó en la sección 5.2. (Supuestos del modelo), en el modelo las cancelaciones solo se pueden realizar en dos momentos. El primero es antes de la asignación del vehículo, cuando las entidades se encuentran en la cola de espera (cancelaciones tipo 1). Las cancelaciones que tienen lugar en esta etapa del proceso se deben a que no existen vehículos disponibles ya que están prestando un servicio o están en proceso de trasladarse a la ubicación que se le asigne (P2 o P3) o que tenga asignada (P4). El segundo momento en que se puede realizar una cancelación es cuando el vehículo llega al lugar del evento (cancelación tipo 2). Las cancelaciones que tienen lugar en esta etapa se deben a que los vehículos asignados tardan mucho tiempo en llegar a la ubicación del paciente.

En la **Tabla 12** se presenta el porcentaje de cancelaciones en la aplicación de cada política identificando el tipo de cancelación. Como se puede observar, P1 presenta menores cancelaciones tipo 1 mientras que P4 presenta las mayores. De acuerdo a lo discutido en el párrafo anterior, esto se debe a que a diferencia de P1, en el resto de políticas se involucra un tiempo en el cual el vehículo debe trasladarse a la ubicación que se le asigne (P2 o P3) o que tenga asignada (P4) y por lo tanto los vehículos no están disponibles inmediatamente finalizan la prestación de un servicio.

Con respecto a las cancelaciones tipo 2, en P1 se presenta mayores cancelaciones que en el resto de políticas. Esto se debe a que la ubicación de los vehículos una vez finalizado la prestación de un servicio no es la más adecuada y entonces los vehículos tardan más tiempo en trasladarse a la ubicación de un nuevo servicio. Por otro lado, para el resto de políticas, las cancelaciones son menores. Sin embargo, esta mejora con respecto a P1 de hasta 1,1 puntos porcentuales no puede atribuirse directamente a una mejor ubicación de los vehículos, como a continuación se discute.

Los porcentajes registrados en la **Tabla 12** se calcularon con respecto a una misma base, la cual es la demanda total que entra al sistema. Por lo tanto la disminución registrada para las cancelaciones tipo 2 en P2, P3 y P4 se puede deber a que las llamadas a las cuales se les asignan un vehículo disminuyen como consecuencia del mayor porcentaje de cancelaciones tipo 1.

Tabla 12: Porcentajes de cancelaciones antes de la asignación del vehículo (tipo 1) y después de la asignación (tipo 2)

	Porcentajes de cancelaciones			
	P1	P2	P3	P4
Cancelaciones tipo 1	1,6%	2,7%	3,1%	5,6%
Cancelación tipo2	3,8%	3,1%	3,0%	2,7%

Para analizar si las mejoras registradas en las cancelaciones tipo 2 cuando se aplica P2, P3 o P4 con respecto a P1 se debe a la mejor localización de los vehículos, se recalculó el porcentaje de cancelaciones tomando como base las llamadas a las que se le asigna un vehículo. Es decir no se tienen en cuenta para el cálculo las llamadas que salen del sistema en la cancelación tipo 1. En la **Tabla 13** se registran los resultados obtenidos con esta consideración y se observa que el comportamiento es similar a obtenido

en la **Tabla 12**. Esto indica que las mejoras registradas aplicando las políticas P2, P3 y P4 al parecer si se deben a una mejor ubicación de los vehículos con respecto a P1.

Tabla 13: Porcentajes de cancelaciones tipo 2 son tener en cuenta las llamadas que salen del sistema en la cancelación tipo 1.

	Porcentajes de cancelaciones con base a las llamadas a las que se le asignan un vehículo			
	P1	P2	P3	P4
Cancelación tipo2	3,9%	3,2%	3,1%	2,9%

De lo discutido anteriormente se puede concluir que con respecto al porcentaje de cancelaciones la mejor política es P1. Sin embargo es importante señalar que el modelo realizado en el presente trabajo no considera el hecho de que un vehículo puede ser asignado a un servicio en el tiempo en el cual está trasladándose hasta la nueva base. En la práctica considerar esta posibilidad puede tener un impacto positivo en el comportamiento del sistema ya que permitiría la disminución de las cancelaciones tipo 1 y tipo 2. Adicionalmente, de las discusiones con las **Tabla 12** y **Tabla 13** se podría pensar en una política adicional en la que se realicen relocalizaciones, pero cuando una relocalización exceda un tiempo T dado, el vehículo permanezca en el barrio donde prestó el último servicio. Es decir, considerar la combinación de P1 con P2, P3 o P4.

Finalmente, con respecto a las cancelaciones, una forma de disminuirlas es incluir en el proceso una actividad adicional en la cual se realice una llamada al paciente antes o durante el traslado del vehículo al lugar del evento. Esto con el fin de identificar si el paciente está dispuesto a esperar la llegada del vehículo. En caso en que el paciente no esté dispuesto a esperar, se evita el desplazamiento del vehículo y es posible asignarlo a un paciente que se encuentre en la cola de espera.

6.2.2. Tiempos de servicio

Se analizaron por separado cada uno de los componentes del tiempo de servicio los cuales son el tiempo de espera, el tiempo de atención, el tiempo de viaje y el tiempo de relocalización.

Debido a que el tiempo de atención se calcula con distribuciones de acuerdo al tipo de servicio y al tipo de vehículo y estas distribuciones no cambian de acuerdo a la política que se está modelando, el comportamiento es muy similar en cada una, como se muestra en la **Figura 23**.

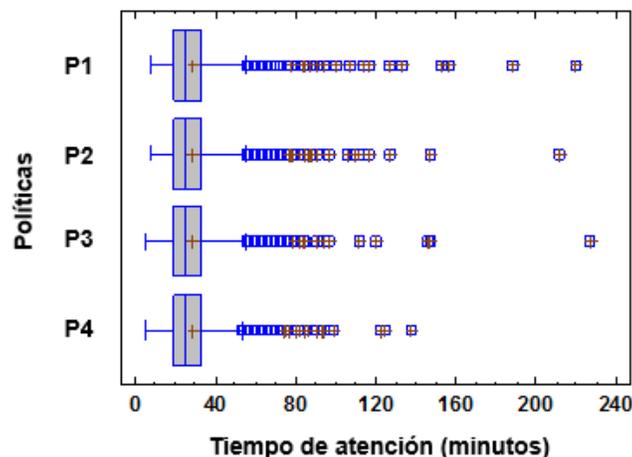


Figura 23: Tiempo de atención (resultados de 1000 corridas)

A diferencia del tiempo de atención, en el modelo el tiempo de viaje depende de las características del sistema en el momento en el que se calcula. En la **Figura 24** se presenta los tiempos de viaje hasta la ubicación del paciente para las 4 políticas. Se encontró que algunas de las entidades en P1 tenían tiempos de viaje más grandes comparados con los tiempos de viaje de las demás políticas. Esto puede atribuirse a que en P2, P3 y P4 se tiene una mejor ubicación de los vehículos y explicaría la disminución en el porcentaje de cancelaciones tipo 2 con respecto a P1 observado en la **Tabla 13**.

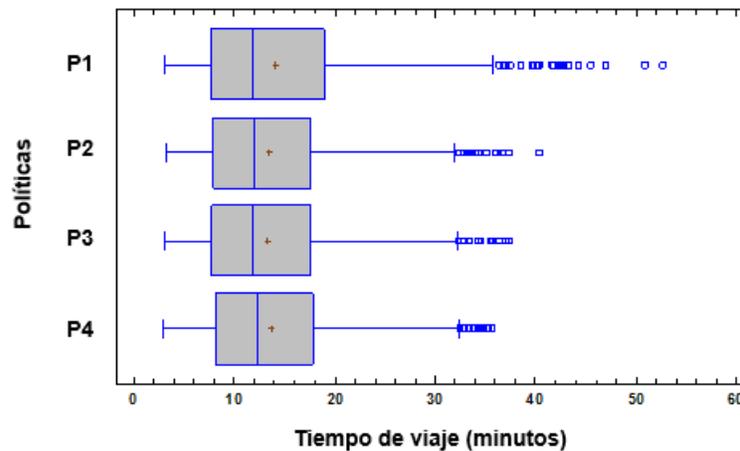


Figura 24: Tiempo de viaje a la ubicación del paciente (resultados de 1000 corridas)

Adicional a lo anterior, se analizaron los tiempos de viaje que deben recorrer los vehículos hasta la ubicación del paciente y el tiempo de viaje en el desplazamiento a la ubicación que se le asigne (P2 o P3) o que tenga asignada (P4). Se encontró que cuando los vehículos deben desplazarse a una base después de finalizar un servicio (P2, P3 y P4) se presenta un aumento significativo en los tiempos de viaje, como se presenta en la **Figura 25**. Además, se observa que este tiempo es mayor en P4 que en P2 y P3. Esto debido a que en estos dos últimos se asignan bases disponibles más cercanas a la ubicación actual del vehículo. Este comportamiento afecta la disponibilidad de los vehículos y explicaría el aumento en cancelaciones tipo 1 que se observó para P4 en la **Tabla 12**.

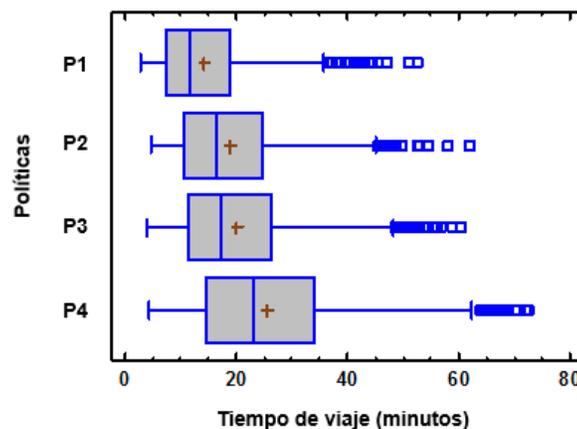


Figura 25: Tiempo de viaje a la ubicación del paciente y tiempo de viaje en la relocalización (resultados de 1000 corridas)

Al realizar el análisis de varianza (ANOVA) de los tiempos de viaje en cada uno de las políticas evaluadas, se encontró que existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los 4 grupos de variables con un nivel del 95,0% de confianza. Ver **Tabla 14**

Tabla 14: Tabla ANOVA tiempo total de viaje

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	70631,6	3,0	23543,9	185,6	0,0
Intra grupos	534825,0	4217,0	126,8		
Total (Corr.)	605457,0	4220,0			

Otra medida de desempeño que permitió comparar las diferentes políticas simuladas fue el tiempo que esperan las entidades en la cola para la asignación del vehículo. Como se puede observar en la **Figura 26**, hay una mayor cantidad de entidades que esperan para la asignación de los vehículos en P2, P3 y P4. Si se comparan estas políticas con P1 se presentó un aumento del 23.9%, 25.7% y 54.7% respectivamente. Adicional a lo anterior, se comparó el tiempo promedio en cola de P2, P3 y P4 con P1. Se encontró un aumento de 40.8%, 33.1% y 112% con respecto a P1, respectivamente.

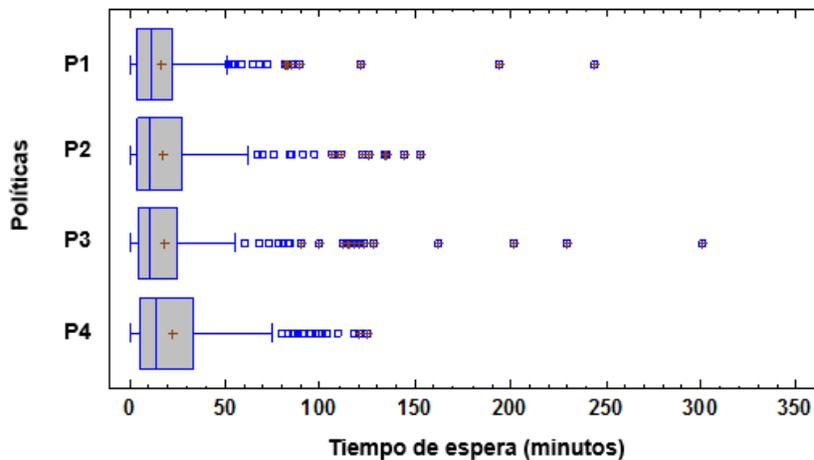


Figura 26: Tiempo de espera en cola (resultados de 1000 corridas)

En la

Figura 27, a manera general y de conclusión, si se toma el tiempo de una semana de operación y se analizan los tiempos involucrados en el proceso se encuentra que el tiempo adicional que los vehículos gastan en trasladarse a la ubicación asignada (porcentaje azul en la **Figura 27**), afecta significativamente los tiempos de espera (porcentaje color amarillo en la **Figura 27**) y por lo tanto aumenta los porcentajes de cancelación tipo 1. Sin embargo, se observó que con la inclusión de un proceso de traslado a una base una vez finalizado el servicio (P2, P3 o P4), se disminuyeron los tiempos de viaje a la ubicación de la entidad (porcentaje naranja) con respecto a P1. Además, dependiendo del tipo de política que se implemente, el tiempo de traslado a una base puede ser mayor, por lo se afecta el tiempo de disponibilidad de los vehículos para atender los servicios que solicitan al SEM.

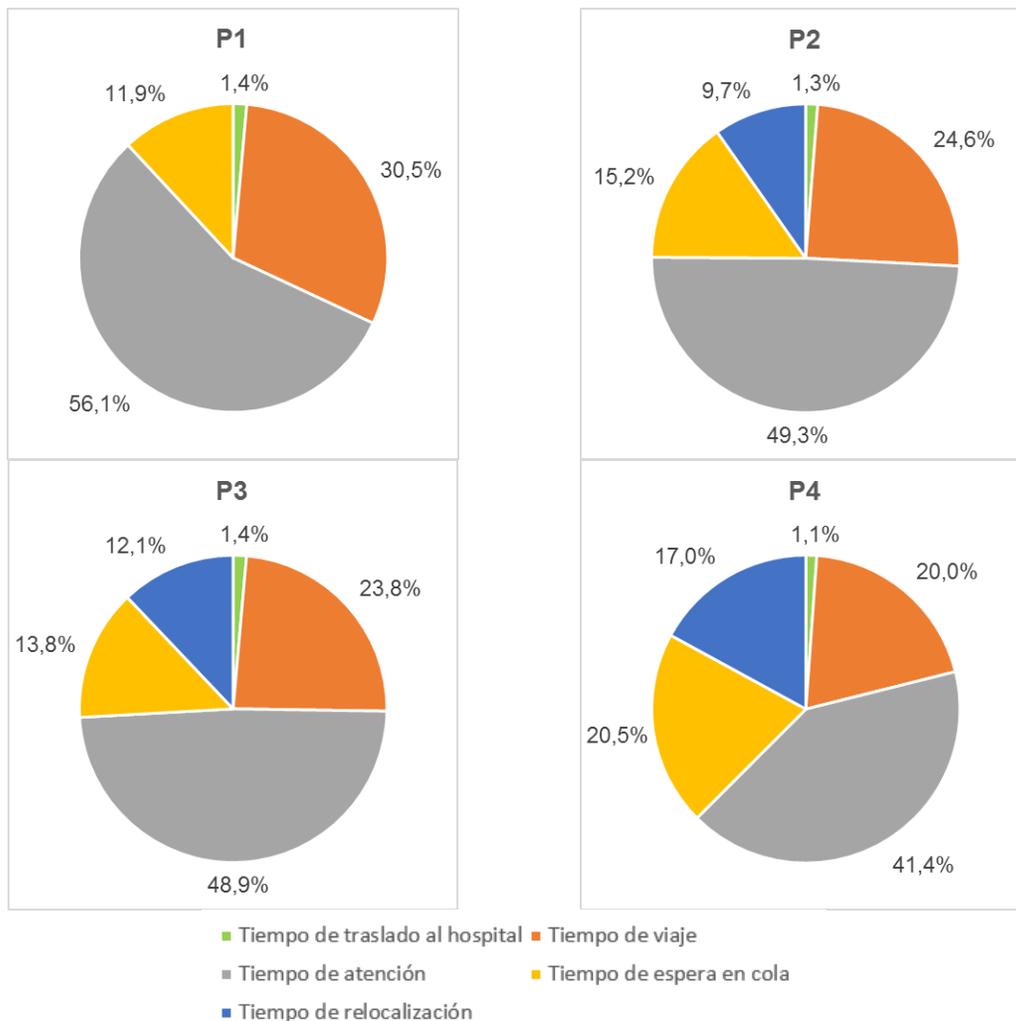


Figura 27: Proporción de los tiempos de servicio por tipo de política

Finalmente, otra medida de desempeño frecuentemente utilizada en la literatura es la referente al grado de utilización de los vehículos. Básicamente con esta medida de desempeño se busca identificar qué porcentaje del tiempo total que los vehículos estuvieron en el sistema fue utilizado para atender los servicios. Esto último hace referencia a: el tiempo de traslado a la ubicación del paciente, el tiempo de atención y el tiempo de traslado del paciente al hospital. En las **Figura 28** y **Figura 29** se presenta la caracterización de las políticas diseñadas considerando el porcentaje del tiempo en que los vehículos están en servicio, en espera a que les sea asignado un servicio y en desplazamiento a la base una vez finalizado un servicio. Es de resaltar que estos porcentajes son determinados para cada política con respecto a un mismo tiempo: una semana de cuatro días.

Como se observa en las **Figura 28** y **Figura 29** las mayores diferencias se obtienen, por supuesto, en el tiempo de desplazamiento a la base y en el tiempo de espera. El tiempo de desplazamiento a las bases es mayor, en su orden, para P2, P3 y P4. Dado que el tiempo de espera siempre disminuye cuando se aplica una política diferente a la política actual del SEM, se podría pensar que es el tiempo de desplazamiento el que afecta el tiempo que los vehículos están en servicio. Este último, como se observa en las figuras siempre es menor para las políticas P2, P3 y P4.

Como se mencionó anteriormente, la implementación de una política en la que se realicen relocalizaciones cuando no hay pacientes en cola, pero cuando una relocalización exceda un tiempo T dado, el vehículo permanezca en el barrio donde presto el último servicio y que además permita la asignación de servicios cuando está en el proceso de desplazamiento a una base podría generar un impacto positivo en el SEM. Para poder realizar esto el servicio debe contar con una herramienta que le permita consultar la distancia que debe recorrer el vehículo al trasladarse a una nueva ubicación con el objetivo de evaluar si el traslado excede el tiempo T dado y que le permita identificar la ubicación de los vehículos en cualquier momento. Esto último con el fin de asignar el vehículo, que se encuentre la base o en desplazamiento, más cercano a la ubicación de un nuevo evento.

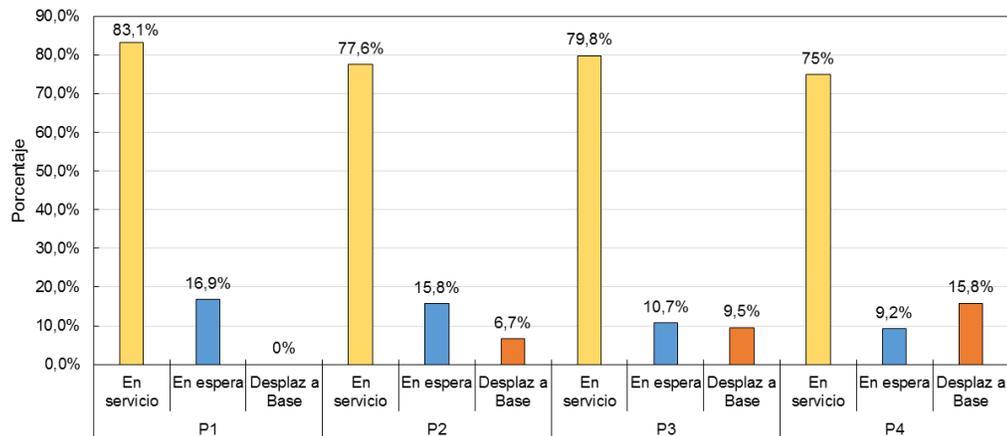


Figura 28: Distribución del porcentaje del tiempo total en el sistema para las ambulancias

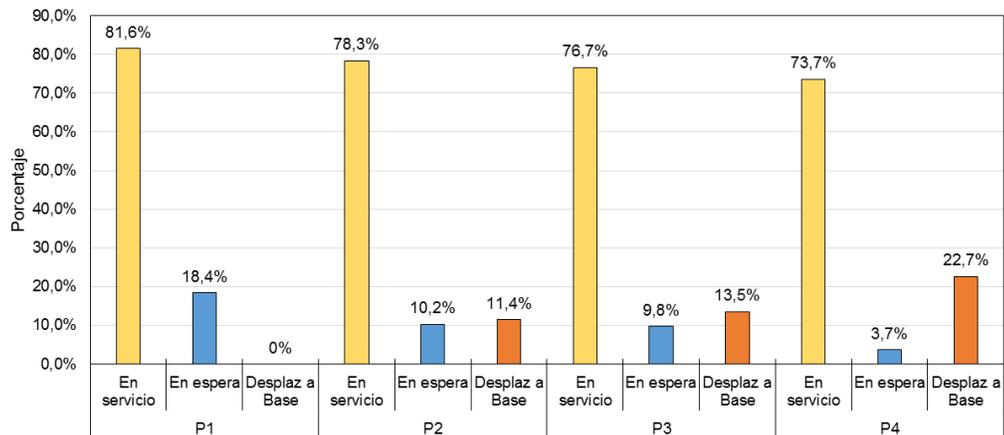


Figura 29: Distribución del porcentaje del tiempo total en el sistema para los vehículos de consulta

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un modelo de simulación de eventos discretos para analizar el problema de relocalización de los vehículos de un SEM. Para ellos se caracterizó el proceso de atención del SEM de estudio, se analizó la información sobre la prestación del servicio y se definieron las variables que posteriormente se utilizaron en el modelo. Así mismo, se presentaron los supuestos que se tuvieron en cuenta, el diagrama del modelo de simulación y se describieron las etapas en las que se divide el modelo. Posterior al desarrollo y validación del modelo, se evaluaron cuatro políticas para ubicación de los vehículos después de finalizar la prestación de un servicio. Todo lo anterior permitió elaborar las conclusiones y recomendaciones que continuación se presenta.

7.1. Conclusiones de la construcción, validación y verificación del modelo de simulación.

Estas conclusiones se describen de manera detallada en la sección 5.6. Algunas de las conclusiones más importantes son:

- Se encontró que algunas variables como es el caso del tiempo entre llamadas, los tiempos de espera hasta la cancelación, el tiempo de atención de un servicio y el tiempo que dura el proceso de traslado se pueden modelar con distribuciones tipo exponencial, weibull y lognormal.
- En la literatura generalmente se reporta la consideración de un solo tipo de vehículo en los modelos, suponiendo que cualquier vehículo está en la capacidad de responder cualquier llamada. Sin embargo, en este trabajo se encontró que el tiempo de atención de un servicio se ve afectado por el tipo de vehículo que se utiliza para dar respuesta y el tipo de servicio que se presta. Por lo anterior, se encontró que un ajuste de las distribuciones que tenga en cuenta el tipo de vehículo y el tipo de servicio es el más adecuado.
- En este trabajo se utilizaron herramientas de SIG y GPS, las cuales permitieron obtener información con un alto grado de desagregación. Esto era uno de los puntos destacados en la revisión de la literatura para incluir en trabajos futuros.

7.2. Conclusiones de los resultados de la implementación de las políticas de relocalización

Para analizar los resultados de la simulación de las políticas para la ubicación de los vehículos después de finalizar la prestación de un servicio, se compararon diferentes medidas de desempeño que nos permitieron evaluar el impacto de las políticas diseñadas sobre el servicio. Las medidas de desempeño que se analizaron fueron los porcentajes de cancelaciones, los tiempos de servicio, los tiempos de esperas y los tiempos de viaje. Las conclusiones que se tienen son las siguientes.

- El porcentaje del total de servicios cancelados (cancelaciones tipo 1 + tipo 2) aumentó cuando se aplicaron políticas diferentes a la actual del SEM de estudio. Con políticas diferentes se presentaron incrementos en el porcentaje de cancelación de hasta el 53.7%. Lo cual se debe a que estas políticas incluyen traslados a nuevas ubicaciones una vez finalizado la prestación de un servicio.
- Al analizar por separado las cancelaciones tipo 1 y tipo 2 se encontró que cuando se aplicaron políticas diferentes a la actual del SEM de estudio se presentaron incrementos en el porcentaje de cancelación tipo 1 de hasta 250%. Esto se debe a que a diferencia de P1, en el resto de políticas se involucra un tiempo en el cual el vehículo debe trasladarse a la ubicación que se le asigne (P2

o P3) o que tenga asignada (P4) y por lo tanto los vehículos no están disponibles inmediatamente finalizan la prestación de un servicio.

- Con respecto a las cancelaciones tipo 2, cuando se aplicaron políticas diferentes a la actual del SEM de estudio se presentaron disminuciones en el porcentaje de cancelación tipo 2 de hasta 29%. Esto se debe a que la ubicación de los vehículos una vez finalizado la prestación de un servicio no es la más adecuada y entonces los vehículos tardan más tiempo en trasladarse a la ubicación de un nuevo servicio. Por otro lado, para el resto de políticas, las cancelaciones son menores.
- Se encontró que algunas de las entidades en P1 tenían tiempos de viaje más grandes comparados con los tiempos de viaje de las demás políticas. Esto puede atribuirse a que en P2, P3 y P4 se tiene una mejor ubicación de los vehículos y explicaría la disminución en el porcentaje de cancelaciones tipo 2 con respecto a P1.
- Se encontró que cuando los vehículos deben desplazarse a una base después de finalizar un servicio (P2, P3 y P4) se presenta un aumento significativo en los tiempos de viaje (tiempo de viaje hasta la ubicación del paciente + tiempo de viaje a la ubicación asignada como base). Además, se encontró que este tiempo es mayor en P4 que en P2 y P3. Esto debido a que en estos dos últimos se asignan bases disponibles más cercanas a la ubicación actual del vehículo. Este comportamiento afecta la disponibilidad de los vehículos y explicaría el aumento en cancelaciones tipo 1 que se observó para P4.
- Se encontró que hay una mayor cantidad de entidades que esperan para la asignación de los vehículos en P2, P3 y P4. Con políticas diferentes a la actual en el SEM de estudio se presentaron aumentos hasta del 54.7%. Adicional a lo anterior, se comparó el tiempo promedio en cola de P2, P3 y P4 con P1. Se encontró un aumento hasta del 112% con respecto a P1.
- Las mayores diferencias se obtienen en el tiempo de desplazamiento a la base y en el tiempo de espera. El tiempo de desplazamiento a las bases es mayor, en su orden, para P2, P3 y P4. Dado que el tiempo de espera siempre disminuye cuando se aplica una política diferente a la política actual del SEM, se podría pensar que es el tiempo de desplazamiento el que afecta el tiempo que los vehículos están en servicio.

7.3. Mejora en la calidad información

Aunque el SEM de estudio cuenta con un procedimiento establecido para el registro de la dirección, los despachadores actualmente no lo utilizan. Por lo anterior, para el desarrollo del modelo fue necesario realizar un proceso de depuración y organización de dicha información que requirió un tiempo de aproximadamente 4 meses. Además, una parte de los registros que no fue posible georreferenciar fue debido a la ausencia de estandarización de los datos registrados en la dirección del evento. Por esta razón se hace necesario implementar mecanismos que faciliten el registro de esta información y eviten el ingreso de errores. Por ejemplo el uso de GPS para capturar la información de la ubicación de la tripulación cuando se encuentren atendiendo a un paciente.

Para optimizar el grado de desagregación del modelo, una de las mejoras que se puede hacer desde el SEM de estudio es la implementación de un sistema que permita obtener de manera automática el tiempo de atención y el tiempo de traslado al hospital. De la información obtenida en el trabajo de campo se



observó que pueden presentarse olvidos o retrasos en el reporte de dicha información debido a que la tributación debe llamar al despachador para notificar los estados del servicio.

Además, se identificó la necesidad de conocer y registrar algunos de los eventos que se presentan en servicio y que no fueron posible modelar debido a la falta de información, como por ejemplo, las averías de los vehículos, el proceso de limpieza y desinfección, los descansos de la tripulación y el abastecimiento de combustible.

Todo lo anterior permitiría mejorar la precisión del modelo y los escenarios propuestos y además, facilitaría el análisis del comportamiento del sistema en cuanto a la cobertura actual del servicio.

Finalmente, es importante resaltar que no solo es necesario realizar una adecuada captura de la información del servicio sino también mejorar el procesamiento y análisis de dicha información. Esto es posible con una adecuada estructuración de los análisis y creación de indicadores que permitan mejorar el servicio. Lo anterior permitiría la creación de una herramienta que soportaría la toma de decisiones en el SEM.

7.4. Recomendaciones en el proceso de atención

Con relación al proceso de clasificación inicial de los servicio cuando se reciben las solicitudes de los usuarios, se evidenció que existe un gran porcentaje de estos que cambian durante la atención, es por este motivo que se recomienda realizar una intervención para educar al usuario y entrenar al despachador de modo que el porcentaje de cambio, por ejemplo de urgencia a consulta, no sea tan alto.

Aunque en algunos casos es posible que debido a la política actual del SEM de estudio, de ubicar los vehículos en los barrios donde se prestó el último servicio, se presenten mayores tiempos de respuesta, cuando analizamos todo los servicios se observa que con esta política se generan menores porcentajes de cancelaciones y de tiempos de espera. Además, la política actual permite una mayor disponibilidad de los vehículos para atender las solicitudes de los pacientes, debido a que están disponibles inmediatamente después de terminar un servicio.

Con respecto a las cancelaciones, una forma de disminuirlas es incluir en el proceso una actividad adicional en la cual se realice una llamada al paciente antes o durante el traslado del vehículo al lugar del evento. Esto con el fin de identificar si el paciente está dispuesto a esperar la llegada del vehículo. En caso en que el paciente no esté dispuesto a esperar, se evita el desplazamiento del vehículo y es posible asignarlo a un paciente que se encuentre en la cola de espera.

Como trabajos futuros se recomienda incluir en el modelo la posibilidad de asignación de servicios durante el proceso de traslado a la ubicación asignada como base de espera y de esta forma permitir que los vehículos estén disponibles para la atención de nuevos servicios. Además, se podría pensar en una política adicional en la que se realicen relocalizaciones, pero cuando una relocalización exceda un tiempo T dado, el vehículo permanezca en el barrio donde presto el último servicio y que además permita la asignación de servicios cuando está en el proceso de desplazamiento a una base podría generar un impacto positivo en el SEM. Para esto el servicio debe contar con una herramienta para la ubicación de los vehículos que le permita consultar la distancia que debe recorrer el vehículo al trasladarse a una nueva ubicación con el objetivo de evaluar si el traslado excede el tiempo T dado y que le permita identificar la ubicación de los vehículos en cualquier momento. Esto último con el fin de asignar el vehículo, que se encuentre la base o en desplazamiento, más cercano a la ubicación de un nuevo evento.



Teniendo en cuenta todo lo anterior se podría pensar como trabajo futuro la sistematización del conocimiento obtenido en el presente trabajo en un software de apoyo a la toma de decisiones de ubicación de los vehículos en un SEM. Finalmente, también se recomienda como trabajo futuro la utilización del modelo aquí presentado como soporte a la toma de decisiones del SEM de estudio en tiempo real.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. S. Savas, "Simulation and cost-effectiveness analysis of New York's emergency ambulance service," *Manage. Sci.*, vol. 15, no. 12, pp. 608–627, 1969.
- [2] A. Ingolfsson, E. Erkut, and S. Budge, "Simulation of single start station for Edmonton EMS," *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 54, no. 7, pp. 736–746, 2003.
- [3] K. Inakawa, T. Furuta, and A. Suzuki, "Effect of ambulance station locations and number of ambulances to the quality of the emergency service," in *The Ninth International Symposium on Operations Research and Its Applications (ISORA'10)*, 2010, pp. 340–347.
- [4] L. Aboueljineane, Z. Jemai, and E. Sahin, "Reducing ambulance response time using simulation: The case of Val-de-Marne department Emergency Medical Service," in *Proceedings winter simulation conference (WSC)*, 2012, pp. 1–12.
- [5] D. H. Uyeno and C. Seeberg, "A practical methodology for ambulance location," *Simulation*, vol. 43, no. 2, pp. 79–87, 1984.
- [6] W. H. Iskander, "Simulation modeling for emergency medical service systems," in *Proceedings winter simulation (WSC)*, 1989, pp. 1107–1111.
- [7] S. Su and C.-L. Shih, "Modeling an emergency medical services system using computer simulation," *Int. J. Med. Inform.*, vol. 72, no. 1–3, pp. 57–72, 2003.
- [8] S. Su and C.-L. Shih, "Resource reallocation in an emergency medical service system using computer simulation," *Am. J. Emerg. Med.*, vol. 20, no. 7, pp. 627–34, 2002.
- [9] Y. Liu, Y. Yuan, Y. Li, and H. Pang, "A chance constrained programming model for reliable emergency vehicles relocation problem," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 96, pp. 671–682, 2013.
- [10] S. Cretin and T. R. Willemain, "A model of prehospital death from ventricular fibrillation following myocardial infarction," *Health Serv. Res.*, vol. 14, no. 3, pp. 221–34, 1979.
- [11] M. Eisenberg, L. Bergner, and A. Hallstrom, "Paramedic programs and out-of-hospital cardiac arrest: I. Factors associated with successful resuscitation," *Am. J. Public Health*, vol. 69, no. 1, pp. 30–8, 1979.
- [12] J. Naoum-Sawaya and S. Elhedhli, "A stochastic optimization model for real-time ambulance redeployment," *Comput. Oper. Res.*, vol. 40, no. 8, pp. 1972–1978, 2013.
- [13] M. Zhong, C. Shi, T. Fu, L. He, and J. Shi, "Study in performance analysis of China Urban Emergency Response System based on Petri net," *Saf. Sci.*, vol. 48, no. 6, pp. 755–762, 2010.
- [14] J. Ma, F. Mao, and W. Zhou, "Agent-based simulation for urban emergency response planning," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009*, 2009, pp. 200–203.
- [15] A. Borshchev and A. Filippov, "From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: reasons, techniques, tools," in *The 22nd International Conference of the System Dynamics Society*, 2004, p. 23.



- [16] A. K. Rodríguez, G. M. Osorno, and P. A. Maya, “Relocalización de vehículos en Servicios de Emergencias Médicas: una revisión,” *Ing. y Cienc.*, 2015.
- [17] S. M. Céspedes, N. Velasco, and C. A. Amaya, “Localización y relocalización de ambulancias del centro regulador de urgencias y emergencias de Bogotá,” Universidad de los Andes, Bogotá, 2008.
- [18] J. G. Villegas R., C. Castañeda P., and K. A. Blandón, “Mejoramiento de la localización de ambulancias de atención prehospitalaria en Medellín (Colombia) con modelos de optimización,” in *Congreso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa*, 2012, p. 12.
- [19] L. Aboueljineane, E. Sahin, and Z. Jemai, “A review on simulation models applied to emergency medical service operations,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 66, no. 4, pp. 734–750, 2013.
- [20] L. Zhen, K. Wang, H. Hu, and D. Chang, “A simulation optimization framework for ambulance deployment and relocation problems,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 72, pp. 12–23, 2014.
- [21] K. Sudtachat, M. E. Mayorga, and L. A. Mclay, “A nested-compliance table policy for emergency medical service systems under relocation,” *Omega*, Jun. 2015.
- [22] M. Gendreau, G. Laporte, and F. Semet, “The maximal expected coverage relocation problem for emergency vehicles,” *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 57, no. 1, pp. 22–28, 2006.
- [23] M. Moeini, Z. Jemai, and E. Sahin, “Location and relocation problems in the context of the emergency medical service systems: a case study,” *Cent. Eur. J. Oper. Res.*, vol. 23, no. 3, pp. 641–658, Dec. 2014.
- [24] Y. Yue, L. Marla, and R. Krishnan., “An efficient simulation-based approach to ambulance fleet allocation and dynamic redeployment,” in *Proceedings of the national conference on artificial intelligence*, 2012, pp. 398–405.
- [25] M. Gendreau, G. Laporte, and F. Semet, “A dynamic model and parallel tabu search heuristic for real-time ambulance relocation,” *Parallel Comput.*, vol. 27, no. 12, pp. 1641–1653, Nov. 2001.
- [26] T. Andersson and P. Värbrand, “Decision support tools for ambulance dispatch and relocation,” *Oper. Res. Soc.*, vol. 58, no. 2, pp. 195–201, Feb. 2007.
- [27] M. S. Maxwell, S. G. Henderson, and H. Topaloglu, “Ambulance redeployment: An approximate dynamic programming approach,” in *Proceedings of the winter simulation conference (WSC)*, 2009, pp. 1850–1860.
- [28] M. Van Buuren, R. Van der Mei, K. Aardal, and H. Post, “Evaluating dynamic dispatch strategies for emergency medical services: TIFAR simulation tool,” in *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC)*, 2012, pp. 1–12.
- [29] C. J. Jagtenberg, S. Bhulai, and R. D. van der Mei, “An efficient heuristic for real-time ambulance redeployment,” *Oper. Res. Heal. Care*, vol. 4, pp. 27–35, Mar. 2015.
- [30] P. L. van den Berg and K. Aardal, “Time-dependent MEXCLP with start-up and relocation cost,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 242, no. 2, pp. 383–389, Apr. 2015.
- [31] V. Schmid, “Solving the dynamic ambulance relocation and dispatching problem using approximate dynamic programming,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 219, no. 3, pp. 611–621, 2012.
- [32] H. K. Rajagopalan, C. Saydam, and J. Xiao, “A multiperiod set covering location model for dynamic redeployment of ambulances,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 35, no. 3, pp. 814–826, 2008.
- [33] M. S. Maxwell, M. Restrepo, S. G. Henderson, and H. Topaloglu, “Approximate dynamic programming for ambulance redeployment,” *INFORMS J. Comput.*, vol. 22, no. 2, pp. 266–281, May 2010.



- [34] K. Schneeberger, K. F. Doerner, A. Kurz, and M. Schilde, "Ambulance location and relocation models in a crisis," *Cent. Eur. J. Oper. Res.*, pp. 1–27, Jul. 2014.
- [35] M. Moeini, Z. Jemai, and E. Sahin, "An integer programming model for the dynamic location and relocation of emergency vehicles: A case study," in *International Symposium on Operational Research in Slovenia, SOR*, 2013, pp. 343–350.
- [36] J. F. Repede and J. J. Bernardo, "Developing and validating a decision support system for locating emergency medical vehicles in Louisville, Kentucky," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 75, no. 3, pp. 567–581, 1994.
- [37] K. Peleg and J. S. Pliskin, "A geographic information system simulation model of EMS: reducing ambulance response time," *Am. J. Emerg. Med.*, vol. 22, no. 3, pp. 164–170, 2004.
- [38] V. Schmid and K. F. Doerner, "Ambulance location and relocation problems with time-dependent travel times," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 207, no. 3, pp. 1293–1303, 2010.
- [39] L. Aboueljinnane, E. Sahin, Z. Jemai, and J. Marty, "A simulation study to improve the performance of an emergency medical service: application to the French Val-de-Marne department," *Simul. Model. Pract. theory*, vol. 47, pp. 46–59, Sep. 2014.
- [40] R. Alanis, A. Ingolfsson, and B. Kolfal, "A markov chain model for an EMS system with repositioning," *Prod. Oper. Manag.*, vol. 22, no. 1, pp. 216–231, Jan. 2013.
- [41] R. Nair and E. Miller-Hooks, "Evaluation of relocation strategies for emergency medical service vehicles," *Transp. Res. Rec.*, no. 2137, pp. 63–73, Dec. 2009.
- [42] H. Billhardt, M. Lujak, V. Sánchez-Brunete, A. Fernández, and S. Ossowski, "Dynamic coordination of ambulances for emergency medical assistance services," *Knowledge-Based Syst.*, vol. 70, pp. 268–280, Nov. 2014.
- [43] D. Degel, L. Wiesche, S. Rachuba, and B. Werners, "Time-dependent ambulance allocation considering data-driven empirically required coverage," *Health Care Manag. Sci.*, pp. 1–15, Mar. 2014.
- [44] L. Wiesche, "Time-dependent dynamic location and relocation of ambulances," in *Operations research proceedings 2013*, D. Huisman, I. Louwerse, and A. P. M. Wagelmans, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2014, pp. 481–486.
- [45] A. Haghani and S. Yang, "Real-time emergency response fleet deployment: concepts, systems, simulation & case studies," in *Dynamic fleet management*, vol. 38, V. Zeimpekis, C. D. Tarantilis, G. M. Giaglis, and I. Minis, Eds. Boston, MA: Springer US, 2007, pp. 133–162.
- [46] L. A. C. G. Andrade and C. B. Cunha, "An ABC heuristic for optimizing moveable ambulance station location and vehicle repositioning for the city of São Paulo," *Int. Trans. Oper. Res.*, vol. 22, no. 3, pp. 473–501, May 2015.
- [47] O. Fujiwara, T. Makjamroen, and K. K. Gupta, "Ambulance deployment analysis: A case study of Bangkok," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 31, no. 1, pp. 9–18, 1987.
- [48] M. Poulton and G. Roussos, "Towards smarter metropolitan emergency response," in *IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2013, pp. 2576–2580.
- [49] S. G. Henderson and A. J. Mason, "Ambulance service planning: simulation and data visualisation," in *Operations research and health care*, vol. 70, M. L. Brandeau, F. Sainfort, and W. P. Pierskalla, Eds. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2005, pp. 77–102.
- [50] A. J. Mason, "Simulation and real-time optimised relocation for improving ambulance



- operations,” in *Handbook of Healthcare Operations Management*, vol. 184, B. T. Denton, Ed. New York, NY: Springer New York, 2013, pp. 289–317.
- [51] L. J. Shuman, H. Wolfe, and M. J. Gunter, “RURALSIM: the design and implementation of a rural EMS simulator,” *J. Soc. Health Syst.*, vol. 3, no. 3, pp. 54–71, 1992.
- [52] J. Goldberg, R. Dietrich, J. M. Chen, M. Mitwasi, T. Valenzuela, and E. Criss, “A simulation model for evaluating a set of emergency vehicle base locations: Development, validation, and usage,” *Socioecon. Plann. Sci.*, vol. 24, no. 2, pp. 125–141, 1990.
- [53] L. Brotcorne, G. Laporte, and F. Semet, “Ambulance location and relocation models,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 147, no. 3, pp. 451–463, 2003.
- [54] F. Glover and B. Melián, “Búsqueda Tabú,” *Intel. Artif.*, vol. 19, pp. 29–48, 2003.
- [55] Coomeva Emergencias Médicas, “Atención de Servicios CEM.” p. 9, 2014.
- [56] E. G. Dunna, H. G. Reyes, and L. E. C. Barrón, *Simulación y análisis de sistemas con ProModel*. 2006.
- [57] J. Wang, J. Li, K. Tussey, and K. Ross, “Reducing Length of Stay in Emergency Department: A Simulation Study at a Community Hospital,” *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. - Part A Syst. Humans*, vol. 42, no. 6, pp. 1314–1322, Nov. 2012.
- [58] J. P. C. Kleijnen, “Verification and validation of simulation models,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 82, no. 1, pp. 145–162, Apr. 1995.
- [59] J. Barceló, *Simulación de sistemas discretos*. 1996.
- [60] R. G. Sargent, “Verification and validation of simulation models,” in *Proceedings Winter Simulation Conference*, 2010, vol. 1, pp. 13–24.
- [61] R. G. Sargent, “Verification and validation of simulation models,” *J. Simul.*, vol. 7, no. 1, pp. 12–24, Dec. 2013.



9. ANEXOS

ANEXO 1

Resultados georreferenciación de las ubicaciones de las solicitudes de los servicios. Base de datos de los años 2012 a julio del 2014.

Municipio	Barrio	Número del barrio	Comuna	Total de servicios solicitados	Porcentaje
Medellín	Patio Bonito	238	14	8983	4,336241%
Medellín	Laureles	270	11	7125	3,439354%
Medellín	Colombia	226	14	6163	2,974981%
Medellín	Granada	257	16	5008	2,417443%
Medellín	La Gloria	105	16	3434	1,657648%
Medellín	Conquistadores	271	11	3324	1,604549%
Medellín	Castropol	227	14	3197	1,543244%
Medellín	San Bernardo	104	16	3013	1,454424%
Medellín	Belén	101	16	2963	1,430289%
Medellín	Santa Fe	262	15	2757	1,330849%
Medellín	Las Acacias	255	11	2642	1,275337%
Medellín	La Castellana	92	11	2620	1,264717%
Medellín	La Florida	240	14	2435	1,175414%
Medellín	Santa María De Los Ángeles	249	14	2413	1,164795%
Medellín	El tesoro	241	14	2382	1,149830%
Sabaneta	Sabaneta	367		2371	1,144520%
Medellín	Campo Amor	259	15	2301	1,110730%
Envigado	Centro	336		2245	1,083698%
Medellín	Lalinde	234	14	2240	1,081285%
Medellín	Loma De Los Bernal	108	16	2177	1,050873%
Medellín	Lorena	264	11	2171	1,047977%
Medellín	Las Playas	107	16	2064	0,996327%
Medellín	Los Colores	53	11	2019	0,974604%
Medellín	Santa Teresita	93	12	1923	0,928264%
Medellín	Boston	187	10	1894	0,914265%
Medellín	Santa Mónica	89	12	1847	0,891577%
Medellín	La Palma	102	16	1846	0,891094%
Medellín	Floresta	76	12	1801	0,869372%
Medellín	La América	79	12	1800	0,868889%
Medellín	Rosales	266	16	1789	0,863580%
Medellín	El Poblado	236	14	1785	0,861649%
Medellín	El Velódromo	77	12	1690	0,815791%
Medellín	San Joaquín	269	11	1670	0,806136%
Medellín	Fátima	267	16	1641	0,792138%
Envigado	Mesa	357		1497	0,722626%
Itagiúf	San Fernando	308	4	1496	0,722144%
Medellín	Trinidad	263	15	1494	0,721178%
Medellín	La Mota	110	16	1456	0,702835%
Medellín	Estadio	67	11	1391	0,671458%
Medellín	Simón Bolívar	90	12	1379	0,665666%
Medellín	La Candelaria	191	10	1253	0,604844%
Envigado	Alcalá	332		1245	0,600982%



Grupo de Investigación en Innovación y Gestión de Cadenas de Abastecimiento - INCAS
Departamento de Ingeniería Industrial - Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia

Envigado	Bosques De Zúñiga	334		1222	0,589879%
Medellín	La Colina	114	15	1214	0,586018%
Medellín	Astorga	239	14	1210	0,584087%
Medellín	Prado	175	10	1205	0,581673%
Medellín	Diego Echavarría	109	16	1198	0,578294%
Envigado	Loma Del Atravesado	355		1194	0,576363%
Medellín	Miravalle	100	16	1193	0,575881%
Medellín	Cristo Rey	260	15	1191	0,574915%
Envigado	Pontevedra	360		1187	0,572984%
Medellín	El Nogal Los Almendros	265	16	1150	0,555124%
Medellín	San Miguel	179	8	1122	0,541608%
Medellín	El Rincón	111	16	1109	0,535332%
Medellín	El Danubio	80	12	1108	0,534850%
Medellín	Gerona	218	9	1108	0,534850%
Medellín	Nueva Villa De Aburra	99	16	1089	0,525678%
Medellín	Calasanz	66	12	1088	0,525195%
Medellín	San Diego	223	10	1085	0,523747%
Medellín	Suramericana	69	11	1044	0,503956%
Medellín	Buenos Aires	213	9	1037	0,500577%
Medellín	Las Lomas 1	235	14	1004	0,484647%
Medellín	Las Mercedes	96	16	981	0,473545%
Medellín	Los Pinos	78	12	978	0,472097%
Medellín	San Javier 1	82	13	965	0,465821%
Medellín	Florida Nueva	256	11	928	0,447961%
Medellín	Simesa	231	14	924	0,446030%
Medellín	Sanlucas	247	14	889	0,429135%
Medellín	Tejelo	4	5	880	0,424790%
Medellín	La Pilarica	40	7	865	0,417550%
Medellín	Los Alcazares	74	13	846	0,408378%
Envigado	Loma Del Barro	356		841	0,405964%
Medellín	Campo Alegre	81	12	839	0,404999%
Medellín	Bolivariana	268	11	827	0,399206%
Medellín	Manila	237	14	804	0,388104%
Medellín	La Pradera	72	13	787	0,379898%
Itagüí	Santa María No. 3	321	4	785	0,378932%
Medellín	Cataluña	220	9	780	0,376519%
Medellín	Alejandro Echavarría	210	9	774	0,373622%
Medellín	Calasanz Pa.	65	12	767	0,370243%
Medellín	Los Alpes	98	16	750	0,362037%
Medellín	Sucre	188	8	749	0,361555%
Envigado	El Chocho	338		747	0,360589%
Medellín	La Mansión	176	8	743	0,358658%
Medellín	Miraflores	214	9	737	0,355762%
Medellín	Campo Valdes 2	155	3	735	0,354797%
Medellín	Alejandría	242	14	734	0,354314%
Medellín	Tenche	252	15	734	0,354314%
Medellín	Campo Valdés 1	154	4	716	0,345625%
Medellín	Las Lomas 2	233	14	705	0,340315%
Medellín	El Salvador	217	9	700	0,337901%
Bello	La Cabañita	410		678	0,327282%
Medellín	Villa Nueva	186	10	677	0,326799%
Medellín	Villa Carlota	232	14	671	0,323903%



Grupo de Investigación en Innovación y Gestión de Cadenas de Abastecimiento - INCAS
Departamento de Ingeniería Industrial - Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia

Medellín	Brasilia	151	4	667	0,321972%
Medellín	El Diamante 2	250	14	660	0,318593%
Medellín	Alfonso López	24	5	655	0,316179%
Medellín	Barrio Cristóbal	91	12	649	0,313283%
Medellín	Francisco Antonio Zea	23	5	644	0,310869%
Medellín	Berlin	142	4	637	0,307490%
Medellín	La Aguacatala	244	14	630	0,304111%
Medellín	Belencito	88	13	603	0,291078%
Itagüí	Santa María No. 2	320	4	603	0,291078%
Medellín	Santa Lucia	75	12	587	0,283354%
Medellín	Altavista	106	16	581	0,280458%
Medellín	Los Ángeles	181	10	571	0,275631%
Medellín	Perpetuo Socorro	222	10	571	0,275631%
Medellín	Carlos E. Restrepo	50	11	564	0,272252%
Medellín	Corazón De Jesús	192	10	557	0,268873%
Medellín	Ferrini	54	12	546	0,263563%
Itagüí	Colinas Del Sur	281	4	544	0,262598%
Medellín	Santa Inés	156	3	540	0,260667%
Medellín	Castilla	21	5	538	0,259701%
Envigado	El Dorado	339		535	0,258253%
Medellín	Cuarta Brigada	51	11	526	0,253909%
Copacabana	Machado	441		514	0,248116%
Itagüí	Centro	280	1	506	0,244254%
Medellín	Pedregal	14	6	500	0,241358%
Medellín	Bombona 1	212	10	499	0,240875%
Medellín	Florencia	2	5	477	0,230256%
Medellín	Colon	194	10	473	0,228325%
Medellín	La Asomadera 1	224	9	471	0,227359%
Medellín	Villa Hermosa	177	8	451	0,217705%
Medellín	Luis López De Mesa	29	7	450	0,217222%
Medellín	Robledo	45	7	444	0,214326%
Medellín	Loreto	225	9	442	0,213361%
Medellín	Noel	116	15	438	0,211430%
Medellín	El Diamante	28	7	428	0,206603%
Medellín	Manrique Central 2	167	3	424	0,204672%
Medellín	Los Naranjos	243	14	418	0,201775%
Medellín	La Milagrosa	219	9	415	0,200327%
Medellín	Manrique Oriental	166	3	414	0,199845%
Medellín	Metropolitano	63	13	410	0,197914%
Medellín	Manrique Central 1	168	4	403	0,194535%
Medellín	Barrios De Jesús	207	9	398	0,192121%
Medellín	Caycedo	211	9	391	0,188742%
Medellín	Bombona 2	221	9	390	0,188259%
Medellín	Las Brisas	251	5	378	0,182467%
Itagüí	Ditares	282	3	378	0,182467%
Medellín	La Independencia	87	13	375	0,181019%
Medellín	Altamira	36	7	370	0,178605%
Medellín	Las Palmas	216	10	370	0,178605%
Medellín	Los Balsos 2	245	14	364	0,175709%
Medellín	San Isidro	141	4	363	0,175226%
Medellín	Aeroparque Juan Pablo II	254	15	358	0,172812%
Medellín	Villa Flora	39	7	353	0,170399%



Grupo de Investigación en Innovación y Gestión de Cadenas de Abastecimiento - INCAS
Departamento de Ingeniería Industrial - Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia

Medellín	Antonio Nariño	71	13	348	0,167985%
Envigado	El Esmeralda	340		343	0,165572%
Medellín	El Chagualo	172	10	341	0,164606%
Envigado	San Marcos	362		335	0,161710%
Medellín	San German	52	7	331	0,159779%
Medellín	Shellmar	103	15	326	0,157366%
Medellín	Girardot	15	5	325	0,156883%
Medellín	La Esperanza	20	6	325	0,156883%
Medellín	Las Violetas	97	16	306	0,147711%
La estrella	Bellavista	368		300	0,144815%
Medellín	El Cucaracho	43	7	298	0,143849%
Medellín	Bello Horizonte	38	7	295	0,142401%
Bello	Ciudad Niquía	395		289	0,139505%
Itagüí	Yarumito	328	2	287	0,138540%
Medellín	Bosques De San Pablo	37	7	285	0,137574%
Itagüí	Simón Bolívar	323	4	279	0,134678%
Bello	Prado	431		272	0,131299%
Medellín	Aures 1	27	7	269	0,129851%
Medellín	Naranjal	253	11	269	0,129851%
Medellín	Kennedy	25	6	265	0,127920%
Bello	Panamericano	427		261	0,125989%
Medellín	20 De Julio	86	13	260	0,125506%
Itagüí	La Palma	293	2	258	0,124541%
Medellín	Altos Del Poblado	230	14	250	0,120679%
Bello	La Cabaña	409		250	0,120679%
Itagüí	San Gabriel	310	3	247	0,119231%
Medellín	El Pinal	189	8	240	0,115852%
Bello	San José Obrero	435		237	0,114404%
Medellín	Calle Nueva	197	10	234	0,112956%
Itagüí	El Rosario	284	6	228	0,110059%
Medellín	Granizal	123	1	227	0,109577%
Medellín	La Pinuela	149	4	226	0,109094%
Itagüí	Fatima	286	6	222	0,107163%
Medellín	San Pablo	134	1	219	0,105715%
Bello	Central	393		218	0,105232%
Medellín	La Alpujarra	195	10	216	0,104267%
Medellín	Cerro Nutibara	261	16	216	0,104267%
Itagüí	Los Naranjos	301	1	210	0,101370%
Medellín	Santa Rosa De Lima	64	13	208	0,100405%
Medellín	Guayabal	115	15	208	0,100405%
Medellín	Las Granjas	153	3	208	0,100405%
Medellín	San Javier 2	73	13	207	0,099922%
Medellín	San Pedro	169	4	204	0,098474%
Itagüí	Playa Rica	304	1	203	0,097991%
Itagüí	Araucaria	274	1	201	0,097026%
Medellín	Boyacá	3	5	200	0,096543%
Bello	Nuevo	425		197	0,095095%
Itagüí	La Gloria	291	1	195	0,094130%
Medellín	Aranjuez	148	4	188	0,090751%
Itagüí	La Independencia	292	1	188	0,090751%
Bello	Pérez	429		186	0,089785%
Itagüí	La Esmeralda	289	4	181	0,087372%



Grupo de Investigación en Innovación y Gestión de Cadenas de Abastecimiento - INCAS
Departamento de Ingeniería Industrial - Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia

Medellín	Moravia	146	4	180	0,086889%
Medellín	La Asomadera 3	229	9	178	0,085924%
Medellín	Palenque	44	7	177	0,085441%
Bello	Manchester	421		174	0,083993%
Medellín	San Benito	190	10	173	0,083510%
Bello	La Gran Avenida	414		169	0,081579%
Medellín	Enciso	180	8	166	0,080131%
Medellín	Los Cerros El Vergel	215	9	166	0,080131%
Envigado	Alto De Misael	333		166	0,080131%
Medellín	El Progreso	35	5	165	0,079648%
Medellín	Versales 1	165	3	164	0,079165%
Medellín	Universidad Nacional Facultad De Minas	46	7	162	0,078200%
Medellín	Betania	94	13	159	0,076752%
Itagüí	San José	313	1	159	0,076752%
Medellín	El Socorro	70	13	154	0,074338%
Medellín	La Libertad	209	8	154	0,074338%
Envigado	Milán Vallejuelos	358		152	0,073373%
Medellín	Córdoba	30	7	151	0,072890%
Medellín	Bermejal-Los Alamos	147	4	150	0,072407%
Medellín	Héctor Abad Gómez	17	5	149	0,071925%
Medellín	8 De Marzo	205	9	148	0,071442%
Medellín	El Castillo	248	14	148	0,071442%
Medellín	Plaza De Ferias	16	5	145	0,069994%
Itagüí	Las Mercedes	299	1	144	0,069511%
Itagüí	Zona Industrial No. 3	331	2	144	0,069511%
Itagüí	Ferrara	287	5	138	0,066615%
Envigado	El Trianon	342		137	0,066132%
La estrella	Caqueta	370		135	0,065167%
Medellín	Santo Domingo Savio 2	126	1	134	0,064684%
Bello	Altos De Quitasol	388		133	0,064201%
Bello	La Florida	412		131	0,063236%
Bello	Andalucía	389		130	0,062753%
Medellín	Jesús Nazareno	173	10	129	0,062270%
Envigado	Las Vegas	353		129	0,062270%
Bello	Salento	434		129	0,062270%
Medellín	San Martin De Porres	13	6	127	0,061305%
Itagüí	Asturias	276	1	125	0,060340%
Medellín	Los Balsos 1	246	14	124	0,059857%
Bello	El Mirador	401		123	0,059374%
Envigado	El Portal	341		118	0,056961%
La estrella	Camilo Torres	369		118	0,056961%
Medellín	La Asomadera 2	228	9	117	0,056478%
Medellín	Las Esmeraldas	152	4	113	0,054547%
Bello	Las Granjas	418		111	0,053582%
Medellín	Sevilla	170	4	110	0,053099%
Medellín	Toscana	1	5	109	0,052616%
Envigado	Jardines	343		107	0,051651%
Medellín	La Frontera	117	2	105	0,050685%
La estrella	Centro	371		105	0,050685%
Medellín	Doce De Octubre 2	10	6	101	0,048754%
Medellín	El Raizal	163	3	100	0,048272%



Grupo de Investigación en Innovación y Gestión de Cadenas de Abastecimiento - INCAS
Departamento de Ingeniería Industrial - Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia

Envigado	La Primavera	348		100	0,048272%
Medellín	Playon De Los Comuneros	121	2	99	0,047789%
Medellín	Santander	5	6	97	0,046823%
Itagüí	San Pio X	315	2	95	0,045858%
Bello	Ciudadela Del Norte	396		95	0,045858%
Medellín	Doce De Octubre 1	6	6	93	0,044893%
Medellín	13 De Noviembre	198	8	93	0,044893%
Medellín	Aures 2	26	7	92	0,044410%
Envigado	Uribe Ángel	364		92	0,044410%
Itagüí	Santa María No. 1	319	4	91	0,043927%
Medellín	Everfit	34	5	88	0,042479%
Bello	Altos De Niquía	387		85	0,041031%
Medellín	Terminal De Transporte	32	5	84	0,040548%
Itagüí	Monteverde	302	2	81	0,039100%
Medellín	Villatina	200	8	80	0,038617%
Bello	Mesa	422		80	0,038617%
Medellín	Liceo U. De A.	47	7	77	0,037169%
Itagüí	Triana	325	3	77	0,037169%
Envigado	La Pradera	347		77	0,037169%
Bello	Centro	394		76	0,036686%
Bello	Congolo	397		75	0,036204%
Medellín	Picacho	12	6	74	0,035721%
Medellín	Juan Pablo Ii	204	9	74	0,035721%
Medellín	El Pomar	159	3	73	0,035238%
Itagüí	Camparola	279	2	73	0,035238%
Envigado	La Magnolia	345		71	0,034273%
Medellín	Santo Domingo Savio 1	125	1	70	0,033790%
Medellín	Guayaquil	193	10	70	0,033790%
La estrella	Las Brisas	378		70	0,033790%
La estrella	San Martin	383		69	0,033307%
Envigado	La Sebastiana	349		68	0,032825%
Itagüí	Calatrava	278	5	65	0,031377%
Bello	Nazareth	423		65	0,031377%
Envigado	Obrero	359		62	0,029928%
Medellín	Miranda	150	4	60	0,028963%
Medellín	Cementerio universal	31	5	59	0,028480%
Bello	El Rosario	404		59	0,028480%
Bello	Urb. Villas de Occidente	439		58	0,027998%
Itagüí	El Tablazo	285	5	57	0,027515%
Itagüí	San Isidro	311	1	57	0,027515%
Itagüí	El Palmar	283	2	55	0,026549%
Itagüí	La Aldea	288	5	55	0,026549%
Envigado	Zúñiga	366		55	0,026549%
Medellín	Santa Cruz	137	2	54	0,026067%
Medellín	Jardín botánico	158	4	53	0,025584%
Medellín	Caribe	33	5	52	0,025101%
Bello	Puerto Bello	432		51	0,024619%
Medellín	Eduardo Santos	84	13	50	0,024136%
Bello	Suárez	438		50	0,024136%
Medellín	Villa Guadalupe	139	1	49	0,023653%
Itagüí	San francisco	309	3	49	0,023653%
Itagüí	San Javier	312	3	49	0,023653%



Grupo de Investigación en Innovación y Gestión de Cadenas de Abastecimiento - INCAS
Departamento de Ingeniería Industrial - Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia

Bello	Santa Ana	436		49	0,023653%
Itagüí	Villa Lía	326	3	48	0,023170%
Medellín	Nuevos conquistadores	85	13	47	0,022688%
Medellín	Palermo	140	4	47	0,022688%
Medellín	La Isla	122	2	46	0,022205%
Medellín	U. De A.	171	4	46	0,022205%
Itagüí	San Juan Bautista	314	1	46	0,022205%
Itagüí	Santa María La Nueva	318	6	46	0,022205%
Itagüí	Villa Paula	327	1	46	0,022205%
Medellín	Los Mangos	184	8	45	0,021722%
Medellín	Centro Administrativo	196	10	45	0,021722%
Medellín	El Pesebre	55	13	43	0,020757%
Medellín	El Rodeo	113	15	42	0,020274%
Itagüí	Pilsen	303	3	41	0,019791%
Bello	Espíritu Santo	405		41	0,019791%
La estrella	Primavera	380		40	0,019309%
Itagüí	Las Acacias	295	5	39	0,018826%
Itagüí	Zona Industrial No. 2	330	1	39	0,018826%
La estrella	La Ospina	377		39	0,018826%
Medellín	Unidad Deportiva Atanasio Girardot	68	11	38	0,018343%
Medellín	La Francia	119	2	38	0,018343%
Medellín	Moscú 1	136	2	38	0,018343%
Bello	El Cairo	398		38	0,018343%
Bello	El Carmelo	399		38	0,018343%
Medellín	Cerro El Volador	48	7	37	0,017861%
Medellín	Villa Del Socorro	129	2	37	0,017861%
Bello	La Madera	415		37	0,017861%
Medellín	Belalcazar	18	5	36	0,017378%
Itagüí	Samaria Robles Del Sur	306	2	36	0,017378%
Medellín	Pablo Vi	118	2	35	0,016895%
Itagüí	Samaria	305	2	33	0,015930%
Bello	Buenos Aires	392		33	0,015930%
Itagüí	Las Margaritas	298	2	32	0,015447%
Envigado	San José	361		32	0,015447%
Bello	La Estación	411		32	0,015447%
Medellín	Estación Villa	185	10	31	0,014964%
Bello	Alcalá	385		31	0,014964%
Medellín	Picachito	11	6	29	0,013999%
Bello	El Porvenir	403		28	0,013516%
Medellín	Popular 1	124	1	27	0,013033%
Medellín	La Salle	143	3	27	0,013033%
Itagüí	Otro Itagüí	272		27	0,013033%
Envigado	La Inmaculada	344		26	0,012551%
Envigado	Villagrande	365		26	0,012551%
La estrella	San Andrés	382		26	0,012551%
Bello	Bellavista	390		26	0,012551%
Itagüí	Balcones De Sevilla	277	5	25	0,012068%
Itagüí	Loma Linda	300	5	24	0,011585%
La estrella	La Chinca	375		24	0,011585%
Copacabana	El Porvenir	443		24	0,011585%
Medellín	La Ladera	178	8	23	0,011102%



Grupo de Investigación en Innovación y Gestión de Cadenas de Abastecimiento - INCAS
Departamento de Ingeniería Industrial - Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia

Medellín	Santa Margarita	59	7	22	0,010620%
Medellín	Villa Liliam	206	8	22	0,010620%
Medellín	Progreso 2	7	6	21	0,010137%
Medellín	El Triunfo	8	6	21	0,010137%
Medellín	Mirador Del Doce	9	6	21	0,010137%
Medellín	La Hondonada	112	16	21	0,010137%
Itagüí	Artex	275	1	21	0,010137%
La estrella	Escobar	373		21	0,010137%
La estrella	San Vicente	384		21	0,010137%
Bello	Niquía Bifamiliar	424		21	0,010137%
Medellín	Carpinelo	131	1	20	0,009654%
Envigado	Bucarest	335		20	0,009654%
Itagüí	Zona Industrial No. 1	329	1	19	0,009172%
Bello	La Gabriela	413		19	0,009172%
Bello	Paris	428		19	0,009172%
Envigado	Las Flores	351		16	0,007723%
Bello	La Aldea	408		16	0,007723%
Medellín	La Rosa	138	2	15	0,007241%
La estrella	San Agustín	381		15	0,007241%
Medellín	San Vicente De Paul	174	10	14	0,006758%
Bello	La Milagrosa	417		14	0,006758%
Itagüí	Las Brisas	297	3	13	0,006275%
Bello	Altavista	386		13	0,006275%
Bello	Hermosa Provincia	407		13	0,006275%
Medellín	Las Estancias	203	8	12	0,005793%
Itagüí	La Union	294	6	12	0,005793%
Itagüí	Santa Catalina	317	2	12	0,005793%
Bello	El Ducado	400		12	0,005793%
Medellín	Moscu 2	135	1	11	0,005310%
Medellín	Batallon Girardot	182	8	11	0,005310%
Medellín	Andalucía	120	2	10	0,004827%
Medellín	La Avanzada	127	1	9	0,004344%
Envigado	Las Antillas	350		9	0,004344%
Itagüí	19 De Abril	273	3	8	0,003862%
Itagüí	Terranova	324	5	8	0,003862%
Bello	Rincón Santo	433		8	0,003862%
Bello	Sn Martín	437		8	0,003862%
Medellín	La Esperanza 2	130	1	7	0,003379%
Medellín	Parque Norte	157	4	7	0,003379%
La estrella	Horizontes	374		7	0,003379%
Bello	La Maruchenga	416		7	0,003379%
Bello	Pachelly	426		7	0,003379%
Medellín	El Salado	83	13	6	0,002896%
Medellín	San José La Cima 1	144	3	6	0,002896%
Medellín	Villa Turbay	208	8	6	0,002896%
Envigado	Loma De Las Brujas	354		6	0,002896%
La estrella	El Dorado	372		6	0,002896%
Bello	Briceñito	391		6	0,002896%
Medellín	Juan XXIII - La Quiebra	62	13	5	0,002414%
Itagüí	Santa Ana	316	2	5	0,002414%
Medellín	Blanquizal	57	13	4	0,001931%
Medellín	La Sierra	201	8	4	0,001931%



Grupo de Investigación en Innovación y Gestión de Cadenas de Abastecimiento - INCAS
Departamento de Ingeniería Industrial - Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia

Itagüí	Satexco	322	1	4	0,001931%
Itagüí	La Finca	290	2	3	0,001448%
Itagüí	San Antonio	307	3	3	0,001448%
Envigado	Las Orquídeas	352		3	0,001448%
Bello	Fontidueño	406		3	0,001448%
Copacabana	El Tablazo	444		3	0,001448%
Medellín	Pajarito	42	7	2	0,000965%
Medellín	Universidad Nacional	49	7	2	0,000965%
Medellín	San Antonio	199	8	2	0,000965%
Itagüí	Las Américas	296	5	2	0,000965%
Envigado	La Paz	346		2	0,000965%
Envigado	San Rafael	363		2	0,000965%
La estrella	Monterrey	379		2	0,000965%
Bello	Los Alpes	420		2	0,000965%
Bello	Villas Del Sol	440		2	0,000965%
Medellín	Tricentenario	19	5	1	0,000483%
Medellín	Versales 2	164	3	1	0,000483%
Envigado	El Chingui	337		1	0,000483%
La estrella	La Ferrería	376		1	0,000483%
Bello	El Paraíso	402		1	0,000483%
Bello	Las Vegas	419		1	0,000483%
Bello	Playa Rica	430		1	0,000483%
Copacabana	La Azulita	442		1	0,000483%

ANEXO 2

Resultados georreferenciación de las ubicaciones de los hospitales a los que se realiza traslado de pacientes en el SEM de estudio. Base de datos de los años 2012 a julio del 2014.

Municipio	Barrio	Número del barrio	Cantidad de servicios	Porcentaje
Medellín	Girardot	15	1	0,028%
Medellín	San Francisco de Zea	23	1	0,028%
Medellín	Progreso	35	60	1,704%
Medellín	Altamira	36	106	3,010%
Medellín	Bosques de San Pablo	37	253	7,183%
Medellín	Cuarta Brigada	51	9	0,256%
Medellín	Estadio	67	9	0,256%
Medellín	Los Pinos	78	36	1,022%
Medellín	La América	79	1	0,028%
Medellín	Belén	101	319	9,057%
Medellín	La Gloria	105	191	5,423%
Medellín	Diego Echavarría	109	412	11,698%
Medellín	Sevilla	170	483	13,714%
Medellín	Prado	175	89	2,527%
Medellín	San Miguel	179	41	1,164%
Medellín	Villa Nueva	186	77	2,186%
Medellín	La Candelaria	191	204	5,792%
Medellín	Barrio Caicedo	211	2	0,057%
Medellín	Buenos Aires	213	12	0,341%



UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA
1803

Grupo de Investigación en Innovación y Gestión de Cadenas de Abastecimiento - INCAS
Departamento de Ingeniería Industrial - Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia

Medellín	Perpetuo Socorro	222	424	12,039%
Medellín	San Diego	223	1	0,028%
Medellín	Barrio Colombia	226	1	0,028%
Medellín	Manila	237	1	0,028%
Medellín	Patio Bonito	238	235	6,672%
Medellín	La Florida	240	13	0,369%
Medellín	Los Naranjos	243	150	4,259%
Medellín	La Aguacatala	244	8	0,227%
Medellín	Cerro Nutibara	261	2	0,057%
Medellín	Fátima	267	77	2,186%
Medellín	San Joaquín	269	1	0,028%
Medellín	Los Conquistadores	271	9	0,256%
Itagüí	Las Mercedes	299	88	2,499%
Itagüí	Playa Rica	304	92	2,612%
Itagüí	Samaria Robles del Sur	306	4	0,114%
Envigado	Centro	336	4	0,114%
Envigado	La Pradera	347	35	0,994%
Envigado	Primavera	348	11	0,312%
Envigado	San Marcos	362	1	0,028%
Sabaneta	Sabaneta	367	1	0,028%
Bello	Ciudadela del Norte	396	43	1,221%
Bello	Manchester	421	6	0,170%
Bello	San José Obrero	435	9	0,256%
			3.522	100%