

Ingeniería y Ciencia

Ingeniería y Ciencia

ISSN: 1794-9165

ingciencia@eafit.edu.co

Universidad EAFIT

Colombia

Rodríguez Q., Alma K.; Osorno O., Gloria M.; Maya D., Pablo A.
Relocalización de vehículos en servicios de emergencias médicas: una revisión
Ingeniería y Ciencia, vol. 12, núm. 23, enero-junio, 2016, pp. 163-202
Universidad EAFIT
Medellín, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83544436009>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Relocalización de vehículos en servicios de emergencias médicas: una revisión

Alma K. Rodríguez Q.¹, Gloria M. Osorno O.² y Pablo A. Maya D.³

Recepción: 15-08-2015 | Aceptación: 22-12-2015 | En línea: 01-02-2016

MSC:90-02

doi:10.17230/ingciencia.12.23.9

Resumen

Este artículo presenta una revisión de la literatura de los estudios realizados sobre problemas de relocalización de vehículos de Servicios de Emergencia Médica, (SEM). En particular se presenta una descripción básica de las actividades que se realizan en un SEM, la forma como son clasificados este tipo de problemas, los principales componentes que se tienen en cuenta en el diseño de los modelos, los métodos de solución que se han implementado a la fecha y las medidas de desempeño para evaluar las soluciones. Además se discuten los softwares utilizados para su desarrollo, las estrategias para la recolección de los datos que se tienen en cuenta y las técnicas de verificación y validación. Finalmente, se presentan las políticas de relocalización más evaluadas e implementadas.

Palabras clave: servicios de emergencia médicos; relocalización; optimización; simulación de eventos discretos.

¹ Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, alma.rodriguez@udea.edu.co.

² Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, gloria.osorno@udea.edu.co.

³ Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, pablo.maya@udea.edu.co.

Relocation of Vehicles Emergency Medical Services: a Review

Abstract

This paper presents a literature survey of the current state of the art in vehicle relocation problems applied to EMS. Specially, we focus on describing a classification of this kind of problems, main components that should be taken into account for modeling them, key methods used for solving these problems, objectives pursued by the researchers, key performance measures considered in the EMS literature, software used in the development of models, data collection and verification and validation of the models. We also present some of the relocation policies that have been most frequently evaluated and implemented.

Key words: emergency medical services; relocation; optimization; discrete event simulation.

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. Una de las constantes preocupaciones de los SEM es mejorar el tiempo de respuesta ante la ocurrencia de un evento, debido a que este es una medida de desempeño muy importante para determinar la calidad de atención pre-hospitalaria de los SEM y para preservar la vida y la salud de los pacientes [1]. Además, algunos estudios han demostrado que existe una relación directa entre la disminución del tiempo de respuesta y la disminución de la mortalidad [2],[3]. Por ejemplo, después de un paro cardíaco y circulatorio las posibilidades de una reanimación exitosa disminuyen en un 10 % por cada minuto que el paciente no es atendido [4].

Generalmente, el tiempo de respuesta se define como el intervalo de tiempo entre el momento en que se recibe la solicitud del servicio hasta el momento en que el vehículo del SEM llega al lugar del incidente [5],[6],[7].

Se han identificado que existen muchas variables en la operación de los SEM que afectan el tiempo de respuesta, algunas de ellas por ejemplo son las ubicaciones de las bases, la cantidad de recursos (vehículos y personal) y la programación de turnos [8],[9],[10],[11]. 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 [12].

El proceso relocalización de los vehículos de los SEM generalmente se realiza en forma empírica, es decir, el despachador de acuerdo a su experiencia informa a las ambulancias cuál debe ser su nueva ubicación [13]. Sin embargo, al revisar la literatura se encuentra que aspectos como los cambios de turno, el agotamiento, la 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 SEM se apoyen en metodologías que les permitan crear, evaluar y optimizar reglas o políticas de relocalización que garanticen una óptima atención de los pacientes que soliciten el servicio.

El propósito de este trabajo es presentar una revisión de la literatura de los estudios realizados sobre problemas de relocalización de vehículos de los SEM. Además, en cada uno de los trabajos seleccionados se identificó los principales componentes que se tienen en cuenta en el diseño de los modelos, los métodos de solución que se han implementado a la fecha, el objetivo de la investigación, así como las medidas de desempeño, el software utilizado para cumplir dichos objetivos, algunas estrategias para la recolección de

los datos y las técnicas de validación y verificación de los modelos. Dicho análisis se realiza a estudios encontrados en artículos de revistas, artículos de conferencia y libros que representan los últimos 15 años de trabajo en este campo. La búsqueda de la literatura se realizó en las bases de datos ScienceDirect, Scopus y SpringerLink utilizando términos de búsqueda que consideran como palabras claves “*ambulance*”, “*relocation*”, “*redeployment*”, “*emergency medical service*”, “*ambulancia*”, “*relocalización*”, “*servicios de emergencia médicos*”. Además, se identificaron trabajos adicionales utilizando las listas de referencias de las publicaciones revisadas.

Este artículo se divide en 9 secciones, en la segunda se presenta un resumen del proceso de atención de un SEM y se identifican las etapas en el proceso donde es posible aplicar políticas de relocalización. La forma como se apliquen estas políticas permite clasificar los problemas de relocalización en dos categorías, las cuales también se discuten en la primera sección. En la tercera sección se presentan, los principales componentes que se tienen en cuenta en el diseño de los modelos planteados en torno a esta problemática. En la cuarta sección se identifican los métodos de solución implementados en la literatura para abordar los problemas de relocalización, así como los objetivos de estudio. En la quinta sección se identifican las medidas de desempeño más utilizadas en la evaluación de políticas de relocalización, en la sexta se discuten aspectos relacionados con las estrategias de la recolección de datos, en la séptima se presenta las técnicas de verificación y validación de los modelos y en la octava sección se presentan algunas políticas de relocalización utilizadas en los estudios revisados. Finalmente, en la sección novena se presentan las conclusiones y algunas sugerencias para investigaciones futuras.

2 Relocalización en servicios de emergencias médicos

Con el propósito de identificar la importancia de las decisiones de relocalización y en qué etapa del proceso de atención deben ser tomadas, en esta sección se presenta una descripción básica de las actividades que se realizan en un SEM (sección 2.1.), así como los dos tipos de relocalización que existen (sección 2.2.).

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

En el proceso de la atención de una emergencia [6],[14] 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. La Figura 1 muestra la diagramación de las actividades anteriormente mencionadas.

De la Figura 1, independiente del SEM que se analice las actividades se clasifican en dos grandes grupos: actividades centrales y actividades externas, [7],[15]. 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.

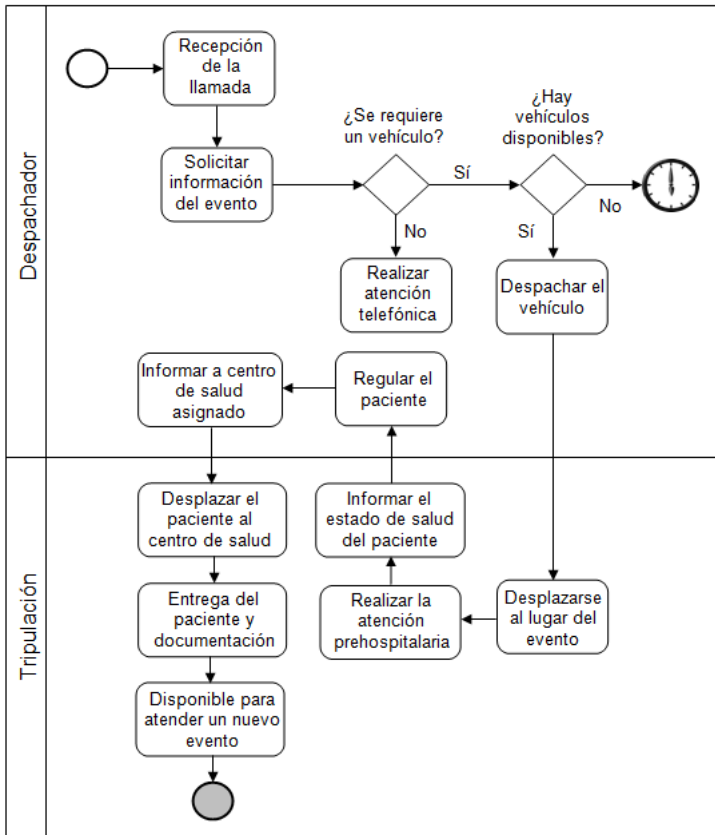


Figura 1: Proceso de solicitud de un servicio a un servicio de emergencias médicas.

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 ,[16].

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 [17],[12] 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 [7],[18].

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 [4],[5],[8],[13],[16],[17],[19],[14],[18],[20],[21],[22],[23],[24],[25],[26],[27],[28]. 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 [1],[29],[30],[31],[20],[15].

Aunque se ha reportado que se obtienen mejores resultados cuando se estudian los problemas de relocalización de forma multi-periodo [15],[22], 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.

3 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 (sección 3.1.), la demanda (sección 3.2.), las reglas de despacho (sección 3.3.), las características de los vehículos (sección 3.4.), las velocidades, distancias y tiempos de viaje (sección 3.5.), las reglas para la selección del hospital (sección 3.6.) y aspectos adicionales consideradas en los modelos (sección 3.7.). Mientras que la diferencia entre las investigaciones está dada por el nivel de detalle con que se consideran estos componentes. En esta revisión se encontró que este último aspecto es muy importante cuando se analizan problemas de relocalización [31]. Por ejemplo, van den Berg *et al.*[22] 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.

A continuación se describen los componentes utilizados para el diseño de los modelos y la forma como se incluyen estos componentes en los modelos.

3.1 Objetivos considerados de en los modelos

Los problemas de relocalización dinámica se han estudiado por ejemplo para maximizar el porcentaje de servicios atendidos en un tiempo considerado como un tiempo óptimo [8], para maximizar el número de personas cubiertas [14], para disminuir el porcentaje de servicios no atendidos [25], para aumentar el grado de preparación en el área de responsabilidad [19] y para disminuir los costos de relocalización [21]. En estos casos los autores realizan consideraciones tales como: la de priorización de los lugares en los que los vehículos deben estacionarse después de finalizar la prestación de un servicio, evitar relocalizar un mismo vehículo de manera sucesiva y evitar largos viajes entre los sitios de ubicación inicial y final.

Los problemas de relocalización multi-periodo se han estudiado por ejemplo para optimizar la cobertura de la demanda esperada en diferentes periodos de tiempo [31], para reducir el número de ambulancias y personal requerido en diferentes periodos de tiempos sin afectar el tiempo de respuesta [1] y para minimizar el costo total expresado como la distancia total recorrida de las reubicaciones entre las estaciones de espera de las ambulancias en la ciudad [15]. En estos casos los autores realizan consideraciones tales como: utilizar información relacionada con los cambios de la velocidad de las ambulancias entre áreas, las condiciones de tráfico, el comportamiento de la demanda y los tiempos de viaje en función del tiempo.

3.2 Demanda

En la Tabla 1 se presenta un resumen de las tres características principales que se tienen en cuenta para representar la demanda en los SEM. Estas características son: la distribución de la llamada, la distribución geográfica y la clasificación del evento.

En cuando a la distribución de la llamada, en la Tabla 1 se observa que para su consideración generalmente se utiliza una distribución Poisson. La cual es una distribución discreta que modela las llegadas de las llamadas durante un intervalo de tiempo o región específica.

Si la distribución Poisson modela correctamente el número de llegadas durante un periodo dado, entonces el tiempo entre llegadas debe ser

exponencial [32].

Como se muestra en la Tabla 1 para modelar los lugares de origen de las llamadas, es posible utilizar diferentes opciones entre las que se encuentran el uso de códigos postales, el uso de datos históricos de la demanda del SEM, la representación de las zonas de estudios utilizando polígonos de diferentes tamaños y el uso de datos censales.

Tabla 1: Datos de la demanda utilizados en los problemas de relocalización de los SEM.

| Característica | Consideraciones | Referencias |
|---------------------------------------|---|---|
| Densidad de la llamada | Distribución Poisson | [4],[5],[8],[13],[33],[15],[34],[21],[35],[16],[23],[25],[26] |
| | Distribución uniforme | [20] |
| | Demanda por cantidad de habitantes | [31],[22] |
| | Distribución empírica con datos históricos (probabilidad o cantidad de servicios solicitados por hora del día en cada zona) | [33],[36],[37],[30] |
| | Número de incidentes por zona | [38] |
| | Probabilidad proporcional a cantidad de población de la zona | [19] |
| | | |
| Distribución espacial de las llamadas | Región cuadrada | [13],[16, 36],[37],[31],[20],[15],[38],[26],[39],[28] |
| | Polígonos con tiempos de respuesta T | [1] |
| | Datos reales de las dirección de las solicitudes de servicios | [4] |
| | Códigos postales | [5],[22],[23] |
| | Datos del censo | [10],[31],[21] |
| | Zonas de igual tamaño con peso por cantidad de habitantes | [19] |
| | Tamaño de los distritos o comunas | [18],[35],[27] |
| Clasificación del evento | IRIS (zonas con aproximadamente 2000 habitantes) | [10],[30] |
| | Todas iguales (no hay prioridad) | [4],[16],[14],[18],[15],[34],[35],[22],[23],[25],[38] |
| | Prioridad teniendo en cuenta la gravedad del paciente y si se requiere traslado o no | [5],[8],[10],[30],[19],[21],[40],[41] |

Cuando se usan datos históricos para la generación de las llamadas se utiliza información de los servicios solicitados al SEM de estudio en el pasado. Generalmente de estos registros es posible obtener información relacionada con los lugares dónde un incidente ha ocurrido, y por lo tanto se asume que es posible que un incidente vuelva a ocurrir en esos lugares. La ventaja de suponer esto es que los lugares donde muchos incidentes suceden en la realidad, estarán representados de forma precisa. La desventaja de esta estrategia es que también hay muchos lugares donde nunca antes ha ocurrido un incidente y es posible que en un futuro puedan ocurrir [5].

Otros investigadores describen las zonas de la demanda utilizando polígonos de diferentes tamaños. Para crear estos polígonos se tiene cuenta el número de habitantes tomados de datos censales, e.g. [19] o el rango de cobertura en un tiempo T , e.g. [1]. Algunos autores utilizan específicamente cuadrados, e.g. [31]. Una vez definida la forma de la zona una práctica común es ubicar la posición geográfica de la demanda, vehículos, bases y hospitales en los centroides de la zona.

Para caracterizar los eventos, los investigadores tienen en cuenta la condición del paciente para asignar prioridades a las llamadas. Esta clasificación permite aplicar políticas de asignación de vehículos teniendo en cuenta la gravedad del paciente. En otras palabras, esta clasificación permite establecer una jerarquía en los casos en los que se presentan llamadas simultáneas o que existan llamadas en espera. Por ejemplo, cuando un evento es clasificado como una emergencia que amenaza la vida y otro es clasificado como no urgente, la asignación del vehículo se realiza primero a las más graves, en este caso, al evento clasificado como emergencia que amenaza la vida, e.g.[8].

3.3 Reglas de despacho

Cuando una llamada llega a un SEM, el despachador, de acuerdo a la información que le suministran sobre el evento decide cual es el equipo disponible más adecuado para dar respuesta a ese evento, teniendo en cuenta que se debe cumplir con un tiempo de respuesta. En la revisión de los métodos de solución discutidos en la sección 3 se encontró que en su mayoría los investigadores utilizan como regla de despacho el vehículo disponible más cercano al

evento, la cual consiste en enviar el equipo que tenga menor tiempo de viaje a la localización del evento [4],[5],[8],[10],[33],[16],[37],[30],[17],[31],[15],[34],[22],[23],[25],[38],[26],[28]. Sin embargo, algunos autores plantean que esta práctica no es siempre la mejor [4],[15].

Es posible aplicar otras reglas de despacho, como por ejemplo: Abouel-jinane *et al.* [30] presentan como regla de despacho la respuesta regionalizada o atención a los eventos que se demandan en la zona asignada a cada vehículo, si este no está disponible, se envía el vehículo disponible más cercano.

Repede *et al.* [29] propusieron una política de despacho alternativa. Si ningún vehículo puede responder dentro del umbral de tiempo T , entonces se despacha el vehículo con la menor probabilidad de recibir una llamada en la zona asignada.

Gendreau *et al.* [21] atienden las llamadas en orden decreciente de prioridad. El vehículo más cercano disponible se despacha para atender una llamada. Para las llamadas urgentes, adicional a los vehículos disponibles en las bases, se consideran para el despacho los vehículos en camino a nuevos sitios de ubicación. Por otra parte, el vehículo ya asignado a una llamada menos urgente puede ser reasignado a una llamada urgente si el vehículo es el más cercano a la escena de la llamada urgente, y hay un vehículo alternativo capaz de cubrir en el tiempo restante la llamada menos urgente.

Andersson *et al.* [19] categorizan las llamadas como prioridad 1, 2 y 3 en función del grado de urgencia. Prioridad 1 son las más urgentes y potencialmente mortales. El vehículo más cercano disponible siempre se asigna a una llamada de Prioridad 1. La asignación de vehículos para las llamadas de prioridad 2 y 3 se basa en el impacto que tenga en el nivel de preparación la asignación de un vehículo. En otras palabras, se asigna el vehículo que tenga menor impacto en el nivel de preparación.

Generalmente para cada evento se realiza el despacho de un solo vehículo, sin embargo hay estudios en los que se considera el envío de más de un vehículo cuando el evento es de alta prioridad, tal es el caso del reciente estudio de Mason [42] en el que se considera la asignación del primer y segundo vehículo más cercano y Gendreau *et al.* [21] en el que es posible el despacho de dos vehículos para atender un evento.

3.4 Características de los vehículos

Los SEM para la atención de los servicios generalmente utilizan diferentes tipos de vehículos. Estos vehículos difieren en cuanto a la dotación, las características de la tripulación y el tipo de evento que están en la capacidad de responder. Entre los tipos de vehículos se encuentran las ambulancia de transporte asistencial básico (TAB) y las ambulancias de transporte asistencial medicalizado (TAM). Estas últimas son utilizadas para la atención de eventos de mayor complejidad o de pacientes críticos.

En su mayoría, los investigadores utilizan un solo tipo de vehículo para la atención de los eventos [4],[5],[10],[33],[16],[37],[18],[15],[34],[21],[35],[23],[25],[38],[26],[27],[28], en otras palabras suponen que cualquier vehículo está en la capacidad de responder cualquier llamada. Pero existen algunos autores como Peleg *et al.* [1] quienes tienen en cuenta los dos tipos de vehículo antes mencionados. Sin embargo aclaran que esto fue posible gracias a que contaban con información de los registros de los servicios del SEM de estudio.

Es frecuente que en la planificación de las actividades de los SEM se tenga en cuenta la programación de los turnos de los vehículos, la cual permite que los servicios se adapten a los cambios del comportamiento de la demanda. Como consecuencia, los SEM tendrían disponible durante las horas del día diferentes número de vehículos. Algunos investigadores tienen en cuenta esta característica de los recursos y programan la disponibilidad de los vehículos dependiendo de la hora del día [13],[33],[16],[36],[17],[31],[34],[21],[22],[38],[39]. Otros programan sus modelos con un número constante de vehículos durante el tiempo de simulación [4],[14],[31],[15],[25],[26],[28].

3.5 Velocidades, distancias y tiempos de viaje

Para calcular los tiempos de viaje, los autores utilizan información relacionada con la velocidad del vehículo y las distancias entre puntos de demanda, ubicación de locaciones y bases [1],[8]. Se encontró que algunos utilizan velocidades constantes durante todo el trayecto [13],[16],[17],[14], y otros varían la velocidad dependiendo del trayecto que se seleccione (diferentes

por tipo de vías) [37],[22], de la prioridad del evento [5], de la hora del día [36], de la hora del día y día de la semana [35], de la hora del día y del sector [15],[21] y del estado del vehículo [23],[26]. Para este último se considera, por ejemplo, que el vehículo se mueve más rápido cuando se dirige a prestar un servicio y más lento cuando está retornando a la base. También se encontraron trabajos que utilizan una velocidad crucero con una tasa de aceleración/desaceleración dependiendo del estado del vehículo [8],[34], por ejemplo, Ingolfsson *et al.* [8] en su modelo, asumieron que las ambulancias incrementaban su velocidad a una aceleración constante (a) hasta que alcanzaran una velocidad de crucero y luego desaceleran a la misma tasa a hasta que llegan a la ubicación de la llamada. Lo anterior es basado en observaciones de las velocidades medias de una ambulancia al responder a una llamada.

Existen factores que afectan los tiempo de viaje de un vehículo, entre los que se encuentran, las condiciones de tráfico (horas pico, los días de semana frente a los fines de semana, durante el día en función del tiempo de noche, etc.), las condiciones climáticas, la prioridad del evento, la calidad de las carreteras, la dificultad para encontrar la ubicación exacta de llamada, entre otros. Van den Berg *et al.* [22], Jagtenberg *et al.* [23] y Schmid *et al.* [31] utilizan tiempos de viaje que dependen de la hora del día. Andrade *et al.* [35] utilizan tiempos de viaje que dependen de la hora del día y del día de la semana. Aboueljinane *et al.* [10] utilizan tiempos de viaje que no solo dependen de la hora del día, sino también del día de la semana, tipo de llamada y prioridad. Pero algunos autores no tienen en cuenta estos factores y utilizan tiempos de viaje fijos entre trayectos, los cuales no dependen de la hora del día [13],[26],[28].

3.6 Reglas para la selección del hospital

Cuando la tripulación del SEM realiza la estabilización del paciente en el lugar del evento en algunas ocasiones es necesario trasladarlo a un hospital o centro de salud. Es el despachador quien le informa a la tripulación cuál es el hospital al que se deben dirigir. Para tomar esta decisión se utilizan criterios como: seleccionar el hospital que tenga las instalaciones adecuadas para el tratamiento del paciente, que tengan capacidad disponible o que sea cercanos al lugar del evento. También es posible tener en cuenta el deseo

del paciente en cuanto al hospital al que desea ser llevado [8],[10].

Para modelar esta actividad los autores utilizan como regla el hospital más cercano a la ubicación del evento [5],[35],[23]. Sin embargo, Ingolfsson *et al.* [8] mencionan que la proximidad no siempre es la única variable que influye, tal es el caso del SEM de Edmonton, Canadá. Ingolfsson *et al.* [8], con el análisis de la información de los servicios atendidos por este SEM concluyeron que un 50 % de los pacientes no son transportados al hospital más cercano. Es por esta razón que algunos autores utilizan en los modelos el análisis de los datos históricos relacionados con la selección del hospital al cual fueron trasladados los pacientes [29],[4],[8],[26],[28].

3.7 Aspectos adicionales consideradas en los modelos

Dependiendo del tipo de variables que se utilicen para analizar los modelos, estos se pueden clasificar en determinísticos y probabilísticos [43],[44]. Los modelos determinísticos [45],[18],[24],[27] son aquellos donde se supone que los datos se conocen con certeza. En este tipo de modelo las mismas entradas producen siempre el mismo estado y las mismas salidas. En otras palabras, el azar no juega ningún papel en el modelo.

A diferencia de los anteriores, en los modelo probabilístico o estocástico [29],[4],[5],[8],[10],[13],[33],[16],[30],[19],[20],[15],[34],[21],[25],[35],[23],[26],[40],[46],[47], algunos elementos no se conocen con certeza. En estos modelos se presupone que algunas variables son aleatorias, por lo tanto no tienen valores conocidos antes que se tomen las decisiones correspondientes.

Debido a esto, el azar interviene en el modelo de tal forma que una misma entrada puede producir diversos estados y salidas. Estos modelos probabilísticos tienden a reportar su mayor utilidad cuando intervienen en ellos muchas entradas inciertas y hay pocas restricciones [43],[44].

Algunas de las restricciones que se utilizan para modelar los problemas de relocalización de los vehículos de los SEM están basadas en la cobertura [33],[16],[36],[14],[18],[31],[20],[21],[35],[22],[24],[27],[40],[47], la capacidad de las bases de espera [13],[36],[14],[31],[15],[21],[35],[22],[24],[25], mover la misma ambulancia repetidamente [21], evitar tiempos de viaje largos [19],[21], penalizar las largas esperas [40], controlar el número de ambulancias a relocalizar [19], la cantidad de vehículos a despachar [4],[40] y el

número de vehículos disponibles [33],[16],[22].

4 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 2; 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.

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 [48]. 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 2 es la simulación. Una aplicación de este método lo presenta Gendreau *et al.* [21] 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 [49],[50].

Tabla 2: 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 | Referencias |
|--|--|--|
| Simulación | Aumentar el grado de preparación en el área de responsabilidad | [19] |
| | Maximizar la demanda cubierta en un tiempo T | [29],[21] |
| | Evaluar políticas de relocalización de los vehículos del SEM | [1],[51] |
| Simulación de eventos discretos | Reducir el porcentaje de arribos tardíos a la prestación del servicio | [23] |
| | Maximizar la demanda cubierta | [8],[16],[30],[34] [38] |
| | Minimizar el número de ambulancias y sus ubicaciones para cada grupo de tiempo | [20] |
| | Evaluar políticas de relocalización de los vehículos del SEM | [5],[8],[10],[15], [26],[42],[40],[46] |
| Optimización a partir de modelos matemáticos | Minimizar el tiempo de respuesta | [1],[4] |
| | Reducir al mínimo el número de bases abiertas | [22] |
| | Maximizar la demanda cubierta en un tiempo T | [33],[16],[36],[17], [18],[34],[35],[22], [24],[27],[39] |
| | Minimiza el número de relocalizaciones | [13],[36],[22],[39] |

| Método de solución | Objetivo de la investigación | Referencias |
|--|---|--------------------------|
| Optimización a partir de modelos matemáticos | Minimizar el número de vehículos ubicados en cada base | [36] |
| | Minimizar el coste total (o distancia) de las rutas de reubicación entre bases | [33],[15],[18] |
| | Minimizar el coste total (o distancia) de las rutas de reubicación entre bases | [33],[18],[15],[27] |
| | Evaluar políticas de relocalización de los vehículos del SEM | [4],[24],[40] |
| | Minimizar el número de llamadas que no son atendidas en un tiempo T de servicio deseado | [13] |
| Meta heurística - Heurísticas | Maximizar la demanda cubierta en un tiempo T | [37],[14],[31],[21],[35] |
| | Minimizar el número de ambulancias y sus ubicaciones para cada grupo de tiempo | [20] |
| | Aumentar el grado de preparación en el área de responsabilidad | [19] |
| | Minimizar el tiempo total de relocalización | [35] |
| | Evaluar políticas de relocalización de los vehículos del SEM | [5] |

Zhen *et al.* [15] 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.* [17] 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 [33],[45],[21]. 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.* [14] 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 [52]. 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 importan-

te 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.* [25] 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.* [8] 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 [5],[46].

Para la programación de los códigos de los modelos mencionados anteriormente se utilizan softwares como ARENA (simulación eventos discretos) [10],[16],[30], ServiceModel-promodel [8], o herramientas de apoyo a la toma de decisiones como IBM ILOG CPLEX Optimization Studio [13],[33],[16],[17],[18],[35],[22],[24],[27],[40], Visual Basic para Excel [8],[14] y FICO Xpress Optimizer [36] y lenguajes de programación como por ejemplo, Visual Studio C # [15], Matlab [13],[34], Java [20],[34], Python [42] y C++ [4],[5],[21], Andrade2015, Mason2013 y SIMSCRIPT [29]. Ingolfsson *et al.* [8] concluyen que uno de los beneficios que se tienen al utilizar paquetes de simulación son: un menor tiempo invertido en el desarrollo de modelos y las capacidades integradas de los softwares para la generación de variables aleatorias y el análisis de las salidas del modelo.

Cualquiera que sea el método de solución que se escoja para abor-

dar 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 presenta una clasificación de las medidas de desempeño encontradas en la literatura y utilizadas en los SEM.

5 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. A continuación su definición.

- **Tiempo de respuesta:** se define como el período entre la recepción de una llamada y la primera llegada de un vehículo al lugar del evento [1],[10]. Esta es la medida de desempeño más utilizada y se debe a que es la medida, desde el punto de vista de los pacientes, que mejor representa el desempeño de un SEM. 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 [53].

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 [4],[17],[19],[14],[15],[23],[42],[40]. Otros autores prefieren evaluarlo considerando el porcentaje de servicios atendidos dentro de un tiempo de respuesta objetivo T . Este último caso se suele referenciar con el nombre de cobertura en un tiempo estándar T [1],[29],[5],[8],[10],[13],[16],[30],[17],[19],[18],[31],[34],[21],[35],[22],[25],[26],[27].

- **Nivel de preparación de las zonas:** la preparación es una medida de desempeño para evaluar la capacidad que se tiene en una zona de atender a los pacientes potenciales. La manera más sencilla de definir el nivel de preparación es como una relación entre el número de ambulancias disponibles en una zona en un tiempo determinado sobre el número de habitantes de dicha zona. De esta manera el nivel de preparación es una medida que permite comparar el resultado de aplicar diferentes políticas de relocalización en un tiempo determinado. Existen autores que además de considerar el número de ambulancias y el número de habitantes introducen factores asociados al tiempo que tarda cada ambulancia en llegar a la zona [19].
- **Porcentaje de arribos tardíos:** es el porcentaje de servicios que se atendieron por fuera de un límite de tiempo T . Cuando esto sucede se considera que el arribo o llegada a la escena fue tardío [23].
- **Tasa de utilización de los vehículos:** es la relación entre el tiempo de servicio sobre el tiempo total de trabajo de un vehículo [5],[8],[10],[30],[15],[34],[26],[42]. Generalmente, un SEM se diseña para tener una baja tasa de utilización con el fin de garantizar que siempre habrán vehículos disponibles en caso que se presente una o más llamadas de alta prioridad [7]. También, es importante que todos los vehículos tengan la misma tasa de utilidad ya que así se garantiza que no hay equipos sub o sobre-utilizados .
- **Horas extras de los equipos:** es una medida que se refiere al trabajo que se realiza por fuera del turno programado al personal que opera los vehículos. Esto puede suceder por ejemplo cuando se asigna un servicio a un vehículo lejos de las base cuando el turno está cerca de finalizar. Las horas extras resultan en un incremento en los costos salariales, así como retrasos en el inicio de los próximos turnos [8].
- **Número o porcentaje llamadas pérdidas:** se refiere al nú-

mero o porcentaje de llamadas que no son atendidas, esto sucede porque el tiempo de espera para el envío de un vehículo es alto [17],[25],[26],[28].

- **Número de relocalizaciones:** es el número de cambios de ubicaciones (bases de espera) que realiza un vehículo con el fin de mejorar el servicio en un tiempo dado [13],[36],[19],[18],[31],[22],[25].
- **Número de bases utilizadas (abiertas) en un tiempo T:** es el número de bases o sitios de espera que utilizan los vehículos para que el sistema pueda brindar la cobertura deseada [35],[22].
- **Distancia de reubicación:** es la distancia medida en km que debe recorrer un vehículo cuando es asignado a una nueva base de espera [17],[35].
- **Costos por reubicación:** en algunos casos se puede presentar que el número de relocalizaciones a realizar resulte impráctica en la realidad o genere costos de rodamiento elevados. Por esta razón, algunos autores en sus estudios consideran como una medida de desempeño el costo generado por la reubicación de los vehículos [13],[31],[15],[21],[25].

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 [13],[16],[17],[14],[31],[22],[23],[40] y es utilizada para determinar la escalabilidad de los modelos [23] y como medida de comparación para analizar la eficiencia entre dos o más modelos bajo unas mismas políticas de relocalización [13],[16],[22].

6 Estrategias para la recolección de datos

Entre dos ciudades pueden existir aspectos similares como una mayor demanda de servicios de emergencias médicos en las zonas más

pobladas o dificultades en el transporte durante las horas pico, sin embargo, el contexto socio-cultural y económico puede generar grandes diferencias entre los patrones de la distribución de la demanda. Por ejemplo, en países con estaciones climáticas marcadas, la distribución de la demanda varía considerablemente con la estación climática en la que se analiza el servicio, mientras que en países que no tienen esta característica los patrones de demanda no presentan variaciones considerables a lo largo del año.

Por lo anterior, los patrones de demanda de servicios de emergencias médicos es una característica intrínseca de cada ciudad, región o país en el que el SEM de estudio presta sus servicios. En consecuencia en cada una de las publicaciones revisadas en este artículo se utilizan diferentes datos de demanda, los cuales corresponden a las ciudades o regiones donde se realizaron las investigaciones. En esta revisión se encontró que la mayoría de los estudios de relocalización se han realizado en Europa [4],[5],[10],[13],[36],[37],[30],[19],[18],[31],[20],[54],[38],[23],[22],[39],[24],[27], seguido de Norteamérica [29],[8],[33],[16],[17],[34],[21],[26],[40],[28], Asia [1],[15],[25] y Sudamérica [14],[35].

No obstante, los datos de demanda son intrínsecos a la zona de estudio hay cierta características que pueden ser tenidas en cuenta en forma general. Como ya se ha mencionado estas características tiene que ver con el nivel de detalle con que se consideran los datos. Schmid *et al.* [31] realizaron un análisis en el que evaluaron el impacto que tiene sobre el modelo agrupar zonas de tal manera que el número total de zonas sea menor. Los autores concluyeron que con esta práctica disminuye la calidad de la solución resultante y no se obtiene un adecuado nivel de realismo.

En general la práctica más utilizada para la recolección de datos con respecto a la demanda es el uso de datos históricos del SEM de estudio [16],[25],[21],[20],[33],[22],[8],[10],[30],[13],[29],[40],[4]. En algunos casos debido a la falta de información de la demanda del servicio, los autores utilizan información del número de habitantes dividido por zonas de la ciudad donde se encuentra ubicado el SEM de estudio [19].

Para cálculo de los tiempos de viaje y las velocidades los autores utilizan datos históricos de las ambulancias del SEM de estudio, e.g. de las velocidades [5],[22] o de tiempos de viaje [29],[30]. También utilizan información de la red de carreteras de la ciudad [4],[33],[15],[26] y, aunque no es muy frecuente, algunos utilizan información de los tiempos de viaje entre zonas recolectados de otros servicios, como por ejemplo de los bomberos [16],[19] o de una flota de taxis [31].

Para algunos autores es importante considerar también el tiempo que el vehículo permanece en el hospital mientras que la tripulación hace entrega del paciente y completa la documentación necesaria [29],[4]. Para esto utilizaron datos históricos del servicio.

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 [40].

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 [31],[35]. Schmid *et al.* [31] 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 [4],[5],[31], Geocode [1], Google Maps [35], MapQuest [37] y ArcGIS [14]. 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.

Finalmente, otra ventaja de los SIG es la presentada por Henderson *et al.* [46] 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.

7 Verificación y validación del modelo

La verificación del modelo computarizado asegura que la programación y aplicación del modelo conceptual son correctas, esto permite identificar si el modelo está realizando lo que se propuso con su formulación o si es necesario depurarlo. Mientras que el proceso de validación tiene como objetivo asegurar que el modelo es una representación exacta del sistema de estudio. Si un modelo está validado, las decisiones hechas con el modelo son similares a las de la experiencia física [55].

Entre las técnicas de verificación y validación que se han utilizado para resolver los problemas de relocalización de los vehículos de un SEM están:

- **Análisis de sensibilidad:** consiste en cambiar los valores de los parámetros de entrada del modelo (por ejemplo, las tasas de llegada) para determinar los efectos sobre el comportamiento o salida del modelo. El objetivo es evaluar si el modelo se comporta como se esperaba. Por ejemplo, Van den Berg *et al.* [22] realizaron cambios en el tiempo de respuesta para evaluar el nivel de cobertura; Schmid *et al.* [4] realizaron cambios en el volumen solicitudes por día y cambios en el tamaño de la flota y Zhen *et al.* [15] evaluaron el impacto que tiene sobre el tiempo

de respuesta y los planes de despliegue de ambulancias parámetros como la tasa de arribo entre dos solicitudes, el número de ambulancias, el número de bases y la cantidad de hospitales.

- **Validación con personal del SEM:** 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 [10],[30].
- **Validación paso a paso:** en esta técnica se realiza un seguimiento de los movimientos de los vehículos y de la ocurrencia de eventos, con el fin de validar la exactitud de la lógica del modelo. Por ejemplo, Ingolfsson et al. [8] y Aboueljinane *et al.* [10] rastrearon los tiempos de viaje y la selección del vehículo.
- **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 [29],[8],[10],[42],[16],[30],[38]. Sin embargo, aunque esto último suceda una pregunta muy importante que se deberían plantear los investigadores está relacionada con la calidad y fiabilidad de la información que se está utilizando [40]. Esto debido a que generalmente el registro de los servicios solicitados a un SEM es realizado en forma manual, por lo que en muchos casos se pueden presentar que los datos recolectados estén incompletos y presenten errores tipográficos.

8 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.* [21] 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 [34],[33]. Por ejemplo, Maxwell *et al.* [26] 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.* [28] 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.* [34] 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 [4] y Jagtenberg *et al.* [23].

Por otro lado, existen estudios en los que se tienen en cuenta los dos políticas anteriores [5],[37],[16], tal es el caso de Van Buuren *et al.* [5] 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 [36],[39],[40] 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 [19].

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 [28] y la de permitir la relocalización de toda la flota. Con respecto a esta última, en el SEM de estudio de Yue *et al.* [25] (), 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.* [33] el rendimiento del servicio se veía afectado considerablemente.

En el SEM de estudio de Rajagopalan *et al.* [20] los autores encontraron que es importante aplicar políticas que limiten el número de ve-

ces que un mismo vehículo puede ser relocalizado en un tiempo determinado. Lo anterior para evitar por ejemplo sucesivas relocalizaciones de un mismo vehículo. En [25],[31],[21],[29],[14],[15],[22],[13],[35],[33],[36],[39],[18],[27] 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 *et al.* [22] 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.* [14] 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 [21] 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.

9 Conclusiones

En este artículo se revisó la literatura relacionada con el tratamiento de los problemas de relocalización en Servicios de Emergencia Médicos (SEM). Para esto, inicialmente se presentó un resumen del proceso de atención de un SEM y se identificaron las etapas en el proceso donde es posible aplicar políticas de relocalización y la importancia de las mismas. Posterior a esta descripción se discutieron los métodos de solución de los problemas de relocalización más implementados en la literatura. En este trabajo también se identificaron los objetivos de las investigaciones y se listaron las medidas de desempeño más utilizadas en la evaluación de políticas de relocalización. Adicionalmente, se discutieron aspectos relacionados con el diseño de los modelos, la recolección de datos y técnicas de verificación y validación de los modelos. Finalmente, se presentaron algunas políticas de relocalización utilizadas en los estudios revisados.

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. Por ejemplo, Van den Berg *et al.* [22] 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.* [19] para otro SEM encontraron que la cobertura se podría mejorar si se abrían nuevas bases de espera. Por lo anterior, y dado que las políticas y regulaciones varían dependiendo de la ciudad [22],[21],[23],[8] cada SEM debe ser considerado como un caso particular.

Esta revisión permitió identificar que los principales problemas abordados por los investigadores son los que tienen como objetivo maximizar la demanda de los servicios cubierta en un tiempo T , y 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 en la sección 5, 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.

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.* [25] 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.

Adicional a lo anterior, se propone incluir en trabajos futuros la evaluación de un conjunto más amplio de políticas de relocalización y la inclusión en los modelos de herramientas que generen información en tiempo real del comportamiento del tráfico de la ciudad donde se realicen los estudios.

Agradecimientos

Los autores queremos agradecer el apoyo para la realización de este trabajo a: Proyecto de regalías “Plataforma tecnológica para los servicios de teleasistencia, emergencias médicas, seguimiento y monitoreo permanente a los pacientes y apoyo a los programas de promoción y prevención”, específicamente en el cuarto eje estratégico de dicho proyecto “Sistema de soporte para la toma de decisiones logísticas en el sistema integrado de emergencias y seguridad (SIES-M)”; Coomeva Emergencias Médicas y al comité para el desarrollo de la Investigación de la Universidad de Antioquia (Fondo Codi 2010) con el proyecto titulado: “Identificación de un modelo de decisión para la operación logística del Sistema de teleasistencia prehospitalaria del área metropolitana del Valle de Aburrá”.

Referencias

- [1] K. Peleg and J. S. Pliskin, “A geographic information system simulation model of EMS: reducing ambulance response time,” *American Journal of Emergency Medicine*, vol. 22, no. 3, pp. 164–170, 2004. 164, 169, 171, 172, 173, 175, 180, 184, 187, 189
- [2] R. Sánchez-Mangas, A. García-Ferrer, A. de Juan, and A. M. Arroyo, “The probability of death in road traffic accidents. How important is a quick medi-

- cal response?" *Accident; analysis and prevention*, vol. 42, no. 4, pp. 1048–56, Jul. 2010. 164
- [3] R. P. Gonzalez, G. R. Cummings, H. A. Phelan, M. S. Mulekar, and C. B. Rodning, "Does increased emergency medical services prehospital time affect patient mortality in rural motor vehicle crashes? A statewide analysis." *American journal of surgery*, vol. 197, no. 1, pp. 30–4, Jan. 2009. 164
 - [4] V. Schmid, "Solving the dynamic ambulance relocation and dispatching problem using approximate dynamic programming," *European journal of operational research*, vol. 219, no. 3, pp. 611–621, 2012. 164, 169, 172, 174, 175, 177, 180, 181, 183, 184, 187, 188, 189, 192
 - [5] 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)*. IEEE, Dec. 2012, pp. 1–12. 164, 169, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 180, 181, 183, 184, 185, 187, 188, 189, 192
 - [6] 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*, Rio de Janeiro, 2012, p. 12. 164, 167
 - [7] L. Aboueljinane, E. Sahin, and Z. Jemai, "A review on simulation models applied to emergency medical service operations," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 66, no. 4, pp. 734–750, 2013. 164, 167, 169, 185
 - [8] A. Ingolfsson, E. Erkut, and S. Budge, "Simulation of single start station for Edmonton EMS," *Journal of the operational research society*, vol. 54, no. 7, pp. 736–746, 2003. 165, 169, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 180, 183, 184, 185, 187, 190, 194
 - [9] 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. 165
 - [10] L. Aboueljinane, 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)*. IEEE, Dec. 2012, pp. 1–12. 165, 172, 174, 175, 176, 177, 180, 183, 184, 185, 187, 190
 - [11] S. Su and C.-L. Shih, "Modeling an emergency medical services system using computer simulation," *International Journal of Medical Informatics*, vol. 72, no. 1-3, pp. 57–72, 2003. 165

- [12] Y. Liu, Y. Yuan, Y.-h. Li, and H. Pang, “A chance constrained programming model for reliable emergency vehicles relocation problem,” *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 96, pp. 671–682, 2013. 165, 169
- [13] J. Naoum-Sawaya and S. Elhedhli, “A stochastic optimization model for real-time ambulance redeployment,” *Computers & Operations Research*, vol. 40, no. 8, pp. 1972–1978, 2013. 165, 169, 172, 175, 176, 177, 180, 181, 183, 184, 186, 187, 193
- [14] S. Céspedes, N. Velasco, and C. Amaya, “Localización y relocalización de ambulancias del centro regulador de urgencias y emergencias de Bogotá,” Universidad de los Andes, Bogotá, Tech. Rep., 2008. 167, 169, 171, 172, 175, 177, 181, 182, 183, 184, 186, 187, 189, 193
- [15] L. Zhen, K. Wang, H. Hu, and D. Chang, “A simulation optimization framework for ambulance deployment and relocation problems,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 72, pp. 12–23, 2014. 167, 169, 170, 171, 172, 174, 175, 176, 177, 180, 181, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 193
- [16] K. Sudtachat, M. E. Mayorga, and L. A. Mclay, “A nested-compliance table policy for emergency medical service systems under relocation,” *Omega*, Jun. 2015. 169, 172, 174, 175, 177, 178, 180, 183, 184, 186, 187, 188, 190, 192
- [17] M. Gendreau, G. Laporte, and F. Semet, “The maximal expected coverage relocation problem for emergency vehicles,” *Journal of the Operational Research Society*, vol. 57, no. 1, pp. 22–28, 2006. 169, 174, 175, 180, 182, 183, 184, 186, 187
- [18] M. Moeini, Z. Jemai, and E. Sahin, “Location and relocation problems in the context of the emergency medical service systems: a case study,” *Central European Journal of Operations Research*, vol. 23, no. 3, pp. 641–658, Dec. 2014. 169, 172, 175, 177, 180, 181, 183, 184, 186, 187, 193
- [19] T. Andersson and P. Värbrand, “Decision support tools for ambulance dispatch and relocation,” *Operational research society*, vol. 58, no. 2, pp. 195–201, Feb. 2007. 169, 171, 172, 173, 174, 177, 180, 181, 184, 185, 186, 187, 188, 192, 194
- [20] H. K. Rajagopalan, C. Saydam, and J. Xiao, “A multiperiod set covering location model for dynamic redeployment of ambulances,” *Computers & Operations Research*, vol. 35, no. 3, pp. 814–826, 2008. 169, 172, 177, 180, 181, 183, 187, 192
- [21] M. Gendreau, G. Laporte, and F. Semet, “A dynamic model and parallel tabu search heuristic for real-time ambulance relocation,” *Parallel computing*, vol. 27, no. 12, pp. 1641–1653, Nov. 2001. 169, 171, 172, 174, 175, 176, 177, 178, 180, 181, 182, 183, 184, 186, 187, 191, 193, 194

- [22] P. L. van den Berg and K. Aardal, "Time-dependent MEXCLP with start-up and relocation cost," *European Journal of Operational Research*, vol. 242, no. 2, pp. 383–389, Apr. 2015. 169, 170, 172, 174, 175, 176, 177, 178, 180, 183, 184, 186, 187, 188, 189, 193, 194
- [23] C. Jagtenberg, S. Bhulai, and R. van der Mei, "An efficient heuristic for real-time ambulance redeployment," *Operations Research for Health Care*, vol. 4, pp. 27–35, Mar. 2015. 169, 172, 174, 175, 176, 177, 180, 184, 185, 186, 187, 192, 194
- [24] K. Schneeberger, K. F. Doerner, A. Kurz, and M. Schilde, "Ambulance location and relocation models in a crisis," *Central European Journal of Operations Research*, pp. 1–27, Jul. 2014. 169, 177, 180, 181, 183, 187
- [25] 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. 169, 171, 172, 174, 175, 177, 183, 184, 186, 187, 192, 193, 195
- [26] M. S. Maxwell, S. G. Henderson, and H. Topaloglu, "Ambulance redeployment: An approximate dynamic programming approach," in *Proceedings of the winter simulation conference (WSC)*. IEEE, Dec. 2009, pp. 1850–1860. 169, 172, 174, 175, 176, 177, 180, 184, 185, 186, 187, 188, 191
- [27] 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*. Symposium on Operations Research, SOR, 2013, pp. 343–350. 169, 172, 175, 177, 180, 181, 183, 184, 187, 193
- [28] M. S. Maxwell, M. Restrepo, S. G. Henderson, and H. Topaloglu, "Approximate dynamic programming for ambulance redeployment," *INFORMS Journal on Computing*, vol. 22, no. 2, pp. 266–281, May 2010. 169, 172, 174, 175, 176, 177, 186, 187, 191, 192
- [29] J. F. Repede and J. J. Bernardo, "Developing and validating a decision support system for locating emergency medical vehicles in Louisville, Kentucky," *European journal of operational research*, vol. 75, no. 3, pp. 567–581, 1994. 169, 174, 177, 180, 183, 184, 187, 188, 190, 193
- [30] L. Aboueljinane, 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," *Simulation modelling practice and theory*, vol. 47, pp. 46–59, Sep. 2014. 169, 172, 174, 177, 180, 183, 184, 185, 187, 188, 190

- [31] V. Schmid and K. F. Doerner, “Ambulance location and relocation problems with time-dependent travel times,” *European journal of operational research*, vol. 207, no. 3, pp. 1293–1303, 2010. 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 181, 184, 186, 187, 188, 189, 193
- [32] J. W. Hauge and K. N. Paige, *Learning SIMUL8: the complete guide*, 2004. 172
- [33] R. Nair and E. Miller-Hooks, “Evaluation of relocation strategies for emergency medical service vehicles,” *Transportation research record*, no. 2137, pp. 63–73, Dec. 2009. 172, 174, 175, 177, 178, 180, 181, 182, 183, 187, 188, 191, 192, 193
- [34] R. Alanis, A. Ingolfsson, and B. Kolfal, “A markov chain model for an EMS system with repositioning,” *Production and operations management*, vol. 22, no. 1, pp. 216–231, Jan. 2013. 172, 174, 175, 176, 177, 180, 183, 184, 185, 187, 191, 192
- [35] 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,” *International Transactions in Operational Research*, vol. 22, no. 3, pp. 473–501, May 2015. 172, 175, 176, 177, 180, 181, 183, 184, 186, 187, 188, 189, 193
- [36] D. Degel, L. Wiesche, S. Rachuba, and B. Werners, “Reorganizing an existing volunteer fire station network in Germany,” *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 48, no. 2, pp. 149–157, Jun. 2014. 172, 175, 176, 177, 180, 181, 183, 186, 187, 192, 193
- [37] H. Billhardt, M. Lujak, V. Sánchez-Brunete, A. Fernández, and S. Ossowski, “Dynamic coordination of ambulances for emergency medical assistance services,” *Knowledge-Based Systems*, vol. 70, pp. 268–280, Nov. 2014. 172, 174, 175, 176, 181, 187, 189, 192
- [38] M. Poulton and G. Roussos, “Towards smarter metropolitan emergency response,” in *IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. IEEE, Sep. 2013, pp. 2576–2580. 172, 174, 175, 180, 187, 190
- [39] L. Wiesche, “Time-dependent dynamic location and relocation of ambulances,” in *Operations research proceedings 2013*, ser. Operations Research Proceedings, D. Huisman, I. Louwerse, and A. P. Wagelmans, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2014, pp. 481–486. 172, 175, 180, 187, 192, 193

- [40] A. Haghani and S. Yang, “Real-time emergency response fleet deployment: concepts, systems, simulation & case studies,” in *Dynamic fleet management*, ser. Operations Research/Computer Science Interfaces Series, V. Zeimpekis, C. D. Tarantilis, G. M. Giaglis, and I. Minis, Eds. Boston, MA: Springer US, 2007, vol. 38, pp. 133–162. 172, 177, 180, 181, 183, 184, 186, 187, 188, 190, 192
- [41] A. M. Gnanasekaran, M. Moshref-Javadi, H. Zhong, M. Moghaddam, and S. Lee, “Impact of patients priority and resource availability in ambulance dispatching,” in *Industrial and Systems Engineering Research Conference*. Institute of Industrial Engineers, 2013, pp. 1727–1736. 172
- [42] A. J. Mason, “Simulation and real-time optimised relocation for improving ambulance operations,” in *Handbook of Healthcare Operations Management*, ser. International Series in Operations Research & Management Science, B. T. Denton, Ed. New York, NY: Springer New York, 2013, vol. 184, pp. 289–317. 174, 180, 183, 184, 185, 190
- [43] H. A. Taha, *Investigación de operaciones*, séptima ed. Pearson Educación, 2004. 177
- [44] H. Frederick and L. Gerald, *Introducción a la investigación de operaciones*, novena ed., M. Hill, Ed., 2010. 177
- [45] L. Brotcorne, G. Laporte, and F. Semet, “Ambulance location and relocation models,” *European journal of operational research*, vol. 147, no. 3, pp. 451–463, 2003. 177, 182
- [46] S. G. Henderson and A. J. Mason, “Ambulance service planning: simulation and data visualisation,” in *Operations research and health care*, ser. International Series in Operations Research & Management Science, M. L. Brandeau, F. Sainfort, and W. P. Pierskalla, Eds. Boston: Kluwer Academic Publishers, Jan. 2005, vol. 70, pp. 77–102. 177, 180, 183, 189
- [47] A. Sathe and E. Miller-Hooks, “Optimizing location and relocation of response units in guarding critical facilities,” *Transportation research board*, vol. 1923, pp. 127–136, jan 2005. 177
- [48] 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*, Jul. 2009, pp. 200–203. 178
- [49] L. J. Shuman, H. Wolfe, and M. J. Gunter, “RURALSIM: the design and implementation of a rural EMS simulator,” *Journal of the Society for Health Systems*, vol. 3, no. 3, pp. 54–71, 1992. 179

- [50] 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,” *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 24, no. 2, pp. 125–141, 1990. 179
- [51] O. Fujiwara, T. Makjamroen, and K. K. Gupta, “Ambulance deployment analysis: A case study of Bangkok,” *European Journal of Operational Research*, vol. 31, no. 1, pp. 9–18, 1987. 180
- [52] F. Glover and B. Melián, “Búsqueda Tabú,” *Inteligencia Artificial*, vol. 19, pp. 29–48, 2003. 182
- [53] E. S. Savas, “Simulation and cost-effectiveness analysis of New York’s emergency ambulance service,” *Management science*, vol. 15, no. 12, pp. 608–627, 1969. 184
- [54] M. Reuter and W. Michalk, “Towards the dynamic relocation of ambulances in Germany: the risk of being too late,” in *Annual SRII Global Conference*. IEEE, Jul. 2012, pp. 642–649. 187
- [55] R. G. Sargent, “Verification and validation of simulation models,” in *Proceedings winter simulation conference (WSC)*. IEEE, Dec. 2011, pp. 183–198. 189