

## LOCALIZACIÓN Y DESPACHO DE VEHÍCULOS DE EMERGENCIA

Cristián E. Cortés, U. de Chile e Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI) – ccortes@ing.uchile.cl

Vladimir Marianov, Pontificia U. Católica de Chile e Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI) – marianov@ing.puc.cl

Gonzalo Pérez, Pontificia U. Católica de Chile – gaperez2@uc.cl

Pablo A. Rey, Universidad Tecnológica Metropolitana – prey@utem.cl

*Palabras clave: Servicios de Emergencia, Localización, Tiempo de Respuesta, Cobertura, Atención Pre-hospitalaria, Metaheurística, Adherencia, Triage.*

### RESUMEN

En este trabajo se propone un enfoque de optimización-simulación para definir la localización y políticas de operación de una flota de vehículos de un sistema de servicio de atención médica pre-hospitalaria en la ciudad de Santiago de Chile. Los proveedores de servicios de atención médica de emergencia se enfrentan a un gran desafío cuando deben manejar sus recursos móviles dado que su localización, así como su operación, tiene un impacto directo en el nivel de servicio, el cual se relaciona con el tiempo que transcurre entre que se recibe una solicitud de emergencia y el instante en el que el equipo médico llega al lugar del evento. Se consideró una flota con dos tipos de vehículos y una demanda de atención médica heterogénea clasificada según urgencia a través de un sistema de *triage* en tres categorías. Cada categoría tiene diferentes requerimientos asociados a los vehículos que pueden atenderlas y los centros de salud a los cuales pueden ser derivados. El problema fue abordado de manera estratégica y táctica considerando políticas de despacho y relocalización de los vehículos. Se desarrolló un modelo de programación entera y una metaheurística junto con un simulador que permite recrear el comportamiento de los sistemas de forma detallada. Se realizaron varios análisis de sensibilidad y de escenarios enfocados en los parámetros principales del problema como, por ejemplo, el número de vehículos disponibles y el nivel de adherencia a las políticas establecidas. Se concluye que, mediante la utilización de las herramientas desarrolladas es posible apoyar la toma de decisiones en este sistema para, así, mejorar su desempeño.

## ABSTRACT

In this paper we propose an optimization-simulation approach to define the location and operation policies of a fleet of vehicles in a pre-hospital medical attention service in the city of Santiago, Chile. The emergency service providers face a great challenge to handle the mobile resources as their location and operation, have a direct impact on the level of service, which is closely related to the difference in time between the instant of the emergency call and the arrival of the medical staff to the location of the incident. We considered a fleet with two types of vehicles and a heterogeneous demand for medical attention classified according to urgency with a *triage* system of three categories. Each category has different requirements associated with the vehicles and derivation medical centers where the emergency can be attended. The problem was addressed from strategic and tactical approaches considering dispatch policies as well as relocation of vehicles. We developed an integer optimization model along with a metaheuristic that work together with a simulator to represent the reality in the best possible way. Several sensitivity analyses were performed focused on the main parameters of the problem, such as for example, the number of available vehicles for each type of attention, the shifts durations and the adherence to the established policies. We conclude that, by using the developed tools it is possible to support the decisions of the system improving their performance.

**Keywords:** Emergency services, Location, Response time, Covering, pre-hospital attention, Metaheuristic, Adherence, *Triage*

## INTRODUCCIÓN

### Motivación

La atención pre-hospitalaria comprende toda atención médica que se entrega desde que se recibe la solicitud de atención de emergencia de un paciente hasta que se encuentra recuperado o es derivado a algún centro de salud. Frente a situaciones de emergencia, en especial para los casos de mayor gravedad, el tiempo que demora el personal médico en llegar a entregar esa atención pre-hospitalaria tiene un impacto en la supervivencia de los pacientes (Wilde, 2013). Este tiempo depende de diversos factores. Uno muy importante es la localización que se tiene para los vehículos de emergencia que atienden las solicitudes de atención. Esto dado que si algunos vehículos se encuentran localizados cerca del lugar desde el cual se genera la solicitud de atención, estos pueden llegar en un menor tiempo al lugar del evento. Una optimización de esta localización puede generar mejoras considerables en relación a estos tiempos (McCormack y Coates, 2015).

Entonces, el problema abordado es interesante porque generar una mejor localización de los recursos móviles puede ayudar a disminuir los tiempos de respuesta frente a

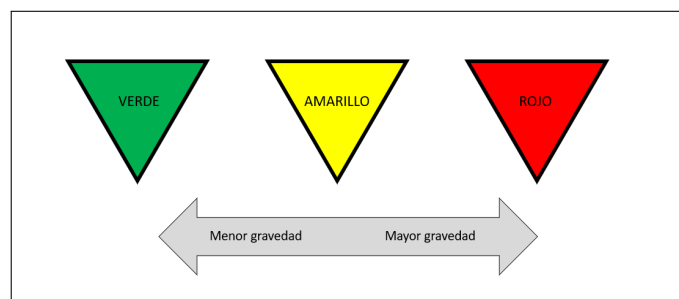
emergencias y, en algunos casos, disminuir la mortalidad asociada a esos eventos (Baez, 2017; Erkut et al., 2008).

Con esto en mente, se propuso desarrollar una metodología que permita optimizar la localización de las bases de despacho y asignación de vehículos de emergencia para mejorar el nivel de servicio de los sistemas de emergencia médica.

En particular, a continuación se presentará el modelo matemático desarrollado y la simulación implementada para recrear el funcionamiento de estos sistemas.

### Descripción del problema

En este problema, una base corresponde a una instalación en donde se pueden estacionar vehículos de emergencia a la espera de instrucciones y solicitudes de atención durante sus horarios de trabajo. Se consideran 2 tipos de vehículos y 5 turnos de trabajo distintos. Por otro lado, se considera que la demanda asociada a solicitudes de atención puede aparecer en cualquier parte de la ciudad y esta se encuentra separada en 3 clases en función de su urgencia y gravedad como se muestra en la figura 1. Esta clasificación se conoce como *triage* y cada *triage* puede ser atendido por ambos o solo uno de los tipos de vehículos de emergencia disponibles. Esta clasificación es usada para darle mayor prioridad para ser atendidos a los casos más graves por sobre los menos graves.



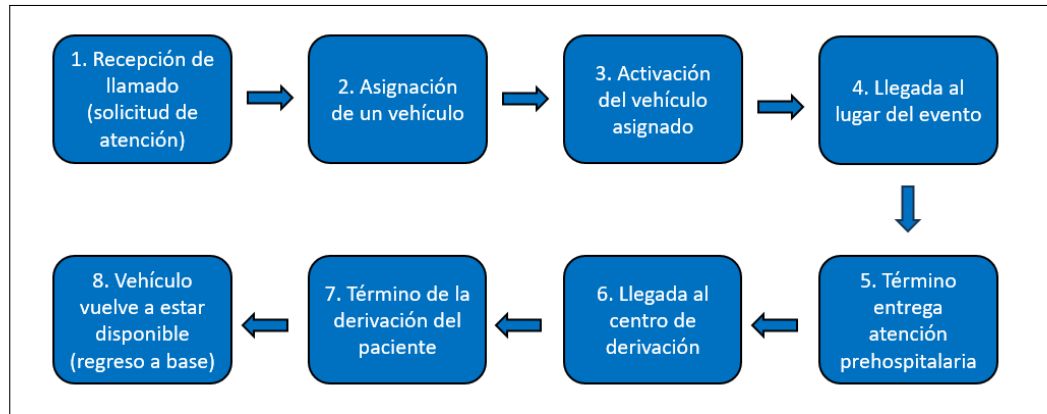
**Figura 1:** Escala o clasificación por triage.

El área geográfica considerada en este estudio corresponde a la Región Metropolitana. La demanda puede aparecer en cualquier punto del plano geográfico y se observó una distribución heterogénea de la demanda en la ciudad así como en distintos horarios del día.

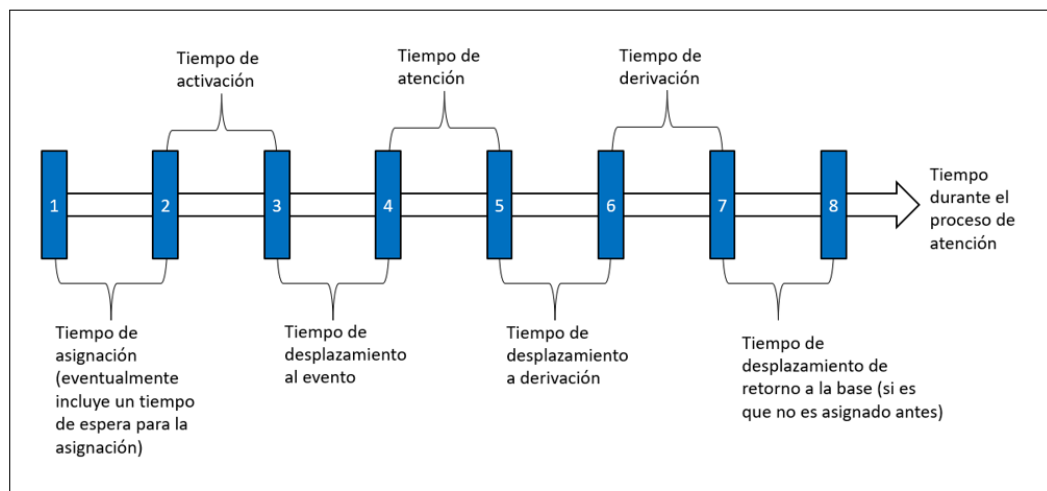
### El proceso de atención

El proceso de atención está consituido por diferentes etapas como se muestra en las figuras 2 y 3. Primero se tiene la recepción del llamado de solicitud de atención de emergencia, el

cual es procesado por personal médico que clasifica cada evento según el sistema de *triage* antes mencionado. Luego de la *recepción del llamado*, se realiza la *asignación de un vehículo* de emergencia a ese evento según una política de despacho determinada. En este estudio se consideró para la política de despacho la asignación del vehículo que se encuentra más cerca, en términos de tiempo, al lugar del evento así como una asignación según distritos definidos.



**Figura 2:** Etapas del proceso de atención pre-hospitalaria.



**Figura 3:** Tiempos asociados a los subprocesos del proceso de atención pre-hospitalaria.

Posterior a esa asignación se concreta el despacho al informar a la tripulación de la ambulancia seleccionada que debe dirigirse al lugar del evento asociado a entregar la atención médica correspondiente. Este proceso es el de *activación del vehículo de emergencia*. Enseguida, el vehículo asignado comienza su trayecto hacia el evento. Esta etapa corresponde al subproceso de *desplazamiento al lugar del evento*.

Una vez que el personal médico ha llegado al lugar de la emergencia, este procede a

entregarle la *atención pre-hospitalaria* correspondiente. Luego de esto, el paciente es derivado a un centro asistencial. Esta etapa es denominada como *desplazamiento a derivación*.

Al llegar al centro de derivación correspondiente, el paciente es *derivado* al personal médico del lugar y así concluye la atención asociada a ese evento y el vehículo de emergencia vuelve a considerarse como disponible por lo que la tripulación vuelve a su base asignada.

Si bien este estudio tiene su enfoque centrado en la disminución de los tiempos de respuesta a través de una buena localización de los recursos móviles que permita disminuir los tiempos de desplazamiento, es importante destacar que una parte del tiempo de respuesta se asocia a la selección y despacho de los vehículos de emergencia, ambos subprocesos en los cuales, eventualmente, se podría ganar tiempo de forma independiente a las decisiones de localización. Se consideraron 2 tipos de vehículos. El primer tipo corresponde a ambulancias que son capaces de atender todo tipo de eventos. Es decir, todos los *tríages*. El segundo tipo corresponde a un vehículo menos equipado que solo es capaz de atender los eventos de menor gravedad. Es decir, eventos de *triage* verde. También se consideraron los horarios de atención de los centros de salud.

Se utilizó como solución o caso base la localización real de los vehículos de emergencia operados por el proveedor de servicios con el que se trabajó.

En relación a los centros de derivación, cada uno de los centros considerados tiene distintas capacidades de atención médica o *nivel de resolución*. Este *nivel de resolución* define si un paciente puede ser derivado o no a un centro de derivación determinado y por lo tanto tiene un impacto directo en la operación.

## Indicadores de desempeño

Los indicadores más relevantes considerados en el estudio son el tiempo de respuesta, el cumplimiento, la cobertura y algunos percentiles del tiempo de respuesta. En particular el percentil 90 de la distribución de los tiempos de respuesta. El primer indicador, cómo fue mencionado, corresponde al tiempo que demora el vehículo de emergencia en llegar al paciente desde que se generó la solicitud de atención asociada. Por otro lado, el cumplimiento corresponde a la proporción de eventos para los cuales el proveedor de servicio fue capaz de llegar antes de un umbral aceptable definido como el nivel de servicio o SLA por sus siglas en inglés (*service level agreement*). La cobertura, de forma más general, indica la proporción de eventos atendidos con un tiempo de respuesta inferior a un determinado umbral.

Finalmente, el percentil 90 corresponde al tiempo de respuesta que está por sobre el 90 % de los tiempos de respuesta de los eventos.

## Políticas de operación

Existen diversas políticas de operación aplicables en estos sistemas. A continuación se presentan algunas consideradas en este estudio y las cuales fueron implementadas en el simulador desarrollado. Estas políticas de operación definen la manera en la que se despachan los vehículos para satisfacer la demanda y su comportamiento a lo largo del día.

1. Los eventos de *triage* rojo y amarillo solo pueden ser atendidas por vehículos de tipo 1.
2. Frente a la aparición de un nuevo evento de *triage* rojo, los vehículos que se encuentren asignados a una demanda de menor gravedad pero que aún no hayan llegado al lugar del evento, son reasignados al evento de mayor gravedad en caso de que ser el vehículo más cercano al evento de *triage* rojo.
3. Para la solicitudes de *triage* verde siempre se intentará utilizar un vehículo de tipo 2 por sobre un vehículo de tipo 1.
4. Luego de que un vehículo ha concluido la derivación de un paciente, ese vehículo se considera como disponible y debe retornar a su base asignada para esperar nuevas instrucciones.
5. Un vehículo de emergencia se considera como disponible si es que no tiene ninguna demanda asignada y si no lleva un paciente a bordo.

## Revisión bibliográfica

Las problemáticas asociadas a la localización de vehículos de emergencia conforman un área de investigación que ha sido muy activa en las últimas 4 décadas (Brotcorne et al., 2003)(Marianov et al., 2002) y, en el último tiempo, ha cobrado mayor relevancia gracias al avance en técnicas de optimización y de la computación. Aunque este estudio pone especial énfasis en el problema de localización de ambulancias, si se desea profundizar en las distintas características o la taxonomía de los problemas de localización, en la literatura se presentan revisiones de diversos problemas logísticos del área de emergencia médica (Reuter-Oppermaun et al., 2017) y clasificaciones detalladas para estos problemas (Başar et al., 2012).

En la literatura, para el problema estático, se distinguen principalmente dos enfoques o paradigmas generales en los modelos (Baez, 2017). El primer enfoque se basa en el concepto de cobertura. Este concepto consiste en definir si una determinada demanda está cubierta o puede ser cubierta por una base o servidor asignado. Usualmente esto se

hace con la ayuda de una medida de distancia o tiempo y un umbral o nivel de servicio apropiado. En este enfoque, cuando se trabaja con modelos de programación entera, se puede considerar la cobertura tanto en la función objetivo como en las restricciones.

El segundo enfoque apunta a minimizar o maximizar otros objetivos distintos a la cobertura. Por ejemplo, indicadores asociados al tiempo de respuesta en sistemas de emergencia o costos de traslado y localización de infraestructura. Ambos enfoques no son excluyentes y pueden diseñarse modelos que los combinen. En prácticamente toda la literatura, se observan algunos modelos precursores o fundamentales en el desarrollo de muchos otros modelos actuales. A continuación presentamos algunos de estos modelos básicos. Todos los modelos observados para este problema trabajan sobre una representación del sistema en la forma de un grafo.

En primer lugar se tiene el modelo *Location Set Covering Problem (LSCP)*. Este modelo se apoya en el concepto de cobertura y busca minimizar el número de bases utilizadas para determinar el número mínimo necesario de bases que permite cubrir toda la demanda del problema. Se considera que una base cubre una demanda si es que se encuentra ubicada a una distancia o tiempo de viaje menor a un cierto estándar  $S$ .

Luego, tenemos el modelo de Maximal Covering Location Problem (MCLP). Este modelo también se apoya en el concepto de cobertura pero, a diferencia del anterior, esta idea se incorpora en la función objetivo. El modelo busca maximizar la cobertura, es decir, definir localizaciones para las bases de manera que se maximice la cantidad de demanda que se considera cubierta (en donde al menos una base se encuentra a una distancia menor o igual al umbral definido), esto considerando un número máximo de bases que pueden ser localizadas, lo que permite incorporar una noción de “presupuesto”.

Es interesante notar que en este caso siempre se puede obtener una solución factible pues existe la configuración que entrega una nula cobertura.

El MCLP es un modelo muy utilizado en los problemas de localización de ambulancias pero tiene la desventaja de que su función objetivo puede presentar cambios abruptos entre tener cobertura y no tener cobertura en ciertas zonas, lo que a veces no representa de manera correcta la realidad (Azizan et al., 2017).

Luego tenemos el modelo *p-Median Problem (PMP)*, correspondiente al segundo enfoque, que no maximiza cobertura. En este caso, el objetivo es minimizar el tiempo total de viaje o costo total en el que se incurre al satisfacer toda la demanda considerando que cada demanda es atendida por su base más cercana. En este modelo se considera un número máximo de bases a localizar. Es decir, el modelo de *p-Median* busca minimizar el costo total ponderado que se tiene al atender toda la demanda considerada.

Otro modelo básico interesante es el modelo de *p-Center* que es similar al PMP pero tiene como objetivo minimizar la distancia máxima entre las distancias de todas las demandas

a sus bases más cercanas. Este modelo tiene especial relevancia en los casos en los que la demanda se encuentra muy dispersa y una buena solución ponderada globalmente puede ser una configuración con tiempos de respuesta o distancias de atención considerables para algunas demandas. En general, hay un *trade-off* entre minimizar el tiempo máximo de respuesta y minimizar el tiempo promedio o total de respuesta.

Los modelos LSCP, MCLP y PMP corresponden a versiones simplificadas de problemas reales pues no consideran aspectos como la localización de distintos tipos de vehículos, distintos tipos de demanda, la inherente naturaleza estocástica del problema, las capacidades de los vehículos o servidores, el efecto de la operación en estos sistemas, etc.

Otros modelos incorporan el aspecto estocástico del problema como los modelos MEXCLP, ERTM y MALP (Berg y Essen, 2019).

A medida que se incorporan más aspectos de la realidad en los modelos, estos se hacen más difíciles de resolver. Algunos autores han aplicado heurísticas para resolver modelos más complejos (Marín et al., 2018) que incorporan la dimensión estocástica y dinámica del problema. Recientemente otras metodologías de solución como *Deep Reinforcement Learning* han sido aplicados a este problema (Allen et al., 2021).

Algunos autores abordan el problema analizando otras métricas y combinando enfoques de optimización mediante modelos MIP y heurísticas (Carvalho et al., 2020). El problema también ha sido abordado mediante simulación (Berg y Essen, 2019) (Kergosien et al., 2015) y, en particular, mediante esquemas de optimización-simulación (Bélanger et al., 2020) como se propone en este estudio.

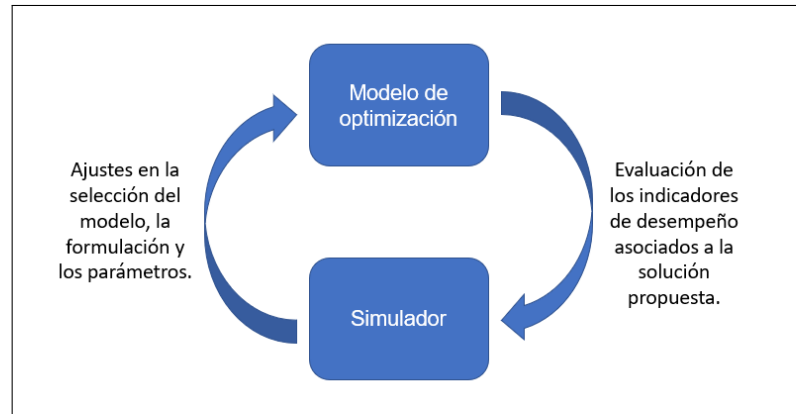
## METODOLOGÍA

### Enfoque de optimización-simulación

El enfoque de solución utilizado consistió en un esquema de *optimización-simulación* en donde se resolvían los distintos modelos, con distintos parámetros, y las soluciones obtenidas eran evaluadas a través del simulador de manera de identificar con qué modelos y qué parámetros se logra obtener los mejores resultados en cuanto a los indicadores de desempeño ya mencionados. Una ventaja de este enfoque es que se tiene independencia entre la simulación y el método utilizado para encontrar soluciones satisfactorias.

La utilización de este enfoque es importante debido a que si solo se utiliza un modelo matemático y se toma como medida de desempeño de una solución, el valor que se tiene en la función objetivo del modelo, podría haber una “desconexión” considerable con el desempeño real de la solución propuesta. Por consiguiente, una buena opción cuando no es factible o toma demasiado tiempo realizar pruebas reales, es la de realizar la





**Figura 4:** *Enfoque de Optimización-Simulación.*

evaluación de desempeño de las soluciones mediante el uso de la simulación. En la figura 4 se muestra una ilustración del enfoque utilizado.

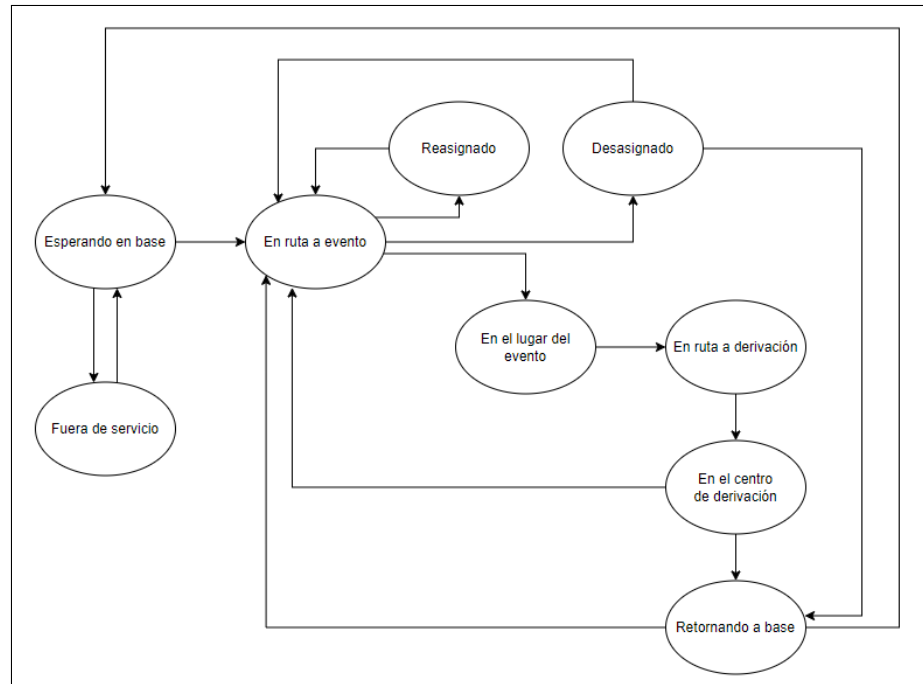
### Desarrollo del simulador

Se diseñó e implementó una simulación por eventos discretos que considera la generación de demanda a través de diferentes métodos como el muestreo de demanda real o producción sintética de demanda a partir del ajuste de distribuciones de *Poisson* de tasa variable para distintas zonas en el área geográfica considerada para los distintos *triages*. Para realizar estos ajustes se analizaron datos de demanda sobre una grilla de celdas en la ciudad. La grilla fue construida de manera de que pudiera contener toda la Región Metropolitana. Se utilizó programación orientada a objetos y el lenguaje de programación Python para modelar e implementar las entidades del sistema: bases de despacho, vehículos de emergencia, eventos de demanda, centros de salud, el centro de operaciones del proveedor y la ciudad de Santiago. Para simular los movimientos de los vehículos en la ciudad, se utilizaron estimaciones de tiempos de viaje calibradas a partir de datos publicados en *OpenStreetMap*.

Los vehículos simulados pueden pasar por diferentes estados como ilustra la figura 5.

### Política de *districting*

En vista de que frecuentemente los vehículos de emergencia se alejan de su base asignada a medida que se les asignan de forma consecutiva eventos de emergencia durante el día, se propuso una política de *districting* para controlar cuán lejos un vehículo de emergencia puede atender eventos. Esto considerando que este fenómeno evita que se respete la localización asignada. Los distritos para cada base son definidos como el espacio para el



**Figura 5:** Posibles estados para los vehículos en la simulación.

cuál la base correspondiente es la más cercana en tiempo a cualquier emergencia dentro del espacio unido con una “bola de apoyo”. Esta “bola de apoyo” corresponde a todos los puntos en el espacio en donde un vehículo puede llegar en menos de 30 minutos desde su base asignada.

En la figura 6 se observa la diferencia en la dispersión de atenciones de un vehículo durante el año considerando la política base y la política con *districting*. En la figura 7 se ilustra la construcción de distritos.

## Desarrollo del modelo de optimización

A continuación se presenta el modelo implementado. El modelo es una adaptación del modelo de p-mediana en el cual se consideraron restricciones de capacidad y cobertura y turnos de trabajo de los vehículos.

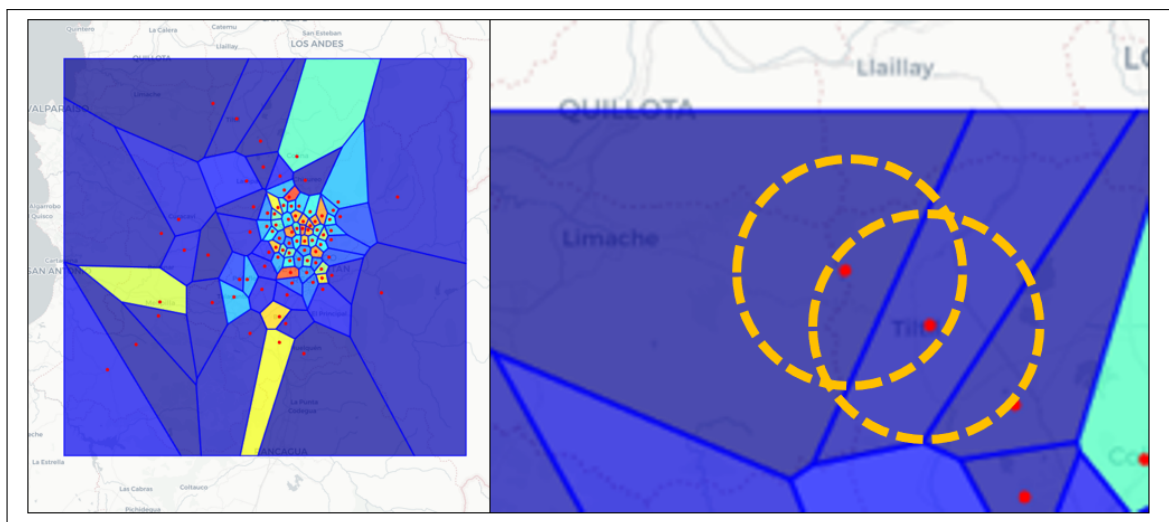
## Conjuntos

$J$  Conjunto de índices de localizaciones potenciales.

$B$  Conjunto de índices de bloques de tiempo.



**Figura 6:** Atenciones para un vehículo sin aplicar districting (a la izquierda) y aplicando districting (a la derecha). Los círculos naranjos indican atenciones de un vehículo en el año.



**Figura 7:** Distritos para diferentes bases potenciales y sus bolas de apoyo.

$I$  Conjunto de índices de turnos de vehículos.

$I$  Conjunto de índices asociados a la demanda.

$V$  Conjunto de índices asociados a los vehículos disponibles.

$K$  Conjunto de índices asociados a los grados de cobertura ( $k > 1$  corresponde a cobertura adicional). Se utiliza inicialmente  $K = \{1, \dots, |V|\}$ .

$S$  Conjunto de “días” considerados.

### Parámetros

$U$  Umbral de nivel de servicio que define la cobertura. Puede, por ejemplo, estar asociado a la distancia o tiempo de respuesta y estar en unidades de *km* o *minutos*. Se utiliza inicialmente  $U = 15$  min.

$V_r$  Vehículos con turno  $r$ .

$V^b$  Vehículos cuyo turno cubre el bloque  $b$ .

$q_i$  Es la llamada *busy-fraction* local. Representa la probabilidad de que un vehículo esté ocupado para atender (cubrir) una demanda de la localización  $i$ . Inicialmente se utiliza 30 %.

$t_{i,j,b}$  Es el tiempo de viaje entre la base  $j$  y la demanda  $i$  en el bloque  $b$ .

$\delta_{i,v}$  Parámetro binario que vale 1 si la demanda del nodo  $i$  puede ser cubierta por el vehículo  $v$ . Este parámetro considera el tipo de vehículo y el *triage* del evento así como el horario del llamado y el turno del vehículo.

$z_{\max}$  Cantidad máxima de bases que pueden ser utilizadas.

$\text{big}_M$  Constante “suficientemente grande” para restricción (R6). En nuestra implementación,  $\text{big}_M = 3$ .

### Funciones

$f(t)$  Se considera una función no creciente de  $t \geq 0$  para describir la cobertura gradual en función del tiempo de respuesta (de viaje en este caso):

$$f(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } t \leq U, \\ \max\left(\frac{(t-\eta \cdot U)}{(U-\eta \cdot U)}, 0\right) & \text{si } t > U. \end{cases}$$

## Variables

$z_j$  Variable binaria que vale 1 si se utiliza la base en la localización  $j$ .

$x_{jv}$  Variable binaria que vale 1 si se localiza el vehículo  $v$  en la localización potencial  $j$ .

$y_{ijksb}$  Variable binaria que vale 1 si la demanda del nodo  $i$  se encuentra cubierta por la base  $j$  con grado  $k$  el día  $s$  en el bloque  $b$ .

## Función objetivo

$$\text{máx} \quad \sum_{i \in I} \sum_{b \in B} \sum_{s \in S} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} (1 - q_i) q_i^{(k-1)} y_{ijksb} f(t_{i,j,b})$$

## Restricciones

$$\sum_{j \in J} y_{ijksb} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad \forall k \in K, s \in S, k \in K, \quad (\text{R1})$$

$$\sum_{k \in K} y_{ijksb} \leq \sum_{v \in V} \delta_{i,v} x_{jv} \quad \forall i \in I, b \in B, j \in J, s \in S, \quad (\text{R2})$$

$$\sum_{v \in V_r} \sum_{j \in J} x_{jv} \leq |V_r| \quad \forall r \in R, \quad (\text{R3})$$

$$\sum_{j \in J} x_{jv} = 1 \quad \forall v \in V, \quad (\text{R4})$$

$$\sum_{j \in J} z_j \leq z_{\max}, \quad (\text{R5})$$

$$\sum_{v \in V} x_{jv} \leq \text{big}_M z_j, \quad \forall j \in J, \quad (\text{R6})$$

$$z_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J,$$

$$x_{jv} \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J, v \in V,$$

$$y_{ijksb} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, s \in S, b \in B.$$

A continuación se presenta una breve descripción para cada restricción, detallando su significado y utilidad.

**R1** Conjunto de restricciones que asegura que cada demanda  $i$  sea cubierta a lo más por una base con cobertura con grado  $k$  cada bloque  $b$  de cada día  $s$ .

- R2** Conjunto de restricciones que asegura que una demanda  $i$  no pueda ser considerada cubierta (en ningún grado) por un vehículo de la base  $j$  si es que no se ha asignado a esa base ningún vehículo que pueda servir esa demanda.
- R3** Conjunto de restricciones que limita el número de vehículos con turno  $r$  que se pueden utilizar.
- R4** Conjunto de restricciones que garantiza que cada vehículo que se utiliza se asigna sólo a una base.
- R5** Restricción que limita el número de bases utilizadas al máximo permitido.
- R6** Conjunto de restricciones que limita el número de vehículos asignados a cada base utilizada e impide asignar vehículos a bases no seleccionadas.

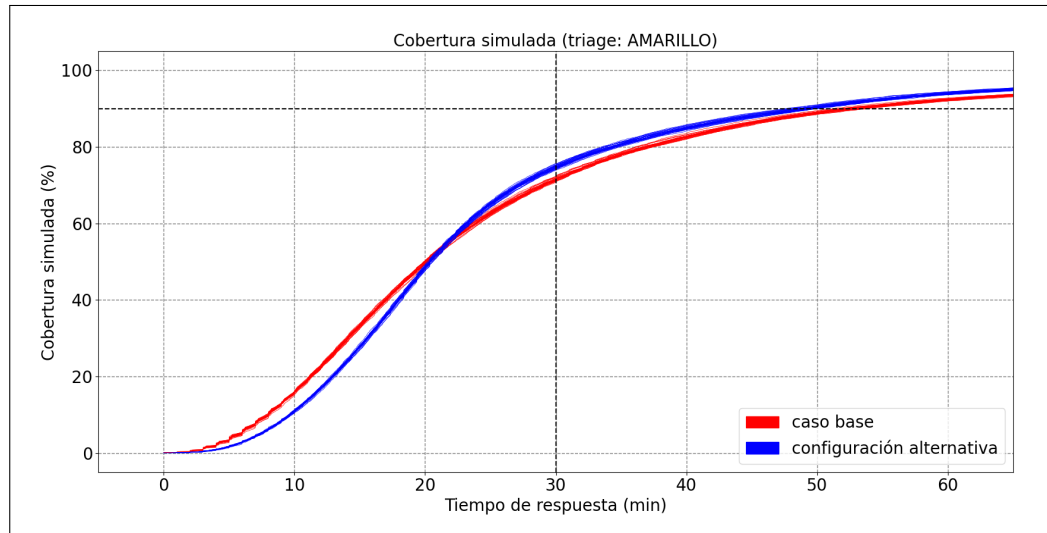
## RESULTADOS

Comparando la configuración base con las localizaciones propuestas por el modelo, mediante la utilización del simulador desarrollado se observó en promedio una mejora en la mayoría de los indicadores estudiados para cada *triage*. Se consideraron 30 escenarios de demanda sintetizada de un año de duración para comparar las propuestas con el caso base. Se observó que esta mejora es estadísticamente significativa pues, a partir de los resultados de las simulaciones, se determinó que los intervalos de confianza asociados a los tiempos de respuesta promedio no se superponen y además se lograron mejoras en cada escenario de demanda simulada.

En promedio, se observó una disminución del tiempo de respuesta de un 4.6 % y 5.8 % para los *trienes* amarillo y rojo respectivamente con un leve deterioro de un 1.7 % para el *triage* verde. Al mismo tiempo, se observaron mejoras en el p90, obteniendo con la configuración propuesta una disminución de un 6.7 % y 13.4 % para los *trienes* amarillo y rojo respectivamente con un leve deterioro de menos del 1 % para el *triage* verde. Por otro lado, al observar la cobertura bajo 30 minutos se observaron, en promedio, mejoras de un 0.2 %, 3.3 % y 2.1 % para los *trienes* verde, amarillo y rojo respectivamente.

En la Figura 8 se muestra la diferencia de cobertura para distintos umbrales de tiempo para el *triage* amarillo. Notar que, si bien, para tiempos cortos se tiene que la cobertura es menor en el caso propuesto (curva en azul), para tiempos de respuesta superiores a 20 minutos, la cobertura es mejor con el modelo propuesto. Por otro lado, la curva azul corta el umbral del 90 % de cobertura mucho antes que la curva de la configuración base.

En particular, se observó que la configuración propuesta por el modelo se hace cargo de mejor forma de la atención de viajes largos. Esto es muy importante dado que, aunque estos viajes sean poco frecuentes, son servidos de mejor forma puesto que se les logra



**Figura 8:** Curva ECDF para el tiempo de respuesta del triage amarillo.

entregar la atención pre-hospitalaria con un tiempo de respuesta considerablemente menor. Este tipo de mejoras podría significar salvar algunas vidas que, eventualmente, se perderían operando con una configuración diferente.

Se observa que la política de *districting* tiene un mejor impacto en el sistema cuando es aplicada en conjunto con una localización optimizada. Esto debido a que se obtienen distritos mejor balanceados en relación a la demanda y extensión geográfica.

A través de la simulación y sus visualizaciones, se identificó un fenómeno relevante en la operación asociado a la simultaneidad en la aparición de la demanda. Esto representa una dificultad adicional para la operación del sistema dado que a veces, cuando se tienen demandas simultáneas que se encuentran cercanas geográficamente, los recursos móviles más próximos a los eventos pueden no ser suficientes para cubrir la demanda por lo que se termina por recurrir al despacho de otros recursos más lejanos y, por lo tanto, se tienen atenciones con mayores tiempos de respuesta.

## CONCLUSIONES

Usando un enfoque de optimización-simulación se desarrolló una metodología para definir una buena configuración de los recursos móviles de manera de minimizar los tiempos de respuesta en las atenciones de emergencias médicas. Como parte del enfoque de optimización utilizado, se desarrolló un simulador muy detallado con el cual fue posible estudiar diversos aspectos del problema. En un contexto estático, se pudo desarrollar una metodología que permite definir una localización eficiente para el problema abordado.

Se estimaron, mediante la simulación, mejoras en el desempeño de la flota si se adoptan los cambios sugeridos por el modelo desarrollado. Se observó, en particular, una mejora en la distribución de la atención, cubriendo de mejor manera las atenciones más complicadas correspondientes a viajes largos.

Se observó un aumento general del 3.4 % en la cobertura de las atenciones más graves de *triage* amarillo y rojo. Además de esto, hay un impacto positivo en el resto de los indicadores de desempeño para esos *trriages*. Notablemente, el percentil 90 (p90) tiene mejoras considerables.

En conclusión, integrar la optimización de la localización de las bases de despacho de los vehículos de emergencia junto con políticas de despacho como el *districting* es un enfoque efectivo para mejorar el nivel de servicio en estos sistemas.

Dado el fenómeno observado de simultaneidad de demanda, se ha explorado el uso de localización dinámica de los vehículos de emergencia obteniendo resultados positivos pero que aún deben ser analizados considerando que ese tipo de políticas pueden introducir nuevos desafíos en la operación así como costos adicionales en el sistema.

**Agradecimientos:** Esta investigación fue parcialmente financiada por el Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ANID PIA/PUENTE AFB220003)

## REFERENCIAS

- Allen, M., Pearn, K., y Monks, T. (2021). Developing an openai gym-compatible framework and simulation environment for testing deep reinforcement learning agents solving the ambulance location problem. **arXiv preprint arXiv:2101.04434**.
- Azizan, M. H., Go, T. L., Hatta, W. A. W., Lim, C. S., y Teoh, S. S. (2017). Comparison of emergency medical services delivery performance using maximal covering location and gradual cover location problems. **International Journal of Electrical and Computer Engineering**, 7, 2791-2797.
- Baez, C. A. (2017). **Emergency medical service ambulance system planning: History and models** (Tesis Doctoral no publicada). UC Santa Barbara.
- Başar, A., Çatay, B., y Ünlüyurt, T. (2012, 8). A taxonomy for emergency service station location problem. **Optimization Letters**, 6, 1147-1160.
- Berg, P. L. V. D., y Essen, J. T. V. (2019). Comparison of static ambulance location models. **International Journal of Logistics Systems and Management**, 32 (3-4), 292–321.
- Brotcorne, L., Laporte, G., y Semet, F. (2003, 6). Ambulance location and relocation models. **European Journal of Operational Research**, 147, 451-463.



- Bélangier, V., Lanzarone, E., Nicoletta, V., Ruiz, A., y Soriano, P. (2020). A recursive simulation-optimization framework for the ambulance location and dispatching problem. **European Journal of Operational Research**, 286, 713-725.
- Carvalho, A. S., Captivo, M. E., y Marques, I. (2020, 6). Integrating the ambulance dispatching and relocation problems to maximize system's preparedness. **European Journal of Operational Research**, 283, 1064-1080.
- Erkut, E., Ingolfsson, A., y Erdogan, G. (2008, 2). Ambulance location for maximum survival. **Naval Research Logistics**, 55, 42-58. doi: 10.1002/nav.20267
- Kergosien, Y., Bélangier, V., Soriano, P., Gendreau, M., y Ruiz, A. (2015, 12). A generic and flexible simulation-based analysis tool for ems management. **International Journal of Production Research**, 53, 7299-7316.
- Marianov, V., Serra, D., et al. (2002). Location problems in the public sector. **Facility location: Applications and theory**, 1, 119-150.
- Marín, A., Martínez-Merino, L. I., Rodríguez-Chía, A. M., y da Gama, F. S. (2018, 7). Multi-period stochastic covering location problems: Modeling framework and solution approach. **European Journal of Operational Research**, 268, 432-449.
- McCormack, R., y Coates, G. (2015). A simulation model to enable the optimization of ambulance fleet allocation and base station location for increased patient survival. **European Journal of Operational Research**, 247 (1), 294-309.
- Reuter-Oppermann, M., van den Berg, P. L., y Vile, J. L. (2017, 11). Logistics for emergency medical service systems. **Health Systems**, 6, 187-208.
- Wilde, E. T. (2013). Do emergency medical system response times matter for health outcomes? **Health economics**, 22 (7), 790-806.