



---

**Universidad de Valladolid**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**Grado en Estadística**

**Gestión automática del enrutamiento en tiempo real  
de transporte sanitario no urgente**

**Autor: Diego Stefano Wortman Rueda  
Tutores: Jesús Alberto Tapia García  
Juan Camilo Yepes Borrero  
Año: 2025**



# Agradecimientos

Me gustaría hacer un agradecimiento a todas aquellas personas que me han acompañado durante esta etapa universitaria.

Muchas gracias a mi familia y amigos por estar a mi lado durante estos años, tanto en los buenos como en los malos momentos.

También agradecer a todos los profesores del Grado por los conocimientos que me han aportado. En especial a Jesús Tapia y Juan Camilo, que me han ayudado en el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado, como en el transcurso de las prácticas relacionadas con este trabajo.



# Resumen

Uno de los problemas que se plantean en las empresas de transporte sanitario no urgente es la asignación de los servicios entrantes a las unidades (conductores junto con su ambulancia asignada) disponibles para su realización, e intentar que la unidad elegida para realizar el servicio sea la que menos tiempo tarde. En este trabajo de fin de grado lo que buscaremos será un algoritmo que, dado un servicio a realizar, nos devuelva el conjunto de unidades que puedan realizar el servicio en el menor tiempo posible.

El algoritmo se encargará de proporcionar un conjunto de unidades candidatas a solución, ordenadas por un criterio de minimización de tiempo en realizar el servicio. Además, para poder obtener un conjunto de unidades solución, no nos bastaría con buscar únicamente las unidades que menos tiempos tardarían en realizar el servicio, dado que tanto el servicio entrante, como las propias unidades, tienen restricciones que pueden provocar que ciertas unidades no puedan realizar el servicio entrante.

Por otro lado, veremos que las asignaciones de servicios son muy dependientes de los tiempos para la realización del servicio de las unidades que lo pueden realizar. Calcularemos tiempos estimados a partir de coordenadas mediante el uso de una velocidad media.

Finalmente, comprobaremos el ajuste del algoritmo para diferentes tipos de servicios frecuentes en el día a día de las empresas de transporte sanitario no urgente y casos en los que encontramos un mayor número de limitaciones para la realización de los servicios.

# Abstract

One of the challenges faced by non-emergency medical transportation companies is the assignment of incoming services to the available units (drivers along with their assigned ambulance) in such a way that the chosen unit completes the service in the shortest possible time. In this dissertation, we aim to develop an algorithm that, given a service to be performed, returns the set of units capable of completing the service in the shortest time.

The algorithm will be responsible for providing a set of candidate units, sorted by a criterion that minimizes the time required to perform the service. However, to obtain a valid set of candidate units, it is not enough to simply select those that would take the least amount of time, as both the incoming service and the units themselves have constraints that may prevent certain units from being able to carry out the service.

Additionally, we will see that service assignments are highly dependent on the estimated times required by the available units to perform the service. We will estimate these times based on geographic coordinates using an average travel speed.

Finally, we will test the algorithm's performance with different types of services that are commonly handled by the company on a daily basis, including cases with a greater number of constraints affecting service execution.



# Índice general

<b>1. Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Metodología</b> .....	<b>4</b>
2.1. Problema de asignación generalizada .....	4
<b>3. Planteamiento del problema</b> .....	<b>6</b>
3.1. Planteamiento del problema de enrutamiento .....	6
3.1.1. Función objetivo .....	6
3.1.2. Variables de decisión .....	7
3.1.3. Restricciones .....	7
3.1.3.1. Restricciones de unidades de la provincia .....	7
3.1.3.2. Restricciones de tiempo para llegar al origen .....	8
3.1.3.3. Restricciones de estado del conductor .....	12
3.1.3.4. Restricciones de jornada laboral .....	13
3.1.3.5. Restricciones de capacidad de la ambulancia .....	15
3.1.3.6. Restricción de vehículos solución .....	17
3.1.3.7. Restricciones de tipo de vehículo .....	17
3.1.3.8. Restricciones de individuo solicitante de servicio .....	22
3.2. Limitaciones del planteamiento del problema .....	24
3.3. Obtención de la variable tiempo en las unidades factibles a ser solución .....	25
3.3.1. Restricciones de tiempo en la ambulancia .....	29
3.3.2. Restricciones de capacidad .....	30
3.3.3. Restricciones de tipo de viaje .....	31
3.3.4. Restricciones sobre la información del traslado .....	31
3.3.5. Restricciones de personal especializado .....	31
<b>4. Base de datos</b> .....	<b>32</b>
4.1. Información disponible .....	32
4.1.1. Asignación de servicio .....	32
4.1.2. Asignación de servicios .....	34
4.1.3. Dotaciones .....	37
<b>5. Solución del problema</b> .....	<b>39</b>
5.1. Modelos ajustados .....	39

5.1.1. Modelo de asignación completo .....	40
5.1.2. Modelo de asignación con cambio de unidad.....	41
5.2. Ajuste del modelo .....	42
5.2.1. Servicio de hemodiálisis en camilla .....	43
5.2.2. Servicio interhospitalario.....	43
5.2.3. Servicio de salida de urgencias.....	44
5.2.4. Servicio de alta de planta.....	44
5.2.5. Servicio de vuelta de fuera de provincia .....	45
5.2.6. Servicio en ambulancia PMR .....	46
5.2.7. Servicio privado.....	46
5.2.8. Servicio en unidad bariátrica .....	47
5.2.9. Servicio en unidad de soporte vital básico .....	47
5.2.10. Servicio en UVI móvil.....	48
<b>Conclusiones.....</b>	<b>49</b>
<b>A. Código R.....</b>	<b>51</b>

# Capítulo 1

## Introducción

El transporte sanitario no urgente [1] [2] consiste en la realización de servicios de desplazamiento de pacientes por causas exclusivamente clínicas, cuya situación les impide desplazarse en los medios ordinarios de transporte. El transporte sanitario abarca al paciente, acompañante si fuera necesario, y aquellos accesorios o elementos supletorios, que sujetos a criterios sanitarios, sean necesarios para permitir y facilitar el traslado y posterior desenvolvimiento del paciente de la forma más digna y autónoma posible.

Todo traslado de transporte sanitario requerirá prescripción previa por el personal sanitario autorizado para ello. El prescriptor podrá solicitar que el traslado del paciente se extienda a su acompañante cuando por razón de edad, patología o estado físico o mental lo precise.

Todos los servicios tenderán a realizarse con el medio más idóneo, en el menor tiempo posible (respetando los tiempos de respuesta), por la ruta más adecuada y en las mejores condiciones técnico-sanitarias y de confort para los pacientes. Por ello, su planificación es un gran desafío, dado que la asignación eficiente de servicios a las unidades disponibles es un problema complejo que influye en la calidad del servicio.

Este trabajo tiene como objetivo general facilitar la labor de los jefes de tráfico, los cuales son los encargados de llevar a cabo esta planificación, mediante el diseño de un algoritmo que asigne los servicios entrantes a las unidades disponibles minimizando el tiempo total de ejecución del servicio. Para ello, se plantean otros objetivos más específicos, como son

la identificación de las restricciones, la estimación de los tiempos de desplazamiento y la evaluación del rendimiento del algoritmo con diferentes casos de servicios entrantes.

Ahora mismo, como hemos comentado antes más brevemente, la asignación de los servicios la lleva a cabo un jefe de tráfico. Ellos son los que reciben un servicio, y se encargan de comprobar cuáles son las unidades que pueden realizar el servicio, y entre ellas buscan la unidad que pueda completar el servicio en el menor tiempo posible.

No obstante, cuando entra un nuevo servicio de traslado de un paciente, este puede hacer que se modifique la programación previamente asignada por los jefes de tráfico, haciendo que la asignación previa de los servicios a cierta unidad pueda ser modificada debido a la entrada de otros nuevos.

Esto provoca que los jefes de tráfico pierdan mucho tiempo pensando a que unidad se debería asignar el nuevo servicio, dado que lo primero que buscan son unidades que podrían realizar el servicio sin necesidad de tener que modificar la programación de los servicios posteriores que coincidirían en tiempos con el servicio entrante, pero luego también se plantean cuál sería el conductor óptimo para la realización del nuevo servicio, y si conviene modificar la programación actual para que el servicio nuevo lo realice la mejor unidad.

Por el momento, este trabajo sólo lo puede realizar un jefe de tráfico, dado que no es únicamente buscar la mejor unidad para la realización del servicio, sino que, los servicios entrantes también tienen unas restricciones que se deben cumplir, y de las que hablaremos más adelante, y por ahora no hay una implementación de un algoritmo que realice esta tarea.

Esto es una parte de los problemas que se le plantean al jefe de tráfico cuando entra un servicio, y ya podemos observar que es un trabajo muy complejo y que nuestro principal objetivo es facilitar el trabajo de los jefes de tráfico mediante un algoritmo.

Para ello, nos planteamos un problema inicial en el que entra un nuevo servicio y queremos obtener las mejores unidades entre las que debería estar la solución propuesta por el jefe de tráfico. Nuestro objetivo será obtener un conjunto de unidades candidatas a

solución, para que el jefe de tráfico tome la decisión que él crea conveniente para la realización del servicio (que puede no coincidir con la solución óptima por otros factores externos).

El trabajo se organiza de la siguiente manera:

- En el capítulo dos se presenta la metodología general, incluyendo la función objetivo y las restricciones del problema.
- En el capítulo tres se describe el planteamiento del problema y el cálculo de los tiempos de desplazamiento.
- En el capítulo cuatro se detallan los datos utilizados para ajustar el algoritmo.
- En el capítulo cinco se presentan los resultados obtenidos tras la implementación del modelo en distintos casos prácticos.
- Finalmente, el capítulo seis recoge las conclusiones y propuestas de mejora futura.

# Capítulo 2

## Metodología

### 2.1. Problema de asignación generalizada

El Problema de Asignación Generalizada (Generalized Assignment Problem, GAP) [9] es un modelo de programación lineal entera que se utiliza para gestionar la asignación de recursos a tareas con un costo total mínimo. Para la realización de las actividades se necesita un determinado recurso, los cuales están disponibles en una cantidad limitada, cada tarea debe ser asignada sólo a un recurso.

En nuestro caso, las tareas son los servicios entrantes para realizar, y los recursos son las unidades (conductor junto con su ambulancia asignada).

La formulación del modelo de asignación generalizado [3], cuando la aplicamos a nuestro contexto de asignación de servicios a unidades, es la siguiente:

- $i \in I$  son las unidades.
- $j \in J$  son los servicios.
- $c_{ij}$  es el costo de asignar el servicio  $j$  a la unidad  $i$ .

Variables:

- $x_{ij} = 1$  si el servicio  $j$  es asignada a la unidad  $i$ ; 0 en caso contrario.

Entonces, el modelo ajustado es:

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} * x_{ij} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\forall j \sum_{i \in I} x_{ij} = 1 \quad (2)$$

$$\forall i, j \quad x_{ij} \in \{0,1\} \quad (3)$$

De acuerdo con la formulación mencionada antes, se verifica lo siguiente:

- Cada servicio debe ser asignado a exactamente una unidad (2).
- Cada asignación tiene un costo asociado.
- El objetivo es minimizar la función de costo total (1), respetando las restricciones.
- La variable de decisión (3) es binaria, y toma los siguientes valores:
  - Si  $x_i = 0$ , nos indica que la unidad  $i$  no realizará el servicio nuevo entrante.
  - Si  $x_i = 1$ , entonces indica que la unidad  $i$  es la elegida para realizar el servicio entrante.

Pero si contextualizamos más en nuestro problema planteado de asignación de un servicio entrante, la formulación sería la siguiente:

$$\min \sum_{i \in I} c_i * x_i$$

Sujeto a:

$$\sum_{i \in I} x_i = 1$$

$$\forall i \quad x_i \in \{0,1\}$$

Vemos que consiste únicamente en la asignación de un único servicio a la unidad que lo pueda hacer en el menor tiempo posible, aunque el número de restricciones aumenta considerablemente como veremos más adelante.

# Capítulo 3

## Planteamiento del problema

### 3.1. Planteamiento del problema de enrutamiento

En esta sección se va a adaptar el problema de asignación al problema que tiene por objeto la búsqueda de la unidad que realiza el servicio con un costo mínimo. En nuestro caso, el costo asociado a cada unidad es el tiempo total en realizar el servicio. El problema de enrutamiento lo podemos desglosar en las siguientes componentes fundamentales:

#### 3.1.1. Función objetivo

Hemos visto anteriormente que la función objetivo del problema de asignación generalizada en nuestro problema de asignación de un nuevo servicio entrante busca minimizar un costo que tiene asignado cada unidad candidata a realizar el servicio.

En nuestro problema de enrutamiento, en el que se busca realizar el servicio en el menor tiempo posible [1] [2], lo que hacemos es descomponer ese coste asociado a cada unidad  $i$  en las dos partes que mencionamos a continuación:

- $t_{i,(u_i,origen)}$ : tiempo que tarda la unidad  $i$  en llegar al lugar de origen del servicio que queremos asignar ahora, desde su ubicación en ese preciso instante.
- $t_{i,(origen,destino)}$ : tiempo que tardaría la unidad  $i$  en hacer ese servicio desde el lugar de origen hasta el lugar de destino.

Por lo tanto, la función objetivo de nuestro problema de asignación es:

$$\min \sum_{i \in I} (t_{i,(u_i,origen)} + t_{i,(origen,destino)}) * x_i$$

### 3.1.2. Variables de decisión

Las variables de decisión que utilizaremos para el problema de enrutamiento no cambian con respecto al problema de asignación generalizado, es decir, nuestra variable de decisión es  $x_i \in \{0,1\}$ , que es una variable de decisión binaria que representa lo siguiente:

- Si  $x_i = 0$ , nos indica que la unidad  $i$  no realizará el servicio nuevo entrante.
- Si  $x_i = 1$ , entonces la unidad  $i$  es la elegida para realizar el servicio entrante.

### 3.1.3. Restricciones

Como ya hemos mencionado en apartados anteriores, el número de restricciones del problema planteado es bastante superior, por lo que las restricciones [2] son las siguientes:

#### 3.1.3.1. Restricciones de unidades de la provincia

Cada servicio tiene una provincia asignada, que tiene relación con la provincia del domicilio del paciente, junto con la provincia a la que pertenece su centro de salud. Al igual que los servicios, las unidades también tienen una provincia asignada.

A partir de esto, se indica que un servicio solo puede ser realizado por una unidad de la misma provincia, dado que, en el caso de que el servicio fuera realizado por una unidad otra provincia y justo en esa provincia hicieran falta recursos para hacer más servicios, sería una incidencia considerable, porque se estarían quitando recursos de otras provincias. Estas situaciones solo se podrían contemplar en casos extremos, donde la provincia del servicio no dispone de unidades para poder realizar ese servicio en tiempo, y en otra provincia no habría servicios programados para hacer, y el jefe de tráfico considera que tiene una unidad disponible, aunque entraran servicios a posteriori.

Formulamos la restricción y obtenemos:

$$\forall i \ x_i \leq M * z_{i,(provincia)}$$

Donde utilizamos:

- Constante de penalización  $M$  grande, que sirve para implementar una restricción lógica en restricciones lineales simples [4].
- $z_{i,(provincia)} \in \{0,1\}$ , que es una variable binaria que toma los siguientes valores:

- Si la provincia del servicio es distinta de la provincia de la unidad, entonces  $z_{i,(provincia)} = 0$ .
- En cambio, si la provincia del servicio coincide con la provincia de la unidad, entonces  $z_{i,(provincia)} = 1$ .

La implementación de las restricciones mediante una constante de penalización  $M$  grande, hace que las restricciones aparezcan de la siguiente manera cuando ajustamos el modelo:

- $x_i \leq 0$  si la provincia del servicio y la provincia de la unidad  $i$  son diferentes, por lo que la unidad  $i$  ya no sería candidata, dado que la variable de decisión solo puede ser 0 o 1, y así forzamos a que valga 0.
- $x_i \leq M$ , si la provincia del servicio y la de la unidad  $i$  son coincidentes, lo que hace que la unidad pueda ser o no ser la elegida.

### **3.1.3.2. Restricciones de tiempo para llegar al origen**

Cada servicio tiene una hora de entrada fijada, aunque dependiendo del tipo de servicio que sea el que entra, se deben verificar unas condiciones u otras.

En el caso de que el servicio sea un viaje de ida y no se trate de un servicio de desplazamiento interhospitalario, entonces tenemos como restricción que el paciente debe de llegar al lugar de destino como máximo a la hora de entrada fijada, mientras que también se fija una hora de llegada máxima, dado que se fija que los pacientes pueden estar como muy pronto una hora antes de la hora de entrada fijada.

En cambio, cuando hablamos de un servicio de transporte interhospitalario o un servicio de vuelta, entonces la hora de entrada que se nos proporciona es la hora a la que el centro médico o el hospital correspondiente solicita el servicio de vuelta. En este caso, la hora de entrada fija la hora a la que la unidad debe estar para recoger al paciente como muy pronto, y la hora máxima a la que las ambulancias candidatas pueden llegar al lugar de origen para recoger al paciente puede variar dependiendo del tipo de tratamiento que tiene el paciente del servicio entrante:

- Si se trata de un servicio de hemodiálisis, entonces la ambulancia que haga el servicio debe de encontrarse en el lugar de origen para recoger al paciente como muy tarde media hora después de la hora de entrada fijada en el servicio.

- Si se trata de un servicio de salida de urgencias del paciente, entonces disponemos de más tiempo, dado que la ambulancia podría estar como muy tarde dos horas después de la fecha de entrada fijada en el servicio entrante.
- Cuando se trata de un servicio de alta de planta del paciente, entonces es el tratamiento que más tiempo disponemos para recoger al paciente, dado que debe de poder llegar al lugar de origen como muy tarde tres horas después de la hora de entrada fijada por el hospital.
- En cambio, como norma general, en el resto de los tratamientos la ambulancia debe de estar como muy tarde en el lugar de origen del servicio para recoger al paciente una hora después de la hora de entrada.
- Además, cuando tenemos un servicio en el que el lugar de origen esta fuera de la provincia, pero es un servicio que le corresponde a esa provincia (es decir, la provincia de origen y la provincia del servicio no coinciden en este caso, lo que se denomina un servicio interprovincial), entonces disponemos del tiempo que hemos indicado en los apartados anteriores junto con el tiempo de desplazamiento entre las dos provincias.

Por lo tanto, formulamos las restricciones de la siguiente manera:

- Si tenemos un servicio de ida y no es un servicio interhospitalario:

$$\sum_{i \in I} (H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)} + t_{i,(origen,destino)}) * x_i \leq H_{entrada}$$

$$\sum_{i \in I} (H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)} + t_{i,(origen,destino)}) * x_i \geq (H_{entrada} - 1)$$

- En otro caso (servicios de vuelta o servicios de ida interhospitalarios):

$$\sum_{i \in I} (H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)}) * x_i \geq H_{entrada}$$

$$\forall i (H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)}) * x_i \leq H_{entrada} + 1 - 0.5 * Z_{HE} + 1 * Z_{SUR} + 2 * Z_{ALT} + t_{i,(provincia\ unidad,provincia\ origen)} * Z_{INTER}$$

Descomponemos la formulación en los siguientes términos:

- $H_{actual}$ : Hora a la que se ajusta el modelo, es decir, hora a la que se asigna la unidad para hacer el servicio entrante (en horas).
- $t_{i,(u_i,origen)}$ : tiempo que tardaría la unidad  $i$  en ir desde su posición actual hasta el lugar de origen (en horas).

- $t_{i,(origen,destino)}$ : tiempo que tardaría la unidad  $i$  en ir desde el origen del servicio hasta el destino (en horas).
- $t_{i,(provincia\ unidad,provincia\ origen)}$ : tiempo entre provincia de origen del servicio y provincia de las unidades (en horas).
- $H_{entrada}$ : hora de entrada del servicio (en horas).
- $z_{HE}$ : variable indicadora binaria que toma los siguientes valores:
  - Si el servicio entrante es de hemodiálisis, entonces  $z_{HE} = 1$ .
  - En caso contrario, entonces  $z_{HE} = 0$ .
- $z_{SUR}$ : variable indicadora binaria que toma los siguientes valores:
  - Si el servicio entrante es de salida de urgencias, entonces  $z_{SUR} = 1$ .
  - En caso contrario, entonces  $z_{SUR} = 0$ .
- $z_{ALT}$ : variable indicadora binaria que toma los siguientes valores:
  - Si el servicio entrante es de alta de planta, entonces  $z_{ALT} = 1$ .
  - En caso contrario, entonces  $z_{ALT} = 0$ .
- $z_{INTER}$ : variable indicadora binaria que toma los siguientes valores:
  - Si el servicio entrante es un servicio con origen fuera de la provincia, entonces  $z_{INTER} = 1$ .
  - En caso contrario, entonces  $z_{INTER} = 0$ .

Entonces, centrándonos en los servicios de ida que no sean interhospitalarios, podemos ver que se cumplen las siguientes características:

- En la primera restricción, con la que seleccionamos unidades que puedan hacer el servicio sin retraso, cuando se da el caso en el que  $(H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)} + t_{i,(origen,destino)}) > H_{entrada}$ , entonces la unidad  $i$  no podría realizar el servicio entrante. Vemos entonces que el valor de la variable de decisión asociada a esta unidad  $x_i = 0$ , dado que esa unidad no puede ser candidato a solución.
- En cambio, cuando sucede el caso contrario, es decir, que se verifica que  $(H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)} + t_{i,(origen,destino)}) \leq H_{entrada}$ , entonces vemos que la unidad  $i$  en este caso sí podría ser candidata a realizar el servicio entrante, por lo que la variable de decisión binaria asociada a esa unidad  $x_i \in \{0,1\}$ , dado que si la unidad finalmente no es elegida será por otras restricciones, o porque no es la más eficiente para realizar el servicio, pero la restricción de realización del servicio sin retraso si la cumpliría.

- Por otro lado, en la restricción asociada a la finalización del servicio una hora antes de la hora de entrada, cuando sucede la situación en el que la unidad hiciera el servicio, pero el paciente llegaría al destino más de una hora antes de la hora de entrada fijada, entonces esto provocaría que esa unidad no podría ser la encargada de la realización del servicio. Es decir que, si ocurre el caso en el que, para la unidad  $i$ , se verifica  $(H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)} + t_{i,(origen,destino)}) < (H_{entrada} - 1)$ , entonces esto implicaría que  $x_i = 0$ .
- En cambio, cuando para otra unidad si se verifica que  $(H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)} + t_{i,(origen,destino)}) \geq (H_{entrada} - 1)$ , es decir, que la unidad  $i$  sí podría realizar el servicio dejando al paciente en el destino con menos de una hora de antelación, entonces esa unidad sí podría ser candidata a solución, y ya si la unidad no es elegida para realizar el servicio sería por otras restricciones o porque habría otras unidades más eficientes para realizar el servicio, lo que implicaría que  $x_i \in \{0,1\}$ .

Ahora, con respecto a los servicios de vuelta o servicios de ida interhospitalarios, observamos las siguientes relaciones:

- En la restricción asociada al límite inferior temporal de recogida del paciente, cuando se da el caso en el que  $(H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)}) < H_{entrada}$ , entonces la unidad  $i$  no podría realizar el servicio entrante. Vemos entonces que el valor de la variable de decisión asociada a esta unidad  $x_i = 0$ , dado que esa unidad no puede ser candidata a solución.
- En cambio, cuando para otra unidad si se verifica que  $(H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)}) \geq H_{entrada}$ , es decir, que la unidad  $i$  sí podría realizar el servicio porque llegaría después de la hora de entrada fijada, entonces esa unidad sí podría ser candidata a solución, y ya si la unidad no es elegida para realizar el servicio sería por otras restricciones o porque habría otras unidades mejores para realizar el servicio, lo que implicaría que  $x_i \in \{0,1\}$ .
- Por otro lado, la implementación de las restricciones de limitación superior de tiempo para sacar los servicios mediante variables binarias hace que las restricciones aparezcan de la siguiente manera cuando ajustamos el modelo:
  - $\forall i (H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)}) * x_i \leq H_{entrada} + 0.5$  si el servicio entrante es un servicio de hemodiálisis de origen en la provincia de la unidad.

- $\forall i (H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)}) * x_i \leq H_{entrada} + 2$  si el servicio entrante es una salida de urgencias en la provincia de la unidad.
- $\forall i (H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)}) * x_i \leq H_{entrada} + 3$  si el servicio entrante es un alta de planta de origen en la provincia de la unidad.
- $\forall i (H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)}) * x_i \leq H_{entrada} + 1$  si el servicio entrante no es un servicio de hemodiálisis ni un alta de planta ni una salida de urgencias de origen en la provincia de la unidad.

Es importante reflejar que, mediante los casos que hemos mencionado de restricciones, podemos reflejar que no es posible que coincidan dos tipos de tratamiento para el mismo servicio. No obstante, si se pueden dar situaciones de servicios fuera de la provincia de alguno de los tratamientos anteriores, y se añadiría  $t_{i,(provincia\ unidad,provincia\ origen)}$ .

### 3.1.3.3. Restricciones de estado del conductor

Los conductores de las unidades, cuando buscamos asignar el servicio nuevo a una de las unidades, tienen un estado del conductor asociado a la unidad en tiempo real. No obstante, dentro de los estados del conductor, hay dos estados que provocan que ese servicio no lo pueda realizar esa unidad, los cuales son los estados de avería y permiso.

Cuando un conductor se encuentra en estado de avería, esto provoca que el conductor no pueda realizar el servicio dado que no tiene una unidad en perfecto estado de funcionamiento. Por otro lado, si un conductor está de permiso, sabemos que no se puede contar con ese conductor tampoco hasta que cambie de estado de nuevo.

Planteamos la formulación de esta restricción de la siguiente manera:

$$\sum_{i \in I} x_i * z_{i,(PERMISO/AVERÍA)} \leq 0$$

Donde disponemos de una variable auxiliar que indica lo siguiente:

- $z_{i,(PERMISO/AVERÍA)}$ : variable indicadora binaria que puede tomar los siguientes valores dependiendo del estado del conductor  $i$ :
  - Estado de avería o de permiso, entonces  $z_{i,(PERMISO/AVERÍA)} = 1$ .
  - En otro caso, entonces  $z_{i,(PERMISO/AVERÍA)} = 0$ .

Este tipo de restricciones hace que se limite el valor que toma cada variable de decisión asociada a cada unidad  $i$ , dependiendo del estado del conductor, de la siguiente manera:

- Si tenemos al conductor  $i$  en estado de permiso o de avería, es decir  $Z_{i,(PERMISO/AVERÍA)} = 1$ , entonces para que se cumpla la restricción, para cada una de las  $I$  unidades disponibles debe verificarse que  $x_i * Z_{i,(PERMISO/AVERÍA)} = 0$  para que la suma de todas las unidades sea igual a cero, dado que tanto la variable de decisión como la variable auxiliar son binarias y no pueden tomar valores negativos. Entonces, se verifica que  $Z_{i,(PERMISO/AVERÍA)} = 1 \Rightarrow x_i = 0$ .
- En cambio, en el caso de que el conductor de la ambulancia  $i$  no está en ese estado de permiso ni de avería, entonces se verificaría lo siguiente:

$$Z_{i,(PERMISO/AVERÍA)} = 0 \Rightarrow x_i \in \{0,1\}$$

Vemos que las unidades que no están ni en avería ni de permiso sí que podrían ser candidatas a solución, dado que sí podrían tomar el valor uno en la variable de decisión como hemos visto anteriormente.

### 3.1.3.4. Restricciones de jornada laboral

Un servicio que entra nuevo tiene una hora de entrada fijada. Para que las unidades de las que disponemos puedan ser candidatas para realizar el servicio, se debe de poder realizar dentro de la jornada laboral de los conductores.

Para que un servicio se pueda hacer dentro de la jornada laboral de los conductores, se debe verificar que la hora de asignación (es decir, la hora actual, que es cuando se ejecuta el algoritmo) sea mayor que la hora de inicio de turno del conductor  $i$  más un margen de media hora con el que contamos por parte de las empresas de transporte sanitario no urgente, dado que, si fuera necesario empezar antes el turno, estas horas extra se le pagarían al conductor.

Por otro lado, si los conductores realizan el servicio solicitado, entonces deberían ser capaces de poder realizar el servicio, junto con el desplazamiento desde el destino del servicio hasta la zona asociada a la unidad, antes de finalizar su jornada laboral más un margen de media hora como hemos mencionado anteriormente.

A continuación, formulamos las restricciones planteadas de la siguiente manera:

$$\sum_{i \in I} (H_{i,(inicio\ turno)} - 0.5) * x_i \leq H_{actual}$$

$$\forall i (H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)} + t_{i,(origen,destino)} + t_{i,(destino,zona_i)}) * x_i \leq H_{i,(fin\ turno)} + 0.5$$

Descomponemos la formulación en los siguientes términos:

- $H_{actual}$ : Hora a la que se ajusta el modelo, es decir, hora a la que se asigna la unidad para hacer el servicio entrante (en horas).
- $H_{i,(inicio\ turno)}$ : hora a la que la unidad  $i$  inicia su jornada laboral (en horas).
- $H_{i,(fin\ turno)}$ : hora a la que la unidad  $i$  finaliza su jornada laboral (en horas).
- $t_{i,(u_i,origen)}$ : tiempo que tardaría la unidad  $i$  en ir desde su posición actual hasta el lugar de origen (en horas).
- $t_{i,(origen,destino)}$ : tiempo que tardaría la unidad  $i$  en ir desde el origen del servicio hasta el destino (en horas).
- $t_{i,(destino,zona_i)}$ : tiempo que tarda la unidad  $i$  en ir desde el lugar de destino del servicio entrante hasta su zona de colectivo asociada a la unidad (en horas).

Este tipo de restricciones hace que se limite el valor que toma cada variable de decisión asociada a cada unidad dependiendo de la capacidad de cada unidad para poder realizar el servicio dentro de su jornada laboral:

- En la restricción asociada al comienzo de jornada laboral, cuando se da el caso de que  $H_{actual} < (H_{i,(inicio\ turno)} - 0.5)$ , que esto sucede cuando queremos asignar un servicio a una unidad que aún no ha iniciado su jornada laboral, y tampoco podríamos contar con él media hora antes del inicio de su turno, que es el margen que disponemos para pedirle al conductor que se conecte antes del horario indicado. Cuando sucede este caso, vemos entonces que el valor de la variable de decisión asociada a esta unidad  $x_i = 0$ , dado que esa unidad no puede ser candidato a solución.
- En cambio, cuando sucede el caso contrario, es decir, que se verifica que  $(H_{i,(inicio\ turno)} - 0.5) \leq H_{actual}$ , entonces vemos que la unidad  $i$  en este caso sí podría ser candidata a realizar el servicio entrante, por lo que la variable de decisión binaria asociada a esa unidad  $x_i \in \{0,1\}$ , dado que si la unidad finalmente

no es elegida será por otras restricciones, o porque no es la más eficiente para realizar el servicio, pero la restricción de inicio de jornada laboral si la cumpliría.

- Por otro lado, en las restricciones asociadas al fin de jornada laboral de los conductores, cuando sucede la situación en el que si la unidad  $i$  realizara el servicio entrante y esto provocara que ese conductor se excediera de su jornada laboral, incluyendo el margen de media hora del que disponemos, entonces esto provocaría que esa unidad no podría ser la encargada de la realización del servicio. Es decir que, si ocurre el caso en el que, para la unidad  $i$ , se verifica  $(H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)} + t_{i,(origen,destino)} + t_{i,(destino,zona_i)}) > H_{i,(fin\ turno)} + 0.5$ , entonces esto implicaría que  $x_i = 0$ .
- En cambio, cuando para otra unidad si se verifica que  $(H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)} + t_{i,(origen,destino)} + t_{i,(destino,zona_i)}) \leq H_{i,(fin\ turno)} + 0.5$ , es decir, que la unidad  $i$  sí podría realizar el servicio dentro de su jornada laboral, entonces esa unidad sí podría ser candidata a solución, y ya si la unidad no es elegida para realizar el servicio sería por otras restricciones o porque habría otras unidades más eficientes para realizar el servicio, lo que implicaría que  $x_i \in \{0,1\}$ .

### 3.1.3.5. Restricciones de capacidad de la ambulancia

En primer lugar, en las ambulancias podemos distinguir tres tipos de plazas en las que los pacientes viajan para realizar los servicios correspondientes. Los tres tipos de plazas que pueden tener son las siguientes:

- Asiento: plazas donde suelen ir los pacientes que no tienen ninguna limitación de movilidad solicitada en el volante médico. Estos pacientes son transportados sentados en los asientos de la unidad. En estas plazas también viajan tanto los posibles acompañantes que tenga autorizados el servicio, como los enfermeros o los médicos en caso de que fuera necesario.
- Camilla: plazas donde suelen ir los pacientes cuyo volante médico indica que el paciente debe de ser transportado en camilla.
- Sillas: plazas donde los pacientes son transportados en silla de ruedas. La ambulancia dispone de unos enganches donde se encajaría la silla de ruedas del paciente para que se pueda realizar el servicio de forma segura.

Cada ambulancia no tiene el mismo número de plazas de cada tipo, esto es debido a que cada ambulancia tiene un carrozado distinto y esto hace que no haya el mismo espacio disponible en todas las unidades. No obstante, esto no nos resulta un impedimento, dado que, para cada unidad, conocemos el número de asientos, número de sillas y número de camillas que tienen.

Entonces, para que una unidad pueda realizar el servicio entrante, debe de ser capaz de poder transportar al paciente (junto a su acompañante, enfermero o médico si así viene solicitado en el volante médico) en las condiciones de movilidad bajo las que se debe realizar el servicio. Esto se debe verificar siempre, dado que no todas las unidades disponen de plazas de sillas de ruedas, o no todas pueden llevar pacientes en camilla.

A continuación, formulamos las restricciones planteadas de la siguiente manera:

$$\sum_{i \in I} (N_{i,(sillas)}) * x_i \geq N_{silla}$$

$$\sum_{i \in I} (N_{i,(camillas)}) * x_i \geq N_{camilla}$$

$$\sum_{i \in I} (N_{i,(asientos)}) * x_i \geq N_{asiento}$$

Descomponemos la formulación en los siguientes términos:

- $N_{i,(sillas)}$ : número total de plazas de silla de las que dispone la unidad  $i$ .
- $N_{silla}$ : número de personas del servicio entrante que necesitan ir en una plaza de silla.
- $N_{i,(camillas)}$ : número total de plazas de camilla de las que dispone la unidad  $i$ .
- $N_{camilla}$ : número de personas del servicio entrante que necesitan ir en una plaza de camilla.
- $N_{i,(asientos)}$ : número total de plazas de asientos que tiene la unidad  $i$ .
- $N_{asiento}$ : número de personas del servicio entrante que necesitan ir en una plaza de asiento (en estas plazas suelen ir también los acompañantes, los enfermeros y los médicos).

Este tipo de restricciones hace que se limite el valor que toma cada variable de decisión asociada a cada unidad dependiendo de la capacidad de cada unidad para poder realizar el servicio con la unidad asignada actualmente:

- En la primera restricción, podemos observar que, si se verifica que el número de plazas necesarias de silla para poder realizar el servicio entrante supera las capacidades máximas de sillas de la unidad  $i$ , entonces la unidad  $i$  no podría realizar el servicio. Es decir, que se cumple que  $N_{i,(sillas)} < N_{silla} \Rightarrow x_i = 0$ . Lo mismo pasaría con respecto a las plazas de camilla y las plazas de asiento de las unidades, dado que también se cumple que  $N_{i,(camillas)} < N_{camilla} \Rightarrow x_i = 0$  y  $N_{i,(asientos)} < N_{asiento} \Rightarrow x_i = 0$ .
- En cambio, cuando sucede el caso contrario, es decir, que se verifica que  $N_{i,(sillas)} \geq N_{silla}$ ,  $N_{i,(camillas)} \geq N_{camilla}$  o  $N_{i,(asientos)} \geq N_{asiento}$ , entonces eso nos indica que se cumplen las restricciones de capacidad de la ambulancia para cada tipo de plaza con la ambulancia  $i$ , por lo que esa ambulancia sería una de las candidatas a solución, y por lo tanto  $x_i \in \{0,1\}$ . La unidad  $i$  cumpliría las restricciones de capacidad, pero podría no ser la elegida por no cumplir otras restricciones, o por no ser la mejor unidad para realizar el servicio entrante.

### 3.1.3.6. Restricción de vehículos solución

Esta restricción se trata de la restricción de asignación del servicio a una unidad planteada en el problema de asignación generalizado [3], por lo que formulamos la restricción a continuación:

$$\sum_{i \in I} x_i = 1$$

Como las variables de decisión asociadas a las unidades son binarias, esta restricción hace que solamente una de las unidades sean las elegidas para realizar el servicio, por lo tanto,  $x_i = 1$  solamente para la unidad  $i$  seleccionada, y para el resto de las unidades disponibles se tendría que  $x_i = 0$ .

### 3.1.3.7. Restricciones de tipo de vehículo

Los servicios de traslado de pacientes también pueden tener requisitos de traslado en un tipo de vehículo determinado. Los tipos de unidades que dispone la compañía [5] son los siguientes:

- Transporte sanitario no urgente (TSNU): son unidades destinadas al transporte sanitario no urgente de particulares o colectivos. Son ambulancias de tipo A y se clasifican en:
  - A1: es una ambulancia pequeña, que suelen contar con unas 3 plazas de asientos (más la del conductor), junto con una camilla. Este tipo de ambulancias no pueden realizar servicios de traslado de un paciente en silla de ruedas, dado que no dispone de los anclajes para poder realizar el viaje en condiciones de seguridad. Las ambulancias A1 se suelen utilizar sobre todo en viajes individuales, en los que no se colectiviza (aunque eso no quiere decir que no se pueda colectivizar, pero suele ser el uso frecuente).
  - A2: son las ambulancias mayoritarias en todos los turnos del día. Esto es debido a que son unidades que pueden hacer todo tipo de servicios (pueden llevar pacientes tanto sentados, en silla de ruedas como en camilla). Suelen tener capacidad para llevar en torno a seis u ocho pacientes sentados, una persona en camilla y una persona en silla de ruedas. Hay casos en los que los pacientes en sillas de ruedas pueden provocar alguna incidencia si el servicio lo realiza una ambulancia de este tipo, dado que cuando la silla tiene unas medidas superiores a la medida estándar (por ejemplo, las sillas eléctricas suelen ser más anchas que las sillas de ruedas normales), entonces puede darse el caso de que una vez esté la unidad allí se den cuenta de que no entra en la ambulancia.
  - PMR: este tipo de unidades son las que podrían resolver el problema planteado anteriormente, dado que son unidades que no tienen camilla, y esto hace que el hueco para meter la silla de ruedas no sea tan limitado. Al no disponer de camilla, las unidades PMR no pueden llevar pacientes que deben ser transportados en camilla. Estas unidades suelen disponer de entre seis y ocho plazas de asiento, y podrían llevar en torno a dos o tres pacientes en silla de ruedas. Puede no contarse como un tipo de vehículo, dado que suele contarse como una ambulancia de tipo A2, pero sin camilla.
- Transporte sanitario urgente (TSU): son unidades destinadas al transporte sanitario urgente. Este tipo de ambulancias asistenciales se dividen en tres tipos:

- Bariátrica: son ambulancias que están destinadas al traslado de pacientes con problemas de sobrepeso. Las unidades mencionadas anteriormente son capaces de transportar pacientes con un peso menor de 150 kg, así que cuando el peso del paciente es superior a los 150 kg, el servicio se solicita en ambulancia bariátrica, que puede hacer servicios de transporte sanitario urgente como no urgente.
- SVB (Soporte Vital Básico): también se conocen como ambulancias de tipo B, y están destinados para la asistencia sanitaria básica en caso de emergencias. Suelen contar con técnico/enfermero.
- UVI Móvil: son las ambulancias de tipo C, que están destinadas a la atención de sanitaria intensiva en caso de emergencias. La ambulancia cuenta con todos los medios para poder trasladar pacientes en una situación vital de riesgo. Las unidades cuentan con técnico de emergencias sanitarias (TES), personal médico y de enfermería que se encargan de la atención del paciente durante el traslado.

En nuestro caso, cuando se pide un servicio de traslado de un paciente, el tipo de vehículo que se solicita para el traslado puede ser alguno de los tipos mencionados anteriormente, junto a otros que no implicarían un tipo de vehículo en concreto. Los tipos de vehículos que implican restricciones son PMR, Bariátrica, UVI móvil y SVB. Para los vehículos que hemos mencionado, si el servicio se pide con alguno de esos tipos de vehículo, entonces se debe realizar con este tipo de vehículo.

A partir de lo visto anteriormente, formulamos las restricciones de la siguiente manera:

$$\sum_{i \in I} x_i * (1 - z_{i,(PMR)}) \leq M * (1 - z_{PMR})$$

$$\sum_{i \in I} x_i * (1 - z_{i,(BAR)}) \leq M * (1 - z_{BAR})$$

$$\sum_{i \in I} x_i * (1 - z_{i,(SVB)}) \leq M * (1 - z_{SVB})$$

$$\sum_{i \in I} x_i * (1 - z_{i,(UVI)}) \leq M * (1 - z_{UVI})$$

Donde utilizamos una constante de penalización  $M$  con un número grande para implementar restricciones lógicas [4], y descomponemos la formulación en los siguientes términos:

- $Z_{i,(PMR)}$ : variable indicadora binaria puede tomar los siguientes valores:
  - Si la unidad  $i$  es de tipo PMR, entonces  $Z_{i,(PMR)} = 1$ .
  - En cualquier otro caso, entonces  $Z_{i,(PMR)} = 0$ .
- $Z_{PMR}$ : variable indicadora binaria que toma los siguientes valores:
  - Si la realización del traslado se solicita en una ambulancia PMR, entonces  $Z_{PMR} = 1$ .
  - En cualquier otro caso, entonces  $Z_{PMR} = 0$ .
- $Z_{i,(BAR)}$ : variable indicadora binaria puede tomar los siguientes valores:
  - Si la unidad  $i$  es de tipo bariátrica, entonces  $Z_{i,(BAR)} = 1$ .
  - En cualquier otro caso, entonces  $Z_{i,(BAR)} = 0$ .
- $Z_{BAR}$ : variable indicadora binaria que toma los siguientes valores:
  - Si la realización del traslado se solicita en una ambulancia bariátrica, entonces  $Z_{BAR} = 1$ .
  - En cualquier otro caso, entonces  $Z_{BAR} = 0$ .
- $Z_{i,(SVB)}$ : variable indicadora binaria puede tomar los siguientes valores:
  - Si la unidad  $i$  es de soporte vital básico, entonces  $Z_{i,(SVB)} = 1$ .
  - En cualquier otro caso, entonces  $Z_{i,(SVB)} = 0$ .
- $Z_{SVB}$ : variable indicadora binaria que toma los siguientes valores:
  - Si la realización del traslado se solicita en una unidad de soporte vital básico, entonces  $Z_{SVB} = 1$ .
  - En cualquier otro caso, entonces  $Z_{SVB} = 0$ .
- $Z_{i,(UVI)}$ : variable indicadora binaria puede tomar los siguientes valores:
  - Si la unidad  $i$  es una UVI móvil, entonces  $Z_{i,(UVI)} = 1$ .
  - En cualquier otro caso, entonces  $Z_{i,(UVI)} = 0$ .
- $Z_{UVI}$ : variable indicadora binaria que toma los siguientes valores:
  - Si la realización del traslado se solicita en una unidad UVI móvil, entonces  $Z_{UVI} = 1$ .
  - En cualquier otro caso, entonces  $Z_{UVI} = 0$ .

Por otro lado, también debemos de tener en cuenta que las unidades de transporte sanitario urgente (TSU) no pueden realizar otros servicios que se solicitan con otro tipo de vehículo, mientras que una ambulancia PMR puede hacer servicios que se solicitan en ambulancia PMR, junto a otros. De la manera que estamos utilizando las restricciones anteriores no se contempla esta opción, por lo que planteamos estas restricciones a continuación:

$$\sum_{i \in I} x_i * z_{i,(BAR)} \leq M * z_{BAR}$$

$$\sum_{i \in I} x_i * z_{i,(SVB)} \leq M * z_{SVB}$$

$$\sum_{i \in I} x_i * z_{i,(UVI)} \leq M * z_{UVI}$$

Estas restricciones hacen que se limite el valor que toma cada variable de decisión asociada a cada unidad dependiendo del tipo de vehículo [5] que sea cada unidad:

- En el caso de las unidades PMR se plantean las siguientes situaciones:
  - Si entra un servicio que se solicita en PMR, entonces  $z_{PMR} = 1$ , lo que provocaría que se deba de cumplir que  $x_i * (1 - z_{i,(PMR)}) \leq 0$ . Observamos que cuando la unidad  $i$  no es de tipo PMR, entonces esto haría que la unidad  $i$  no sería candidata a solución. Es decir, se cumple que  $z_{i,(PMR)} = 0 \Rightarrow x_i = 0$ . En cambio, si la unidad es de tipo PMR, esto hace que la unidad  $i$  pueda ser elegida solución o no. Es decir, se cumpliría que  $z_{i,(PMR)} = 1 \Rightarrow x_i \in \{0,1\}$ .
  - Por otro lado, como las ambulancias PMR sí que pueden realizar otros servicios, aunque no se solicite PMR como tipo de vehículo, entonces comprobamos que cuando no se solicita un servicio en PMR ( $z_{PMR} = 0$ ), esto provoca que tengamos una restricción  $\sum_{i \in I} x_i * (1 - z_{i,(PMR)}) \leq M$ , y como  $M$  es un número grande positivo, vemos que no nos pone restricciones de limitación de servicios que puede hacer una ambulancia PMR.
- Por otra parte, para las unidades de soporte vital básico, UVI móvil y bariátricas (unidades de transporte sanitario urgente, denotaremos  $UTSU \in \{BAR, SVB, UVI\}$  para referirnos a este tipo de unidades), se plantea otra situación:

- Si entra un servicio que se solicita su realización en una unidad de transporte sanitario urgente, entonces  $z_{UTSU} = 1$ , lo que provoca que se deba de cumplir que  $x_i * (1 - z_{i,(UTSU)}) \leq 0$ . Observamos que cuando la unidad  $i$  no es una unidad de transporte sanitario urgente, entonces esto haría que la unidad  $i$  no sería candidata a solución. Es decir, se cumple que  $z_{i,(UTSU)} = 0 \Rightarrow x_i = 0$ . En cambio, si la unidad es de transporte sanitario urgente, esto hace que la unidad  $i$  pueda ser elegida solución o no. Es decir, se cumpliría que  $z_{i,(UTSU)} = 1 \Rightarrow x_i \in \{0,1\}$ .
- Por otro lado, las unidades de transporte sanitario urgente solamente pueden realizar los servicios que se soliciten para su realización en la unidad de transporte sanitario urgente correspondiente. Como vimos que en caso de las unidades PMR, cuando no se solicita un servicio en unidad de transporte sanitario urgente ( $z_{UTSU} = 0$ ), esto provoca que tengamos una restricción  $\sum_{i \in I} x_i * (1 - z_{i,(UTSU)}) \leq M$ , y estas restricciones no limitan que la unidad no pueda hacer el servicio al no solicitarse un servicio de transporte sanitario urgente. Para ello, introducimos las restricciones de la forma  $\sum_{i \in I} x_i * z_{i,(UTSU)} \leq M * z_{UTSU}$ . Entonces, cuando el servicio entrante no se solicita en ninguna de las unidades de transporte sanitario urgente (bariátrica, UVI móvil y soporte vital básico), es decir,  $z_{UTSU} = 0$ , con estas restricciones se fuerza a que  $x_i * z_{i,(UTSU)} \leq 0$ . A partir de aquí, observamos que cuando la unidad  $i$  es una unidad de transporte sanitario urgente, entonces esto haría que la unidad  $i$  no sería candidata a solución. Es decir, se cumple que  $z_{i,(UTSU)} = 1 \Rightarrow x_i = 0$ . En cambio, si no es una unidad de transporte sanitario urgente, esto hace que la unidad  $i$  pueda ser elegida solución o no. Es decir, se cumpliría que  $z_{i,(UTSU)} = 0 \Rightarrow x_i \in \{0,1\}$ .

### 3.1.3.8. Restricciones de individuo solicitante de servicio

Un servicio siempre viene solicitado por un individuo solicitante de servicio que llamamos cliente y viene identificado por un código numérico que es único para cada cliente distinto. Los clientes que se manejan a grandes rasgos son los siguientes:

- Seguridad Social (SACYL en Castilla y León, los servicios solicitados por la sanidad pública tienen asignado el código de cliente 1).
- Unidad de cuidados intensivos UCI (servicios de UVI móvil, los servicios solicitados por la UCI tienen asignado el código de cliente 2).
- Compañías privadas (diferentes compañías aseguradoras que tienen seguros médicos privados, cada compañía tiene un código de cliente distinto).

Las unidades de privado también son distintas a las unidades de Seguridad Social, dado que las unidades de servicios públicos llevan el rotulado de la Seguridad Social, y esto nos provoca que haya servicios que no pueda realizar.

Cuando entra un servicio de traslado de un paciente, este servicio viene solicitado por un cliente, que puede ser uno de los mencionados. En este caso, si el servicio lo ha solicitado una aseguradora privada, este servicio debe realizarse en una ambulancia de servicio privado (sin el rotulado de la Seguridad Social) [2] salvo que se trate de un servicio de apoyo (al que se le asigna el código de cliente 10225). Es decir, que cuando un servicio lo solicita una compañía privada, el servicio se debe de hacer en unidades de privado salvo en apoyos que lo podría hacer una unidad de la Seguridad Social. En cambio, cuando se solicita un servicio de la Seguridad Social, este lo puede realizar tanto una unidad de privado como de público, por lo que en este caso no habría limitaciones.

A continuación, formulamos las restricciones planteadas anteriormente de la siguiente manera:

$$\sum_{i \in I} x_i * (1 - z_{i,(PRIV)}) \leq M * (1 - z_{PRIV})$$

Donde utilizamos una constante de penalización  $M$  con un número grande para la implementación de restricciones lógicas [4], y descomponemos la formulación en los siguientes términos:

- $z_{i,(PRIV)}$ : variable indicadora binaria puede tomar los siguientes valores:
  - Si la unidad  $i$  es de privado, entonces  $z_{i,(PRIV)} = 1$ .
  - En cualquier otro caso, entonces  $z_{i,(PRIV)} = 0$ .
- $z_{PRIV}$ : variable indicadora binaria que toma los siguientes valores:

- Si la realización del traslado es solicitada por una compañía privada, entonces  $Z_{PRIV} = 1$ .
- En cualquier otro caso, entonces  $Z_{PRIV} = 0$ .

Con esta implementación de las restricciones, hacemos que se limite el valor que toma cada variable de decisión asociada a cada unidad dependiendo del cliente que solicita el servicio y el tipo de ambulancia asociada:

- Si entra un servicio solicitado por una compañía privada que no es un apoyo (es decir, que el código de cliente asociado es distinto de 1, 2 y 10225), entonces  $Z_{PRIV} = 1$ , esto hace que se deba de cumplir que  $x_i * (1 - z_{i,(PRIV)}) \leq 0$ . Observamos que cuando la unidad  $i$  tiene el rotulado de la Seguridad Social, entonces esto haría que la unidad  $i$  no pueda formar parte del conjunto de unidades candidatas a solución. Es decir, se cumple que  $z_{i,(PRIV)} = 0 \Rightarrow x_i = 0$ . En cambio, si la unidad no tiene el rotulado de la Seguridad Social, esto hace que la unidad  $i$  pueda ser elegida solución o no. Es decir, se cumpliría que  $z_{i,(PRIV)} = 1 \Rightarrow x_i \in \{0,1\}$ .
- Por otro lado, podemos apreciar que si entra un servicio de la Seguridad Social (es decir,  $Z_{PRIV} = 0$ ), entonces esto haría que se debe cumplir que  $\sum_{i \in I} x_i * (1 - z_{i,(PRIV)}) \leq M$ . Ya hemos visto anteriormente que  $M$  es un número muy grande, el cuál no nos limita a que ese servicio pueda ser realizado por algún tipo de unidad en concreto. Se puede apreciar que, si el servicio no lo solicita una compañía privada, ese servicio podría ser realizado por cualquier unidad, independientemente de si es de privado o de la Seguridad Social.

## 3.2. Limitaciones del planteamiento del problema

Cuando estamos en una situación teórica ideal, buscaríamos que el modelo que se ajusta nos devuelva la unidad que debe realizar el servicio nuevo, pero hay diversas situaciones que hacen que no siempre sea realizado por la mejor.

En la situación real, los jefes de tráfico también se plantean otras observaciones, a parte de las restricciones mencionadas anteriormente, antes de asignar el servicio a una unidad. Por ejemplo, cuando entra un servicio de vuelta cerca de horas finales de jornada laboral

de algún conductor y que pueda terminar la jornada laboral cerca de su zona de colectivo, o que la mejor unidad sea una unidad en estado localizado que se intentan reservar su uso, o simplemente situaciones en las que el jefe de tráfico prefiere que el servicio lo realice otra unidad, que puede hacer el servicio, pero que no es la mejor.

No obstante, aunque la unidad que realice los servicios no siempre sea la óptima en la vida real, lo que siempre se cumple es que el servicio será realizado por una de las unidades más rápidas, por lo que, si hallamos un conjunto con las unidades candidatas más eficientes para realizar el servicio, entonces la decisión del jefe de tráfico siempre se encontrará entre los candidatos seleccionados.

Por otro lado, cuando buscamos el conjunto de candidatos a solución de unidades, también debemos contemplar la opción de que los conductores que no podían realizar el servicio en una primera instancia puedan realizarlo con un cambio de vehículo. No obstante, esta opción es la menos se contempla, dado que la prioridad es no cambiar de vehículo porque el tiempo de llegada al origen aumentaría de manera significativa (el tiempo de llegada al origen sería la suma del tiempo desde la ubicación actual hasta la nave y el tiempo desde la nave hasta el origen), pero puede haber situaciones en las que el número de unidades eficientes para realizar el servicio sea menor (o directamente no haya unidades que puedan realizar el servicio sin cambiar de vehículo) que el mínimo número de candidatos solicitados, y entonces contemplamos en una segunda instancia si algún otro conductor pudiera realizar el servicio cambiando de unidad.

Por último, también apreciamos dificultades a la hora de calcular los tiempos que tardaría cada unidad en realizar el servicio entrante.

### **3.3. Obtención de la variable tiempo en las unidades factibles a ser solución**

Cuando queremos asignar un servicio a una unidad que se encargue de su realización, como buscamos a la unidad óptima para su realización, debemos calcular los siguientes tiempos para cada una de las unidades:

- $t_{i,(u_i,origen)}$ : tiempo que tardaría la unidad  $i$  en llegar al lugar de origen del servicio desde su ubicación a la hora del ajuste del modelo.
- $t_{i,(u_i,nave)}$ : tiempo que tardaría la unidad  $i$  en llegar a la nave de unidades para cambiar de vehículo.
- $t_{i,(nave,origen)}$ : tiempo que tardaría la unidad  $i$  en ir desde la nave hasta el lugar de origen del servicio entrante.
- $t_{i,(origen,destino)}$ : tiempo que tarda la unidad  $i$  en realizar el servicio entrante, que puede ser distinto dependiendo de si colectiviza o no.
- $t_{i,(destino,zona_i)}$ : tiempo que tarda la unidad  $i$  en ir desde el lugar de destino del servicio hasta su zona de colectivo asociada a cada unidad.
- $t_{i,(provincia\ unidad,provincia\ origen)}$ : tiempo entre la provincia de la unidad  $i$  hasta la provincia de origen del servicio entrante.

Pero el cálculo de estos tiempos resulta un gran problema para las empresas de transporte sanitario no urgente en la actualidad, dado que cada consulta de tiempo para cada unidad supone un gran número de consultas, lo que implicaría un coste excesivo. Para obtener estos tiempos, tenemos varias opciones de cálculo, pero nos damos cuenta de que cuanto mayor es la precisión, mayor es el coste para las empresas.

La opción más precisa sería obtener los tiempos estimados mediante consultas a una API de planificación de rutas. Esta opción, hoy en día, no es una opción realista que podamos considerar, dado que cada consulta tiene un coste, y tampoco se pueden obtener todos los tiempos para todas las unidades de una manera instantánea, dado que el tiempo de cómputo también aumenta de manera significativa.

La otra opción, que es la más viable ahora, es trabajar a partir de coordenadas, dado que es información de la que si disponemos ahora mismo en las empresas. A partir de estas coordenadas, lo que hacemos es calcular la distancias y después los tiempos estimados a partir de una velocidad media. En este trabajo trabajaremos mediante coordenadas.

Para calcular los tiempos mencionados anteriormente, en el momento de la asignación disponemos de las siguientes latitudes y longitudes de las siguientes ubicaciones [2]:

- Origen del servicio.

- Destino del servicio.
- Ubicación actual de las unidades.
- Zona de colectivo de las unidades.
- Ubicación de las naves de vehículos.
- Origen de los servicios que ya tiene asignados la unidad  $i$  (solo si tiene).
- Destino de los servicios que ya tiene asignados la unidad  $i$  (solo si tiene).
- Provincias de cada unidad y de origen del servicio.

A partir de esta información, lo que hacemos es calcular las siguientes distancias:

- $dist_{i,(u_i,origen)}$ : distancia que recorre la unidad  $i$  desde su ubicación actual hasta el lugar de origen.
- $dist_{i,(u_i,nave)}$ : distancia que recorre la unidad  $i$  desde su ubicación actual hasta la nave de vehículos.
- $dist_{i,(nave,origen)}$ : distancia que recorre la unidad  $i$  desde la nave hasta el lugar de origen.
- $dist_{i,(origen,destino)}$ : distancia que recorre la unidad  $i$  desde el lugar de origen hasta el destino del servicio entrante.
- $dist_{i,(destino,zona_i)}$ : distancia que recorre la unidad  $i$  desde el destino hasta su zona de colectivo asociada.
- $dist_{i,(provincia\ unidad,provincia\ origen)}$ : distancia entre provincias de la unidad  $i$  y la provincia de origen del servicio.

La forma de calcular las distancias se hace mediante la distancia Haversine. La distancia de Haversine [6] se calcula a partir de la fórmula de Haversine:

$$D = 2 \cdot \sin^{-1} \left( \sqrt{\sin^2 \left( \frac{lat_2 - lat_1}{2} \right) + \cos(lat_2) \cdot \cos(lat_1) \cdot \sin^2 \left( \frac{lon_2 - lon_1}{2} \right)} \right) \cdot \mu_E$$

Donde tenemos los siguientes elementos:

- $D$ : distancia entre los dos puntos en kilómetros.
- $lat_1$ : latitud del primer punto.
- $lat_2$ : latitud del segundo punto.
- $lon_1$ : longitud del punto 1.
- $lon_2$ : longitud del punto 2.

- $\mu_E$ : radio de la Tierra en kilómetros (6371.009 km)

La fórmula de Haversine [7] es una fórmula utilizada para calcular la distancia entre dos puntos de una esfera dadas sus coordenadas de longitud y latitud. Lo que hace es calcular la distancia más corta entre dos puntos de la superficie de un objeto esférico, como la Tierra.

En la realidad, la fórmula de Haversine [7] se utiliza para calcular rutas de vuelo, distancias en mapas y navegación marítima. También se utiliza en meteorología para calcular las trayectorias de las tormentas, para posicionar equipos de telecomunicaciones y para trazar la trayectoria de los satélites en el cielo. La fórmula también se utiliza en navegación GPS para determinar las rutas más eficientes para los conductores.

Una vez ya tenemos las distancias calculadas (en kilómetros), lo que hacemos es calcular tiempos aproximados, a partir de la siguiente relación:

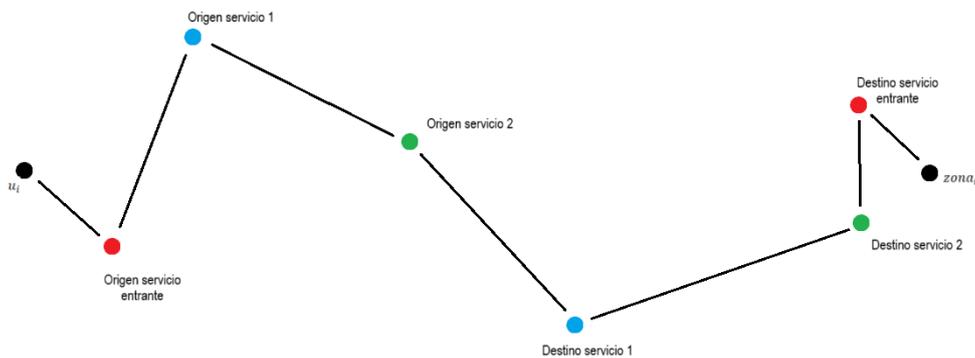
$$T = \frac{D}{v}$$

Dado que la distancia está en kilómetros y la velocidad media está en kilómetros por hora, por lo que los tiempos los obtenemos en horas. Con respecto a la velocidad media, podemos obtener buenas estimaciones de tiempo utilizando valores distintos dependiendo del tipo de servicio a realizar y las conexiones de carreteras entre origen y destino de los servicios entrantes. En los casos que veremos más adelante de servicios entre El Tiemblo y Ávila, cuyo trayecto es de 44.6 kilómetros y se tardaría 42 minutos en realizar el servicio, usamos una velocidad media de 45 kilómetros por hora en línea recta, dado que la distancia en línea recta es de 31.12 kilómetros y un tiempo estimado de 41.49 minutos.

No obstante, cuando las unidades tienen asignados servicios para realizar, debemos comprobar una serie de restricciones para calcular estas distancias. Nuestra prioridad siempre es la colectivización de servicios [2], por lo que, si para el servicio entrante se cumplen ciertas restricciones para una unidad  $i$  que ya tenía servicios asignados, entonces se hacen los servicios asignados junto con el nuevo entrante de manera colectiva. En cambio, si no se cumplen, la distancia para llegar al origen del servicio entrante para esa unidad  $i$  sería la distancia para hacer los servicios ya asignados junto con la distancia en llegar al lugar de origen. Las restricciones que se deben verificar son las siguientes:

### 3.3.1. Restricciones de tiempo en la ambulancia

En los pliegos de prescripciones técnicas firmados por las empresas de transporte sanitario no urgente [2], tenemos fijado unas condiciones con respecto a la colectivización de servicios. Para poder plantear estas restricciones planteamos la situación del siguiente gráfico:



En esta situación podemos observar que la unidad  $i$  tenía asignado dos servicios antes de la entrada del nuevo servicio, y que si se le asignara el servicio entrante debería seguir la ruta indicada en la imagen. Nos interesa que se colectivicen los servicios [2] en la medida de lo posible, pero no podemos colectivizar todos los servicios dado que los pliegos nos plantean las siguientes restricciones para todos los servicios que se realizan colectivizando (servicio entrante junto con los servicios ya asignados):

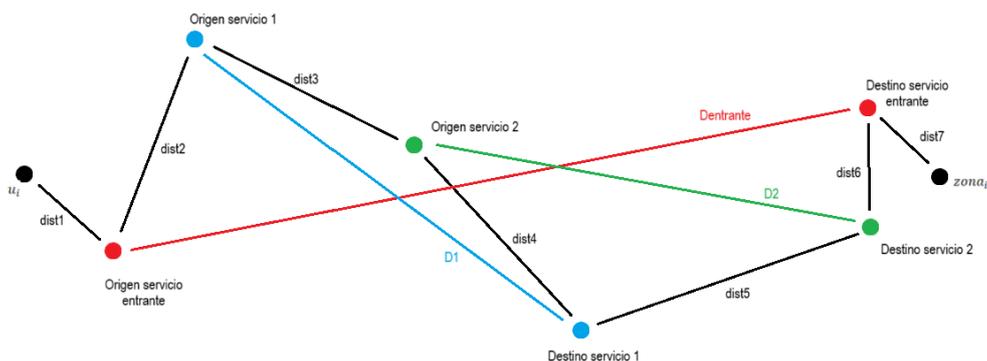
- Si el tiempo del paciente  $j$  en la ambulancia es inferior a una hora:

$$t_{i,(origen_j,destino_j)} \leq 3 * t_{origen_j,destino_j}$$

- Si el tiempo del paciente  $j$  en la ambulancia es superior a una hora:

$$dist_{i,(origen_j,destino_j)} \leq 2 * dist_{origen_j,destino_j}$$

La situación que se plantea en las restricciones la podemos apreciar sobre el gráfico anterior:



Vemos gráficamente que la colectivización provoca una mayor duración de los pacientes en la ambulancia, y aunque la colectivización es uno de nuestros principales objetivos, dado que el número de unidades es significativamente menor al número de servicios diarios, las restricciones planteadas en los pliegos de prescripciones técnicas provocan que no se pueda colectivizar cualquier conjunto de servicios.

### 3.3.2. Restricciones de capacidad

Cuando queremos colectivizar servicios, entonces la ambulancia debe de poder ser capaz de poder llevar a todos los pacientes, cada uno en su tipo de movilidad indicado en su volante médico. Como ya vimos anteriormente, tenemos tres tipos de plazas en la unidad, que son las plazas de asiento, de sillas y de camilla. Por lo tanto, si queremos hacer el servicio colectivizando, se deben de cumplir las siguientes restricciones:

$$N_{silla\ asignado} + N_{silla\ entrante} \leq N_{i,(sillas)}$$

$$N_{camilla\ asignado} + N_{camilla\ entrante} \leq N_{i,(camillas)}$$

$$N_{asiento\ asignado} + N_{asiento\ entrante} \leq N_{i,(asientos)}$$

Descomponemos la formulación en los siguientes términos:

- $N_{i,(sillas)}$ : número total de plazas de silla de las que dispone la unidad  $i$ .
- $N_{silla\ entrante}$ : número de plazas de silla necesarias en el servicio entrante.
- $N_{silla\ asignado}$ : número de plazas de silla necesarias en los servicios asignados.
- $N_{i,(camillas)}$ : número total de plazas de camilla de las que dispone la unidad  $i$ .
- $N_{camilla\ entrante}$ : número de plazas de camilla necesarias en el servicio entrante
- $N_{camilla\ asignado}$ : número de plazas de camilla necesarias en los servicios asignados.
- $N_{i,(asientos)}$ : número total de plazas de asientos que tiene la unidad  $i$ .
- $N_{asiento\ entrante}$ : número de plazas de asiento necesarias en el servicio entrante
- $N_{asiento\ asignado}$ : número de plazas de asiento necesarias en los servicios asignados.

De esta manera, podemos observar de manera intuitiva que cuando el número de plazas necesarias para realizar los servicios de manera colectiva en un único viaje es mayor que el número de plazas del tipo requerido que dispone una unidad  $i$ , entonces esa unidad  $i$  si

fuera seleccionada para realizar el servicio debería de realizar primero los servicios ya asignados, y después realizaría el servicio entrante.

### **3.3.3. Restricciones de tipo de viaje**

Para poder colectivizar servicios, los tipos de viaje deben de ser iguales. Es decir, que, si una unidad *i* tenía asignados servicios de ida, entonces solo se podría colectivizar con otro servicio de ida. No se podría colectivizar con un servicio de vuelta porque no se consideraría una colectivización.

### **3.3.4. Restricciones sobre la información del traslado**

Es común que se solicite un servicio de traslado de un paciente mediante un transporte asilado de otros pacientes. Esto sucede cuando son pacientes que pueden tener algún tipo de enfermedad infecciosa, o pacientes con necesidades especiales de atención, o pacientes psiquiátricos que necesitan medidas de contención. También se usa para pacientes con obesidad mórbida, pacientes VIP, pacientes de pediátricos, y servicios de traslado en colchón de vacío [8], que es el sistema de inmovilización más completo para el traslado, dado que absorbe gran parte de las vibraciones, aísla al paciente e inmoviliza las lesiones en la posición que se realice el vacío.

### **3.3.5. Restricciones de personal especializado**

Cuando un servicio entrante se solicita su realización acompañada de un médico o de un enfermero, entonces esto provoca que el servicio se deba realizar en traslado individual. Esto es debido a que, cuando un médico o un enfermero deba ir en la unidad, no está obligado a que vaya con otros pacientes, dado que el médico o el enfermero es únicamente para el servicio que lo solicita.

# Capítulo 4

## Base de datos

### 4.1. Información disponible

Como hemos mencionado anteriormente, con la información que se dispone actualmente en las bases de datos de las empresas de transporte sanitario no urgente, el cálculo de los tiempos es un tema complejo, dado que lo ideal sería disponer de esta información mediante una consulta a una API de planificación de rutas, pero esto supone un coste muy elevado. No obstante, ya vimos anteriormente cómo podemos solucionar el problema con respecto al cálculo de los tiempos a partir de la información disponible, la cual describimos a continuación.

Disponemos de bases de datos a partir de las cuales obtenemos los datos necesarios para ajustar nuestro modelo. Las bases de datos utilizadas son las siguientes:

#### 4.1.1. Asignación de servicio

Esta base de datos contiene datos sobre los servicios [2] que va solicitando el hospital, o un particular o una compañía privada, para su realización. Cada fila corresponde a un servicio distinto, y conocemos la siguiente información de cada servicio:

- I.V: variable indicadora del tipo de servicio (I: servicio de ida, V: servicio de vuelta).
- Gr: información sobre el servicio complementaria (servicio provincial, urbano, usar la autovía A15, etc.).
- Movil: dotación da la unidad que realiza el servicio (no está completado dad que no es un servicio asignado).

- Envío: hora de envío del servicio (en nuestro caso, hora de salida para realizar el servicio de la ambulancia).
- Reco: hora a la que se recoge al paciente en el origen.
- Entr: marca temporal del servicio, que incluye el día y la hora de entrada. La interpretación de esta variable depende del tipo de servicio (ida o vuelta), dado que para los servicios de ida es la hora a la que el paciente tiene que estar en el destino, mientras que para los servicios de vuelta es la hora de salida del origen.
- Cli: código del cliente que solicita el servicio (1: cliente público, 2: unidad de vigilancia intensiva (UVI), 10225: servicio de apoyo, resto: clientes privados).
- T.V.: tipo de vehículo requerido para el servicio (AC: ambulancia convencional, ADD: asistencia de enfermería a domicilio, AMD: asistencia médica a domicilio, BAR: vehículo bariátrico (para pacientes con obesidad mórbida), ENF: enfermería (vehículo de enfermería o aviso exclusivo de enfermero sin ambulancia), HC: hospital de campaña, PMA: puesto médico avanzado, PMR: vehículo adaptado para personas con movilidad reducida, SVB: soporte vital básico, TC: transporte colectivo (vehículo para transportar a varios pacientes simultáneamente), UAL: unidad de asistencia local, UMR: unidad móvil de rescate, UVI: unidad de vigilancia intensiva (ambulancia medicalizada con médico y enfermero), VIR: vehículo de intervención rápida (vehículo ligero para llegar rápido con personal sanitario), VSL: vehículo sanitario ligero (no medicalizado, para transporte de pacientes sin riesgo vital)).
- Ter: tipo de tratamiento asociado al servicio (ALT: alta de planta, ANT: antibioterapia, APY: apoyo, ASD: asistencia de enfermero, ASM: asistencia de médico, CST: consulta, CU: curas, DPZ: desplazamiento, HD: hospital de día, HE: hemodiálisis, ING: ingreso, INT: interhospitalario, LOG: logopedia, ORG: órganos, OTR: otro, PMC: permanencia, PRU: prueba, PSQ: psiquiatría, QUI: quimioterapia, RAA: radioterapia, RE: rehabilitación, REM: reconocimiento médico, SUR: salida de urgencias, TP: tratamiento prolongado, URG: urgencias).
- MP: tipo de movilidad del paciente (" " (sin especificar): sin necesidades especiales de movilidad, B: servicio de traslado en camilla, SA: servicio de traslado en silla propia del paciente, SV: servicio de transporte en silla vehículo, SE: servicio de transporte en silla eléctrica).

- IT: información adicional sobre el traslado (" " (sin especificar): sin información especial sobre el traslado, AIS: paciente aislado, E: paciente de especial atención, I: paciente infeccioso, MC: paciente con medidas de contención, OB: paciente con obesidad mórbida, PM: paciente con permiso médico, V: paciente VIP, AP: paciente pediátrico Avanzado, KS: paciente pediátrico con arnés, SP: paciente pediátrico en silla, AS: paciente con Apoyo sanitario, CP: traslado en Camilla palas, CV: traslado en colchón de vacío, CU: traslado cuchara, PT: traslado en silla oruga, SR: traslado en silla de rescate, TA: traslado en tablero espinal).
- O: indica si el servicio requiere oxígeno (O: sí, " ": no).
- A: indica si el servicio incluye acompañante (\*: sí, " ": no).
- C: indica si el servicio requiere camillero (#: sí, " ": no).
- M: indica si el servicio requiere la presencia de un médico (M: sí, " ": no).
- T: indica si el servicio requiere la presencia de un enfermero (T: sí, " ": no).
- Información sobre el origen (donde tenemos sus coordenadas).
  - Pobl.Origen: población de origen.
  - Origen: dirección del origen.
  - Obv.Origen: observaciones.
- Información sobre el destino (donde tenemos sus coordenadas).
  - Pobl.Destino: población de destino
  - Destino: dirección del destino.
  - Obv.Destino: observaciones.
- Datos sobre el paciente
  - Nombre: identificación del paciente.
  - Esp: especificaciones del paciente.
- Op: observaciones del servicio/paciente.
- I: variable indicadora sobre si el servicio ha sufrido alguna incidencia o no.
- R: revisión del servicio (indicador de aviso al paciente de la hora de recogida).

## 4.1.2. Asignación de servicios

Esta base de datos contiene datos sobre los servicios que se están realizando a la hora de la asignación del nuevo servicio [2]. Cada fila corresponde a un servicio distinto, y conocemos la siguiente información de cada servicio:

- I.V: variable indicadora del tipo de servicio (I: servicio de ida, V: servicio de vuelta).
- C.A.: código de asignación identificador de cada servicio, que toma valores entre el 1 y el 1000 en orden creciente y que, cuando se llega al límite superior o al día siguiente, se reinicia el código de asignación.
- Unidad: código de dotación de la unidad que está realizando el servicio (en este caso, sí que aparece cumplimentado de forma correcta).
- Reco: hora a la que se recoge al paciente en el origen.
- Entr: marca temporal del servicio, que incluye el día y la hora de entrada. La interpretación de esta variable depende del tipo de servicio (ida o vuelta), dado que para los servicios de ida es la hora a la que el paciente tiene que estar en el destino, mientras que para los servicios de vuelta es la hora de salida del origen.
- IS: hora de inicio del servicio.
- LO: hora de llegada al origen del servicio.
- SO: hora de salida de origen del servicio.
- LD: hora de llegada al destino del servicio.
- FS: hora de finalización del servicio.
- Cli: código del cliente que solicita el servicio (1: cliente público, 2: unidad de vigilancia intensiva (UVI), 10225: servicio de apoyo, resto: clientes privados).
- T.V.: tipo de vehículo requerido para el servicio (AC: ambulancia convencional, ADD: asistencia de enfermería a domicilio, AMD: asistencia médica a domicilio, BAR: vehículo bariátrico (para pacientes con obesidad mórbida), ENF: enfermería (vehículo de enfermería o aviso exclusivo de enfermero sin ambulancia), HC: hospital de campaña, PMA: puesto médico avanzado, PMR: vehículo adaptado para personas con movilidad reducida, SVB: soporte vital básico, TC: transporte colectivo (vehículo para transportar a varios pacientes simultáneamente), UAL: unidad de asistencia local, UMR: unidad móvil de rescate, UVI: unidad de vigilancia intensiva (ambulancia medicalizada con médico y enfermero), VIR: vehículo de intervención rápida (vehículo ligero para llegar rápido con personal sanitario), VSL: vehículo sanitario ligero (no medicalizado, para transporte de pacientes sin riesgo vital)).
- Ter: tipo de tratamiento asociado al servicio (ALT: alta de planta, ANT: antibioterapia, APY: apoyo, ASD: asistencia de enfermero, ASM: asistencia de

médico, CST: consulta, CU: curas, DPZ: desplazamiento, HD: hospital de día, HE: hemodiálisis, ING: ingreso, INT: interhospitalario, LOG: logopedia, ORG: órganos, OTR: otro, PMC: permanencia, PRU: prueba, PSQ: psiquiatría, QUI: quimioterapia, RAA: radioterapia, RE: rehabilitación, REM: reconocimiento médico, SUR: salida de urgencias, TP: tratamiento prolongado, URG: urgencias).

- MP: tipo de movilidad del paciente (" " (sin especificar): sin necesidades especiales de movilidad, B: servicio de traslado en camilla, SA: servicio de traslado en silla propia del paciente, SV: servicio de transporte en silla vehículo, SE: servicio de transporte en silla eléctrica).
- IT: información adicional sobre el traslado (" " (sin especificar): sin información especial sobre el traslado, AIS: paciente aislado, E: paciente de especial atención, I: paciente infeccioso, MC: paciente con medidas de contención, OB: paciente con obesidad mórbida, PM: paciente con permiso médico, V: paciente VIP, AP: paciente pediátrico Avanzado, KS: paciente pediátrico con arnés, SP: paciente pediátrico en silla, AS: paciente con Apoyo sanitario, CP: traslado en Camilla palas, CV: traslado en colchón de vacío, CU: traslado cuchara, PT: traslado en silla oruga, SR: traslado en silla de rescate, TA: traslado en tablero espinal).
- O: indica si el servicio requiere oxígeno (O: sí, " ": no).
- A: indica si el servicio incluye acompañante (\*: sí, " ": no).
- C: indica si el servicio requiere camillero (#: sí, " ": no).
- M: indica si el servicio requiere la presencia de un médico (M: sí, " ": no).
- T: indica si el servicio requiere la presencia de un enfermero (T: sí, " ": no).
- Información sobre el origen (donde tenemos sus coordenadas).
  - Pobl.Origen: población de origen.
  - Origen: dirección del origen.
  - Obv.Origen: observaciones.
- Información sobre el destino (donde tenemos sus coordenadas).
  - Pobl.Destino: población de destino
  - Destino: dirección del destino.
  - Obv.Destino: observaciones.
- Datos sobre el paciente
  - Nombre: identificación del paciente.
  - Esp: especificaciones del paciente.

- Op: observaciones del servicio/paciente.
- I: variable indicadora sobre si el servicio ha sufrido alguna incidencia o no.
- R: revisión del servicio (indicador de aviso al paciente de la hora de recogida).

### 4.1.3. Dotaciones

Conjunto de datos que contiene la información sobre las diferentes dotaciones actuales (vehículos junto con conductores). La información que se almacena es la siguiente:

- Dotación: código identificador de cada unidad junto con su conductor asignado.
- E. conductor: estado del conductor en el momento de la asignación (" " (sin especificar): cuando el conductor no está en jornada laboral, En escucha, Enviando servicio, Inicio del servicio, Llegada al origen, Salida del origen, Llegada destino, Fin de Servicio, Viaje sin paciente, Comida/café, Avería, Permiso, Localizado, Repostaje, Espera Paciente).
- Provincia: provincia a la que pertenece la unidad.
- IniTurno: horario de inicio de turno de la unidad (junto con el día).
- FinTurno: hora de fin de turno de la unidad.
- Tur: tipo de turno de la unidad (MAÑ: mañana, TAR: tarde, NOC: noche, 24H, PRI: privado, URG: urgencias, REF: refuerzo, PAR: partido).
- T.V.: tipo de vehículo asignado a la dotación (AC: ambulancia convencional, ADD: asistencia de enfermería a domicilio, AMD: asistencia médica a domicilio, BAR: vehículo bariátrico (para pacientes con obesidad mórbida), ENF: enfermería (vehículo de enfermería o aviso exclusivo de enfermero sin ambulancia), HC: hospital de campaña, PMA: puesto médico avanzado, PMR: vehículo adaptado para personas con movilidad reducida, SVB: soporte vital básico, TC: transporte colectivo (vehículo para transportar a varios pacientes simultáneamente), UAL: unidad de asistencia local, UMR: unidad móvil de rescate, UVI: unidad de vigilancia intensiva (ambulancia medicalizada con médico y enfermero), VIR: vehículo de intervención rápida (vehículo ligero para llegar rápido con personal sanitario), VSL: vehículo sanitario ligero (no medicalizado, para transporte de pacientes sin riesgo vital)).
- C.V.: carrozado del vehículo (" ": sin especificar, C: unidad con camilla, E: unidad con rampa eléctrica).

- Camillas: número total de plazas de camilla de la unidad.
- Sillas: número total de plazas de silla de la unidad.
- Asientos: número de plazas de asiento de la unidad (salvo la plaza del conductor).
- Latitud y Longitud: ubicación actual de la unidad (en grados).
- Latitud\_nave y Longitud\_nave: ubicación de la nave de cada unidad (en grados), es decir, donde debe cambiar de unidad esa unidad.
- Latitud\_zona y Longitud\_zona: ubicación de la zona de cada unidad (zona asociada a cada conductor).

# Capítulo 5

## Solución del problema

### 5.1. Modelos ajustados

Nuestro objetivo sigue siendo facilitar el trabajo de los jefes de tráfico a la hora de la asignación de nuevos servicios. Para ello, ya vimos anteriormente que pueden darse diversas situaciones en las que el servicio entrante no se asigne a la mejor unidad, por lo que buscaremos ofrecerle al jefe de tráfico un conjunto de unidades eficientes candidatas a solución. A priori, buscamos el conjunto de unidades más eficientes que pueden realizar el servicio y, si es posible, buscamos que los conductores no tengan que cambiar de unidad para realizar el servicio.

No obstante, existen situaciones en las que no es posible obtener tres unidades que puedan realizar un servicio sin cambiar de unidad, y cuando esto sucede, lo que hacemos es buscar el número de unidades restantes hasta tener el número de candidatos solicitados (en principio se consideran las tres unidades más eficientes) sin considerar las restricciones asociadas al tipo de vehículo [5] que tiene asociada la dotación (salvo para las unidades UVI, que no se puede cambiar de vehículo porque sí existe un turno exclusivamente de UVI móvil), dado que el conductor tendrá que pasar por la nave para cambiar la unidad, pero el tiempo de llegada al lugar de origen cambiaría, dado que:

$$t_{i,(u_i,origen)} = t_{i,(u_i,nave)} + t_{i,(nave,origen)}$$

Además, la solución obtenida como primer candidato no puede ser elegida en el resto de los candidatos para tener tres candidatos distintos y que el jefe de tráfico pueda tomar una decisión. Por tanto, tenemos dos modelos distintos, aunque el segundo modelo en el que no se considera el tipo de vehículo pueden darse casos en los que no sea necesario ajustarlo. Los dos modelos que se consideran son los siguientes:

### 5.1.1. Modelo de asignación completo

El modelo que se ajusta inicialmente es el siguiente:

$$\min \sum_{i \in I} (t_{i,(u_i,origen)} + t_{i,(origen,destino)}) * x_i$$

Sujeto a:

$$\forall i \ x_i \leq M * Z_{i,(provincia)}$$

- Si tenemos un servicio de ida y no es un servicio interhospitalario:

$$\begin{cases} \sum_{i \in I} (H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)} + t_{i,(origen,destino)}) * x_i \leq H_{entrada} \\ \sum_{i \in I} (H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)} + t_{i,(origen,destino)}) * x_i \geq (H_{entrada} - 1) \end{cases}$$

- En otro caso (servicios de vuelta o servicios de ida interhospitalarios):

$$\begin{cases} \sum_{i \in I} (H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)}) * x_i \geq H_{entrada} \\ \forall i \ (H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)}) * x_i \leq H_{entrada} + 1 - 0.5 * Z_{HE} + 1 * Z_{SUR} + 2 * Z_{ALT} \\ \quad + t_{i,(provincia\ unidad,provincia\ origen)} * Z_{INTER} \end{cases}$$

$$\sum_{i \in I} x_i * Z_{i,(PERMISO/AVERÍA)} \leq 0$$

$$\sum_{i \in I} (H_{i,(inicio\ turno)} - 0.5) * x_i \leq H_{actual}$$

$$\forall i \ (H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)} + t_{i,(origen,destino)} + t_{i,(destino,zona_i)}) * x_i \leq H_{i,(fin\ turno)} + 0.5$$

$$\sum_{i \in I} (N_{i,(sillas)}) * x_i \geq N_{silla}$$

$$\sum_{i \in I} (N_{i,(camillas)}) * x_i \geq N_{camilla}$$

$$\sum_{i \in I} (N_{i,(asientos)}) * x_i \geq N_{asiento}$$

$$\sum_{i \in I} x_i = 1$$

$$\sum_{i \in I} x_i * (1 - Z_{i,(PMR)}) \leq M * (1 - Z_{PMR})$$

$$\sum_{i \in I} x_i * (1 - Z_{i,(BAR)}) \leq M * (1 - Z_{BAR})$$

$$\begin{aligned}
\sum_{i \in I} x_i * (1 - z_{i,(SVB)}) &\leq M * (1 - z_{SVB}) \\
\sum_{i \in I} x_i * (1 - z_{i,(UVI)}) &\leq M * (1 - z_{UVI}) \\
\sum_{i \in I} x_i * z_{i,(BAR)} &\leq M * z_{BAR} \\
\sum_{i \in I} x_i * z_{i,(SVB)} &\leq M * z_{SVB} \\
\sum_{i \in I} x_i * z_{i,(UVI)} &\leq M * z_{UVI} \\
\sum_{i \in I} x_i * (1 - z_{i,(PRIV)}) &\leq M * (1 - z_{PRIV}) \\
x_i &\in \{0,1\}
\end{aligned}$$

### 5.1.2. Modelo de asignación con cambio de unidad

Este modelo solo se ajusta si no se llega al número de candidatos requeridos inicialmente, pero cuando es necesario su ajuste, se usa el siguiente modelo:

$$\min \sum_{i \in I} (t_{i,(u_i,origen)} + t_{i,(origen,destino)}) * x_i$$

Sujeto a:

$$\forall i \ x_i \leq M * z_{i,(provincia)}$$

- Si tenemos un servicio de ida y no es un servicio interhospitalario:

$$\begin{cases}
\sum_{i \in I} (H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)} + t_{i,(origen,destino)}) * x_i \leq H_{entrada} \\
\sum_{i \in I} (H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)} + t_{i,(origen,destino)}) * x_i \geq (H_{entrada} - 1)
\end{cases}$$

- En otro caso (servicios de vuelta o servicios de ida interhospitalarios):

$$\begin{cases}
\sum_{i \in I} (H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)}) * x_i \geq H_{entrada} \\
\forall i \ (H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)}) * x_i \leq H_{entrada} + 1 - 0.5 * z_{HE} + 1 * z_{SUR} + 2 * z_{ALT} \\
\quad + t_{i,(provincia\ unidad,provincia\ origen)} * z_{INTER} \\
\sum_{i \in I} x_i * z_{i,(PERMISO/AVERÍA)} \leq 0
\end{cases}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{i \in I} (H_{i,(inicio\ turno)} - 0.5) * x_i \leq H_{actual} \\
& \forall i (H_{actual} + t_{i,(u_i,origen)} + t_{i,(origen,destino)} + t_{i,(destino,zona_i)}) * x_i \\
& \leq H_{i,(fin\ turno)} + 0.5 \\
& \sum_{i \in I} x_i = 1 \\
& \sum_{i \in I} x_i * (1 - z_{i,(UVI)}) \leq M * (1 - z_{UVI}) \\
& \sum_{i \in I} x_i * z_{i,(UVI)} \leq M * z_{UVI} \\
& x_i \in \{0,1\}
\end{aligned}$$

## 5.2. Ajuste del modelo

Ahora, procedemos a ajustar el modelo para obtener las unidades candidatas más eficientes para realizar un conjunto de servicios entrantes. Para ello, como ya comentamos en el capítulo anterior, debemos disponer de los datos del servicio nuevo entrante, de los servicios que se están realizando en este preciso instante, y de las dotaciones del día de hoy que son las unidades candidatas a realizar el servicio.

Para poder obtener los datos requeridos para el ajuste del modelo, lo que hacemos es obtener datos tanto del servicio entrante, como de los servicios asignados actualmente y de las dotaciones actuales, mediante simulación. Hacemos esto con el fin de tener un mayor número de casos de prueba del modelo, y así disponemos de la posibilidad de manejar datos de servicios con un mayor número de limitaciones y poder comprobar en nuestro modelo cómo funcionan los casos extremos. Aunque, por otro lado, la proximidad a la realidad de los datos simulados es muy elevada debido a que las probabilidades de aparición de los tipos de datos han sido recogidas a partir de datos de dos días distintos en la provincia de Ávila y Segovia.

A continuación, se va a mostrar el ajuste del modelo en distintos tipos de servicios entrantes que se pueden solicitar en un día cualquiera en las empresas de transporte sanitario no urgente:

## 5.2.1. Servicio de hemodiálisis en camilla

```

I.V Gr Movil Envio Reco      Entr Cli T.V. Ter MP IT O A C M T Pobl.Origem      Origen Obv.Origem Pobl.Destino      Destino
I      2025-05-25 21:44:36 1 TC HE B      EL TIEMBLEO CALLE DE LA ARENA, 4      AVILA HOSPITAL PROVINCIAL DE AVILA
Obv.Destino      Nombre Esp Op I R latitud_origem longitud_origem latitud_destino longitud_destino prov_s
PÉREZ DOMÍNGUEZ, ALVARO      40.65064      -4.550448      40.95931      -4.584046      AVILA
  
```

Este servicio consiste en un servicio de ida de un paciente de hemodiálisis que debe de ir a su tratamiento al hospital. En este caso, si apreciamos que tenemos limitaciones de movilidad, dado que se indica que el servicio se debe realizar en camilla, por lo que de primeras el servicio no se podría realizar en una unidad PMR que no disponen de camillas. A continuación, ajustamos del modelo de asignación y obtenemos la siguiente solución:

```

Unidades_elegidas
Dotación E. Conductor Provincia      IniTurno      FinTurno Tur T.V. C.V. Momento_realizacion Tiempo_total Tiempo_Demora Cambio_vehiculo
71 U05071 En escucha AVILA 2025-05-25 13:52:25 2025-05-25 21:52:25 TAR TC C      Ahora      46      23      NO
46 U05046 En escucha AVILA 2025-05-25 14:54:09 2025-05-25 22:54:09 TAR TC      Ahora      48      25      NO
30 U05030 En escucha AVILA 2025-05-25 13:31:55 2025-05-25 21:31:55 TAR AC      Ahora      63      40      NO
  
```

Observamos que para el conjunto de unidades seleccionadas no sería necesario cambiar de vehículo, por lo que no se ajustaría el modelo de asignación con cambio de unidad. Por otro lado, vemos que todos los conductores se encuentran en escucha esperando a que el jefe de tráfico les asigne servicios a realizar. Podemos apreciar que, como disponemos de tiempos aproximados, el jefe de tráfico asignaría el servicio entrante a cualquiera de las dos primeras unidades seleccionadas, dado que la diferencia de tiempo en realización del servicio es muy poco significativa.

## 5.2.2. Servicio interhospitalario

```

I.V Gr Movil Envio Reco      Entr Cli T.V. Ter MP IT O A C M T Pobl.Origem      Origen Obv.Origem Pobl.Destino      Destino
V      2025-05-25 20:13:45 1 TC INT SA      AVILA HOSPITAL PROVINCIAL DE AVILA      AVILA
HOSPITAL NUESTRA SEÑORA DE SONSOLES      PÉREZ DOMÍNGUEZ, ALVARO      40.58521      -4.438924      40.97742      -5.309966      AVILA
  
```

En este caso disponemos de un servicio interhospitalario, que son servicios de traslado de pacientes de un hospital a otro. Por otra parte, vemos que el paciente va en su silla propia, por lo que el servicio no podría ser hecho por unidades A1, dado que no pueden transportar pacientes en silla. Ajustamos el modelo de asignación y obtenemos la siguiente solución:

```

Unidades_elegidas
Dotación E. Conductor Provincia      IniTurno      FinTurno Tur T.V. C.V. Momento_realizacion Tiempo_total Tiempo_Demora Cambio_vehiculo
65 U05065 Comida/café AVILA 2025-05-25 14:22:25 2025-05-25 22:22:25 TAR TC C      Ahora      75      19      NO
43 U05043 Localizado AVILA 2025-05-25 14:56:34 2025-05-25 22:56:34 TAR TC C      Ahora      77      20      NO
51 U05051 Comida/café AVILA 2025-05-25 13:44:34 2025-05-25 21:44:34 TAR TC C      Ahora      92      35      NO
  
```

Vemos que no sería necesario cambiar de vehículo para realizar el servicio, por lo que no sería necesario ajustar el modelo de asignación con cambio de unidad. Después, vemos que las dos primeras unidades tardarían tiempos similares en realizar el servicio, mientras que la tercera unidad candidata ya provocaría un aumento de unos 15 minutos aproximadamente. En este caso, los conductores más eficientes están en estado de parada

o son localizados, por lo que el jefe de tráfico debería valorar si el tipo de parada es de comida o de café, o si la parada es de comida, cuanto tiempo falta hasta que termine de comer y poder asignarle el servicio en caso de que ese tiempo no sea muy significativo.

### 5.2.3. Servicio de salida de urgencias

```

I.V Gr Movil Envio Reco      Entr Cli T.V. Ter MP IT O A C M T Pobl.Origen      Origen Obv.Origen Pobl.Destino      Destino
V      2025-05-25 20:15:26 1 TC SUR      AVILA HOSPITAL PROVINCIAL DE AVILA      EL TIEMBLLO CALLE DE LA ARENA, 4
Obv.Destino      Nombre Esp Op I R latitud_origen longitud_origen latitud_destino longitud_destino prov_s
PEREZ DOMINGUEZ, ALVARO      40.85643      -4.804421      40.57655      -4.775997 AVILA
  
```

Ahora disponemos de un servicio de retorno a su domicilio de un paciente tras salir de urgencias, para el cuál disponemos de dos horas como máximo para recoger al paciente en el hospital. No apreciamos otras restricciones de movilidad ni de otro tipo, por lo que procedemos a ajustar el modelo de asignación y obtenemos los siguiente:

```

Unidades_elegidas
Dotación E.Conductor Provincia      IniTurno      FinTurno Tur T.V. C.V. Momento_realizacion Tiempo_total Tiempo_Demora Cambio_vehiculo
51 U05051 Localizado AVILA 2025-05-25 14:18:11 2025-05-25 22:18:11 TAR TC      Ahora      39      18      NO
17 U05017 En escucha AVILA 2025-05-25 14:41:50 2025-05-25 22:41:50 TAR AC E      Ahora      58      37      NO
57 U05057 En escucha AVILA 2025-05-25 14:07:25 2025-05-25 22:07:25 TAR TC      Ahora      59      38      NO
  
```

Tras el ajuste del modelo, obtenemos como salida tres unidades candidatas que no deberían de cambiar de vehículo como podemos observar en la última columna. Por otra parte, vemos que hay una diferencia significativa entre la mejor candidata y las otras dos candidatas, dado que tardaríamos unos veinte minutos más aproximadamente en realizar el servicio, como en llegar al lugar de origen como podemos ver en la penúltima columna. Como las tres unidades elegidas cumplen todos los requisitos para la realización del servicio, y la mejor opción corresponde a un conductor localizado, entonces el jefe de tráfico intentaría asignar el servicio a cualquiera de las otras dos unidades en escucha, salvo en casos de mucha saturación de servicios y entonces se avisaría al conductor localizado.

### 5.2.4. Servicio de alta de planta

```

I.V Gr Movil Envio Reco      Entr Cli T.V. Ter MP IT O A C M T Pobl.Origen      Origen Obv.Origen Pobl.Destino      Destino
V      2025-05-25 19:57:24 1 TC ALT      AVILA HOSPITAL PROVINCIAL DE AVILA      EL TIEMBLLO CALLE DE LA ARENA, 4
Obv.Destino      Nombre Esp Op I R latitud_origen longitud_origen latitud_destino longitud_destino prov_s
PEREZ DOMINGUEZ, ALVARO      40.41028      -4.612943      40.25869      -4.357295 AVILA
  
```

Disponemos de un servicio de vuelta de un alta de planta de un paciente y que se debe realizar con acompañante, por lo que esto puede provocar que haya unidades que no puedan realizar el servicio dependiendo del número de plazas. Por lo tanto, ajustamos el modelo y obtenemos la siguiente salida:

```

Unidades_elegidas
Dotación E.Conductor Provincia      IniTurno      FinTurno Tur T.V. C.V. Momento_realizacion Tiempo_total Tiempo_Demora Cambio_vehiculo
63 U05063 Viaje sin paciente AVILA 2025-05-25 13:38:47 2025-05-25 21:38:47 TAR TC E      Ahora      26      8      NO
26 U05026 En escucha AVILA 2025-05-25 13:54:15 2025-05-25 21:54:15 TAR TC E      Ahora      35      17      NO
35 U05035 Localizado AVILA 2025-05-25 14:09:17 2025-05-25 22:09:17 TAR TC E      Ahora      40      22      NO
  
```

Podemos apreciar que no sería necesario que los conductores cambien de unidad para realizar el servicio, dado que las tres unidades seleccionadas son de tipo PMR (esto lo podemos observar en la salida del algoritmo porque las unidades elegidas tienen T.V. = TC y C.V. = E), y son unidades que no pueden hacer servicios en camilla, pero suelen tener en torno a siete u ocho plazas de asiento. Vemos que la mejor unidad tardaría unos ocho minutos en llegar a buscar al paciente en el hospital, y tardaría unos 26 minutos en completar el servicio. El mejor candidato se encuentra en estado de parada de viaje sin paciente, por lo que el jefe de tráfico podría asignarle el servicio a la unidad más eficiente sin mayor problema, dado que este estado se suele usar en situaciones en las que el conductor ha terminado de realizar un servicio en alguna zona alejada de la capital, y entonces ahora se encuentra retornando a capital.

## 5.2.5. Servicio de vuelta de fuera de provincia

```

I.V Gr Movil Envio Reco      Entr Cli T.V. Ter MP IT O A C M T Pobl.Origen      Origen Obv.Origen Pobl.Destino      Destino
V      2025-05-25 20:19:05 1 TC HE      SALAMANCA HOSPITAL DE SALAMANCA      EL TIEMBLE CALLE DE LA ARENA, 4
Obv.Destino      Nombre Esp Op I R latitud_origen longitud_origen latitud_destino longitud_destino prov_s
PEREZ DOMINGUEZ, ALVARO      40.88356      -4.37562      40.42288      -4.982538 AVILA

```

En este caso, disponemos de un servicio de vuelta de un paciente que corresponde a la provincia de Ávila, y aunque el lugar de origen sea otra provincia y lo óptimo sería que lo realizara una unidad de Salamanca, este servicio debe ser realizado por la provincia de Ávila, e incluso si fuera realizado por la provincia de Salamanca sería tratado como una incidencia, debido a que usaríamos recursos de otra provincia. Se trata de un servicio de hemodiálisis en el que no observamos más limitaciones por parte del servicio, pero como se trata de un servicio fuera de provincia, no solo disponemos de media hora para recoger un servicio de hemodiálisis, si no que disponemos de media hora junto con el tiempo de trayecto entre provincias. Por lo tanto, ajustamos el modelo de asignación y obtenemos la siguiente salida:

```

Unidades_elegidas
Dotación E.Conductor Provincia      IniTurno      FinTurno Tur T.V. C.V. Momento_realizacion Tiempo_total Tiempo_Demora Cambio_vehiculo
15 U05015 En escucha AVILA 2025-05-25 13:41:16 2025-05-25 21:41:16 TAR TC C Ahora 54 6 NO
55 U05055 En escucha AVILA 2025-05-25 14:27:42 2025-05-25 22:27:42 TAR TC C Ahora 63 15 NO
9 U05009 En escucha AVILA 2025-05-25 14:39:22 2025-05-25 22:39:22 TAR TC C Ahora 75 27 NO

```

Vemos que nuevamente no sería necesario cambiar de unidad y no se utilizaría el modelo de asignación con cambio de ambulancia. Por otro lado, observamos que las tres unidades son de tipo A2 (dado que tienen T.V. = TC y C.V. = C) y que, para realizar el servicio, vemos que la mejor unidad tardaría en torno a una hora, y como las mejores unidades se encuentran en escucha, el jefe de tráfico asignaría el servicio a la unidad óptima.

## 5.2.6. Servicio en ambulancia PMR

```

I.V Gr Movil Envio Reco      Entr Cli T.V. Ter MP IT O A C M T Pobl.Origem      Origen Obv.Origem Pobl.Destino      Destino
I      2025-05-25 21:49:04 1 PMR RE      EL TIEMBLE CALLE DE LA ARENA, 4      AVILA HOSPITAL PROVINCIAL DE AVILA
Obv.Destino      Nombre Esp op I R latitud_Origen longitud_Origen latitud_destino longitud_destino prov_s
PÉREZ DOMINGUEZ, ALVARO      40.26236      -5.026095      40.40875      -5.061734 AVILA
  
```

Disponemos de un servicio de ida, en el que la principal limitación que observamos es que el servicio se debe realizar en ambulancia PMR. Esto nos reduce significativamente el número de unidades candidatas, dado que a lo largo del día la mayoría de las unidades son de tipo A2, debido a que pueden llevar tanto sillas como camillas. Procedemos al ajuste del modelo y obtenemos la siguiente salida:

```

Unidades_elegidas
Dotación E.Conductor Provincia      IniTurno      FinTurno Tur T.V. C.V. Momento_realizacion Tiempo_total Tiempo_Demora Cambio_vehiculo
65 U05065 En escucha AVILA 2025-05-25 14:30:51 2025-05-25 22:30:51 TAR TC E Ahora 40 29 NO
22 U05022 En escucha AVILA 2025-05-25 14:10:32 2025-05-25 22:10:32 TAR TC C Ahora 44 33 SI
60 U05060 Viaje sin paciente AVILA 2025-05-25 14:25:07 2025-05-25 22:25:07 TAR TC C Ahora 46 35 SI
  
```

Como era de esperar, observamos que solamente una unidad podría realizar el servicio sin cambiar de ambulancia, dado que las unidades PMR no son tan frecuentes como indicamos anteriormente. Aunque vemos que no hay diferencias significativas para realizar el servicio entre las tres unidades candidatas, se priorizaría que no sea necesario cambiar de vehículo y el jefe de tráfico asignaría el servicio a la unidad más eficiente, que completaría el servicio en unos 40 minutos.

## 5.2.7. Servicio privado

```

I.V Gr Movil Envio Reco      Entr Cli T.V. Ter MP IT O A C M T Pobl.Origem      Origen Obv.Origem Pobl.Destino      Destino
V      2025-05-25 20:23:02 88 TC RE      AVILA HOSPITAL PROVINCIAL DE AVILA      EL TIEMBLE CALLE DE LA ARENA, 4
Obv.Destino      Nombre Esp op I R latitud_Origen longitud_Origen latitud_destino longitud_destino prov_s
PÉREZ DOMINGUEZ, ALVARO      40.58637      -5.289109      40.25066      -4.81376 AVILA
  
```

Observamos que disponemos de un servicio de vuelta que solicita una compañía aseguradora privada. Esto nos limita las ambulancias candidatas a realizar el servicio, dado que no suele haber turnos enteros de una ambulancia de privado (sin el rotulado de la Seguridad Social) [2], y cuando entra un servicio de privado el conductor tiene que cambiar de unidad para realizar el servicio. Por lo tanto, ajustamos el modelo y obtenemos lo siguiente:

```

Unidades_elegidas
Dotación E.Conductor Provincia      IniTurno      FinTurno Tur T.V. C.V. Momento_realizacion Tiempo_total Tiempo_Demora Cambio_vehiculo
62 U05062 Repostaje AVILA 2025-05-25 14:07:52 2025-05-25 22:07:52 TAR TC C Ahora 74 38 SI
8 U05008 En escucha AVILA 2025-05-25 14:04:13 2025-05-25 22:04:13 TAR TC C Ahora 76 39 SI
39 U05039 En escucha AVILA 2025-05-25 14:33:03 2025-05-25 22:33:03 TAR TC C Ahora 81 44 SI
  
```

Tras el ajuste del modelo, vemos que todos los conductores deben de cambiar de ambulancia para realizar el servicio como indicamos anteriormente. Por otra parte, vemos que entre los tres conductores elegidos para realizar el servicio no hay diferencias significativas de tiempos para realizar el servicio, por lo que el jefe de tráfico podría

asignar el servicio a cualquiera de las tres unidades seleccionadas, aunque la mejor unidad está repostando y puede ser que tarde un tiempo mayor en realizar el servicio.

## 5.2.8. Servicio en unidad bariátrica

```

I.V Gr Movil Envio Reco      Entr Cli T.V. Ter MP IT O A C M T Pobl.Origen      Origen Obv.Origen Pobl.Destino      Destino
I      2025-05-25 22:03:59  1 BAR HD B *      EL TIEMBLE CALLE DE LA ARENA, 4      AVILA HOSPITAL PROVINCIAL DE AVILA
Obv.Destino      Nombre Esp Op I R latitud_origen longitud_origen latitud_destino longitud_destino prov_s
PÉREZ DOMINGUEZ, ALVARO      40.72305      -5.290419      40.86283      -5.343335 AVILA
    
```

En este caso, disponemos de un servicio de un paciente que tiene problemas de obesidad, y en estos casos el servicio se solicita en bariátrica [5], que son unidades A2 reforzadas de manera que suelen llevar pacientes con un peso mayor a 150 kg. Tampoco disponemos de turnos de bariátrica, dado que no son servicios habituales, por lo que cuando entra un servicio de estas características, los conductores cambian de vehículo para realizar el servicio. Ajustamos el modelo y obtenemos los siguientes resultados:

```

Unidades_elegidas
Dotación E.Conductor Provincia      IniTurno      FinTurno Tur T.V. C.V. Momento_realizacion Tiempo_total Tiempo_Demora Cambio_vehiculo
45 U05045 Comida/café AVILA 2025-05-25 14:36:01 2025-05-25 22:36:01 TAR TC E      Ahora      50      39      SI
13 U05013 Espera Paciente AVILA 2025-05-25 14:19:50 2025-05-25 22:19:50 TAR TC      Ahora      51      40      SI
15 U05015 En escucha AVILA 2025-05-25 14:12:16 2025-05-25 22:12:16 TAR TC      Ahora      61      50      SI
    
```

Vemos que efectivamente todos los conductores deberían de cambiar de vehículo para realizar el servicio, y que la unidad más eficiente tardaría unos 50 minutos en completar el servicio. Los dos primeros conductores no se encuentran en estado de escucha, por lo que dependiendo de la duración de los conductores en estos estados el jefe de tráfico asignaría el servicio entrante a la unidad en escucha, dado que solo habría una diferencia en torno a diez minutos.

## 5.2.9. Servicio en unidad de soporte vital básico

```

I.V Gr Movil Envio Reco      Entr Cli T.V. Ter MP IT O A C M T Pobl.Origen      Origen Obv.Origen Pobl.Destino      Destino
V      2025-05-25 21:00:54  65 SVB RE *      AVILA HOSPITAL PROVINCIAL DE AVILA      EL TIEMBLE CALLE DE LA ARENA, 4
Obv.Destino      Nombre Esp Op I R latitud_origen longitud_origen latitud_destino longitud_destino prov_s
PÉREZ DOMINGUEZ, ALVARO      40.82457      -5.314671      40.80071      -5.012138 AVILA
    
```

Ahora supongamos que entra un servicio para realizar en una unidad de soporte vital básico. Estos tipos de servicios normalmente son solicitados por compañías privadas, por lo que no hay turnos de este tipo de vehículo, así que para realizar el servicio los conductores deberán cambiar de vehículo para realizar el servicio. A continuación, ajustando el modelo obtenemos la siguiente salida:

```

Unidades_elegidas
Dotación E.Conductor Provincia      IniTurno      FinTurno Tur T.V. C.V. Momento_realizacion Tiempo_total Tiempo_Demora Cambio_vehiculo
43 U05043 En escucha AVILA 2025-05-25 14:46:28 2025-05-25 22:46:28 TAR TC C      Ahora      52      35      SI
56 U05056 DESCONECTADO AVILA 2025-05-25 21:15:44 2025-05-26 05:15:44 NOC TC      Ahora      61      44      SI
16 U05016 En escucha AVILA 2025-05-25 13:52:33 2025-05-25 21:52:33 TAR TC E      Ahora      71      54      SI
    
```

Comprobamos que se ajusta el modelo de asignación con cambio de unidad. Por otro lado, podemos destacar que, si asignamos el servicio entrante a la unidad U05056,

tendríamos que avisar al conductor para que comience antes su turno, porque aún no ha comenzado su jornada laboral, aunque como disponemos de unidades en escucha entre el conjunto de unidades más eficientes para realizar el servicio, el jefe de tráfico intentaría no tener que llamar al conductor del turno de noche para hacer el servicio. Además, vemos que la mejor unidad tardaría unos 52 minutos en realizar el servicio y se encuentra en estado de escucha, por lo que el jefe de tráfico se lo asignaría a este conductor.

## 5.2.10. Servicio en UVI móvil

```

I.V Gr Movil Envio Reco      Entr Cli T.V. Ter MP IT O A C M T Pobl.Origen      Origen Obv.Origen Pobl.Destino
I                               2025-05-06 15:58:06 2 UVI URG      EL TIEMBLO CALLE DE LA ARENA, 4      AVILA
                               Destino Obv.Destino      Nombre Esp Op I R latitud_origen longitud_origen latitud_destino longitud_destino prov_s
HOSPITAL PROVINCIAL DE AVILA      PÉREZ DOMÍNGUEZ, ALVARO      40.80209      -4.987983      40.30514      -5.405466 AVILA
  
```

Ahora disponemos de un servicio de urgencias de un paciente. Estos servicios se piden en ambulancia de UVI móvil, y aunque estos servicios se suele encargar el propio hospital de su realización, cuando el hospital ve que disponemos de turno de UVI móvil, entonces puede solicitarnos la realización de este servicio. En el caso de Ávila y Segovia, disponemos de un turno de UVI móvil tanto en Segovia como en Ávila por las mañanas, y en este caso, no es como en servicios de bariátrica o de soporte vital básico, dado que los conductores no pueden cambiar de unidad para realizar el servicio. Por lo tanto, ajustando el modelo obtenemos:

```

SUnidades_elegidas
Dotación E.Conductor Provincia      IniTurno      FinTurno Tur T.V. C.V. Momento_realizacion Tiempo_total Tiempo_Demora Cambio_vehículo
2 U05002 En escucha AVILA 2025-05-06 05:34:50 2025-05-06 17:34:50 MAÑ UVI      Ahora      75      19      NO
  
```

Podemos destacar que, como ya hemos comentado previamente que solo hay un turno de UVI móvil en Ávila, entonces solo disponemos de una única unidad que puede realizar el servicio lógicamente. Observamos que el servicio se realizaría en unos 75 minutos, aunque se podría recoger al paciente en su domicilio en unos 20 minutos. Por último, como el conductor se encuentra en escucha, vemos que podríamos hacer el servicio ahora mismo.

# Conclusiones

Como hemos ido indicando a lo largo del trabajo, nuestro principal objetivo es facilitar el trabajo de los jefes de tráfico para reducir su carga de trabajo y simplificar procesos complejos de asignación de servicios, y mediante el algoritmo que ajusta del modelo de asignación de servicios entrantes propuesto vemos que es posible proponerles una asignación de posibles candidatos a realizar el servicio. El algoritmo hace que los jefes de tráfico puedan tomar una decisión de asignación de los servicios entrantes de manera mucho más rápida, dado que ahorramos mucho tiempo en la labor de comprobar las restricciones que debe cumplir la unidad que sea la encargada de realizar el servicio finalmente, pero también ayuda a que la decisión que tome el jefe de tráfico sea mucho más eficiente, dado que se buscan las mejores unidades que pueden realizar el servicio en el menor tiempo posible.

Por otra parte, también se ha detectado que nuestro mayor problema es el cálculo de los diferentes tiempos de realización del servicio como hemos visto en el capítulo tres, dado que la mayoría de nuestras restricciones son temporales fijadas por los pliegos de prescripciones técnicas que firman las empresas de transporte sanitario no urgente con la Seguridad Social. La solución que se propone considera tiempos aproximados usando distancias entre dos puntos de coordenadas en línea recta, por ello es necesario facilitar un conjunto de unidades eficientes para realizar el servicio (conjunto de conductores con su ambulancia asignada que hagan los servicios en el mínimo tiempo posible). De esta manera, las probabilidades de que la mejor unidad con tiempos reales se encuentre entre el conjunto de unidades más eficientes para realizar el servicio entrante con tiempos aproximados son mucho mayores con respecto a la situación en la que solo seleccionáramos una única unidad con tiempos aproximados, dado que cuanto mayor es el conjunto de candidatos elegidos con tiempos aproximados, mayor es la probabilidad

de que se encuentre la unidad más eficiente en tiempo real. No obstante, este conjunto de unidades eficientes tiene que ser reducido para que podamos facilitar el trabajo del jefe de tráfico, por lo que buscaremos las tres unidades más eficientes para la realización del servicio entrante.

Además, se ha apreciado en los diferentes casos de servicios que hemos utilizado para ajustar nuestro modelo que, siempre que es posible, las mejores unidades son unidades cuyo conductor se encuentra en estado de escucha. Esto era previsible porque, cuando buscamos la asignación de un servicio entrante, como buscamos minimizar el tiempo de realización del servicio, este tiempo suele ser mucho menor en unidades que no tienen servicios asignados con respecto a las unidades que colectivizan servicios, dado que las colectivizaciones suelen provocar aumentos en los tiempos de realización del servicio.

Por lo tanto, concluimos que con tiempos aproximados mediante el cálculo de distancias en línea recta entre dos puntos de coordenadas puede ser una buena solución ajustando la velocidad media, pero a futuro la situación ideal sería disponer de estos tiempos reales mediante consultas a una API de planificación de rutas y consulta de tiempos entre dos ubicaciones.

# Apéndice A

## Código R

En esta sección se incluye el código R utilizado para el desarrollo del proyecto.

```
library(lubridate)
library(lpSolve)

#####VALORES POSIBLES VARIABLES DE INTERES DE SERVICIOS#####

IV=c("I", "V")
Cli=c(1,2,10225,3)
T.V.=c("AC", "ADD", "AMD", "BAR", "ENF", "HC", "PMA", "PMR", "SVB", "TC", "UAL",
"UMR", "UVI", "VIR", "VSL")
Ter=c("ALT", "ANT", "APY", "ASD", "ASM", "CST", "CU", "DPZ", "HD", "HE", "ING", "
INT", "LOG", "ORG", "OTR", "PMC", "PRU", "PSQ", "QUI", "RAA", "RE", "REM", "SUR",
"TP", "URG")
MP=c(" ", "B", "SA", "SV", "SE")
IT=c(" ", "AIS", "E", "I", "MC", "OB", "PM", "V", "AP", "KS", "SP", "AS
", "CP", "CV", "CU", "PT", "SR", "TA")
O=c("0", " ")
A=c("*", " ")
C=c("#", " ")
M=c("M", " ")
E=c("T", " ")

#####SIMULACION DEL SERVICIO NUEVO#####

# Funcion para pasar de fecha y hh:mm:ss a horas numericas
horas_desde_origen <- function(hora, dia=Sys.Date()) {
  hora=as.character(hora)
  origen=paste(dia,"00:00")
  return(as.numeric(difftime(hora, origen, units = "hours")))
}

# Funcion para pasar horas a fecha y hh:mm:ss
convertir_horas_a_fecha <- function(horas, dia=Sys.Date()) {
  origen = ymd_hm(paste(dia,"00:00"))
  return(origen + dhours(horas))
}
```

```

}

# Función para calcular la distancia entre dos puntos en Latitud y Longitud (en kilómetros)
distancia_haversine <- function(punto1,punto2) {
  lat1=punto1$lat
  lon1=punto1$lon
  lat2=punto2$lat
  lon2=punto2$lon
  # Convertir grados a radianes
  lat1 <- deg2rad(lat1)
  lon1 <- deg2rad(lon1)
  lat2 <- deg2rad(lat2)
  lon2 <- deg2rad(lon2)

  # Radio de La Tierra en kilómetros
  radio_tierra <- 6371

  # Diferencias entre Las coordenadas
  dlat <- lat2 - lat1
  dlon <- lon2 - lon1

  # Aplicar La fórmula de Haversine
  a <- sin(dlat / 2)^2 + cos(lat1) * cos(lat2) * sin(dlon / 2)^2
  c <- 2 * atan2(sqrt(a), sqrt(1 - a))

  # Calcular La distancia
  distancia <- radio_tierra * c

  return(distancia)
}

# Función para convertir grados a radianes
deg2rad <- function(deg) {
  return(deg * pi / 180)
}

calcular_dist_ruta <- function(origen_inicio,origenes_intermedios, destinos_intermedios, destino_final){
  dist=0
  dmin=Inf
  jmin=NULL
  p0=origen_inicio

  marca_ida=rep(0,nrow(origenes_intermedios))
  dist_ui_origen=rep(0,nrow(origenes_intermedios))

  for(i in 1:nrow(origenes_intermedios)){
    dmin=Inf
    jmin=NULL
    for (j in 1:nrow(origenes_intermedios)){
      if(marca_ida[j]==0){
        dist1=distancia_haversine(p0,origenes_intermedios[j,])
        if (dist1<dmin){

```

```

        dmin=dist1
        jmin=j
    }
}
}
dist=dist+dmin
p0=origenes_intermedios[jmin,]
marca_ida[jmin]=1
dist_ui_origen[jmin]=dist
}

marca_vuelta=rep(0,nrow(destinos_intermedios))
dist_origen_destino=rep(0,nrow(destinos_intermedios))

for(i in 1:nrow(destinos_intermedios)){
  dmin=Inf
  jmin=NULL
  for (j in 1:nrow(destinos_intermedios)){
    if(marca_vuelta[j]==0){
      dist1=distancia_haversine(p0,destinos_intermedios[j,])
      if (dist1<dmin){
        dmin=dist1
        jmin=j
      }
    }
  }
  dist=dist+dmin
  p0=destinos_intermedios[jmin,]
  marca_vuelta[jmin]=1
  dist_origen_destino[jmin]=dist-dist_ui_origen[jmin]
}

dist_destino_zonai=distancia_haversine(p0,destino_final)

return(list("distancia_total_servicios"=dist,
           "dist_ui_origen"=dist_ui_origen,
           "dist_origen_destino"=dist_origen_destino,
           "final_servicio"=p0,
           "dist_destino_zonai"=dist_destino_zonai))
}

crear_servicio=function(ns,tipo=NULL){
  servicio_nuevo=data.frame("I/V"=ifelse(is.null(tipo),sample(IV,ns
,replace=T,prob=c(111+117,111+115)/(222+232)),rep(tipo,ns)), "Gr"="", "
Movil"="", "Envio"="", "Reco"="", "Entr"=0, "Cli"=sample(Cli,ns,replace=T,
prob=c(216+231,0,6+1,0)/(222+232)), "T.V."="", "Ter"=sample(Ter,ns,repla
ce=T,prob=c(1+0,0+0,6+1,0+0,0+0,76+50,0+0,0+0,2+18,68+69,1+0,2+9,0+10,
0+0,0+0,0+0,0+0,0+8,2+4,12+24,52+39,0+0,0+0,0+0,0+0)/(222+232)), "MP"=s
ample(MP,ns,replace=T,prob=c(165+190,15+4,42+38,0+0,0+0)/(222+232)), "I
T"=sample(IT,ns,replace=T,prob=c(216+230,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
,6+2,0)/(222+232)), "0"=sample(0,ns,replace=T,prob=c
(9+0,213+232)/(222+232)), "A"=sample(A,ns,replace=T
,prob=c(62+48,160+184)/(222+232)), "C"=sample(C,ns

```

```

,replace=T,prob=c(0+3,222+229)/(222+232)), "M"="", "T"="", "Pobl.Origen"=
"", "Origen"="", "Obv.Origen"="", "Pobl.Destino"="", "Destino"="", "Obv.Des
tino"="", "Nombre"="PÉREZ DOMÍNGUEZ, ÁLVARO", "Esp"="", "Op"="",
"I"="", "R"="")

servicio_nuevo$Entr=convertir_horas_a_fecha(ifelse(rep(is.null(tipo),n
s),ifelse(servicio_nuevo$I.V=="I",runif(ns,horas_desde_origen(Sys.time
())+1,horas_desde_origen(Sys.time()+2),horas_desde_origen(Sys.time()
)),ifelse(servicio_nuevo$I.V=="I",runif(ns,horas_desde_origen(Sys.time
())+1,horas_desde_origen(Sys.time()+3),runif(ns,horas_desde_origen(Sys
.time()-0.5,horas_desde_origen(Sys.time()-0.25))))))

servicio_nuevo$T.V.=ifelse(servicio_nuevo$Cli==2, "UVI", sample(T.V.,ns,
replace=T,prob=c(86+19,0+0,0+0,0+0,0+0,0+0,0+0,0+0,0+0,0+0,136+213,0+0,0+0
,0+0,0+0,0+0)/(222+232)))

servicio_nuevo$M=ifelse(servicio_nuevo$Ter=="ASM", "M", " ")

servicio_nuevo$T=ifelse(servicio_nuevo$Ter=="ASD", "T", sample(E,ns, repl
ace=T,prob = c(0+4,222+228)/(222+232)))
servicio_nuevo$Pobl.Origen=ifelse(servicio_nuevo$I.V=="I", "EL TIEMBLO"
, "AVILA")
servicio_nuevo$Origen=ifelse(servicio_nuevo$I.V=="I", "CALLE DE LA AREN
A, 4", "HOSPITAL PROVINCIAL DE ÁVILA")
servicio_nuevo$Pobl.Destino=ifelse(servicio_nuevo$I.V=="I", "AVILA", "EL
TIEMBLO")
servicio_nuevo$Destino=ifelse(servicio_nuevo$I.V=="I", "HOSPITAL PROVIN
CIAL DE ÁVILA", "CALLE DE LA ARENA, 4")

servicio_nuevo$latitud_origen=runif(ns,40.2,41)
servicio_nuevo$longitud_origen=runif(ns,-5.5,-4.3)
servicio_nuevo$latitud_destino=runif(ns,40.2,41)
servicio_nuevo$longitud_destino=runif(ns,-5.5,-4.3)
servicio_nuevo$prov_s="AVILA"

return(servicio_nuevo)

}

servicio_nuevo=crear_servicio(1)
servicio_nuevo

#####SIMULACIÓN DE LOS VEHICULOS#####

#Número de unidades en un días, junto con UVI que añadimos después y M
T en Segovia
v=34+41

#Provincias del servicio
prov_i=c("SEGOVIA", "AVILA", sample(c("SEGOVIA", "AVILA"),v,replace=T,pro
b=c(34,41)/(34+41)))
prov_i=c(prov_i, "SEGOVIA")

```

```

#Jornada Laboral y turno
Tur_i=c(rep("MAÑ",2),sample(c("MAÑ","TAR","NOC","24H","PRI","URG","REF",
"PAR"),v,replace=T,prob=c(25+25,7+13,v-25-7-25-13,0,0,0,0,0)/v))
IniTurno_i=convertir_horas_a_fecha(ifelse(Tur_i=="MAÑ",runif(v,5.5,7.5),
ifelse(Tur_i=="TAR",runif(v,13.5,15),runif(v,21,22))))
FinTurno_i=IniTurno_i+dhours(8)
IniTurno_i=c(IniTurno_i,convertir_horas_a_fecha(runif(1,7.5,8.5)))
FinTurno_i[v+3]=IniTurno_i[v+3]+dhours(10)
Tur_i[v+3]="PAR"

#Numero total de vehiculos
vtotal=v+3

#Estado del conductor
E.conductor=c("En escucha","Enviando servicio","Inicio del servicio",
"Llegada al origen","Salida del origen","Llegada destino","Fin de Serv
icio","Viaje sin paciente","Comida/café","Avería","Permiso","Localiza
do","Repostaje","Espera Paciente")

e.cond_i=ifelse(horas_desde_origen(Sys.time())>horas_desde_origen(FinT
urno_i) | horas_desde_origen(Sys.time())<horas_desde_origen( IniTurno_
i),"DESCONECTADO",sample(E.conductor,vtotal,replace=T, prob=c(10,2,6,6
,6,6,2,3,2,1,1,1,1,1)))

#Capacidad y tipo de vehiculo
Capacidad_camillas=c(1,1,sample(c(0,1),v,replace=T,prob=c(7+9,27+32)/v
))
Capacidad_camillas=c(Capacidad_camillas,1)
Capacidad_sillas=c(1,1,sample(c(0,1,2),v,replace=T,prob=c(4+5,23+27,7+
9)/v))
Capacidad_sillas=c(Capacidad_sillas,1)
T.V_i=ifelse(Capacidad_sillas==0,"AC","TC")
T.V_i[1:2]="UVI"
C.V_i=ifelse(Capacidad_camillas==0,"E",ifelse(T.V_i=="AC" | T.V_i=="UV
I", " ",sample(c("C",""))))
Capacidad_asientos=ifelse(T.V_i=="AC"|T.V_i=="UVI",sample(c(3,4)),samp
le(c(7,8)))

#Unidades de 1 dia
Unidades=data.frame("Dotación"=paste("U",ifelse(prov_i=="SEGOVIA","40"
,"05"),"0",formatC(seq(1,vtotal), width = 2, flag = "0"),sep=""),"E.Co
nductor"=e.cond_i,"Provincia"=prov_i,"IniTurno"=IniTurno_i,"FinTurno"=
FinTurno_i,"Tur"=Tur_i,"T.V."=T.V_i,"C.V."=C.V_i,"Camillas"=Capacidad_
camillas,"Sillas"=Capacidad_sillas,
"Asientos"=Capacidad_asientos,"Latitud"=runif(vtotal,40.2,41),
"Longitud"=runif(vtotal,-5.5,-4.3),"Latitud_nave"=ifelse (prov_i== "AV
ILA",runif(1,40.2,41),runif(1,40.56,41.65)),"Longitud_nave"=ifelse(pro
v_i=="AVILA",runif(1,-5.5,-4.3),runif(1,-4.81,-3.13)), "Latitud_zona"=
ifelse(prov_i=="AVILA",sample(runif(6,40.2,41),vtotal,replace=T,prob=c
(5,1,1,1,1,1)),sample(runif(6,40.56,41.65),vtotal,replace=T,prob=c(5,1
,1,1,1,1))),"Longitud_zona"=ifelse(prov_i=="AVILA",sample(runif(6,-5.5
,-4.3),vtotal,replace=T, prob=c(5,1,1,1,1,1) ),sample(runif(6,-4.81,-3
.13),vtotal, replace=T,prob=c(5,1,1,1,1,1)))

```

```

)
Unidades=Unidades[order(Unidades$IniTurno),]
Unidades2=Unidades

#Servicios Asignados
servicios = setNames(vector("list", length(Unidades$Dotación)), Unidades$Dotación)
for(i in Unidades$Dotación){
  estado=subset(Unidades$E.Conductor,Unidades$Dotación==i)
  if(estado %in% c("Enviando servicio", "Inicio del servicio", "Llegada al origen", "Salida del origen", "Llegada destino", "Fin de Servicio")){
    servicios[[i]]=crear_servicio(2, tipo=sample(IV,1))
  }
}

#Distancias estimadas
Distancias2=Distancias=data.frame(
  "dist_ui_origen"=0,
  "dist_ui_navei"=0,
  "dist_navei_origen"=0,
  "dist_origen_destino"=0,
  "dist_destino_zonai"=0,
  "dist_provi_provs"=0
)

#Velocidad media
vmedia=45

#Calculamos las distancias dependiendo del estado del conductor en el momento de la asignación
for(i in 1:vtotal){

  if(Unidades$E.Conductor[i] %in% c("Enviando servicio", "Inicio del servicio", "Llegada al origen", "Salida del origen", "Llegada destino")){

    if(Unidades$E.Conductor[i] %in% c("Enviando servicio", "Inicio del servicio", "Llegada al origen")){

      aux=calcular_dist_ruta(origen_inicio = data.frame("lon"=Unidades$Longitud[i], "lat"=Unidades$Latitud[i]), origenes_intermedios = data.frame("lat"=c(servicio_nuevo$latitud_origen, servicios[[i]]$latitud_origen), "lon"=c(servicio_nuevo$longitud_origen, servicios[[i]]$longitud_origen)), destinos_intermedios = data.frame("lat"=c(servicio_nuevo$latitud_destino, servicios[[i]]$latitud_destino), "lon"=c(servicio_nuevo$longitud_destino, servicios[[i]]$longitud_destino)), destino_final = data.frame("lon"=Unidades$Longitud_zona[i], "lat"=Unidades$Latitud_zona[i]))

      if((
        ifelse(sum(!(aux$dist_origen_destino/vmedia<=1 & aux$dist_origen_destino/vmedia<=3*distancia_haversine(punto1 = data.frame("lat"=c(servicio_nuevo$latitud_origen, servicios[[i]]$latitud_origen), "lon"=c(servicio_nuevo$longitud_origen, servicios[[i]]$longitud_origen)), punto2 = data.frame("lat"=c(servicio_nuevo$latitud_destino, servicios[[i]]$latitud_destino), "lon"=c(servicio_nuevo$longitud_destino, servicios[[i]]$longitud_destino))),

```

```

itud_destino),"lon"=c(servicio_nuevo$longitud_destino,servicios[[i]]$l
ongitud_destino)))/vmedia) | (aux$dist_origen_destino/vmedia>1 & aux$d
ist_origen_destino<=2*distancia_haversine(punto1 = data.frame("lat"=c(
servicio_nuevo$latitud_origen,servicios[[i]]$latitud_origen),"lon"=c(s
ervicio_nuevo$longitud_origen,servicios[[i]]$longitud_origen)),punto2
= data.frame("lat"=c(servicio_nuevo$latitud_destino,servicios[[i]]$lat
itud_destino),"lon"=c(servicio_nuevo$longitud_destino,servicios[[i]]$l
ongitud_destino))))==0,TRUE,FALSE)&
  (as.numeric(servicio_nuevo$MP=="SE" | servicio_nuevo$MP=="SV" |
servicio_nuevo$MP=="SA")+sum(as.numeric(servicios[[i]]$MP=="SE" | serv
icios[[i]]$MP=="SV" |servicios[[i]]$MP=="SA"))<=Unidades$Sillas[i]) &
  (as.numeric(servicio_nuevo$MP=="B")+sum(as.numeric(servicios[[i]]
$MP=="B"))<=Unidades$Camillas[i]) &
  (((as.numeric(servicio_nuevo$MP==" ") +as.numeric(servicio_nuevo
o$A=="*") +as.numeric(servicio_nuevo$M=="M") +as.numeric(servicio_nuevo$
T=="T")) +sum((as.numeric(servicios[[i]]$MP==" ") +as.numeric(servicios[
[i]]$A=="*") +as.numeric(servicios[[i]]$M=="M") +as.numeric(servicios[[i
]]$T=="T"))))<=(Unidades$Asientos[i]-Unidades$Sillas[i]-Unidades$Camil
las[i])) &
  (servicio_nuevo$I.V == servicios[[i]]$I.V[1]) &
  !(servicio_nuevo$IT %in% c("AIS", "E", "I", "MC", "OB", "V", "
AP", "KS", "SP", "CV" )) &
  servicio_nuevo$M==" " &
  servicio_nuevo$T==" "
  )==TRUE){

  calc=calcular_dist_ruta(origen_inicio = data.frame("lon"=Unida
des$Longitud[i],"lat"=Unidades$Latitud[i]),origenes_intermedios = data
.frame("lat"=c(servicio_nuevo$latitud_origen,servicios[[i]]$latitud_or
igen),"lon"=c(servicio_nuevo$longitud_origen,servicios[[i]]$longitud_o
rigen)),destinos_intermedios = data.frame("lat"=c(servicio_nuevo$latit
ud_destino,servicios[[i]]$latitud_destino),"lon"=c(servicio_nuevo$long
itud_destino,servicios[[i]]$longitud_destino)),destino_final = data.fr
ame("lon"=Unidades$Longitud_zona[i],"lat"=Unidades$Latitud_zona[i]))
  dist_ui_navei=distancia_haversine(punto1=data.frame("lat"=Unid
ades$Latitud[i],"lon"=Unidades$Longitud[i]),punto2=data.frame("lat"=Un
idades$Latitud_nave[i],"lon"=Unidades$Longitud_nave[i]))
  Unidades$Momento_realizacion[i]="Ahora en colectivo"

}
else{
  c=calcular_dist_ruta(origen_inicio = data.frame("lon"=Unidades
$Longitud[i],"lat"=Unidades$Latitud[i]),origenes_intermedios = data.fr
ame("lat"=servicios[[i]]$latitud_origen,"lon"=servicios[[i]]$longitud_
origen),destinos_intermedios = data.frame("lat"=servicios[[i]]$latitud
_destino,"lon"=servicios[[i]]$longitud_destino),destino_final = data.f
rame("lon"=Unidades$Longitud_zona[i],"lat"=Unidades$Latitud_zona[i]))
  calc=calcular_dist_ruta(origen_inicio = c$final_servicio ,orig
enes_intermedios = data.frame("lon"=servicio_nuevo$longitud_origen,"la
t"=servicio_nuevo$latitud_origen),destinos_intermedios = data.frame("l
at"=servicio_nuevo$latitud_destino,"lon"=servicio_nuevo$longitud_desti
no),destino_final = data.frame("lon"=Unidades$Longitud_zona[i],"lat"=U
nidades$Latitud_zona[i]))
  calc$dist_ui_origen=c$distancia_total+calc$dist_ui_origen

```

```

        dist_ui_navei=c$distancia_total+distancia_haversine(punto1=c$final_servicio,punto2=data.frame("lat"=Unidades$Latitud_nave[i],"lon"=Unidades$Longitud_nave[i]))
        Unidades$Momento_realizacion[i]="Cuando termine los servicios"
    }

    c2=calcular_dist_ruta(origen_inicio = data.frame("lon"=Unidades2$Longitud[i],"lat"=Unidades2$Latitud[i]),origenes_intermedios = data.frame("lat"=servicios[[i]]$latitud_origen,"lon"=servicios[[i]]$longitud_origen),destinos_intermedios = data.frame("lat"=servicios[[i]]$latitud_destino,"lon"=servicios[[i]]$longitud_destino),destino_final = data.frame("lon"=Unidades2$Longitud_zona[i],"lat"=Unidades2$Latitud_zona[i]))

    calc2=calcular_dist_ruta(origen_inicio = c2$final_servicio ,origenes_intermedios = data.frame("lon"=servicio_nuevo$longitud_origen,"lat"=servicio_nuevo$latitud_origen),destinos_intermedios = data.frame("lat"=servicio_nuevo$latitud_destino,"lon"=servicio_nuevo$longitud_destino),destino_final = data.frame("lon"=Unidades2$Longitud_zona[i],"lat"=Unidades2$Latitud_zona[i]))
    calc2$dist_ui_origen=c2$distancia_total+calc2$dist_ui_origen
    dist_ui_navei2=c2$distancia_total+distancia_haversine(punto1=c2$final_servicio,punto2=data.frame("lat"=Unidades2$Latitud_nave[i],"lon"=Unidades2$Longitud_nave[i]))
    Unidades2$Momento_realizacion[i]="Cuando termine los servicios"

}
else{
    c=calcular_dist_ruta(origen_inicio = data.frame("lon"=Unidades$Longitud[i],"lat"=Unidades$Latitud[i]),origenes_intermedios = data.frame("lon"=Unidades$Longitud[i],"lat"=Unidades$Latitud[i]),destinos_intermedios = data.frame("lat"=servicios[[i]]$latitud_destino,"lon"=servicios[[i]]$longitud_destino),destino_final = data.frame("lon"=Unidades$Longitud_zona[i],"lat"=Unidades$Latitud_zona[i]))
    calc=calcular_dist_ruta(origen_inicio = c$final_servicio ,origenes_intermedios = data.frame("lon"=servicio_nuevo$longitud_origen,"lat"=servicio_nuevo$latitud_origen),destinos_intermedios = data.frame("lat"=servicio_nuevo$latitud_destino,"lon"=servicio_nuevo$longitud_destino),destino_final = data.frame("lon"=Unidades$Longitud_zona[i],"lat"=Unidades$Latitud_zona[i]))
    calc$dist_ui_origen=c$distancia_total+calc$dist_ui_origen
    dist_ui_navei=c$distancia_total+distancia_haversine(punto1=c$final_servicio,punto2=data.frame("lat"=Unidades$Latitud_nave[i],"lon"=Unidades$Longitud_nave[i]))
    Unidades$Momento_realizacion[i]="Cuando termine los servicios"

    c2=c
    calc2=calc
    calc2$dist_ui_origen=c2$distancia_total+calc2$dist_ui_origen
    dist_ui_navei2=dist_ui_navei
    Unidades2$Momento_realizacion[i]="Cuando termine los servicios"
}
}
else{
    calc=calcular_dist_ruta(origen_inicio = data.frame("lon"=Unidades$

```

```

Longitud[i], "lat"=Unidades$Latitud[i]),origenes_intermedios = data.frame("lat"=servicio_nuevo$latitud_origen, "lon"=servicio_nuevo$longitud_origen),destinos_intermedios = data.frame("lat"=servicio_nuevo$latitud_destino, "lon"=servicio_nuevo$longitud_destino),destino_final = data.frame("lon"=Unidades$Longitud_zona[i], "lat"=Unidades$Latitud_zona[i]))
  dist_ui_navei=distancia_haversine(punto1=data.frame("lat"=Unidades$Latitud[i], "lon"=Unidades$Longitud[i]), punto2=data.frame("lat"=Unidades$Latitud_nave[i], "lon"=Unidades$Longitud_nave[i]))
  Unidades$Momento_realizacion[i]="Ahora"

  calc2=calc
  dist_ui_navei2=dist_ui_navei
  Unidades2$Momento_realizacion[i]="Ahora"
}

dist_navei_origen=distancia_haversine(punto1=data.frame("lat"=Unidades$Latitud_nave[i], "lon"=Unidades$Longitud_nave[i]), punto2=data.frame("lat"=servicio_nuevo$latitud_origen, "lon"=servicio_nuevo$longitud_origen))
dist_provi_provs=distancia_haversine(punto1=data.frame("lat"=runif(1,40.2,41), "lon"=runif(1, -5.5, -4.3)), punto2=data.frame("lat"=runif(1,40.56,41.65), "lon"=runif(1, -4.81, -3.13)))

Distancias[i,]=c(calc$dist_ui_origen[1],dist_ui_navei,dist_navei_origen,calc$dist_origen_destino[1],calc$dist_destino_zonai[1],dist_provi_provs)
Distancias2[i,]=c(calc2$dist_ui_origen[1],dist_ui_navei2,dist_navei_origen,calc2$dist_origen_destino[1],calc2$dist_destino_zonai[1],dist_provi_provs)
}

#Calculamos los tiempos a partir de las distancias con la velocidad media
obtener_tiempos=function(Dist,vm){

  Tiempos=data.frame(
    "t_ui_origen"=Dist$dist_ui_origen/vm,
    "t_ui_navei"=Dist$dist_ui_navei/vm,
    "t_navei_origen"=Dist$dist_navei_origen/vm,
    "t_origen_destino"=Dist$dist_origen_destino/vm,
    "t_destino_zonai"=Dist$dist_destino_zonai/vm,
    "t_provi_provs"=Dist$dist_provi_provs/vm
  )

  return(Tiempos)
}
Tiempos=obtener_tiempos(Distancias,vmedia)
Tiempos2=obtener_tiempos(Distancias2,vmedia)

#####SOLUCIÓN ÓPTIMA DE ASIGNACIÓN#####

#Calculo de las restricciones

```

```

calculo_restricciones=function(servicio_nuevo,Unidades,Tiempos,disponi
bilidad=TRUE){

#####1)Restricciones de vehiculos de la provincia#####

vtotal=nrow(Unidades)
Mgrande=99999
r1izq=diag(vtotal)
r1dir=rep("<=",nrow(r1izq))
r1der=Mgrande*as.numeric(Unidades$Provincia == servicio_nuevo$prov_s
)

#####H)Restricciones de tiempo para Llegar al origen#####

if(servicio_nuevo$I.V=="I" & servicio_nuevo$Ter!="INT"){
  rhizq=rbind(horas_desde_origen(Sys.time()+Tiempos$t_ui_origen+Tie
mpos$t_origen_destino,horas_desde_origen(Sys.time()+Tiempos$t_ui_orig
en+Tiempos$t_origen_destino)
  rhder=c(horas_desde_origen(servicio_nuevo$Entr)-1,horas_desde_orig
en(servicio_nuevo$Entr))
  rhdir=c(">=", "<=")
}else{
  rhizq=rbind((horas_desde_origen(Sys.time()+Tiempos$t_ui_origen),(
horas_desde_origen(Sys.time()+Tiempos$t_ui_origen)*diag(vtotal))
  rhder=c(horas_desde_origen(servicio_nuevo$Entr),horas_desde_origen
(servicio_nuevo$Entr)+1-0.5*as.numeric(servicio_nuevo$Ter=="HE")+1*as.
numeric(servicio_nuevo$Ter=="SUR")+2*as.numeric(servicio_nuevo$Ter=="A
LT")+Tiempos$t_provi_provs*as.numeric(Unidades$Provincia!=servicio_nue
vo$Pobl.Origen))
  rhdir=c(">=", rep("<=",nrow(rhizq)-1))
}

#####E)Restricciones de Estado del conductor#####

reizq=rbind(as.numeric(Unidades$E.Conductor %in% c("Permiso","Avería
")))
reder=c(0)
redir=c("<=")

#####2)Restricciones servicio dentro de horario laboral del con
ductor#####

r2izq=rbind(horas_desde_origen(Unidades$IniTurno)-0.5,(horas_desde_o
rigen(Sys.time()+Tiempos$t_ui_origen+Tiempos$t_origen_destino+Tiempos
$t_destino_zonai)*diag(vtotal))
r2der=c(horas_desde_origen(Sys.time()),horas_desde_origen(Unidades$F
inTurno)+0.5)
r2dir=rep("<=",nrow(r2izq))

r3izq=NULL
r3dir=NULL
r3der=NULL
if(disponibilidad==TRUE){

```

**#####3)Restricciones de capacidad de La amulancia#####**

```
r3izq=rbind(Unidades$Sillas,Unidades$Camillas,Unidades$Asientos-Unid
ades$Camillas-Unidades$Sillas)
r3dir=rep(">=",nrow(r3izq))
r3der=c(as.numeric(servicio_nuevo$MP=="SE" | servicio_nuevo$MP=="SV"
|servicio_nuevo$MP=="SA"),as.numeric(servicio_nuevo$MP=="B"),as.numeri
c(servicio_nuevo$MP==" ") +as.numeric(servicio_nuevo$A=="*")+as.numeric
(servicio_nuevo$M=="M")+as.numeric(servicio_nuevo$T=="T"))

}
```

**#####4)Restricciones de minimo de vehiculos candidatos#####**

```
r4izq=rep(1,vtotal)
r4dir="="
r4der=1

r5izq=NULL
r6izq=NULL
r5dir=NULL
r6dir=NULL
r5der=NULL
r6der=NULL
if(disponibilidad==TRUE){
```

**#####5)Restricciones de tipo de vehiculo#####**

```
r5izq=rbind((1-as.numeric(Unidades$T.V=="TC" & Unidades$C.V=="E"))
,(1-as.numeric(Unidades$T.V=="BAR")),as.numeric(Unidades$T.V=="BAR")
,(1-as.numeric(Unidades$T.V=="SVB")),as.numeric(Unidades$T.V=="SVB")
)
r5dir=rep("<=",nrow(r5izq))
r5der=c(Mgrande*(1-as.numeric(servicio_nuevo$T.V=="PMR")),Mgrande*(
1-as.numeric(servicio_nuevo$T.V=="BAR")),Mgrande*as.numeric(servicio_
nuevo$T.V=="BAR"),Mgrande*(1-as.numeric(servicio_nuevo$T.V=="SVB")),
Mgrande*as.numeric(servicio_nuevo$T.V=="SVB"))
```

**#####6)Restricciones de cliente servicio#####**

```
r6izq=rbind(1-as.numeric(Unidades$Tur=="PRI"))
r6dir=rep("<=",nrow(r6izq))
r6der=c(Mgrande*(1-as.numeric(servicio_nuevo$Cli!=1 & servicio_nuevo
$Cli!=2 & servicio_nuevo$Cli!=10225 & servicio_nuevo$Ter!="APY")))
}
```

**#####7)Restricciones de UVI#####**

```
r7izq=rbind((1-as.numeric(Unidades$T.V=="UVI")),as.numeric(Unidades
$T.V=="UVI"))
r7dir=rep("<=",nrow(r7izq))
r7der=c(Mgrande*(1-as.numeric(servicio_nuevo$T.V=="UVI")),Mgrande*a
s.numeric(servicio_nuevo$T.V=="UVI"))
```

```

#####Restricciones totales#####

restricciones=rbind(r1izq,rhizq,reizq,r2izq,r3izq,r4izq,r5izq,r6izq,
r7izq)
dir_restriccion=c(r1dir,rhdir,redir,r2dir,r3dir,r4dir,r5dir,r6dir,r7
dir)
rhs=c(r1der,rhder,reder,r2der,r3der,r4der,r5der,r6der,r7der)

return(list("restricciones"=restricciones,"dir_restriccion"=dir_restr
riccion,"rhs"=rhs))
}

#####Ajustamos el modelo#####

f_objetivo=Tiempos$t_ui_origen+Tiempos$t_origen_destino

solucion_optima=function(f,restricciones,numero_opciones=3){
  #f: función objetivo a minimizar
  #restricciones:se deben cumplir.
  #numero_opciones:candidatos a solución que queremos obtener

  res_izq=restricciones$res_izq
  dir=restricciones$dir_restriccion
  res_der=restricciones$res_der

  unidades_elegidas=NULL
  xsol=NULL
  tf=NULL
  objs=NULL
  henv=NULL
  for (i in 1:numero_opciones){
    solucion <- lp("min", f, res_izq, dir, res_der,all.bin = T)

unidades_elegidas=rbind(unidades_elegidas,Unidades[solucion$solution==
1,])
    objs=c(objs,solucion$objval)
    xsol=rbind(xsol,solucion$solution)
    tf=c(tf,ifelse(solucion$status==0,TRUE,FALSE))

    res_izq=rbind(res_izq,diag(vtotal)[solucion$solution==1,])
    dir=c(dir,"<=")
    res_der=c(res_der,0)
  }
  #Return: devuelve Las tres unidades óptimas que pueden hacer el serv
icio.
  return(list("Tiempos_óptimos"=objs,"xsol"=apply(xsol,2,sum),"Unidade
s_elegidas"=unidades_elegidas,"Óptima"=tf))
}

res=calculo_restricciones(servicio_nuevo,Unidades,Tiempos)
candidatos_optimos1=NULL
candidatos_optimos1=solucion_optima(f_objetivo,res,numero_opciones = 3

```

```

)
candidatos_optimos2=NULL
if(sum(as.numeric(candidatos_optimos1$Óptima==FALSE))>0){
  Tiempos2$t_ui_origen=Tiempos2$t_ui_navei+Tiempos2$t_navei_origen
  f_objetivo2=Tiempos2$t_ui_origen+Tiempos2$t_origen_destino
  res2=calculo_restricciones(servicio_nuevo,Unidades2,Tiempos2,disponi
bilidad = F)
  res2$restricciones=rbind(res2$restricciones,candidatos_optimos1$xsol
)
  res2$dir_restriccion=c(res2$dir_restriccion,"<=")
  res2$rhs=c(res2$rhs,0)

candidatos_optimos2=solucion_optima(f_objetivo2,res2,numero_opciones =
sum(as.numeric(candidatos_optimos1$Óptima==FALSE)))
}

#Unidades optimas que proporciona el algoritmo
candidatos_optimos=list("Unidades_elegidas"=cbind(rbind(candidatos_opt
imos1$Unidades_elegidas,candidatos_optimos2$Unidades_elegidas)[,c(1:8,
18)],"Tiempo_total"=ceiling(c(candidatos_optimos1$Tiempos_óptimos[whic
h(candidatos_optimos1$Tiempos_óptimos!=0)],candidatos_optimos2$Tiempos
_óptimos[which(candidatos_optimos2$Tiempos_óptimos!=0)]))*60),"Tiempo_D
emora"=ceiling(c(sort(Tiempos$t_ui_origen[candidatos_optimos1$xsol==1]
),sort(Tiempos2$t_ui_origen[candidatos_optimos2$xsol==1]))*60),"Cambio
_vehiculo"=c(rep("NO",sum(as.numeric(candidatos_optimos1$Óptima==TRUE)
)),rep("SI",sum(as.numeric(candidatos_optimos2$Óptima==TRUE))))))

#####SOLUCIONES OBTENIDAS#####
servicio_nuevo
candidatos_optimos

```

# Referencias bibliográficas

- [1] Salud Castilla y León, «Información de interés sobre el transporte sanitario no urgente,» Salud Castilla y León, [En línea]. Available: <https://www.saludcastillayleon.es/es/prestaciones-ayudas/transporte-sanitario-terrestre/informacion-interes-transporte-sanitario-urgente>
- [2] Junta de Castilla y León, Consejería de Sanidad, «Pliego de prescripciones técnicas que ha de regir el contrato del servicio de transporte sanitario terrestre en el ámbito territorial de la Comunidad Autónoma de Castilla y León,» Gerencia Regional de Salud, 22 Abril 2022. [En línea]. Available: [https://contrataciondelestado.es/wps/wcm/connect/PLACE\\_es/Site/area/docAccCmpnt?srv=cmpnt&cmpntname=GetDocumentsById&source=library&DocumentIdParam=85622b88-b423-4272-b1e3-fbc15f112126](https://contrataciondelestado.es/wps/wcm/connect/PLACE_es/Site/area/docAccCmpnt?srv=cmpnt&cmpntname=GetDocumentsById&source=library&DocumentIdParam=85622b88-b423-4272-b1e3-fbc15f112126)
- [3] Departamento de Matemáticas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires, «Problema de Asignacion,» Universidad de Buenos Aires, [En línea]. Available: [https://www.dm.uba.ar/materias/investigacion\\_operativa/2010/2/cap4\\_05.pdf](https://www.dm.uba.ar/materias/investigacion_operativa/2010/2/cap4_05.pdf)
- [4] Hegyhati, G., «Advanced modelling techniques: big M constraints,» Introduction into Modeling and Optimization of Linear Systems (IMOLS), [En línea]. Available: [https://hegyhati.github.io/IMOLS/pages/modelling\\_bigM.html](https://hegyhati.github.io/IMOLS/pages/modelling_bigM.html)
- [5] Grup La Pau, «Flota de vehículos sanitarios,» Grup La Pau, [En línea]. Available: <https://lapau.es/flota-de-vehiculos-sanitarios/>
- [6] vCalc, «Haversine - Distance,» vCalc, [En línea]. Available: <https://www.vcalc.com/equation/?uuid=e6d11679-da27-11e2-8e97-bc764e04d25f>
- [7] LocationIQ, «¿Qué es la fórmula Haversine?,» LocationIQ, [En línea]. Available: <https://es.locationiq.com/glossary/haversine-formula#:~:text=La%20f%C3%B3rmula%20de%20Haversine%20es%20una%20f%C3%B3rmula%20utilizada,superficie%20de%20un%20objeto%20esf%C3%A9rico%2C%20como%20la%20Tierra.>
- [8] HTGROUP, «¿Para qué se emplea el colchón de vacío?,» HTGROUP, 9 Marzo 2020. [En línea]. Available: <https://www.htgroup.es/para-que-se-empieza-el-colchon-de-vacio/#:~:text=El%20colch%C3%B3n%20de%20vac%C3%ADo%20es%20el%20sistema%20de,en%20la%20posici%C3%B3n%20que%20se%20realice%20el%20vac%C3%ADo.>
- [9] ClubEnsayos.com, «Proyecto de investigación: Problema de asignación generalizada (GAP),» ClubEnsayos.com, 22 Noviembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.clubensayos.com/Ciencia/PROYECTO-DE-INVESTIGACION-PROBLEMA-DE-ASIGNACION-GENERALIZADA/4570731.html>

