



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

ADE

Facultad de Administración  
y Dirección de Empresas /UPV

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Facultad de Administración y Dirección de Empresas

REUBICACIÓN DE VEHÍCULOS DE EMERGENCIAS  
SANITARIAS APLICANDO EL SISTEMA RENDEZ-VOUS  
EN LA CIUDAD DE VALENCIA

Trabajo Fin de Grado

Grado en Administración y Dirección de Empresas

AUTOR/A: Carles Rausell, Marta

Tutor/a: Villa Juliá, María Fulgencia

Cotutor/a externo: BELENGUER RIBERA, JOSE MANUEL

Director/a Experimental: KARPOVA KRYLOVA, YULIA

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

## Resumen

Las emergencias sanitarias son un ámbito crítico, del que dependen las vidas de millones de personas. No obstante, los recursos son limitados, por lo que resulta necesario asignarlos de forma que se maximice la atención ofrecida a los pacientes. En la Comunidad Valenciana, el Servicio de Emergencias Sanitarias (SES) se encarga de asignar los recursos sanitarios disponibles siguiendo un modelo estacionario, donde para atender las emergencias extrahospitalarias más graves se dispone de vehículos de emergencia sanitaria (VES) específicos, los SAMU. Estos vehículos de emergencia sanitaria tienen asignado un equipo médico de forma que el personal y el vehículo se mueven conjuntamente. Esta estrategia tiene una limitación, ya que cuando no se dispone de equipo médico, el vehículo no puede funcionar por carecer de uno de sus componentes. Para evitar esta situación, otros SES utilizan el sistema *rendez-vous*, en el que el personal médico está desvinculado del vehículo de emergencia y se mueven de forma independiente. Este último separa equipo médico de ambulancia con tal de aportar una mayor flexibilidad. A lo largo de este Trabajo Final de Grado, se desarrollará una herramienta mediante modelos de programación lineal que permita realizar la localización y relocalización de los recursos – equipo médico y vehículos – siguiendo un modelo *rendez-vous* para el caso de Valencia. Se trata, por tanto, de una resolución de un problema real, vinculado a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de *Salud y Bienestar, Trabajo Decente y Crecimiento Económico, Industria, Innovación e Infraestructura* y *Alianzas para lograr los objetivos*.

**Palabras clave:** Vehículos de emergencia, Problemas de localización, Optimización, Isócrona, Sistemas de emergencias sanitarias, Sistema *rendez-vous*.

## Resum

Les emergències sanitàries són un àmbit crític, del qual depenen les vides de milions de persones. No obstant això, els recursos són limitats, per la qual cosa resulta necessari assignar-los de manera que es maximitze l'atenció oferida als pacients. A la Comunitat Valenciana, el Servei d'Emergències Sanitàries (SES) s'encarrega d'assignar els recursos sanitaris disponibles seguint un model estacionari, on per a atendre les emergències extra-hospitalàries més greus es disposa de vehicles d'emergència sanitària (VES) específics, els SAMU. Aquests vehicles d'emergència sanitària tenen assignat un equip mèdic de manera que el personal i el vehicle es mouen conjuntament. Aquesta estratègia té una limitació, ja que quan no es disposa d'equip mèdic, el vehicle no pot funcionar per manca d'un dels seus components. Per a evitar aquesta situació, altres SES utilitzen el sistema *rendez-vous*, en el qual el personal mèdic està desvinculat del vehicle d'emergència i es mouen de manera independent. Aquest últim separa equip mèdic d'ambulància amb la condició d'aportar una major flexibilitat. Al llarg d'aquest Treball Final de Grau, es desenvoluparà una eina mitjançant models de programació lineal que permeta realitzar la localització i relocalització dels recursos – equip metge i vehicles – seguint un model *rendez-vous* per al cas de València. Es tracta, per tant, d'una resolució d'un problema real, vinculat als Objectius de Desenvolupament Sostenible de *Salut i Benestar*, *Treball Decent i Creixement Econòmic*, *Indústria, Innovació i Infraestructures* i *Aliances per a aconseguir els objectius*.

**Paraules clau:** Vehicles d'emergència, Problemes de localització, Optimització, Isòcrona, Sistemes d'emergències sanitàries, Sistema *rendez-vous*.

## Abstract

Health emergencies are a critical area, on which the lives of millions of people depend. However, resources are limited, so it is necessary to allocate them in a way that maximizes the care offered to patients. In the Valencian Community, the Health Emergency Service is in charge of allocating the available health resources following a stationary model, where specific emergency vehicles are available to attend the most serious out-of-hospital emergencies. These emergency medical vehicles are assigned a medical team so that the medical staff and the vehicle move together. This strategy has a limitation in that when medical equipment is not available, the vehicle cannot operate because it lacks one of its components. To avoid this situation, other Emergency Medical Services use the *rendez-vous* system, in which the medical staff is detached from the emergency vehicle and they move independently. The latter separates medical staff from ambulance in order to provide greater flexibility. Throughout this Final Degree Project, a tool will be developed using linear programming models that allows the location and relocation of resources – medical staff and vehicles - following a *rendez-vous* model for the case of Valencia. It is, therefore, a resolution of a real problem, linked to the Sustainable Development Goals of *Good Health and Well-Being, Decent Work and Economic Growth, Industry, Innovation and Infrastructure* and *Partnerships for the goals*.

**Key words:** Emergency vehicles, Location problems, Optimization, Isochron, Emergency health systems, *Rendez-vous* system.

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>Resum</b>	<b>II</b>
<b>Abstract</b>	<b>III</b>
<b>1. Introducción y Objetivos</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.2. Motivación . . . . .	3
1.3. Objetivos . . . . .	4
1.4. Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible . . . . .	5
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>7</b>
2.1. Sistemas de emergencias sanitarias: Comparación entre los modelos anglo-americano y franco-alemán . . . . .	7
2.2. Introducción a la Investigación Operativa . . . . .	13
2.3. Problemas de localización . . . . .	14
2.4. Problemas de cubrimiento . . . . .	15
<b>3. Descripción del problema</b>	<b>17</b>
3.1. Recursos utilizados . . . . .	17
3.2. Población y demanda . . . . .	18
3.3. Bases en la ciudad de Valencia . . . . .	19
3.4. Isócronas . . . . .	19

3.5. El problema de los solapamientos y el uso de subregiones . . . . .	20
3.6. Definición de cubrimiento y limitaciones de cobertura . . . . .	23
3.7. Variables, función objetivo, restricciones y parámetros . . . . .	24
<b>4. Metodología</b>	<b>26</b>
4.1. Software QGIS . . . . .	26
4.2. OpenSolver y CPLEX . . . . .	27
4.3. Algoritmo de resolución y obtención de datos . . . . .	27
<b>5. Modelo matemático y resultados</b>	<b>31</b>
5.1. Modelo y resolución de caso hipotético . . . . .	31
5.2. Modelo y resolución de caso real . . . . .	41
<b>6. Conclusiones</b>	<b>50</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	50
6.2. Posibles mejoras . . . . .	51
<b>Bibliografía</b>	<b>53</b>
<b>Anexo I. Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030</b>	<b>55</b>

# Índice de figuras

1.1. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: Naciones Unidas . . . . .	6
2.1. Dispositivos movilizados con el sistema <i>rendez-vous</i> . Fuente: European Transport Safety Council . . . . .	9
2.2. Etapas de atención en el Escenario 1. Fuente: European Transport Safety Council . . . . .	10
2.3. Etapas de atención en el Escenario 2. Fuente: European Transport Safety Council . . . . .	10
2.4. Etapas de atención en el Escenario 3. Fuente: European Transport Safety Council . . . . .	11
2.5. Etapas de atención en el Escenario 4. Fuente: European Transport Safety Council . . . . .	12
3.1. Cambio en la disposición del personal sanitario. Fuente: Elaboración propia	18
3.2. Bases en la ciudad de Valencia. Fuente: Elaboración propia . . . . .	19
3.3. Ejemplo de isócronas de 5 y 8 minutos en coche. Fuente: Elaboración propia	20
3.4. Ejemplo de solapamiento entre isócronas. Fuente: Elaboración propia . . . .	21
3.5. Comparativa del efecto de la definición de unidad territorial. Fuente: Elaboración propia . . . . .	23
3.6. Límite de cubrimiento. Fuente: Elaboración propia . . . . .	24
4.1. Capas utilizadas en QGIS para la delimitación de las subregiones. Fuentes: Instituto Cartográfico Valenciano y Elaboración propia . . . . .	29
4.2. Ejemplo del proceso de rellenado de la matriz. Fuente: Elaboración propia .	30

5.1. Ubicación de las posibles bases en el caso hipotético. Fuente: Elaboración propia . . . . .	32
5.2. Coberturas en el caso hipotético. Fuente: Elaboración propia . . . . .	33
5.3. Población por subregión en el caso hipotético. Fuente: Elaboración propia .	33
5.4. Solución proporcionada por OpenSolver para el caso hipotético. Fuente: Elaboración propia . . . . .	38
5.5. Solución proporcionada por el nuevo modelo para el caso hipotético. Fuente: Elaboración propia . . . . .	41
5.6. Solución para el escenario con 6 médicos. Fuente: Elaboración propia . . . .	43
5.7. Solución para el escenario con 5 médicos. Fuente: Elaboración propia . . . .	44
5.8. Solución para el escenario con 4 médicos. Fuente: Elaboración propia . . . .	45
5.9. Solución para el escenario con 3 médicos. Fuente: Elaboración propia . . . .	46
5.10. Solución para el escenario con 2 médicos. Fuente: Elaboración propia . . . .	47
5.11. Solución para el escenario con 1 médico. Fuente: Elaboración propia . . . .	48

# Índice de tablas

2.1. Comparativa entre sistemas en el mundo y sistema español. Fuente: Elaboración propia . . . . .	13
3.1. Ejemplo de poblaciones cubiertas con y sin solapamiento. Fuente: Elaboración propia . . . . .	22
3.2. Valores de población total, población a la que es posible cubrir y población imposible de cubrir. Fuente: Elaboración propia . . . . .	24
4.1. Concepto, tipo y descripción de las capas utilizadas en QGIS. Fuente: Elaboración propia . . . . .	27
5.1. Parámetros del modelo propuesto. Fuente: Elaboración propia . . . . .	34
5.2. Variables del modelo propuesto. Fuente: Elaboración propia. . . . .	34
5.3. Ubicación de médicos y SAMUs para el escenario con 6 médicos. Fuente: Elaboración Propia . . . . .	42
5.4. Ubicación de médicos y SAMUs para el escenario con 5 médicos. Fuente: Elaboración Propia . . . . .	44
5.5. Ubicación de médicos y SAMUs para el escenario con 4 médicos. Fuente: Elaboración Propia . . . . .	45
5.6. Ubicación de médicos y SAMUs para el escenario con 3 médicos. Fuente: Elaboración Propia . . . . .	46
5.7. Ubicación de médicos y SAMUs para el escenario con 2 médicos. Fuente: Elaboración Propia . . . . .	47
5.8. Ubicación de médico y SAMU para el escenario con 1 médico. Fuente: Elaboración Propia . . . . .	48
5.9. Cubrimientos conseguidos en función de la disponibilidad de médicos. Fuente: Elaboración Propia . . . . .	49

# Capítulo 1

## Introducción y Objetivos

### 1.1. Introducción

En el ámbito de las emergencias sanitarias, cada minuto es clave a la hora de reducir la tasa de mortalidad. Se trata de situaciones en las que es necesario prestar una asistencia de manera rápida y efectiva, motivo por el que resulta imprescindible asignar los recursos de manera eficiente. Pese a que, idealmente, se asignarían recursos suficientes para dar cobertura a cualquier necesidad sanitaria, lo cierto es que cada sistema de emergencias cuenta con un presupuesto finito, por lo que la cantidad de recursos asistenciales es limitada, y debe optimizarse.

Cada país cuenta con un sistema de emergencias médicas (SEM) propio, organizando su logística con tal de prestar la mejor atención posible. Todos estos sistemas pueden categorizarse en dos grupos: aquellos que siguen un sistema anglo-americano y los que se basan en el sistema franco-alemán. Las particularidades de estos dos sistemas se detallan en la sección 2.1, pero su principal diferencia es la filosofía que siguen [1]: el sistema anglo-americano trata de llevar el paciente al hospital, reduciendo la atención *in-situ*, mientras que el sistema franco-alemán trata de llevar el hospital al paciente, proporcionando mayor atención *in-situ* y reduciendo así la necesidad de ser tratado en un centro hospitalario. Esto se traduce en una importante diferencia a nivel logístico: en el sistema anglo-americano se usa el sistema estacionario, donde personal médico y ambulancia se trasladan conjuntamente, asignándose a cada ambulancia un/a médico/a; mientras que en el sistema franco-alemán es mucho más habitual un modelo en el que el personal médico y la ambulancia son independientes, ya que el primero puede adelantarse en llegar a la escena y prestar la atención *in-situ* mientras llega la ambulancia para realizar el posterior traslado. Esta práctica recibe el nombre de *rendez-vous*. Cada sistema presenta ventajas e inconvenientes, por lo que no existe una fórmula más acertada que otra. En la ciudad de Valencia, la situación es algo particular, ya que el sistema que sigue se podría categorizar como franco-alemán, pero en lo que respecta al transporte del personal médico al lugar de la emergencia se trabaja con el sistema esta-

cionario, más propio del modelo anglo-americano. Como se desarrollará en la sección 1.2, en la provincia de Valencia dicho sistema se encuentra ante algunos problemas logísticos a los que podría darse solución adoptando aspectos del sistema *rendez-vous*.

Para desarrollar estos dos modelos, ambos sistemas cuentan con diferentes recursos. En este Trabajo Fin de Grado, se va a trabajar con dos de ellos, el personal sanitario y los vehículos de emergencias. Cada tipo de vehículo cuenta con un tipo de personal y un material distintos, por lo que son usados en situaciones diferentes. El estándar CEN 1789 definido por el Comité Europeo de Normalización identifica varios tipos de ambulancia [2]:

- **Ambulancias Tipo A:** para el transporte de pacientes que no se encuentran en una situación seria. Se puede descomponer en dos tipos: ambulancias tipo A1, para el transporte de un único paciente, y ambulancias tipo A2, destinadas a transportar a varios pacientes tras un accidente múltiple.
- **Ambulancias Tipo B:** para servicio de emergencia y transporte básico de los pacientes.
- **Ambulancias Tipo C:** unidad móvil de cuidados intensivos, para servicio de emergencia y transporte avanzados.

Sin embargo, cada SEM tiene sus particularidades respecto a los tipos de vehículo con los que trabaja.

En España, la propuesta y ejecución de la política del Gobierno en materia de salud, de planificación y asistencia sanitaria, así como el ejercicio de las competencias de la Administración General del Estado para asegurar a la ciudadanía el derecho a la protección de la salud corresponde al Ministerio de Sanidad [3]. Sin embargo, en España la sanidad se encuentra descentralizada, con lo que la mayoría de las competencias se transfieren a las comunidades autónomas. En concreto, la Comunidad Valenciana cuenta con la *Conselleria de Sanitat Universal i Salut Pública*, y esta integra un organismo especializado en la atención de las urgencias vitales, emergencias y catástrofes: el Sistema de Emergencias Sanitarias de la Comunidad Valenciana (SESCV) [4]. Por tanto, este último es el encargado de gestionar las emergencias sanitarias en las tres provincias: Castellón, Valencia y Alicante, y en consecuencia también en la ciudad de Valencia, en la que se centra este documento.

El SESCVCV integra los siguientes recursos [5]:

- **El Centro de Información y Coordinación de Urgencias**, que gestiona la demanda sanitaria en urgencias y emergencias recibida en el 112.
- **Helicópteros medicalizados**, aeronaves para traslado con soporte vital avanzado, utilizadas principalmente en emergencias en lugares de difícil acceso.

- **Servicio de Ayuda Médica Urgente (SAMU)**, que cuenta con ambulancias medicalizadas que proporcionan apoyo vital avanzado. Corresponden a las ambulancias del tipo C definidas por el estándar europeo. Están dotadas de un/a médico/a, enfermería SAMU y un/a técnico/a en emergencias sanitarias.
- **Soporte Vital Avanzado (SVA) de Enfermería**, similar al SAMU y perteneciente también al tipo C, pero dotados de enfermería SAMU y dos técnicos/as en emergencias sanitarias (TES).
- **Soporte Vital Básico (SVB)**, ambulancias destinadas a proporcionar atención sanitaria inicial y soporte vital básico. Corresponden a las ambulancias de tipo B definidas por el estándar. Están dotadas de dos técnicos/as en emergencias sanitarias.
- **Ambulancias no asistidas**, destinadas a transporte de pacientes en camilla. Pueden ser de uso individual o colectivo, y se corresponden con las ambulancias de tipo A definidas por el estándar. Están dotadas de un/a técnico/a en emergencias sanitarias.
- **Vehículos de Intervención Rápida (VIR) o Unidades de Soporte y Coordinación (USC)**, vehículos para prestar asistencia *in-situ*, pero sin capacidad de transporte de pacientes. Dotadas con el mismo equipo humano y material que las SAMU.
- **Emergencias múltiples víctimas (EMV)**, vehículos de transporte de equipamiento y material, específico para la asistencia en caso de incidentes con múltiples víctimas.
- **Incubadoras de transporte**, para el transporte de neonatos en unidades SAMU.

En este Trabajo Fin de Grado, el enfoque se pondrá específicamente en los SAMU y los VIR, de entre todos los recursos mencionados.

## 1.2. Motivación

Uno de los grandes retos actuales para el Servicio de Emergencias Sanitarias es la falta de profesionales. El envejecimiento de la plantilla o la emigración del personal médico [6] son algunas de las causas que están generando un desequilibrio entre la oferta y la demanda, generando estrés en el sector. En particular, el personal médico de urgencias y emergencias se encuentra entre los más afectados. Según el Estudio de Oferta-Necesidad de Médicos Especialistas 2021-2035 llevado a cabo por el Ministerio de Sanidad [7], en 2028 el déficit de estos profesionales será superior al 10 % en España.

En este contexto, uno de los recursos del SES se encuentra particularmente afectado: los SAMU. Como se ha definido en la sección 1.1, este recurso está dotado de personal médico, por lo que en la Comunidad Valenciana cada vehículo tiene asignado un facultativo cuya presencia es indispensable para el funcionamiento del dispositivo. Es por ello que dicha

falta de personal genera importantes ineficiencias en el servicio, ya que los vehículos quedan inmovilizados, perdiendo de esta forma un recurso tan valioso y escaso como es un SAMU. En algunos casos, se están dando situaciones en las que estos vehículos están atendiendo emergencias equipadas únicamente por personal de enfermería y técnico en emergencias sanitarias, convirtiendo así un SAMU en un dispositivo más cercano a un SVA [8]. Se han generado incluso demandas por parte del sindicato de enfermería en reclamo de una adecuada asignación de recursos médicos que evite que los enfermeros se vean obligados a realizar tareas fuera de sus competencias y sin seguridad jurídica [9].

Esta situación se hace más grave todavía al tener en cuenta la estacionalidad, ya que durante períodos críticos como las vacaciones de verano el desajuste entre oferta y demanda de este tipo de profesionales es incluso mayor. La flota de vehículos se mantiene invariable, pero les falta una pieza crucial y difícil de reemplazar, al tratarse de personal altamente cualificado.

Así pues, surge la idea de aplicar el concepto de sistema *rendez-vous*, utilizado por los SEM que siguen un modelo franco-alemán, a la ciudad de Valencia. En este sistema, como se detalla en la sección 2.1, personal médico y ambulancia son independientes, y acuden por separado a la escena del accidente. En caso de que el paciente no necesite asistencia durante su traslado al centro hospitalario, el personal médico puede acudir a otra emergencia haciendo uso de su propio vehículo. De esta forma, se aporta mayor flexibilidad al servicio, permitiendo trabajar con un número de facultativos inferior al número de ambulancias disponible. Por estos motivos, se ha identificado la implementación de este sistema como solución al bloqueo de vehículos SAMU derivado de la falta de personal.

### 1.3. Objetivos

A lo largo de este Trabajo Fin de Grado, el propósito es desarrollar una metodología que permita obtener la localización (y relocalización, en caso de haber cambios en la situación de partida) óptimas de personal médico y ambulancias en la provincia de Valencia, adoptando el enfoque del sistema *rendez-vous*. Con ello, se busca superar el desajuste existente entre la oferta y la demanda de personal en el actual sistema estacionario, optimizando así los recursos y mejorando la eficiencia del sistema. En definitiva, optimizar la calidad del sistema, medida en términos de maximizar el cubrimiento de población en el tiempo de respuesta máximo definido, sin necesidad de aumentar la cantidad de recursos disponibles, o incluso reduciendo la cantidad de recursos necesaria. Este aumento de la flexibilidad trae consigo diversos beneficios para los principales interesados:

- **Para el paciente:** La mejora del servicio se traduce en una disminución del tiempo de respuesta, reduciendo así la tasa de mortalidad.
- **Para el SES:** Aumento en la eficiencia del sistema, mejorando el servicio sin necesidad de incrementar la cantidad de recursos disponibles. Además, un aumento en la

confianza de la población en el sistema, al mejorar la calidad del servicio. Por último, mayor satisfacción laboral de la plantilla, al tener una gestión más eficiente y una carga de trabajo más equilibrada.

- **Para la sociedad valenciana:** Colaboración con la lucha contra el cambio climático, reduciendo el consumo de combustibles fósiles al hacer más eficientes los trayectos. Por otro lado, asegura un uso más eficiente de los recursos económicos recaudados a través de sus impuestos, permitiendo destinar fondos a otras áreas.

## 1.4. Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

El modelo desarrollado en este Trabajo Fin de Grado guarda relación directa con los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible propuestos por la Organización de las Naciones Unidas [10]:

- ODS 3: Salud y Bienestar
  - Meta 3.6: reducir a la mitad el número de muertes y lesiones causadas por accidentes de tráfico en el mundo.
  - Meta 3.d: Reforzar la capacidad de todos los países, en particular los países en desarrollo, en materia de alerta temprana, reducción de riesgos y gestión de los riesgos para la salud nacional y mundial.
- ODS 8: Trabajo Decente y Crecimiento Económico
  - Meta 8.2: Lograr niveles más elevados de productividad económica mediante la diversificación, la modernización tecnológica y la innovación.
- ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructuras
  - Meta 9.5: Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo, entre otras cosas fomentando la innovación y aumentando considerablemente, de aquí a 2030, el número de personas que trabajan en investigación y desarrollo por millón de habitantes y los gastos de los sectores público y privado en investigación y desarrollo.
  - Meta 9.b: Apoyar el desarrollo de tecnologías, la investigación y la innovación nacionales en los países en desarrollo, incluso garantizando un entorno normativo propicio a la diversificación industrial y la adición de valor a los productos básicos, entre otras cosas.
- ODS 17: Alianzas para lograr los objetivos

- Meta 17.17: Fomentar y promover la constitución de alianzas eficaces en las esferas pública, público-privada y de la sociedad civil, aprovechando la experiencia y las estrategias de obtención de recursos de las alianzas.



Figura 1.1: Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: Naciones Unidas

## Capítulo 2

# Marco Teórico

### 2.1. Sistemas de emergencias sanitarias: Comparación entre los modelos anglo-americano y franco-alemán

Pese a que cada país cuenta con una regulación y una terminología diferentes, pudiendo incluso haber grandes diferencias a nivel regional, la mayoría de los Sistemas de Emergencias Sanitarias del mundo pueden clasificarse en dos grupos: el sistema anglo-americano y el sistema franco-alemán [11]. El sistema anglo-americano predomina en países como Reino Unido, Estados Unidos, Canadá, Australia, Irlanda o Países Bajos [1] [12] [13], mientras que el franco-alemán (también conocido como sistema continental europeo [14]) aparece en países como Alemania, Francia, Grecia, Malta y Austria [1] [12]. La principal diferencia entre ambos es la filosofía que llevan detrás. Mientras que el modelo anglo-americano se basa en el “recoger y correr”, llevando al paciente al centro hospitalario lo más pronto posible, el sistema franco-alemán se basa en el “permanecer y estabilizar”, prestando atención *in-situ* al paciente para estabilizarlo antes del transporte al centro hospitalario. Esta diferencia de filosofías provoca que cada uno de los dos sistemas tenga ciertas características particulares respecto a su organización y recursos [11] [1] [15]:

- En el sistema anglo-americano, los profesionales que prestan la atención en la escena de la emergencia son los paramédicos. Este hecho viene fuertemente condicionado por la filosofía previamente mencionada, ya que al minimizar la asistencia *in-situ*, no resulta necesario contar con médicos con una formación mayor. Por otro lado, el sistema franco-alemán está medicalizado, son doctores los que prestan esta asistencia en la escena de la emergencia, debido a su filosofía de estabilizar al paciente previamente a su transporte.
- El sistema anglo-americano depende principalmente de ambulancias que viajan por vía terrestre, mientras que en el sistema franco-alemán es mucho más común encontrarse

con ambulancias aéreas (helicópteros medicalizados), que complementan a la asistencia por vía terrestre.

- En los países que siguen el modelo anglo-americano, dichos servicios se estructuran dentro del sistema de seguridad pública, esto es, se organizan junto con la policía o los bomberos. Por el contrario, en los países que siguen el modelo franco-alemán estos servicios se integran dentro del sistema de salud pública y los hospitales.
- Ambos sistemas organizan de manera distinta el transporte del facultativo (paramédico/a o médico/a) hasta la escena de la emergencia. El modelo anglo-americano usa el sistema estacionario, en el que paramédico/a y ambulancia se desplazan conjuntamente, movilizando un único vehículo, mientras que el modelo franco-alemán usa el conocido como sistema *rendez-vous*, en el que médico/a y ambulancia llegan a la escena de manera independiente, con lo que se movilizan dos vehículos distintos: además de la ambulancia, el personal médico acude en un vehículo de respuesta rápida, con todo el equipo necesario pero sin capacidad para transportar al paciente. Este último es muy común en el sistema franco-alemán porque permite al personal médico llegar antes que la ambulancia, y estabilizar al paciente mientras acude el vehículo para el transporte. El sistema *rendez-vous* prevalece mayormente en zonas en que el número de médicos es inferior al número de ambulancias. Por ejemplo, en Alemania el ratio ambulancias-médico es usualmente de 3:1 o 4:1, y el 87 % de sus sistemas se basan en el *rendez-vous*.

El modelo propuesto a lo largo de este Trabajo Final de Grado se basa en esta última diferencia, centrándose en la utilización del sistema *rendez-vous*, por lo que a continuación se exponen con mayor detalle las características de este sistema. Como se ha mencionado, en el sistema *rendez-vous* ante una incidencia se cuenta con dos vehículos de emergencias sanitarias: una ambulancia con el equipo de enfermería y los técnicos en emergencias sanitarias correspondientes, y un vehículo de intervención rápida con el personal médico, como se muestra en la Figura 2.1. Cada vehículo parte de una localización distinta, y se encuentran en el sitio de la emergencia para prestar la atención necesaria [16].

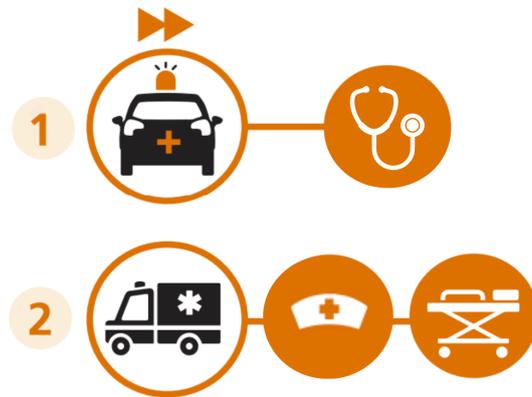


Figura 2.1: Dispositivos movilizados con el sistema *rendez-vous*. Fuente: European Transport Safety Council

Al moverse con un vehículo de respuesta rápida, el personal médico puede llegar al punto de encuentro más rápidamente. Además, en caso de que el paciente no necesite ser acompañado hasta el hospital, el facultativo puede acudir con su vehículo a la siguiente emergencia, sin verse obligado a dedicar tiempo en el transporte y la llegada al centro de atención médica. Así pues, se identifican cuatro escenarios, según la gravedad de la emergencia [16]:

### Escenario 1. Colisión con lesiones menores

En algunas colisiones tan solo se producen lesiones leves y no se requiere el máximo nivel posible de atención por parte de personal médico de urgencias. Estos pacientes pueden ser trasladados a un centro médico para recibir tratamiento adicional. En tales casos, una ambulancia con otro personal de emergencia (equipo de enfermería y técnicos en emergencias sanitarias) puede ser enviada para acudir al lugar, pero no se envía a un/a médico/a de urgencias. Para dicho personal, es posible atender al herido sin la actuación de un facultativo, al tratarse de lesiones menores. En consecuencia, el personal médico de emergencias está disponible en caso de que se produzca otro incidente al mismo tiempo que requiera su intervención. Por tanto, la atención se presta en una única etapa, mediante una ambulancia sin medicalizar, como muestra la Figura 2.2.



Figura 2.2: Etapas de atención en el Escenario 1. Fuente: European Transport Safety Council

### Escenario 2. Colisión sin lesiones o con lesiones leves

A veces no es necesario trasladar a un herido a un centro médico tras una colisión, ya que puede que no haya lesiones o que estas sean leves. Si las lesiones son tratables *in-situ*, puede ser un/a médico/a de emergencias quien evalúe al paciente, sobre todo si se encuentra cerca del lugar del accidente. En ese caso, no es necesario alertar a una ambulancia, ya que el paciente se encuentra en un estado con poca gravedad que permite darlo de alta en el momento. Así pues, la atención se presta de nuevo en una única etapa, pero esta vez enviando tan solo un vehículo de respuesta rápida con el personal médico, como muestra la Figura 2.3.



Figura 2.3: Etapas de atención en el Escenario 2. Fuente: European Transport Safety Council

### Escenario 3. Si lo que parecía una lesión menor deteriora

En caso de que el estado de un paciente que había sido catalogado como “colisión con lesiones menores” deteriora repentinamente, el personal de la ambulancia formado por equipo de enfermería y técnicos de emergencias sanitarias puede llamar a un/a médico/a de emergencias que trabaje en el sistema *rendez-vous*. El personal médico puede acudir rápidamente a la escena del incidente en su vehículo de respuesta rápida para ayudar al personal de la ambulancia. Por tanto, el servicio se presta en dos etapas, con una ambulancia seguida de un/a médico/a en su vehículo de intervención rápida, como muestra la Figura 2.4.

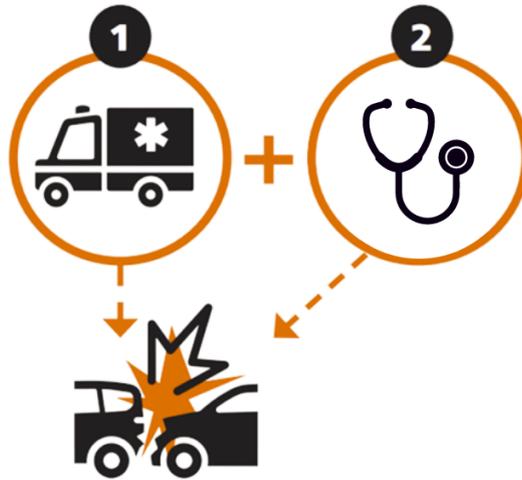


Figura 2.4: Etapas de atención en el Escenario 3. Fuente: European Transport Safety Council

#### **Escenario 4. Colisión seria con lesiones graves**

Si la colisión de tráfico provoca lesiones tan graves que se considera necesaria la intervención de personal médico de emergencias en el momento de la llamada, se envía una ambulancia y al mismo tiempo se avisa a un/a médico/a de emergencias. Una vez estabilizado el paciente, la ambulancia puede trasladarlo al hospital. En este punto, el personal médico de urgencias ha terminado la intervención necesaria y, a menos que se le necesite para acompañar al paciente en la ambulancia al hospital, está disponible para atender otra emergencia si es necesario. De esta forma, la atención se presta en dos fases, como muestra la Figura 2.5, ya que aunque se les avise al mismo tiempo, el personal médico suele llegar antes debido a que su vehículo se desplaza más rápido.



Figura 2.5: Etapas de atención en el Escenario 4. Fuente: European Transport Safety Council

Una vez vistas las diferentes situaciones a las que se puede dar respuesta con este sistema, es posible comprender sus múltiples ventajas [11] [1] [15] [16]:

- Ambulancia y personal médico pueden trabajar de manera independiente. Por tanto, es posible trabajar con un número de médicos inferior al número de ambulancias disponibles, y estos pueden proporcionar asistencia a múltiples incidentes.
- Ahorro en el tiempo que los médicos de emergencias destinan a cada incidente. En el sistema estacionario, se veían obligados a gastar valiosos minutos en acompañar al paciente al hospital, aún cuando no resultaba necesario. En el sistema *rendez-vous*, al disponer de su propio vehículo, pueden ir a atender otra emergencia al terminar la asistencia *in-situ*.
- En incidentes donde se da el cuarto escenario mencionado, permite a las ambulancias contar con mayor margen para llegar al lugar del accidente, ya que el personal médico llega de manera independiente y procede a estabilizar al herido.
- Al desplazarse en un vehículo más compacto, los médicos de emergencias pueden acudir más rápidamente a la escena de la emergencia.

El caso de España es algo particular. Como muestra la Tabla 2.1, cumple con todas las características para ser enmarcado en el modelo franco-alemán, a excepción de una: para hacer llegar al personal médico al lugar de la emergencia, usa un sistema estacionario en lugar del sistema *rendez-vous* [14].

	Sistema anglo-americano	Sistema franco-alemán	Sistema español
<b>Filosofía</b>	Llevar al paciente al hospital (recoger y correr)	Llevar el hospital al paciente (quedarse y estabilizar)	Llevar el hospital al paciente (quedarse y estabilizar)
<b>Proveedor de la atención médica</b>	Paramédicos	Médicos de emergencias	Médicos de emergencias
<b>Tipo de ambulancias usadas</b>	Terrestres	Terrestres y aéreas	Terrestres y aéreas
<b>Organización</b>	SEM perteneciente al sistema de seguridad pública	SEM perteneciente al sistema de salud pública	SEM perteneciente al sistema de salud pública
<b>Logística para transportar a los facultativos</b>	Sistema estacionario	Sistema <i>rendez-vous</i>	Sistema estacionario

Tabla 2.1: Comparativa entre sistemas en el mundo y sistema español. Fuente: Elaboración propia

Como se ha mencionado en la sección 1.2, el sistema de emergencias sanitarias en España, y en concreto en la provincia de Valencia, se encuentra ante un desabastecimiento de médicos de emergencias. Teniendo en cuenta las ventajas del sistema *rendez-vous* mencionadas, y sabiendo que el resto de países que comparten características con el sistema español trabajan con este sistema, en el capítulo 5 se propone un modelo para la adopción del sistema *rendez-vous* en la ciudad de Valencia.

Para ello, la cuestión se basa en gestionar la logística detrás de las ambulancias definidas en la sección 1.1 como de tipo C: se busca elegir dónde ubicar a los médicos y dónde ubicar a las ambulancias, de manera independiente. En el ámbito de la Investigación Operativa, este tipo de problema se conoce como problema de localización, en el caso de elegir las ubicaciones óptimas para el comienzo de un turno de trabajo, o problemas de relocalización, en caso de seleccionar la nueva ubicación óptima tras algún cambio en los recursos disponibles o en otro dato de entrada.

## 2.2. Introducción a la Investigación Operativa

La Investigación Operativa o Investigación de Operaciones es una herramienta cuantitativa y analítica para la resolución de problemas y la toma de decisiones mediante modelos matemáticos, estadística y algoritmos, aplicada a problemas empresariales. Como su propio nombre indica, parte de dos conceptos clave, *investigación* y *operaciones* [17]. El término *investigación* hace referencia a que esta disciplina toma un enfoque similar al de la investigación en ámbitos científicos, siguiendo las fases típicas del método científico – empezando por una atenta observación del problema que permita hacer una formulación inicial del problema a resolver, para a continuación construir un modelo científico, normalmente matemático. En esta fase, es muy importante asegurarse de que dicho modelo es una representación lo suficientemente precisa de la situación, para asegurar que las conclusiones obtenidas a partir del modelo sean también válidas en el problema real. Por último, se llevan a cabo los experimentos adecuados para poner a prueba la hipótesis inicial y modificarla en caso de que sea necesario. Sin embargo, cabe tener en cuenta que el término *operaciones* implica que esta disciplina se utiliza para coordinar y optimizar las operaciones de una organización.

Por tanto, es fundamental para la Investigación Operativa centrarse en la gestión práctica, por lo que deberá proporcionar conclusiones que puedan ser comprendidas por el ejecutor de la decisión. Así pues, el ámbito de aplicación de este campo es muy amplio, pudiendo ser de utilidad para multitud de industrias, como pueden ser la fabricación, el transporte, la construcción, las telecomunicaciones, la planificación financiera, la sanidad, el ejército y los servicios públicos, entre muchos otros [17].

Para la formulación del modelo matemático, aparecen ciertos elementos clave: las variables, la función objetivo, las restricciones y los parámetros [17].

- Las **variables** representan las decisiones cuantitativas cuyos valores deben determinarse. La solución al modelo matemático consistirá en determinar el valor óptimo de estas variables, ya que el valor adoptado por la función objetivo depende de ellas. Existen varios tipos de variable, según sea la decisión que se debe tomar: serán continuas si pueden tomar un valor real o discretas si su valor debe ser entero. Un caso particular de las variables discretas son las binarias, que solo pueden tomar los valores 1 ó 0, en función de si esa decisión "se hace", o bien "no se hace".
- La **función objetivo** representa aquello que se quiere optimizar. Puede ser de maximizar o minimizar, según sea el problema planteado. Dependerá de las variables y de los parámetros. Por tanto, el valor óptimo de las variables será aquel que maximice o minimice esta función objetivo.
- Las **restricciones** son los límites que se les imponen a las variables. Pueden alcanzar una gran complejidad, por lo que son el elemento clave para acercar lo más posible el modelo a la realidad. Son aquellas ecuaciones a las que están sujetas las variables, acotando el posible espacio de soluciones.
- Los **parámetros** son datos de entrada al problema. Son constantes que pueden acompañar a las variables tanto en la función objetivo como en las restricciones.

Con estos cuatro elementos, es posible formular cualquier modelo de programación lineal para resolver problemas de manera analítica gracias a la Investigación Operativa. En el capítulo 5 se hace uso de estos elementos para resolver el problema planteado.

## 2.3. Problemas de localización

Existe una serie de problemas considerados como típicos en la Investigación Operativa. Uno de ellos son los conocidos como problemas de localización. En este tipo de problema, la decisión a tomar es dónde ubicar una serie de ítems (servicios o instalaciones) a lo largo de cierta región, para cubrir las necesidades de cierto número de clientes. Para ello, se tienen en cuenta datos como la demanda de cada cliente, los costes que conlleva situar ese ítem

en cada ubicación posible o los costes (monetarios o temporales) de recorrer las distancias desde las ubicaciones hasta los clientes [18].

Existen varias formas de clasificar los problemas de este tipo. Una de ellas es la distinción entre problemas de localización continuos y discretos. Esta clasificación se basa en las posibles localizaciones de los ítems a ubicar. De esta forma, si estos ítems pueden colocarse en cualquier punto del área a estudiar, el problema será de localización continua, por lo que las posibilidades de ubicación pueden considerarse infinitas. Sin embargo, lo habitual es que ciertas restricciones impidan que cualquier punto esté disponible como localización, y que haya un número finito de ubicaciones posibles. En ese caso, este problema se clasifica como de localización discreto [18]. En el problema presentado en este Trabajo Final de Grado, la ubicación de los recursos sanitarios será un problema de localización discreto, como se explicará en la sección 3.3.

Otra clasificación, dentro del ámbito de los problemas de ubicación de vehículos de emergencias sanitarias, es la de problemas de localización estática y problemas de localización dinámica [18]. La principal diferencia entre ellas es la manera en que se tienen en cuenta los cambios a lo largo del tiempo. En un modelo de localización estática, las decisiones se toman optimizando la función objetivo para un momento fijo. Así pues, con este tipo de modelo puede determinarse la ubicación óptima de los recursos al inicio de la jornada de trabajo (localización), permitiendo también determinar una nueva asignación de los recursos si ocurre algún cambio en la demanda o en los recursos disponibles (relocalización). Por otro lado, un modelo de localización dinámica proporciona la ubicación óptima teniendo en cuenta la variable temporal, y los nuevos cambios que se darán a lo largo de cierto periodo de tiempo. Este último, en el ámbito de los vehículos de emergencias sanitarias implicaría tener en cuenta que, una vez los vehículos empiezan a desplazarse para atender a emergencias, podrían dejar descubierta alguna zona, o proporcionar cobertura en una zona donde antes no la había. En este Trabajo Final de Grado, el problema planteado es de localización estática, ya que el objetivo es determinar la ubicación óptima para los vehículos al inicio de una jornada laboral, permitiendo también realizar relocalizaciones si fuese necesario.

## 2.4. Problemas de cubrimiento

Dentro de los problemas de localización, pueden establecerse varios tipos de objetivo. Algunos ejemplos serían minimizar los costes de transporte o el tiempo destinado en llegar desde las instalaciones a los clientes. Sin embargo, para el problema planteado en este documento el objetivo es proporcionar atención al mayor número posible de ciudadanos, como se detallará en el capítulo 3. Por tanto, se tratará de un problema de cubrimiento. Existen dos enfoques para este tipo de problema: cubrimiento total y máxima cobertura. En el primero, se busca garantizar que toda la población esté cubierta. Esto se reflejará en el modelo matemático como una restricción, y la función objetivo perseguirá minimizar costes o número de recursos utilizados, por ejemplo. Sin embargo, en muchas situaciones

no es posible garantizar que toda la población esté cubierta. En estos casos aparecen los problemas de máxima cobertura, que tienen en cuenta que los recursos son limitados y se centrarán en buscar la mejor solución trabajando con los recursos disponibles. Por tanto, la función objetivo buscará maximizar el número de personas cubiertas, y habrá restricciones que reflejen esta limitación de recursos. Este último es el caso de las emergencias sanitarias, como se explicará en la sección 3.3, ya que con los recursos disponibles no es posible cubrir por vía terrestre a toda la población en el tiempo de respuesta estipulado, por lo que un problema de cubrimiento total no sería factible.

## Capítulo 3

# Descripción del problema

A lo largo de este capítulo, se detallarán diversos aspectos que se han tenido en cuenta a la hora de formular el modelo matemático descrito en el capítulo 5. Se tratarán los tipos de recursos asistenciales utilizados, la forma de cuantificar la demanda, la definición de las posibles bases a utilizar, la definición de isócrona, el uso de subregiones para la resolución del problema y, por último, se dará una visión general de los elementos del problema de Investigación Operativa descritos en la sección 2.2, aplicados al problema concreto.

### 3.1. Recursos utilizados

Tal y como se ha descrito en la sección 2.1, el tipo de personal del que disponen los vehículos es distinto en un sistema estacionario y en un sistema *rendez-vous*. Así pues, en el modelo actual en Valencia para las emergencias más graves se usa un solo vehículo, el SAMU, con un/a médico/a, un/a enfermero/a y un/a técnico/a en emergencias sanitarias. En este problema, para aplicar el sistema *rendez-vous*, se pasará a contar con dos vehículos, y el personal se repartirá entre ellos, tal y como muestra la Figura 3.1. Se dispondrá del SAMU convencional, pero que solo transportará al personal de enfermería y al técnico/a en emergencias sanitarias, y de otro vehículo en el que se trasladará el personal médico. Este último, en los países que utilizan el sistema *rendez-vous*, se conoce como *Rapid Responder*, cuyo equivalente en la Comunidad Valenciana son los Vehículos de Respuesta Rápida descritos en la sección 1.1. Este tipo de vehículo aparece en la descripción de recursos del SESCIV [5], pero no se especifica su asignación de la misma forma que los SAMU, SVA o SVB. Así pues, se considera como una opción viable para la posible adopción del sistema *rendez-vous* planteada en este documento.



Figura 3.1: Cambio en la disposición del personal sanitario. Fuente: Elaboración propia

La siguiente diferencia respecto al sistema estacionario será la definición del tiempo de respuesta, esto es, el tiempo límite en el que el vehículo debe poder llegar al lugar de la emergencia desde que sale de la base. Con un sistema estacionario, tan solo existía un tiempo de respuesta, ya que solo se cuenta con un vehículo. Sin embargo, en este caso aparecen dos tiempos de respuesta. Para el personal médico, desplazándose en su vehículo de respuesta rápida, se ha definido un tiempo de cinco minutos. Por otro lado, el vehículo con el personal de enfermería y el/la técnico/a en emergencias sanitarias tiene mayor margen, dado que el personal médico deberá estabilizar al paciente *in-situ*, y solo una vez acabado ese proceso será necesaria la presencia del segundo vehículo para el transporte del paciente. Por tanto, se ha definido un tiempo de ocho minutos para el vehículo de respuesta rápida.

### 3.2. Población y demanda

En un problema con estas características, uno de los datos de mayor importancia es la demanda de asistencia sanitaria. Es necesario proporcionar este dato de entrada al modelo matemático para determinar la mejor asignación de recursos, teniendo en cuenta en qué zonas surgen más emergencias. Sin embargo, este tipo de información no está abierta al público y además, presenta el problema de que es dinámica y haría necesario actualizar la información de entrada con mucha frecuencia. Por tanto, no resulta factible trabajar con la demanda de emergencias. Así pues, se plantea una alternativa, que es trabajar con la población, asumiendo que a mayor población residente en una zona, mayor será la demanda de emergencias. Se trata de una simplificación habitual y previamente utilizada en estudios similares, y es una información mucho más accesible, abierta a todo el público. En [19], se determina que existe un coeficiente de correlación de 0.995 entre estas dos variables, por lo que se acepta como simplificación el uso de la población.

### 3.3. Bases en la ciudad de Valencia

Otro dato de gran importancia son las posibles localizaciones para los vehículos. En el campo de las emergencias sanitarias, estas ubicaciones se conocen como bases. Sin embargo, no cualquier ubicación puede ser una base. Se trata del lugar donde el vehículo queda a la espera de nuevas llamadas de emergencia a las que acudir, por lo que deben reunir una serie de características, y permitir al vehículo reponer el material sanitario o desinfectarse. Así pues, suelen considerarse como posibles bases los hospitales y centros de salud de la zona, que son los centros sanitarios que reúnen los requerimientos establecidos. Por tanto, atendiendo a lo explicado en la sección 2.3, este problema pasa a categorizarse dentro de los problemas de localización discreta, ya que las posibles ubicaciones no están en cualquier lugar del espacio continuo, sino en puntos fijos.

Así pues, resulta necesario determinar cuáles son las posibles bases dentro de la zona de trabajo. Para este problema, esta se ha definido como la ciudad de Valencia, pero eliminando las zonas no pobladas. La metodología para esta selección queda recogida en la sección 4.3. De esta forma, se han detectado 36 potenciales bases en las zonas de la ciudad de Valencia que quedan dentro de la zona de trabajo, cuya ubicación se muestra en la Figura 3.2a, y son los hospitales y centros de salud de la ciudad. Sin embargo, la complejidad del modelo presentado en la sección 5.2 aumenta con el número de bases, ya que aumenta la combinatoria, por lo que se ha considerado conveniente reducir el número de bases, eligiendo de esta forma las 20 mejores, cuya ubicación se muestra en la Figura 3.2b. La metodología para esta selección queda explicada en el capítulo 4.

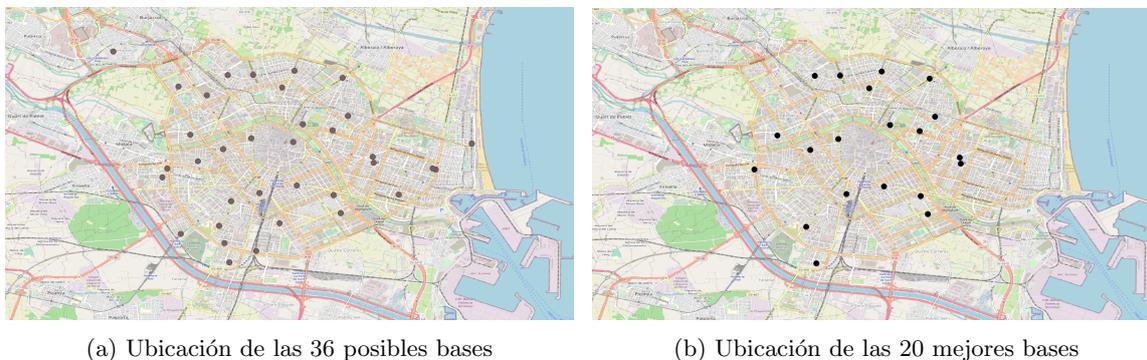


Figura 3.2: Bases en la ciudad de Valencia. Fuente: Elaboración propia

### 3.4. Isócronas

Una vez se han determinado los tiempos de respuesta para ambos tipos de vehículos, además de las potenciales bases donde situarse, es necesario conocer qué zonas de la ciudad pueden cubrirse desde cada base en el tiempo determinado. Para ello, se hace uso del

concepto de isócrona. Una isócrona representa el área de una cierta región que es posible alcanzar en un tiempo definido, haciendo uso de un medio de transporte determinado. Como se explica en la sección 4.3, la herramienta *ORS Tools* y el programa QGIS permiten dibujar y visualizar sobre un mapa las isócronas para cualquier tiempo definido y para distintos tipos de medio de transporte – coche, bicicleta o incluso a pie. Además, es posible también conocer la cantidad de población que cae dentro de la isócrona. En la Figura 3.3 se expone un ejemplo de isócronas para dos tiempos diferentes, partiendo desde un mismo punto, a modo ilustrativo. Para cada uno de los dos tiempos límite, la región sombreada con su respectivo color representa la isócrona, es decir, las zonas a las que resulta posible llegar dentro del tiempo establecido.

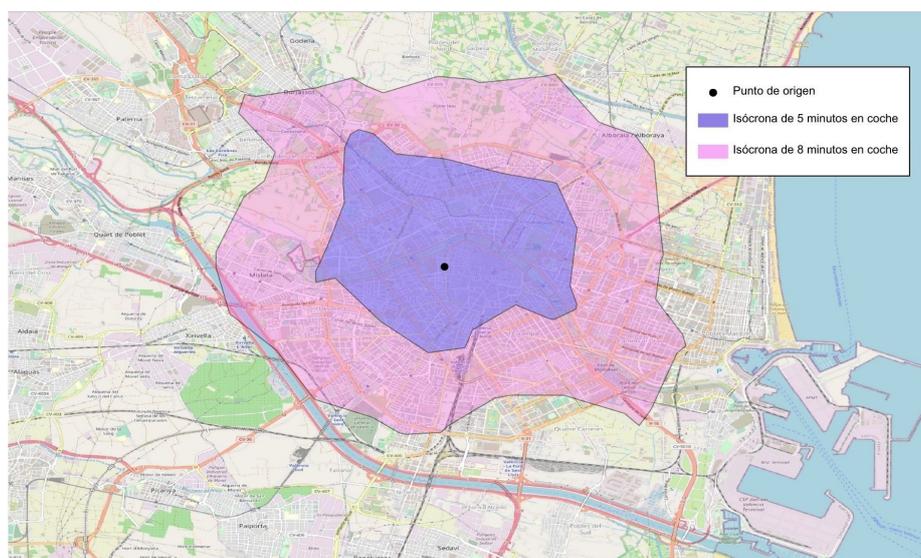


Figura 3.3: Ejemplo de isócronas de 5 y 8 minutos en coche. Fuente: Elaboración propia

Gracias a este concepto es posible conocer qué zonas de la ciudad se cubren en los tiempos de cinco y ocho minutos determinados en la sección 3.1, desde cada una de las bases seleccionadas en la sección 3.3. Esta información servirá como parámetros de entrada al modelo matemático. Además, esta funcionalidad de QGIS resulta sumamente útil para, una vez obtenida la solución final con las ubicaciones óptimas, observar el cubrimiento conseguido.

### 3.5. El problema de los solapamientos y el uso de subregiones

El siguiente paso en la resolución del problema de localización es definir la unidad territorial con la que se trabaja dentro del área de servicio, la ciudad de Valencia. Esto es relevante principalmente para determinar el cubrimiento que se consigue desde cada base.

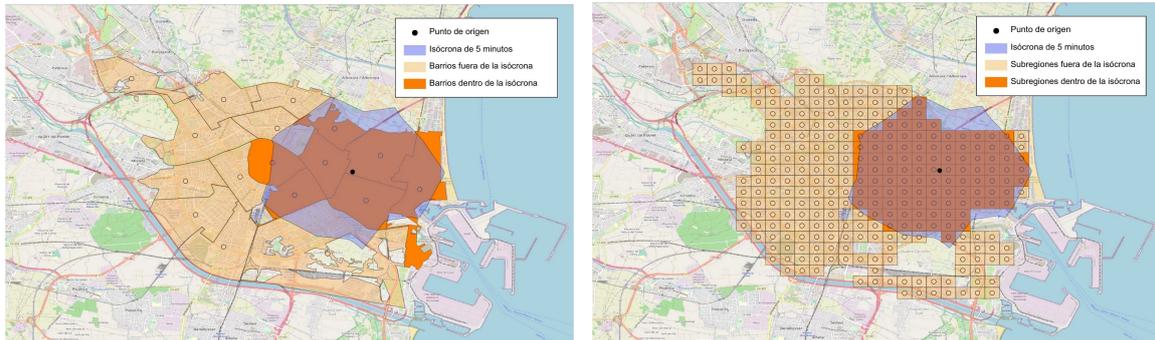


Población en la isócrona azul (A)	235.411 personas
Población en la isócrona verde (B)	164.141 personas
Población total sin tener en cuenta el solapamiento (A+B)	399.552 personas
Población en el área solapada (C)	113.812 personas
Población real (A+B-C)	285.740 personas

Tabla 3.1: Ejemplo de poblaciones cubiertas con y sin solapamiento. Fuente: Elaboración propia

Para dar solución a este problema, surge el concepto de **subregiones**, que son unidades territoriales de un cierto tamaño a definir. Gracias a ellas, se crea una forma alternativa de contar la población cubierta real. De esta forma, ya no se trabaja determinando directamente la cantidad de población que cubre una isócrona, sino que se establece un paso intermedio: a partir de la isócrona, se determina si cada subregión está cubierta. Por tanto, uno de los parámetros de entrada al modelo será una matriz de cubrimiento, que indique si cada subregión se puede cubrir en el tiempo establecido desde cada base. Dado que se conoce la población en cada subregión, es posible obtener así el total de población cubierta. Por tanto, se genera otra forma de conteo de la población, que es sumar el número de habitantes de todas las unidades territoriales con cubrimiento. La subregión se considerará cubierta independientemente de si es alcanzable desde una o varias bases, por lo que su población se contará una única vez, eliminando los problemas derivados por los solapamientos.

El siguiente aspecto en el que el uso de subregiones como unidad territorial resulta ventajoso se debe al hecho de que permite dividir el área de trabajo en unidades territoriales más pequeñas, del tamaño que se desee. Para ilustrar las ventajas de este aspecto, se hace uso de la Figura 3.5. En ella, se muestran dos formas de dividir el territorio: la Figura 3.5a lo hace a partir de los barrios, mientras que en la Figura 3.5b se hace a partir de subregiones. A partir de ambas definiciones de unidad territorial, se muestra un ejemplo de cubrimiento a partir de cierta base. Como se explica en la sección 4.3, en este problema la determinación de los cubrimientos se hace a partir del concepto de centroide, que es el centro geométrico de un polígono. Esto es, para cada región, esta se considerará cubierta desde cierta base si la isócrona contiene a su centroide. Por tanto, se asume, a modo de simplificación, que toda la población de una región está concentrada en su centroide. Así pues, en la Figura 3.5a puede observarse cómo, a partir de este criterio, existen zonas de algunos barrios que no están cubiertas, pero que el sistema considera cubiertas, al mismo tiempo que zonas que sí que reciben cobertura se consideran como descubiertas. Por tanto, la simplificación de los centroides no resulta del todo precisa. Sin embargo, al hacer uso de subregiones de la forma indicada en la Figura 3.5b, puede observarse que la determinación de los cubrimientos resulta mucho más precisa, ya que las áreas incorrectamente clasificadas como cubiertas o no cubiertas son mucho más pequeñas.



(a) Ejemplo de cubrimiento con barrios

(b) Ejemplo de cubrimiento con subregiones

Figura 3.5: Comparativa del efecto de la definición de unidad territorial. Fuente: Elaboración propia

Así pues, se comprueba que contar con unidades territoriales más pequeñas aumenta la precisión del modelo. Cabe notar que, cuanto más pequeña sea la subregión, más exacto y realista será el modelo. Sin embargo, requerirá de una capacidad computacional mayor, ya que aumentará el número de subregiones necesarias para cubrir una misma área. Podría dividirse el territorio en infinitos puntos, de forma que tendría la máxima precisión posible, pero la resolución del modelo sería inviable. Por tanto, al elegir el tamaño de la subregión, se busca encontrar un buen compromiso entre realismo y complejidad. De esta forma, se ha elegido trabajar con una cuadrícula en la que cada subregión comprende un área de quinientos metros por quinientos metros, disponiendo de un total de 284 subregiones.

### 3.6. Definición de cubrimiento y limitaciones de cobertura

A la hora de construir el modelo matemático, es determinante decir qué se entiende por cobertura. En los modelos clásicos que seguían el sistema estacionario, quedaba claro que una zona se consideraba cubierta si el SAMU podía llegar en el tiempo establecido. Sin embargo, en el sistema *rendez-vous* se cuenta con dos vehículos diferentes. Para este Trabajo Final de Grado, se ha considerado adecuado trabajar con los escenarios 3 y 4 de los explicados en la sección 2.1, en los que es necesaria la intervención de personal médico y de un SAMU. Así pues, se consideran cubiertas las subregiones a las que el personal médico pueda llegar en cinco minutos, y un SAMU en ocho minutos. Deben cumplirse ambas condiciones para considerarse cubierta.

En esta situación, puede comprobarse que el recurso limitante son los médicos, ya que su isócrona es más pequeña que la de los SAMU, y hay menor disponibilidad de médicos que de vehículos. Teniendo esto en cuenta, se puede comprobar que, con la definición de subregiones, los tiempos límites establecidos y las posibles bases seleccionadas, no es posible alcanzar todas las subregiones en el tiempo estipulado ni aún disponiendo de un/a médico/a en cada base – situación que en todo caso resultaría inviable, por la limitación de recursos.

En la Figura 3.6 se puede comprobar que, en concreto, son 16 las subregiones que no se pueden cubrir desde ninguna base. Así pues, del total de la población que reside en la ciudad de Valencia, hay un cierto número que no es alcanzable dentro de los límites definidos. En la Tabla 3.2 se recoge la información del número total de habitantes que pueden y que no pueden recibir cobertura en el tiempo establecido. Para estos últimos casos, la atención sanitaria ante una emergencia se prestaría en un tiempo de respuesta superior.

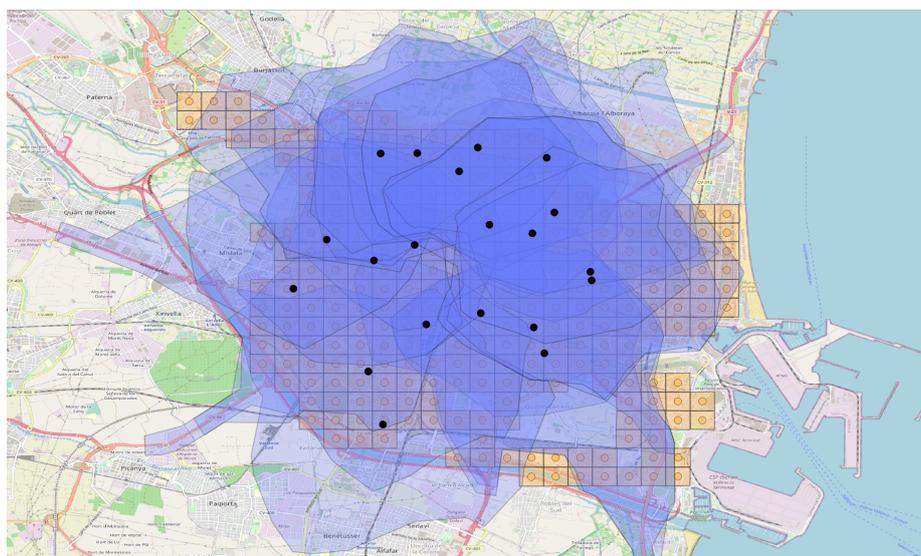


Figura 3.6: Límite de cubrimiento. Fuente: Elaboración propia

Población total	607.138 personas
Población a la que es posible cubrir	581.327 personas
Población imposible de cubrir	25.811 personas

Tabla 3.2: Valores de población total, población a la que es posible cubrir y población imposible de cubrir. Fuente: Elaboración propia

Por tanto, según lo explicado en la sección 2.4, se concluye que este problema puede categorizarse como problema de cubrimiento máximo, ya que la cobertura total es infactible. Se tratará de cubrir al número máximo de personas posible a partir de ciertos recursos limitados.

### 3.7. Variables, función objetivo, restricciones y parámetros

Una vez estudiadas todas las particularidades del problema, ya es posible definir los elementos necesarios para expresar el problema como un modelo de programación matemática:

las variables, la función objetivo, las restricciones y los parámetros, de forma que el modelo seleccione de entre las posibles bases las ubicaciones para los médicos y para las ambulancias para maximizar la población cubierta.

- La decisión a tomar será si se ubica o no una persona del equipo médico y/o una ambulancia en cada base. Por tanto, las **variables** del modelo serán de tipo binario, y habrá dos por cada base, ya que se tiene que tomar la decisión tanto para médicos como para ambulancias. Además, habrá una serie de variables auxiliares encargadas de determinar las coberturas.
- Al tratarse de un problema de cubrimiento máximo, tal y como se ha concluido en la sección 3.6, la **función objetivo** consistirá en maximizar el número de personas cubiertas.
- Las **restricciones** representan las limitaciones del problema, por lo que tratarán de establecer el límite máximo de personal médico y de SAMUs disponibles. También habrá una serie de restricciones encargadas de activar las variables auxiliares para el tratamiento de las coberturas.
- Habrá diversos **parámetros**, que son los datos de entrada al modelo. A parte de la disponibilidad de médicos y de SAMU, será necesario proporcionar al modelo la población en cada subregión, además de las matrices de cubrimiento para cada tiempo definido y desde cada base. La obtención de estos dos últimos es posible gracias a QGIS. En la sección 4.3 se desarrolla el proceso de obtención de estos datos.

## Capítulo 4

# Metodología

### 4.1. Software QGIS

QGIS, del inglés *Quantum Geographic Information System* [20], es un sistema de información geográfica y código abierto. Se trata de un software muy potente para trabajar con mapas e información geográfica, y cuenta con una gran diversidad de herramientas de proceso. Además, cuenta con una comunidad activa de usuarios y desarrolladores que contribuyen con complementos y mejoras continuas al software. En QGIS, el concepto fundamental para organizar y trabajar con datos geoespaciales es la capa, que es una representación digital de un conjunto de datos geográficos que se superpone en un mapa. Con las herramientas que proporciona QGIS, es posible crear y editar estas capas, siendo posible combinar capas o añadir, modificar o eliminar atributos, además de posibilitar la exportación de estas capas a otros formatos para su posterior tratamiento. Las capas pueden clasificarse en dos grupos: las capas vectoriales y las capas ráster. Las primeras representan los datos geográficos mediante puntos, líneas y polígonos. Por tanto, estas capas estarán conformadas por las coordenadas X e Y de su geometría, además de sus atributos. Por otro lado, las capas ráster representan los datos geográficos como una matriz de celdas o píxeles, donde cada uno de estos píxeles tiene un valor que representa un atributo específico, como puede ser la población.

La Tabla 4.1 contiene el resumen de las capas utilizadas para la resolución de este problema.

Capa	Tipo	Descripción
OpenStreetMap	Ráster	Mapa base sobre el que se visualizan los elementos
Capa con las 36 posibles bases en Valencia	Vectorial	Contiene todas las posibles bases en la ciudad de Valencia
Capa con las 20 mejores bases en Valencia	Vectorial	Contiene las 20 mejores bases, seleccionadas de entre las 36
Capa con el área poblada de la ciudad	Vectorial	Contiene las áreas pobladas divididas por barrios de Valencia
Capa de cuadrícula	Vectorial	Representa las 284 subregiones en Valencia
Capa de centroides	Vectorial	Contiene los centroides de cada subregión
Capa de población de la Comisión Europea	Ráster	Capa usada para la extracción de datos de la población por subregión
Isócronas de 5 y 8 minutos	Vectorial	Representa el alcance geográfico desde cada base

Tabla 4.1: Concepto, tipo y descripción de las capas utilizadas en QGIS. Fuente: Elaboración propia

## 4.2. OpenSolver y CPLEX

Para resolver los modelos matemáticos planteados, es necesario un software de optimización. Para ello, en este Trabajo Final de Grado se ha hecho uso de dos softwares diferentes: OpenSolver y CPLEX. Por un lado, OpenSolver [21] es una herramienta de optimización de código abierto para hojas de cálculo de Microsoft Excel que permite resolver problemas de optimización lineal, entera y mixta entera directamente desde Excel. Para ello, hace uso de solucionadores externos. Para este problema, la resolución del caso hipotético se hace en primer lugar haciendo uso de OpenSolver. El siguiente paso es pasar el modelo a CPLEX. CPLEX es un potente solucionador de optimización comercial desarrollado por IBM [22]. Se utiliza para resolver problemas de gran escala, ya que utiliza algoritmos avanzados de optimización. Para utilizar el solucionador de CPLEX, se hace uso de la librería docplex en Python. De esta forma, las variables, función objetivo, restricciones y parámetros del modelo se introducen en un script de Python, y este se resuelve haciendo uso de las capacidades de CPLEX. La segunda fase de este problema, la resolución del caso real, se implementa en Python para solucionarlo con el algoritmo de CPLEX, ya que presenta una complejidad mayor.

## 4.3. Algoritmo de resolución y obtención de datos

La resolución de este problema se ha planteado en varias fases progresivas, con tal de ir ampliando el nivel de realismo del modelo. Para ello, como primer acercamiento al problema se plantea un caso hipotético, que permite contar con datos de entrada más simples y poder así desarrollar el modelo matemático con mayor facilidad. Contando con este ejemplo simplificado, resulta mucho más sencillo desarrollar el modelo de programación lineal que da respuesta al problema planteado. Tras desarrollar dicho modelo, en una primera fase se

resuelve haciendo uso de OpenSolver, la herramienta de optimización que incorpora Excel explicada en la sección 4.2. Una vez resuelto, el siguiente paso es introducir el modelo en Python para resolverlo haciendo uso de CPLEX, software también presentado en la sección 4.2. CPLEX es capaz de dar solución a modelos que requieran de una capacidad computacional mucho mayor, por lo que resulta necesario contar con el algoritmo en esta plataforma para poder resolver situaciones reales, donde el número de variables y de restricciones crece significativamente. Adicionalmente, contar con la resolución en ambas plataformas supone una herramienta de verificación adicional, ya que permite corroborar que la solución obtenida en ambos casos es la misma. Tras todo este proceso, se puede proceder a analizar la solución con los datos obtenidos. Como se detalla en la sección 5.1, esta verificación previa permite identificar ciertas particularidades del modelo que no quedaban reflejadas en la propuesta inicial, de forma que se adapta el modelo para contemplarlas. Así pues, se procede a resolver de nuevo el caso hipotético con este segundo modelo de programación lineal, tanto en Excel como en CPLEX, comprobando de nuevo que la solución obtenida por ambos métodos coincide. Todo este proceso queda detallado en la sección 5.1.

La siguiente fase es la resolución del caso real. El modelo matemático desarrollado a partir del caso hipotético es generalizable para cualquier situación, por lo que no es necesario modificarlo. Por ello, en esta fase la clave es la obtención de los datos, ya que un caso real conlleva una complejidad mayor. Así pues, en esta fase se debe determinar:

- Cuáles son las posibles bases disponibles. Como se ha especificado en la sección 3.3, se parte de una lista de 36 hospitales y centros de salud ubicados en la ciudad de Valencia, que posteriormente se reduce hasta quedar con 20 posibles bases. La información sobre las bases y su ubicación se extrae del Portal Estadístico de la *Conselleria de Sanitat Universal y Salut Pública* [23]. Para la selección de las mejores bases, el procedimiento seguido ha consistido en dibujar las isócronas de 5 minutos desde cada base, y de entre todas ellas se han seleccionado las 20 que cubrían la mayor población en 5 minutos. Para trazar las isócronas, se hace uso de la herramienta *ORS Tools* proporcionada por *OpenRouteService* [24].
- La delimitación de las subregiones. Dado que el área de trabajo es la ciudad de Valencia, en un primer paso se crea una capa en QGIS que contiene los barrios de la ciudad. Para la creación de esta capa, se ha realizado una superposición de dos capas proporcionadas por el Instituto Cartográfico Valenciano [25], donde una de ellas contiene los barrios de Valencia y otra incluye el uso del suelo. De esta forma, se escogen solo aquellas zonas categorizadas como urbanas, en las que residen personas. La Figura 4.1a muestra la capa obtenida tras dicha superposición. Sin embargo, como se ha visto en la sección 3.5, la unidad territorial de trabajo no son los barrios, si no las denominadas subregiones. Por tanto, haciendo uso de las herramientas de QGIS, se crea una cuadrícula sobre el área metropolitana de la ciudad, donde cada cuadrado representa una subregión. Esta capa con la cuadrícula se muestra en la Figura 4.1b, donde hay 284 subregiones de quinientos metros por quinientos metros. Por último, se

crea una capa con los centroides de cada una de estas subregiones, como se muestra en la Figura 4.1c. Estos centroides son el punto central de cada cuadrado, y son de utilidad para determinar las matrices de cubrimiento, como se verá más adelante.

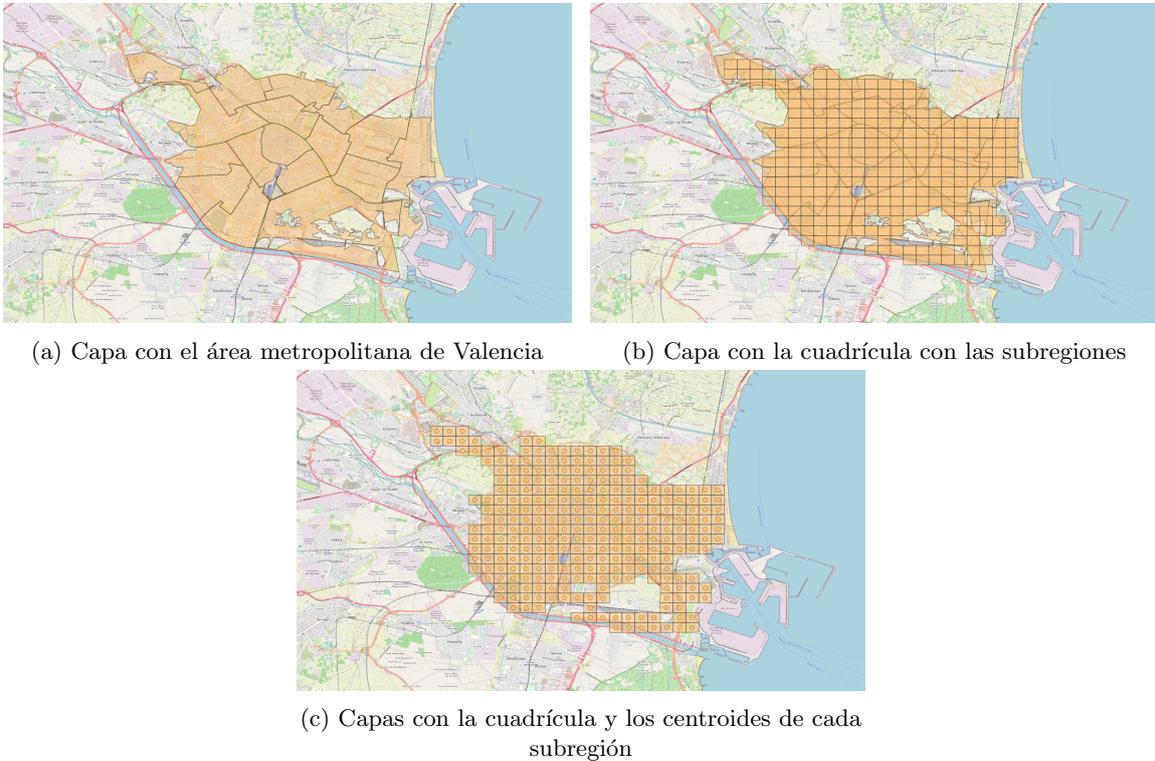


Figura 4.1: Capas utilizadas en QGIS para la delimitación de las subregiones. Fuentes: Intituto Cartográfico Valenciano y Elaboración propia

- La población en cada subregión. Es necesario proporcionar al modelo la información del número de habitantes que residen en cada área de la cuadrícula. Para ello, se hace uso de una capa ráster proporcionada por la Comisión Europea [26]. Mediante un algoritmo específico de QGIS que permite extraer la población para cualquier polígono, se asigna la población correspondiente a cada subregión.
- Las matrices de cubrimiento. Estos son los datos cuya obtención resulta más compleja. En concreto, deben rellenarse las matrices detalladas en la sección 5.2, especificando para cada pareja de subregión y base, si esa subregión se puede cubrir desde esa base en el tiempo estipulado. Al haber 284 subregiones y 20 bases, la matriz tiene unas dimensiones de 284 filas y 20 columnas. Como se ha explicado en la sección 3.1, los médicos y las ambulancias cuentan con tiempos objetivo diferentes para llegar al lugar de la emergencia, por lo que esta matriz deberá rellenarse por doble: una vez para determinar el cubrimiento de los médicos, y otra para determinar el cubrimiento

de las ambulancias. Para ello, el primer paso es la obtención de los datos, que se extraen haciendo uso de QGIS y se almacenan en una serie de hojas de cálculo. El proceso seguido se detalla a continuación. Para cada una de las bases, se traza la isócrona de cinco u ocho minutos, según se esté rellenando la matriz de los médicos o la de las ambulancias. Una vez trazada, se hace uso de la capa de los centroides para seleccionar solo aquellos que intersequen con la isócrona. Para ello, se asume que toda la población de la subregión está concentrada en el centroide. Con esa simplificación, es posible decidir si una subregión está cubierta o no según si su centroide está contenido en la isócrona. La Figura 4.2 muestra un ejemplo de este proceso.

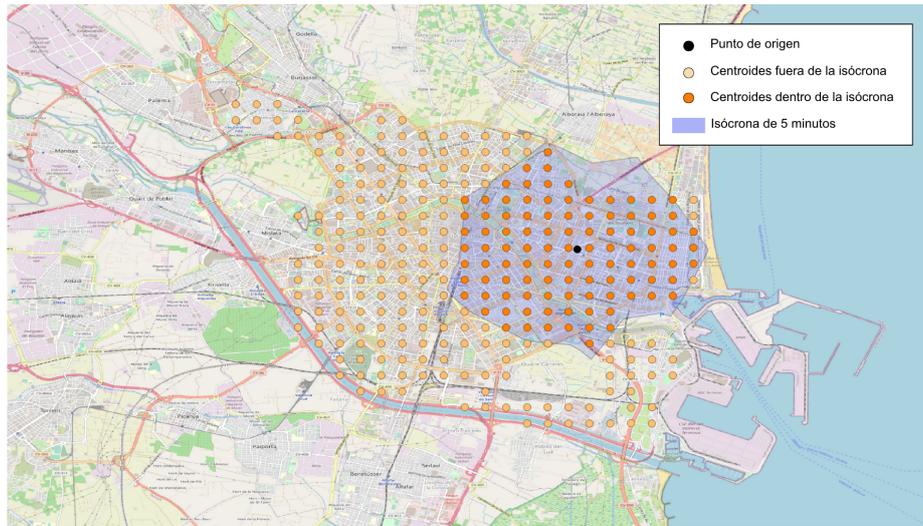


Figura 4.2: Ejemplo del proceso de rellenado de la matriz. Fuente: Elaboración propia

A continuación, cuando se tienen seleccionadas las subregiones cubiertas por esa isócrona, se exporta la capa de centroides filtrando solo por los seleccionados. De esta forma, se crea una hoja de cálculo con la lista de subregiones cubiertas desde esa base. Este proceso se repite para cada base, de forma que finalmente se cuenta con dos archivos por base, ya que se debe repetir el proceso para los dos tiempos de isócrona. Una vez se dispone de todos los datos, se programa un algoritmo en Python que permite automatizar el rellenado de las matrices. Así, se incluye un 1 en la posición correspondiente en la matriz si la subregión aparece en la lista de subregiones cubiertas desde la base, y un 0 en caso de que no aparezca.

Una vez se dispone de los datos, es posible ya resolver el caso real. Así pues, se introducen estos datos en el código en Python, para posteriormente optimizar la localización de los recursos con el algoritmo de CPLEX.

## Capítulo 5

# Modelo matemático y resultados

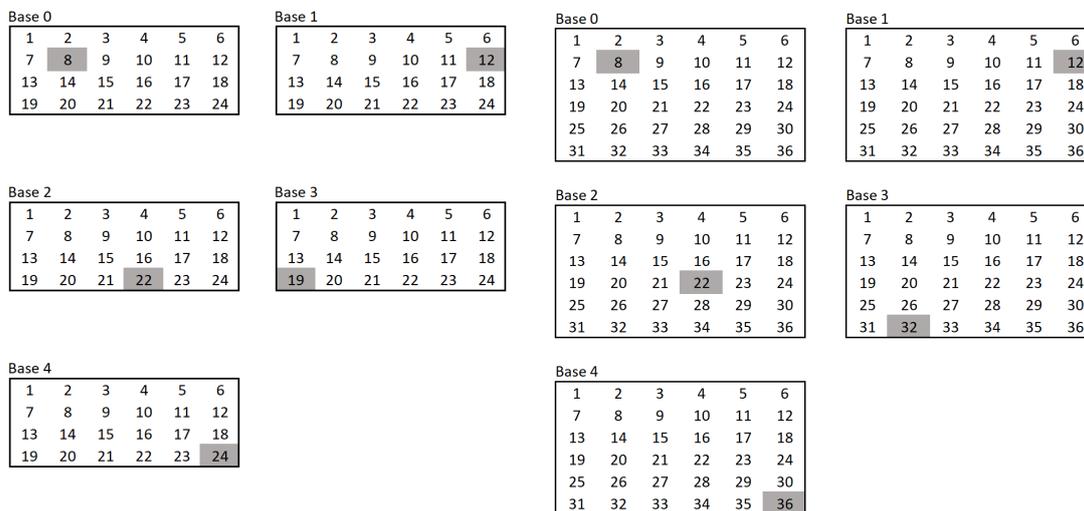
A lo largo de este capítulo, se detalla el desarrollo seguido para plantear el modelo matemático, incluyendo la resolución y el análisis de los resultados. Este proceso se estructura en dos fases, comenzando por la resolución de un caso hipotético, con datos de entrada ficticios que simplifican y facilitan el planteamiento. De esta forma, se desarrolla un modelo matemático que es extrapolable a cualquier otro caso. Por tanto, a continuación se introducen en dicho modelo los datos de entrada reales de la ciudad de Valencia, resolviendo así un caso mucho más realista.

### 5.1. Modelo y resolución de caso hipotético

La primera fase consiste en el análisis, planteamiento y resolución de un caso hipotético. Para ello, se parte de unos datos ficticios, que sirven para desarrollar una herramienta generalizable aplicable al caso real. Se analizan dos situaciones: un primer caso con 24 subregiones y un segundo con 36 subregiones. Los datos a definir se enumeran a continuación.

- **Disponibilidad de médicos.** En ambos casos, se trabajará con una disponibilidad de 2 médicos/as.
- **Disponibilidad de ambulancias.** En ambos casos, se contará con 3 vehículos SAMU disponibles.
- **Subregiones.** Como se ha mencionado, en uno de los dos casos habrá 24 subregiones, ubicadas en una cuadrícula de 4 por 6 celdas, como se verá a continuación, e identificadas por un número del 1 al 24; en el otro habrá 36 subregiones, ubicadas en una cuadrícula de 6 por 6 celdas e identificadas por un número del 1 al 36.
- **Número de bases y ubicación.** En ambas situaciones habrá 5 posibles bases, donde se podrán ubicar médico/a o ambulancia, o ambos a la vez. Sin embargo, la distri-

bución de estas bases es distinta para los dos casos. En la Figura 5.1a se muestra la ubicación de las posibles bases para el caso con 24 subregiones, mientras que en la Figura 5.1b se muestra en el caso de las 36 subregiones, donde la ubicación de la base aparece representada con un cuadro sombreado en cada caso.

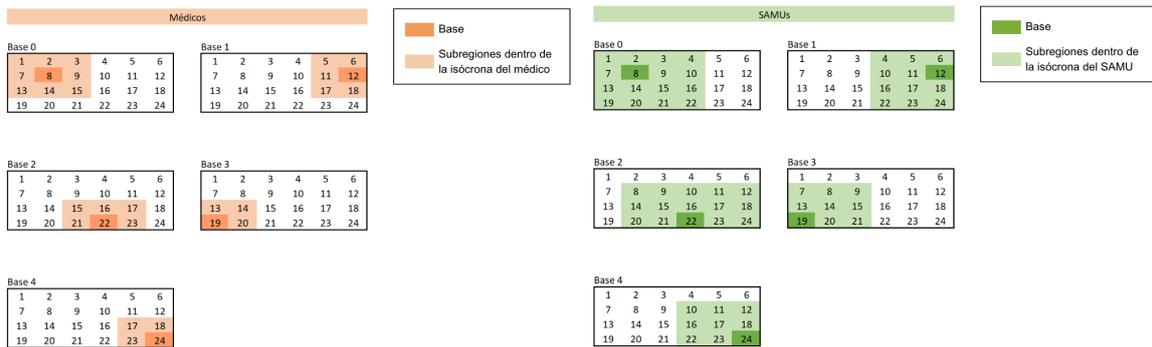


(a) Ubicación de las bases en el caso con 24 subregiones

(b) Ubicación de las bases en el caso con 36 subregiones

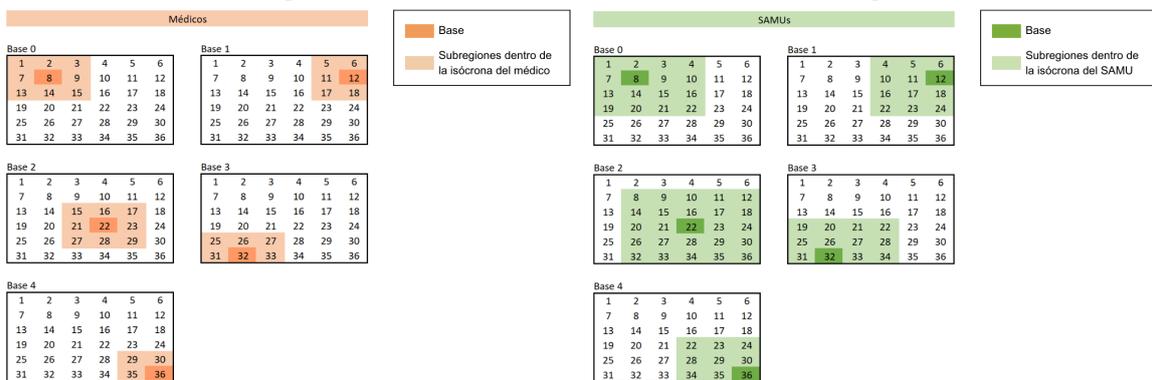
Figura 5.1: Ubicación de las posibles bases en el caso hipotético. Fuente: Elaboración propia

- Cubrimiento.** Para este supuesto, al tratarse de un caso hipotético, no se trabaja con los tiempos de viaje para establecer el alcance de la isócrona, si no que se definen directamente las áreas de cobertura, teniendo en cuenta que las ambulancias deben tener una isócrona mayor, al disponer de más tiempo para llegar a la escena de la emergencia. Así pues, se determina que la cobertura de los médicos será de una celda, y el alcance de las ambulancias será de dos celdas, en horizontal, vertical, diagonal o combinación de ambas. De esta forma, las Figuras 5.2a y 5.2b reflejan las coberturas de médicos y SAMUs, respectivamente, para el caso de las 24 subregiones, en función de la base en la que sean colocados. Por otro lado, las Figuras 5.2c y 5.2d muestran estos mismos datos para el caso de las 36 subregiones.



(a) Cobertura de médicos para el caso de 24 subregiones

(b) Cobertura de SAMUs para el caso de 24 subregiones



(c) Cobertura de médicos para el caso de 36 subregiones

(d) Cobertura de SAMUs para el caso de 36 subregiones

Figura 5.2: Coberturas en el caso hipotético. Fuente: Elaboración propia

- Población.** Por último, es necesario definir el número de habitantes en cada subregión. La Figura 5.3 refleja esta información, donde para el caso de 24 subregiones se han tomado números aleatorios, mientras que en el caso de 36 subregiones se ha tomado de forma creciente. Este último método ayuda a comprobar que la solución sea lógica, ya que los recursos deberán destinarse a subregiones con valores más altos.

Subregión	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Población	23	11	14	15	16	17	30	23	8	6	11	14	18	8	17	26	21	24	7	26	11	30	29	21

(a) Población en el caso con 24 subregiones

Subregión	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Población	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36

(b) Población en el caso con 36 subregiones

Figura 5.3: Población por subregión en el caso hipotético. Fuente: Elaboración propia

A partir de este caso hipotético planteado, es posible proponer un modelo matemático

que proporcione la ubicación óptima para médicos y ambulancias. Este primer modelo es el presentado a continuación.

<b>Datos y conjuntos</b>	
$m$	Número de médicos disponibles.
$n$	Número de SAMUs disponibles, con $m \leq n$ .
$b$	Número de potenciales bases.
$s$	Número de subregiones a cubrir.
$\mathcal{B}$	Conjunto de potenciales bases, esto es, $\{1, \dots, b\}$ .
$\mathcal{S}$	Conjunto de subregiones a cubrir, esto es, $\{1, \dots, s\}$ .
$\alpha$	Tiempo máximo de llegada del personal médico desde su base.
$\beta$	Tiempo máximo de llegada del SAMU desde su base.
$p_l$	Población de la subregión $l \in \mathcal{S}$ .
$q_{kl}^M$	1 si se llega desde la base $k \in \mathcal{B}$ a la subregión $l \in \mathcal{S}$ en a lo más $\alpha$ minutos; 0 en otro caso.
$q_{kl}^A$	1 si se llega desde la base $k \in \mathcal{B}$ a la subregión $l \in \mathcal{S}$ en a lo más $\beta$ minutos; 0 en otro caso.

Tabla 5.1: Parámetros del modelo propuesto. Fuente: Elaboración propia

Con estos datos, se definen las dos constantes siguientes, necesarias para definir las restricciones (6) y (7) del modelo:

$$M_l^M = \min \left\{ m, \sum_{k \in \mathcal{B}} q_{kl}^M \right\} \quad \forall l \in \mathcal{S} \quad (1)$$

$$M_l^A = \min \left\{ n, \sum_{k \in \mathcal{B}} q_{kl}^A \right\} \quad \forall l \in \mathcal{S} \quad (2)$$

<b>Variables</b>	
$X_k$	1, si se asigna un/a médico/a a la base $k \in \mathcal{B}$ ; 0, en otro caso.
$Y_k$	1, si se asigna un SAMU a la base $k \in \mathcal{B}$ ; 0, en otro caso.
$Z_l^M$	1, si la subregión $l \in \mathcal{S}$ está cubierta por al menos un/a médico/a; 0, en otro caso.
$Z_l^A$	1, si la subregión $l \in \mathcal{S}$ está cubierta por al menos un SAMU; 0, en otro caso.
$Z_l$	1, si la subregión $l \in \mathcal{S}$ está cubierta por al menos un/a médico/a y un SAMU; 0, en otro caso

Tabla 5.2: Variables del modelo propuesto. Fuente: Elaboración propia.

**Función Objetivo:**

$$\text{Maximizar } \sum_{l \in \mathcal{S}} p_l Z_l \quad (3)$$

**sujeto a:**

$$\sum_{k \in \mathcal{B}} X_k = m \quad (4)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{B}} Y_k = n \quad (5)$$

$$Z_l^M \leq \sum_{k \in \mathcal{B}} q_{kl}^M X_k \leq M_l^M Z_l^M \quad \forall l \in \mathcal{S} \quad (6)$$

$$Z_l^A \leq \sum_{k \in \mathcal{B}} q_{kl}^A Y_k \leq M_l^A Z_l^A \quad \forall l \in \mathcal{S} \quad (7)$$

$$Z_l^M + Z_l^A \leq Z_l + 1 \quad \forall l \in \mathcal{S} \quad (8)$$

$$Z_l \leq Z_l^M \quad \forall l \in \mathcal{S} \quad (9)$$

$$Z_l \leq Z_l^A \quad \forall l \in \mathcal{S} \quad (10)$$

$$X_k, Y_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in \mathcal{B} \quad (11)$$

$$Z_l^M, Z_l^A, Z_l \in \{0, 1\} \quad \forall l \in \mathcal{S} \quad (12)$$

En este modelo, los parámetros recogidos en la Tabla 5.1 son todos los datos de entrada necesarios para su resolución. Se debe proporcionar la información relativa al número de médicos, el número de SAMUs, el número de posibles bases y su ubicación, el número de subregiones con las que se trabaja, la población en cada subregión y, por último, los tiempos máximos de llegada, que a su vez sirven para determinar los cubrimientos. Estos cubrimientos vienen dados por  $q_{kl}^M$  y  $q_{kl}^A$ , y se introducen en forma de dos matrices de dimensiones  $l \times k$ . Es decir, se debe indicar para cada subregión  $l$  si esta puede ser cubierta desde la base  $k$  en el tiempo determinado.

Respecto a las variables, recogidas en la Tabla 5.2, el modelo propuesto presenta dos tipos. El primero de ellos son las variables de decisión, esto es, las que proporcionan la decisión óptima a tomar. Estas serán  $X_k$  e  $Y_k$ , que indican si se sitúa un/a médico/a o un SAMU en la base  $k$ , respectivamente. Por otro lado, aparece una serie de variables auxiliares,  $Z_l^M$ ,  $Z_l^A$  y  $Z_l$ , cuyo objetivo es determinar si la subregión  $l$  está cubierta y que se activarán gracias a una serie de restricciones. Así pues, la expresión (3) recoge la función objetivo, que consiste en maximizar la población cubierta, por lo que hace uso de la variable  $Z_l$  para que en el total calculado solo se incluyan las subregiones que reciben cobertura por parte de al menos una persona del equipo médico y de al menos un SAMU simultáneamente. De esta forma, el modelo asignará los recursos disponibles de forma que se maximice la población cubierta.

Por último, aparecen las restricciones. La restricción (4) establece que tan solo se pueden asignar  $m$  médicos. La restricción (5) es la análoga para el caso de las ambulancias,

permitiendo asignar  $n$  SAMUs. Las restricciones (6), (7), (8), (9) y (10) se encargan de la activación de las variables auxiliares. Cabe destacar que estas restricciones se repiten para cada subregión existente, por lo que aparecerán  $s$  veces. Con ello, es posible comprobar que el tamaño y la complejidad del modelo a resolver dependen en gran medida del número de subregiones existente, por lo que resulta muy importante elegir un número de subregiones de trabajo que proporcionen un grado de complejidad aceptable. Así pues, la restricción (6) hace que la variable  $Z_l^M$  tome el valor 1 si la subregión  $l$  está cubierta por algún/a médico/a. De la misma forma, la restricción (7) hace que la variable  $Z_l^A$  tome el valor 1 si la subregión  $l$  está cubierta por algún SAMU. Por último, las restricciones (8), (9) y (10) hacen que la variable  $Z_l$  tome el valor 1 tan solo en el caso de que  $Z_l^M$  y  $Z_l^A$  sean 1 para esa subregión  $l$ . Esto viene dado por la definición de cubrimiento determinada en la sección 3.6, donde se determina que una subregión solo se considera cubierta si una persona del equipo médico y una ambulancia están disponibles para llegar en el tiempo máximo establecido. Las restricciones (11) y (12) indican que todas las variables son binarias, esto es, que solo pueden tomar los valores 1 o 0.

Las restricciones (6) y (7), presentan una particularidad: las constantes  $M_l^M$  y  $M_l^A$ . En la Investigación Operativa, es común trabajar con restricciones en las que aparece la llamada *Big M*, una constante de valor "muy grande". Sin embargo, resulta recomendable ajustar el valor de esta  $M$  con tal de optimizar el método de resolución. Por ello, al definir los datos y conjuntos del modelo matemático, se determina el cálculo de estas constantes. En el caso de  $M_l^M$  presente en la restricción (6), se conoce por una lado que la suma de las  $X_k$  no podrá ser superior al número de médicos  $m$ , por la restricción (4), y que por otro lado,  $\sum_{k \in \mathcal{B}} q_{kl}^M X_k$  será como máximo la suma de las  $q_{kl}^M$ , dado que estas están multiplicadas por variables binarias. De esta forma, se determina que la *Big M* no podría tomar un valor superior al expresado en la ecuación (1). Lo mismo ocurre con la constante  $M_l^A$ , para el caso de las ambulancias.

En cuanto a las restricciones (6) y (7), se detectan algunos casos especiales en relación con el caso hipotético planteado. Para el caso de (6), se observa que  $\sum_{k \in \mathcal{B}} q_{kl_0}^M = 0$  para algún  $l_0 \in \mathcal{S}$ . En este caso,  $q_{kl_0}^M = 0$  para todo  $k \in \mathcal{B}$ , esto es, la subregión  $l_0$  no puede alcanzarse desde ninguna base en el tiempo requerido. Entonces, la restricción (6) se puede sustituir por:

$$Z_{l_0} = Z_{l_0}^M = 0 \quad (13)$$

En particular, las subregiones que se encuentran en esta situación pueden identificarse observando las Figuras 5.2a, para el caso de las 24 subregiones, y la 5.2c para el caso de 36 subregiones. Así pues, para la primera situación las subregiones que no se pueden cubrir desde ninguna base son la 4 y la 10. Para el caso con 36 subregiones, son la 4, 10, 19, 20, 24 y 34. Para esas subregiones, la restricción (6) se sustituiría por la restricción (13).

Por otro lado, se observa también que  $\sum_{k \in \mathcal{B}} q_{kl_0}^M = 1$  para algún  $l_0 \in \mathcal{S}$ . En este caso,  $q_{k_0 l_0}^M = 1$  para algún  $k_0 \in \mathcal{B}$  y  $q_{kl_0}^M = 0$  para todo  $k \in \mathcal{B} \setminus \{k_0\}$ , esto es, la subregión  $l_0$  solo puede alcanzarse desde la base  $k_0$  en el tiempo requerido. Entonces, la restricción (6) para

esa subregión  $l_0$  se sustituiría por:

$$Z_{l_0}^M = X_{k_0} \quad (14)$$

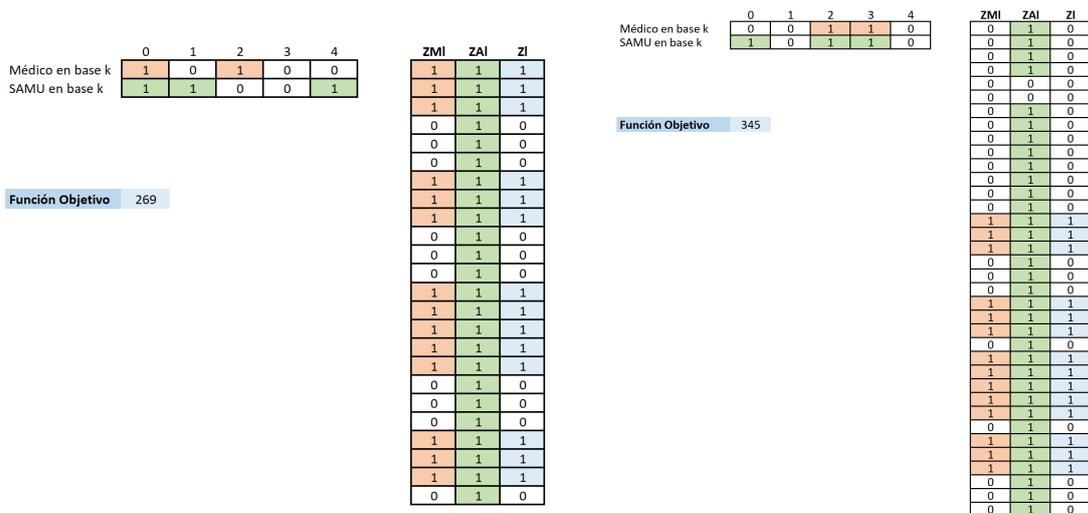
De la misma manera que para el anterior caso especial, las subregiones que se encuentran en esta situación pueden identificarse atendiendo a las coberturas mostradas en la Figura 5.2a y la Figura 5.2c. Para el caso con 24 subregiones, las que se ven afectadas son la 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 16, 19, 20, 21, 22 y 24. En el caso de las 36 subregiones, serían la 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 16, 18, 21, 22, 23, 25, 26, 28, 30, 31, 32, 33, 35 y 36.

Análogamente, los mismos casos especiales son aplicables a la restricción (7), que hace referencia a las isócronas de las ambulancias. Observando los cubrimientos mostrados en las Figuras 5.2b y 5.2d, se detecta que ninguna subregión se encuentra en la situación en la que  $\sum_{k \in \mathcal{B}} q_{kl_0}^A = 0$ , ya que cualquier subregión  $l_0$  es alcanzable desde al menos una base en el tiempo requerido. Sin embargo, sí que ocurre que  $\sum_{k \in \mathcal{B}} q_{kl_0}^A = 1$  para algún  $l_0 \in \mathcal{S}$ , en cuyo caso  $q_{k_0 l_0}^A = 1$  para algún  $k_0 \in \mathcal{B}$  y  $q_{kl_0}^A = 0$  para todo  $k \in \mathcal{B} \setminus \{k_0\}$ , esto es, la subregión  $l_0$  solo puede alcanzarse desde la base  $k_0$  en el tiempo requerido. Por tanto, la restricción (7) sería sustituida por:

$$Z_{l_0}^A = Y_{k_0} \quad (15)$$

Las subregiones que se encuentran en esta situación serían, para el caso de las 24 subregiones, la 1, 2, 3, 5 y 6, mientras que para el caso de las 36 subregiones serían la 1, 2, 3, 5, 6, 7, 13, 25 y 31.

Una vez se ha propuesto el modelo matemático, se procede a resolver el caso hipotético, tanto en Excel, con OpenSolver, como en CPLEX. Para ello, se introducen los parámetros, las variables, la función objetivo y las restricciones en ambos softwares. La Figura 5.4 muestra los resultados de las variables y de la función objetivo para el caso hipotético al resolverlo con OpenSolver. Se puede ver que, para el caso de las 24 subregiones, se asignan los médicos en las bases 0 y 2, mientras que las ambulancias se sitúan en las bases 0, 1 y 4, proporcionando cobertura a 269 personas. En el caso de las 36 subregiones, los médicos se sitúan en las bases 2 y 3, y las ambulancias en las bases 0, 2 y 3, dando cobertura a 345 personas.



(a) Solución para el caso con 24 subregiones                      (b) Solución para el caso con 36 subregiones

Figura 5.4: Solución proporcionada por OpenSolver para el caso hipotético. Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, al introducir y resolver el modelo en CPLEX, la solución obtenida para el caso de las 24 subregiones no coincide de manera exacta con la obtenida con OpenSolver. La asignación óptima de los médicos es la misma, pero en el caso de las ambulancias, estas aparecen asignadas a las bases 0, 1 y 3. Sin embargo, el resultado de la función objetivo obtenido es el mismo. Realizando un análisis de la solución, es posible comprobar que existen una serie de **dominancias** entre isócronas. Por ejemplo, como puede verse en la Figura 5.2b, todas las subregiones cubiertas desde la base 3 ya lo están por la base 0, y todas las subregiones cubiertas desde la base 4 ya lo están por la base 1. Por tanto, el SAMU situado en la base 3 (según la solución de CPLEX) o 4 (según la solución de OpenSolver) resulta redundante en este caso, pese a que el modelo la esté ubicando arbitrariamente porque está diseñado para asignar todos los recursos disponibles.

Así pues, se detecta la necesidad de modificar el modelo para que incluya una segunda condición: minimizar el número de ambulancias asignadas, con tal de no malgastar recursos. Por tanto, este nuevo modelo puede considerarse como un problema multiobjetivo, ya que se busca maximizar la población cubierta a la vez que se minimiza en número de ambulancias utilizadas. Sin embargo, cabe destacar que estos dos objetivos tienen un orden de prioridad, es decir, el objetivo primordial será maximizar la población cubierta y, posteriormente, en el caso de que existan dos soluciones que cubran la misma población, se dirá que una es mejor que la otra si usa menos SAMUs. Para ello, se identifican dos posibles planteamientos:

- La primera opción planteada consiste en la resolución del problema mediante un procedimiento conocido como Programación por Metas, utilizado en problemas multiobjetivo. Según este sistema, se resuelve el problema para un objetivo – que será el de

mayor importancia – y luego se resuelve con el otro tras añadir la función objetivo alcanzada en el primero como restricción. De esta forma, con la primera etapa se obtiene el valor óptimo que puede alcanzar la función objetivo, y en la segunda etapa se optimiza el otro objetivo estableciéndolo como valor “meta” en forma de restricción, es decir, sin permitir que empeore. Así pues, este método aplicado al problema estudiado consistiría en separarlo en dos etapas, mediante dos modelos matemáticos distintos. En primer lugar, se resolvería el modelo con la función objetivo de maximizar la cobertura contando tan solo con los médicos, y se determinaría así la máxima cobertura alcanzable. Esto es posible por la definición dada para considerar cubrimiento, y por el factor de que los médicos tienen una isócrona más pequeña, por lo que son el cuello de botella del problema. Así pues, a partir del resultado de la primera etapa, sin las ambulancias, se puede obtener una solución del problema completo, con médicos y ambulancias, asignando una ambulancia a la misma base a la que se ha asignado un/a médico/a. Por tanto, conociendo la cobertura máxima de los médicos, se conoce ya el límite de cobertura total. Independientemente de dónde se coloquen las ambulancias, la función objetivo no mejorará. A continuación, se resolvería un segundo modelo en el que la función objetivo sería minimizar el número de SAMUs utilizados, donde las variables de decisión incluirían ya las ubicaciones de médicos y ambulancias, y se incorporaría una restricción que garantizase que la misma población “meta” quedase cubierta. De esta forma, se alcanzaría una solución con el número mínimo de SAMUs para el máximo cubrimiento. Sin embargo, esta opción presenta el problema de necesitar dos etapas para su resolución.

- Por tanto, la segunda opción consiste en buscar una alternativa para resolver el problema en un mismo modelo matemático. Para ello, es necesario encontrar la forma de incorporar a la función objetivo inicial otro nuevo objetivo, de manera que se optimicen los dos al mismo tiempo. Sin embargo, es importante que este nuevo objetivo no distorsione el anterior, teniendo en cuenta que es menos prioritario.

Para cumplir con estas especificaciones, se propone el modelo presentado a continuación, donde los datos y subconjuntos son los mismos que para el modelo inicial.

**Variables:**

Se utilizarán las mismas variables que en el modelo inicial, además de una nueva variable continua,  $W$ , que representa el número de SAMUs no usados.

**Función Objetivo:**

$$\text{Maximizar } \sum_{l \in S} p_l Z_l + \frac{W}{n+1} \quad (13)$$

**sujeto a:**

$$\sum_{k \in B} X_k = m \quad (14)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{B}} Y_k + W = n \quad (15)$$

$$Z_l^M \leq \sum_{k \in \mathcal{B}} q_{kl}^M X_k \leq M_l^M Z_l^M \quad \forall l \in \mathcal{S} \quad (16)$$

$$Z_l^A \leq \sum_{k \in \mathcal{B}} q_{kl}^A Y_k \leq M_l^A Z_l^A \quad \forall l \in \mathcal{S} \quad (17)$$

$$Z_l^M + Z_l^A \leq Z_l + 1 \quad \forall l \in \mathcal{S} \quad (18)$$

$$Z_l \leq Z_l^M \quad \forall l \in \mathcal{S} \quad (19)$$

$$Z_l \leq Z_l^A \quad \forall l \in \mathcal{S} \quad (20)$$

$$X_k, Y_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in \mathcal{B} \quad (21)$$

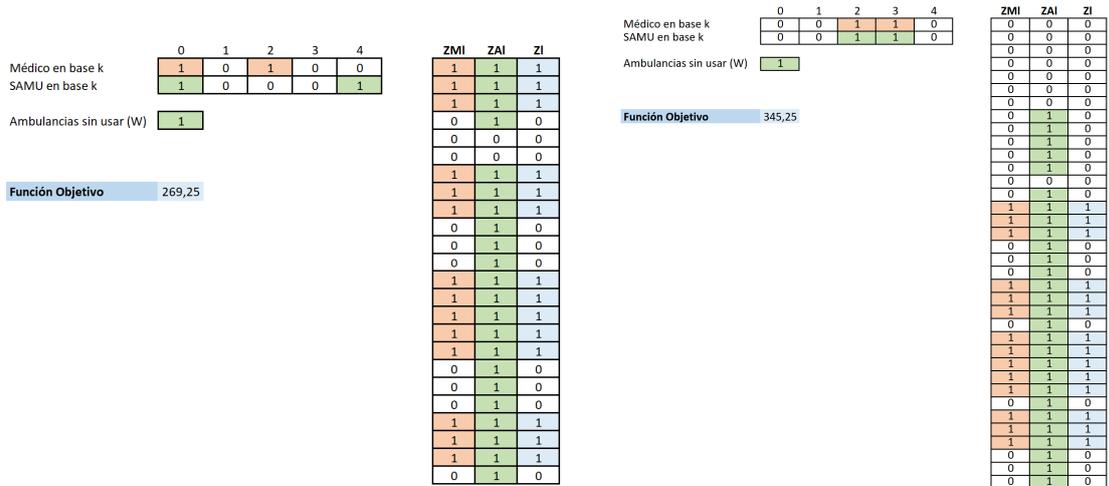
$$Z_l^M, Z_l^A, Z_l \in \{0, 1\} \quad \forall l \in \mathcal{S} \quad (22)$$

$$W \geq 0 \quad (23)$$

En este nuevo modelo, se introduce una nueva variable  $W$  que indica el número de SAMUs que no se asignan de todos los disponibles. Esta variable aparece en la restricción (15), de manera que el número de ambulancias asignadas  $\sum_{k \in \mathcal{B}} Y_k$  ya no se iguala al número de ambulancias disponibles  $n$ , sino que la suma de los asignados  $\sum_{k \in \mathcal{B}} Y_k$  y los no asignados  $W$  es igual al total disponible  $n$ . De esta forma,  $W$  será 0 si se utilizan todos los SAMUs disponibles, y positiva en caso de que haya SAMUs no asignados, siendo su valor igual al número de vehículos no utilizados.

La función objetivo (13) también se ve modificada, incorporando el término  $\frac{W}{n+1}$ , que será mayor cuantos más vehículos sin utilizar haya. Al ser la función objetivo de maximizar, el modelo tratará de buscar la combinación que menor número de ambulancias use, haciendo  $W$  más grande. Debe notarse que, al cumplirse que  $0 \leq \frac{W}{n+1} < 1$ , se asegura que el objetivo de minimizar ambulancias nunca tenga más peso que el de maximizar cobertura. Por tanto, se consigue minimizar los vehículos solo en el caso de que no se sacrifique cobertura a cambio.

Con este nuevo modelo propuesto, se procede a resolver de nuevo los casos hipotéticos planteados. La Figura 5.5 muestra los resultados obtenidos con este segundo modelo propuesto. Se puede observar que la solución obtenida para el caso con 24 subregiones, a pesar de estar la base 4 dominada por la 1, asigna una ambulancia a la base 4, ya que no se han incluido restricciones de dominancia en el modelo y la población cubierta es la misma.



(a) Solución para el caso con 24 subregiones                      (b) Solución para el caso con 36 subregiones

Figura 5.5: Solución proporcionada por el nuevo modelo para el caso hipotético. Fuente: Elaboración propia

De esta forma, se comprueba que el nuevo modelo es capaz de proporcionar una solución que mantiene el nivel de cubrimiento conseguido con el anterior, pero asigna tan solo los SAMUs necesarios, optimizando así el uso de recursos. Con este nuevo modelo, es posible pasar a resolver un caso real, sobre la ciudad de Valencia.

## 5.2. Modelo y resolución de caso real

A lo largo de esta sección, se hace uso del modelo matemático propuesto para resolver el caso de localización aplicando el sistema *rendez-vous* en la ciudad de Valencia. Para ello, se introducen los parámetros según lo explicado en la sección 4.3, disponiendo así de la población, las bases y los cubrimientos reales de la ciudad.

Por último, cabe definir la disponibilidad de médicos y de ambulancias. Para ello, se plantean una serie de escenarios, con tal de verificar el correcto funcionamiento del modelo matemático propuesto ante diversas situaciones. Se plantean seis escenarios, en los que el número de SAMUs disponibles es igual a seis – se demostrará que son necesarios menos, por lo que no se trata de un factor limitante – y el número de médicos desciende progresivamente, pasando de seis a un solo integrante del equipo médico. Para cada escenario, se obtendrá la solución dada por el modelo para la ubicación óptima de los recursos haciendo uso de CPLEX, y se identificará el número de ciudadanos que resultan cubiertos para esa solución.

### Escenario con 6 médicos y 6 SAMUs

En el primer escenario planteado, se cuenta con  $m = 6$  y  $n = 6$ , es decir, se dispone

de seis médicos y de seis SAMUs. Tras resolver el modelo, se obtiene la ubicación óptima mostrada en la Tabla 5.3. Cabe destacar que la variable  $W$  toma un valor igual a 4, lo que significa que, de las seis ambulancias disponibles, tan solo es necesario ubicar dos. Por tanto, se comprueba que la disponibilidad de ambulancias no será determinante a la hora de establecer los escenarios.

Para esta disposición, se consigue un cubrimiento de 581.327 personas. Debe tenerse en cuenta que, tal y como se indica en la Tabla 3.2 de la sección 3.6, este número representa el límite de cubrimiento, ya que el resto de subregiones no son accesibles en el tiempo máximo definido desde ninguna base. Por tanto, el escenario con 6 médicos y 6 SAMUs constituye la situación ideal según los términos de este problema. La función objetivo no podrá mejorarse aún contando con mayor disponibilidad de facultativos.

<b>Bases con personal médico</b>	<b>Bases con SAMU</b>
HOSPITAL CLÍNICO UNIVERSITARIO DE VALENCIA	CENTRO DE SALUD DE VALENCIA REPÚBLICA ARGENTINA
CENTRO DE SALUD DE VALENCIA REPÚBLICA ARGENTINA	CONSORCIO HOSPITAL GENERAL UNIVERSITARIO DE VALENCIA
CENTRO DE SALUD DE VALENCIA BENICALAP AZUCENA	
CENTRO SANITARIO INTEGRADO DE JUAN LLORENS	
CENTRO DE SALUD DE VALENCIA SAN MARCELINO	
CENTRO DE SALUD DE VALENCIA FUENTE DE SAN LUIS	

Tabla 5.3: Ubicación de médicos y SAMUs para el escenario con 6 médicos. Fuente: Elaboración Propia

La Figura 5.6 muestra la solución para el escenario con seis médicos visualizada en QGIS. En concreto, las Figuras 5.6a y 5.6b muestran las isócronas para médicos y ambulancias desde las bases seleccionadas, respectivamente. La Figura 5.6c recoge los dos cubrimientos simultáneamente, además de indicar las subregiones que quedan efectivamente cubiertas con esta asignación.

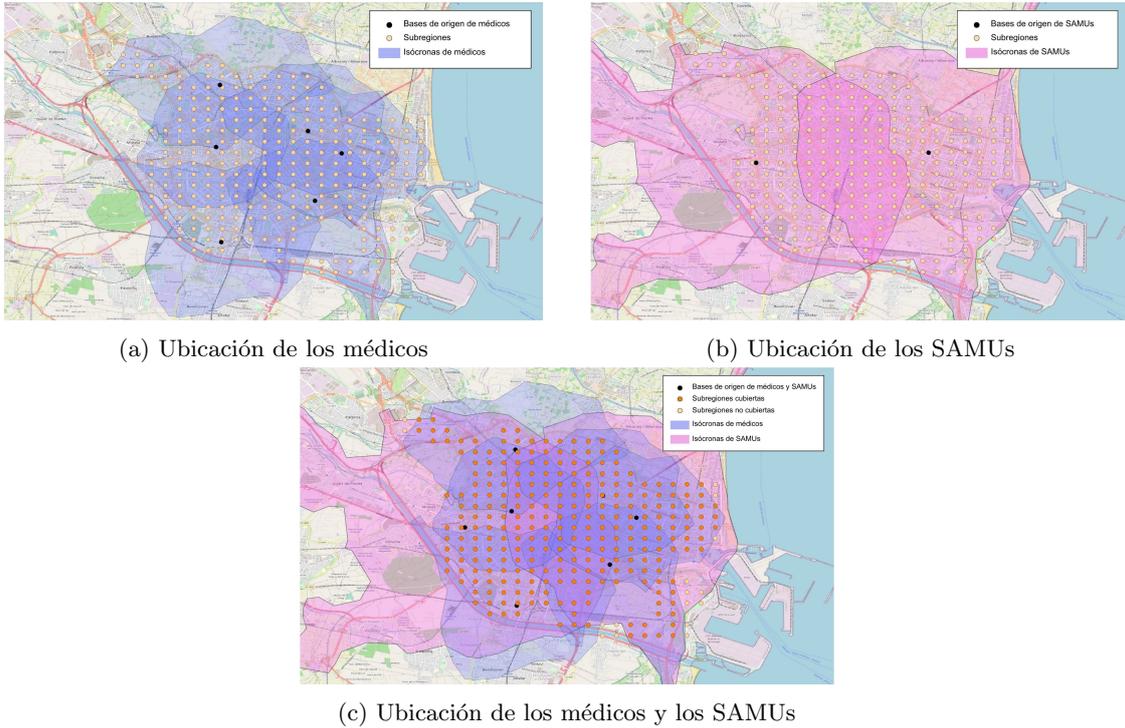


Figura 5.6: Solución para el escenario con 6 médicos. Fuente: Elaboración propia

### Escenario con 5 médicos y 6 SAMUs

En este escenario, la disponibilidad es de  $m = 5$  y  $n = 6$ , contando con cinco médicos y seis ambulancias. La asignación óptima obtenida es la indicada en la Tabla 5.4, donde de la misma forma que en el escenario anterior se ha obtenido  $W = 4$ , por lo que tan solo son necesarios dos SAMUs. Para estas disponibilidades, se consigue un cubrimiento de 579.203 personas, donde tan solo queda sin cubrir una subregión menos que en el escenario anterior. Las coberturas de esta asignación visualizadas en QGIS se muestran en la Figura 5.7.

Bases con personal médico	Bases con SAMU
CENTRO DE SALUD DE VALENCIA REPÚBLICA ARGENTINA	CENTRO DE SALUD DE VALENCIA REPÚBLICA ARGENTINA
CENTRO DE SALUD DE VALENCIA BENICALAP AZUCENA	CONSORCIO HOSPITAL GENERAL UNIVERSITARIO DE VALENCIA
CENTRO SANITARIO INTEGRADO DE JUAN LORENS	
CENTRO DE SALUD DE VALENCIA SAN MARCELINO	
CENTRO DE SALUD DE VALENCIA FUENTE DE SAN LUIS	

Tabla 5.4: Ubicación de médicos y SAMUs para el escenario con 5 médicos. Fuente: Elaboración Propia

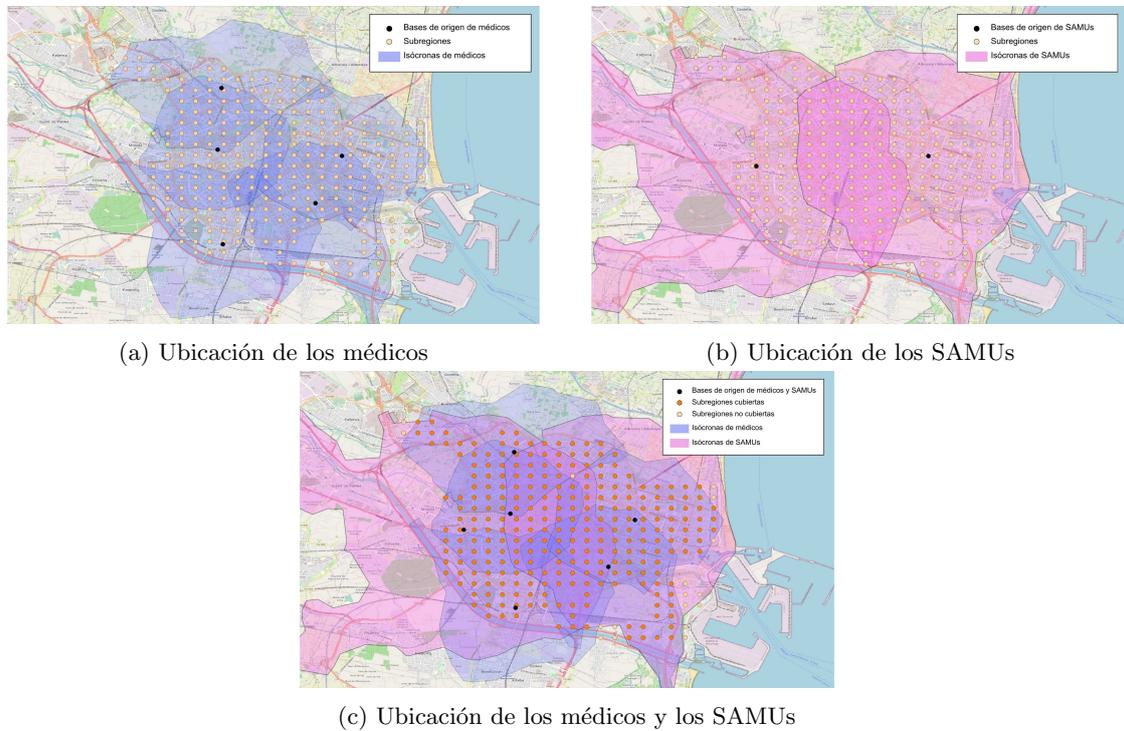


Figura 5.7: Solución para el escenario con 5 médicos. Fuente: Elaboración propia

### Escenario con 4 médicos y 6 SAMUs

En el escenario en que  $m = 4$  y  $n = 6$ , las ubicaciones de médicos y SAMUs óptimas quedan reflejadas en la Tabla 5.5. El valor de la variable  $W$  se mantiene igual a cuatro, siendo necesarias tan solo dos ambulancias. El cubrimiento conseguido en esta situación es de 568.920 personas, y las coberturas visualizadas sobre el mapa de la ciudad con la ayuda

de QGIS se muestran en la Figura 5.8.

Bases con personal médico	Bases con SAMU
CENTRO DE SALUD DE VALENCIA REPÚBLICA ARGENTINA	CENTRO DE SALUD DE VALENCIA SALVADOR PAU
CENTRO DE SALUD DE VALENCIA BENICALAP AZUCENA	CONSORCIO HOSPITAL GENERAL UNIVERSITARIO DE VALENCIA
CONSORCIO HOSPITAL GENERAL UNIVERSITARIO DE VALENCIA	
CENTRO DE SALUD DE VALENCIA FUENTE DE SAN LUIS	

Tabla 5.5: Ubicación de médicos y SAMUs para el escenario con 4 médicos. Fuente: Elaboración Propia

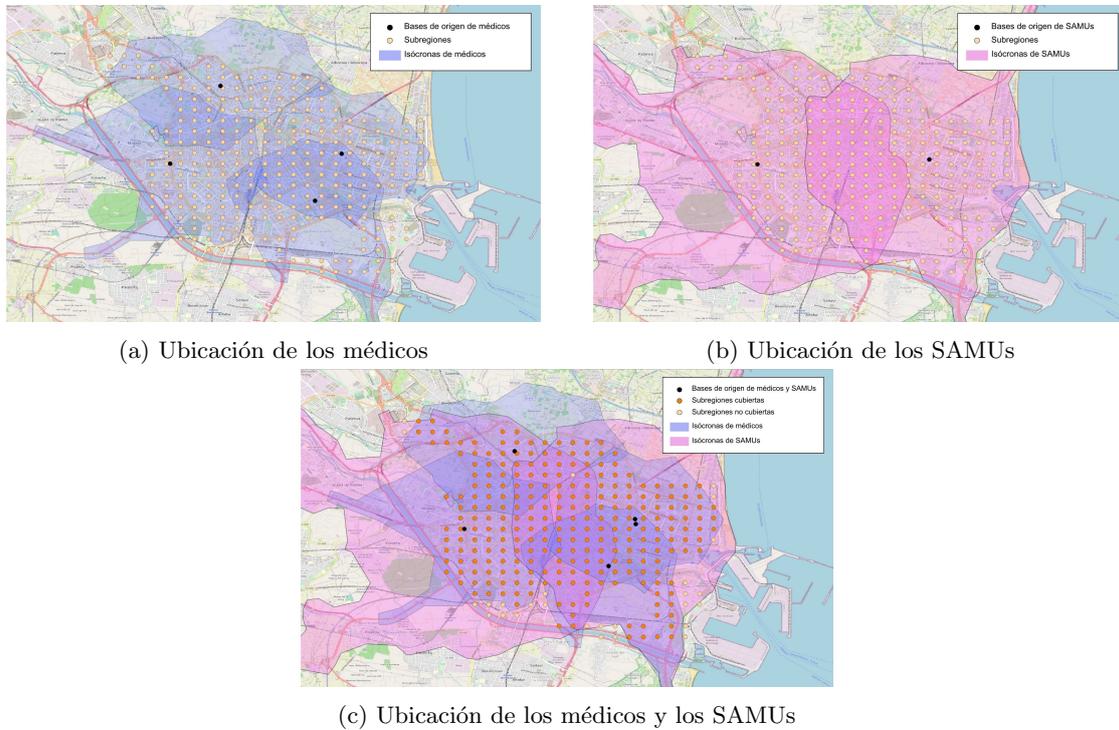


Figura 5.8: Solución para el escenario con 4 médicos. Fuente: Elaboración propia

### Escenario con 3 médicos y 6 SAMUs

En el caso de disponer de tres médicos y seis SAMUs, los valores de los parámetros de disponibilidad serían de  $m = 3$  y  $n = 6$ . En la Tabla 5.9 se recogen las ubicaciones de los recursos asignadas por el modelo, y se puede comprobar que siguen siendo necesarias tan solo dos ambulancias de las seis disponibles. La Figura 5.9 recoge las coberturas visualizadas

con QGIS para este escenario, consiguiéndose un cubrimiento de 547.034 personas.

Bases con personal médico	Bases con SAMU
CENTRO DE SALUD DE VALENCIA REPÚBLICA ARGENTINA	HOSPITAL CLÍNICO UNIVERSITARIO DE VALENCIA
CENTRO DE SALUD DE VALENCIA BENICALAP AZUCENA	CONSORCIO HOSPITAL GENERAL UNIVERSITARIO DE VALENCIA
HOSPITAL UNIVERSITARIO DOCTOR PESET	

Tabla 5.6: Ubicación de médicos y SAMUs para el escenario con 3 médicos. Fuente: Elaboración Propia

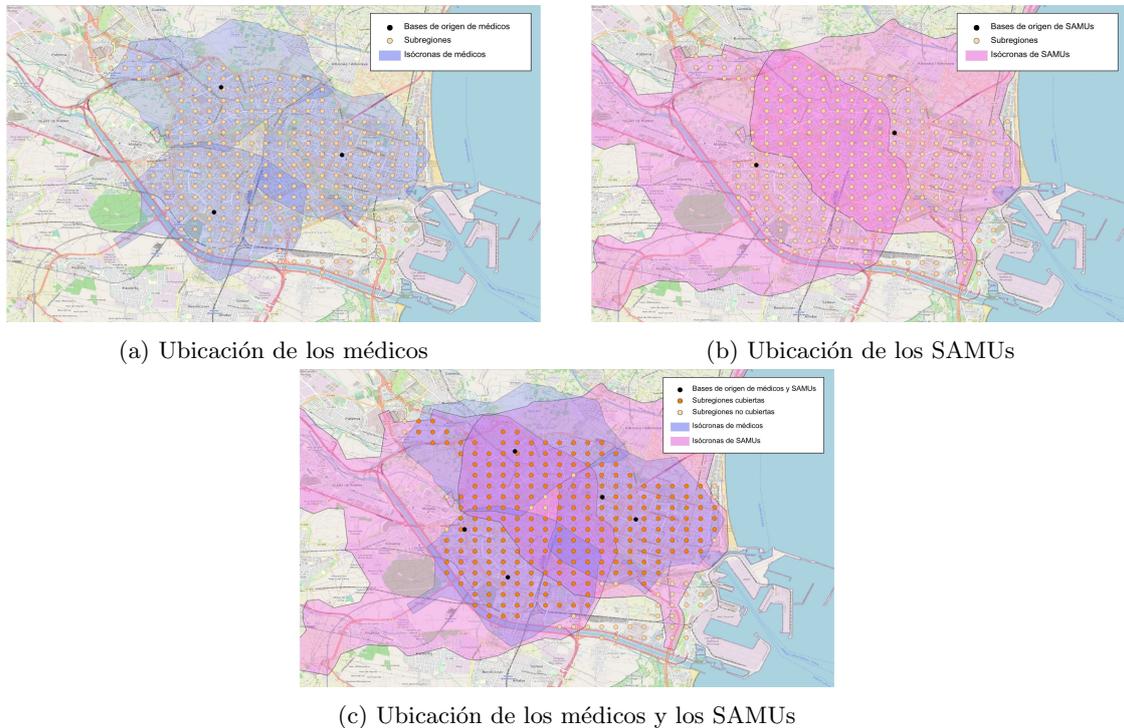


Figura 5.9: Solución para el escenario con 3 médicos. Fuente: Elaboración propia

### Escenario con 2 médicos y 6 SAMUs

Al contar con  $m = 2$  y  $n = 6$ , las bases en las que se ubicarían los recursos serían las indicadas en la Tabla 5.7, donde siguen siendo necesarias tan solo dos ambulancias del total de disponibles. El cubrimiento para esta situación pasa a ser de 427.088 personas, y las zonas de cobertura son las mostradas en la Figura 5.10.

Bases con personal médico	Bases con SAMU
CENTRO DE SALUD DE VALENCIA REPÚBLICA ARGENTINA	HOSPITAL CLÍNICO UNIVERSITARIO DE VALENCIA
CENTRO SANITARIO INTEGRADO DE JUAN LLORENS	CENTRO DE SALUD DE VALENCIA GUILLEM DE CASTRO

Tabla 5.7: Ubicación de médicos y SAMUs para el escenario con 2 médicos. Fuente: Elaboración Propia

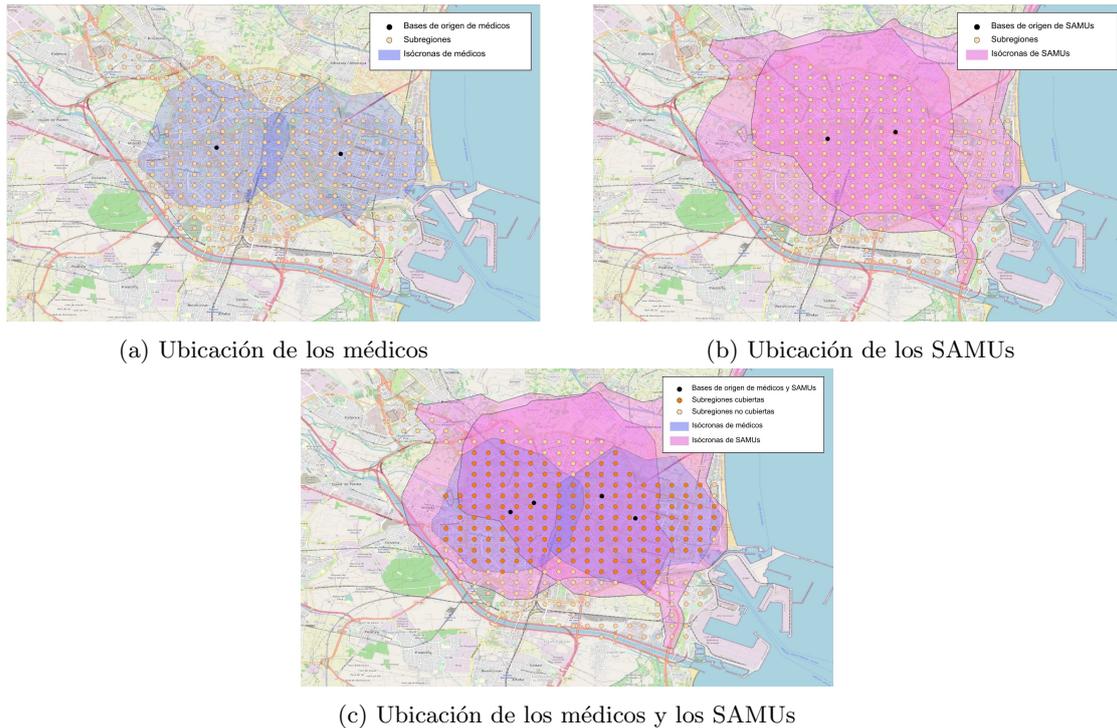


Figura 5.10: Solución para el escenario con 2 médicos. Fuente: Elaboración propia

### Escenario con 1 médico y 6 SAMUs

Por último, en caso de que el equipo médico dispusiera de tan solo una persona para atender a las emergencias sanitarias, las bases elegidas para ubicar a los recursos serían las mostradas en la Tabla 5.8. En este caso, a diferencia de los anteriores, la variable  $W$  que indica el número de SAMUs no utilizados pasa a tomar el valor de 5, ya que una sola ambulancia es suficiente para cubrir aquellas subregiones que cubre el médico. La población cubierta en este escenario sería de 235.411 personas. La Figura 5.11 muestra las coberturas conseguidas con esta asignación.

Base con personal médico	Base con SAMU
CENTRO DE SALUD DE VALENCIA REPÚBLICA ARGENTINA	CENTRO DE SALUD DE VALENCIA BENIMACLET

Tabla 5.8: Ubicación de médico y SAMU para el escenario con 1 médico. Fuente: Elaboración Propia

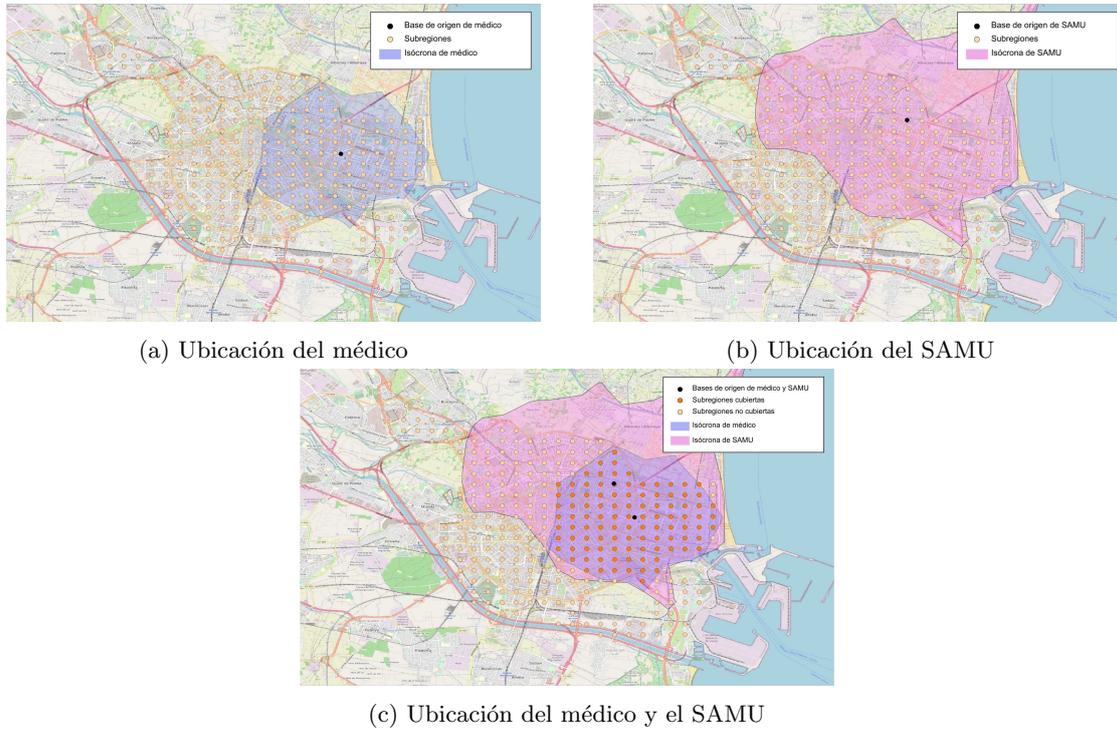


Figura 5.11: Solución para el escenario con 1 médico. Fuente: Elaboración propia

Así pues, tras la resolución de estos escenarios se comprueba que el modelo matemático propuesto es flexible y adaptable a cualquier disponibilidad, desde una cobertura máxima hasta la mínima, al disponer de una sola persona integrante del equipo médico. Además, se verifica que es posible ajustar el número de ambulancias en funcionamiento al mínimo posible garantizando la cobertura.

A modo de resumen final, en la Tabla 5.9 se recogen los cubrimientos obtenidos tras la optimización para cada uno de los escenarios planteados.

<b>Disponibilidad de médicos</b>	<b>Cubrimiento conseguido</b>
6 médicos	581.327 personas
5 médicos	579.203 personas
4 médicos	568.920 personas
3 médicos	547.034 personas
2 médicos	427.088 personas
1 médico	235.411 personas

Tabla 5.9: Cubrimientos conseguidos en función de la disponibilidad de médicos. Fuente:  
Elaboración Propia

## Capítulo 6

# Conclusiones

### 6.1. Conclusiones

A lo largo de este Trabajo Final de Grado, se ha comprobado la importancia de una buena gestión de los recursos y de la optimización de los procesos, especialmente en un campo tan vital como son las emergencias sanitarias. Es importante prestar la mejor atención posible con los recursos de los que se dispone, ya que de esto dependen las vidas de una gran cantidad de personas.

Se ha estudiado un sistema para la disposición de personal médico y ambulancias alternativo al que se lleva a cabo en el presente en la Comunidad Valenciana, el sistema *rendez-vous*, proponiendo así una solución al problema del desabastecimiento de personal sanitario de emergencias ante el que se encuentra el sistema en la actualidad. Se ha visto cómo este sistema permite que equipo médico y ambulancia se desplacen independientemente, aportando así flexibilidad y permitiendo ahorrar tiempo – siendo que este se trata de uno de los recursos más valiosos con los que cuenta el SES – en los procesos. Se han estudiado cuatro escenarios de emergencias sanitarias según la gravedad de las lesiones, comprobando así que el sistema *rendez-vous* supone para todos los casos una optimización del tiempo tanto para personal médico como para ambulancias, reduciendo trayectos innecesarios y permitiendo así que se encuentren disponibles para otras emergencias.

A partir de un caso hipotético simplificado, se ha construido un primer modelo matemático que permite obtener las localizaciones óptimas para personal médico y ambulancias, ubicándolas en alguna de las bases disponibles. A partir de este primer acercamiento, se ha detectado la necesidad de proponer un nuevo modelo que tuviese en cuenta el nuevo requisito de optimizar el número de ambulancias puestas en funcionamiento, dado que algunas de ellas podían resultar redundantes a efectos de cobertura. Así pues, se ha propuesto un segundo modelo, en este caso con un doble objetivo, a partir del cual es posible determinar la ubicación óptima de los recursos con tal de maximizar el cubrimiento de la población,

haciendo uso del menor número de ambulancias posible – siempre dando mayor prioridad a proporcionar una mayor cobertura, ya que el objetivo primordial del SES es salvar vidas.

Con este modelo matemático completo, se ha resuelto un caso real, aplicándolo sobre la ciudad de Valencia, comprobando así el potencial del modelo para hacer frente al actual problema del desabastecimiento de personal médico en la ciudad. Se han dividido las zonas del área de servicio de la ciudad en subregiones, obteniendo la población en cada una de ellas, y se ha seleccionado una lista de posibles bases en las que situar los recursos. Con estos datos de entrada, se ha planteado una serie de escenarios, en los que la disponibilidad de personal médico iba siendo decrementada. De esta forma, se ha comprobado la flexibilidad que proporciona el modelo matemático, permitiendo obtener el mayor cubrimiento posible para la disponibilidad de recursos existente en el momento. Además, haciendo uso de QGIS, se han visualizado las coberturas obtenidas para cada localización. Esta funcionalidad puede resultar de gran utilidad para el SES, ya que permite conocer de manera rápida la situación ante la que se encuentran según sea la disponibilidad de facultativos.

Así pues, se ha diseñado una herramienta que permite conocer la localización óptima de los recursos del SES siguiendo un sistema *rendez-vous*. Se trata de una herramienta muy flexible, con la que es posible determinar de manera sencilla tanto la localización inicial como una relocalización, en caso de que la disponibilidad de recursos varíe. De esta forma, se hace posible mantener los SAMUs activos pese a que la disponibilidad de personal médico esté reducida, por efecto de la estacionalidad u otro motivo. Además, la herramienta permite conocer numéricamente la cantidad de población cubierta, así como qué zonas de la ciudad reciben cobertura y cuáles no. En definitiva, permite conocer en tiempo real la asignación óptima de los recursos disponibles.

## 6.2. Posibles mejoras

Finalmente, se detallan una serie de mejoras que podrían ser incluidas en modelos posteriores.

En primer lugar, sería interesante disponer de los datos de la demanda de emergencias sanitarias desagregada en cada una de las subregiones definidas. Así, no sería necesario aproximar dicha demanda por la población, de la forma realizada en este documento, y sería posible introducir el dato real en el modelo matemático.

Otra posible mejora se basaría en un estudio de las dominancias entre isócronas mencionadas al realizar la resolución del caso hipotético. Sería interesante determinar si alguna base debería ser directamente descartada, por estar dominada por otra. De esta forma, algunas de las variables  $X_k$  e  $Y_k$  se fijarían directamente a cero, impidiendo que el modelo asigne un recurso a una base que proporciona una cobertura menor que otra. Así, se reduciría el número de variables, lo que resulta interesante en modelos de gran tamaño.

Por último, sería conveniente estudiar opciones para aprovechar las ambulancias que

quedan disponibles tras el modelo de minimización. Por ejemplo, podrían situarse en otras bases para reforzar coberturas. Así, podría estudiarse cómo modificar el modelo para que estas ambulancias sobrantes se ubiquen sobre bases que cubran más subregiones, aportando así una cobertura extra pese a que ese exceso de subregiones no esté cubierto por ningún médico.

# Bibliografía

## Bibliografía

- [1] Scott Henry Davison, Michael Alexander Levy, Christian Edward Strobel y Elizabeth Koestler Karpinski. (2016). «A Modified EMS System: Transport Ambulance». Worcester Polytechnic Institute. URL: [https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-050316-182351/unrestricted/A\\_Modified\\_EMS\\_System\\_-\\_Transport\\_Ambulance.pdf](https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-050316-182351/unrestricted/A_Modified_EMS_System_-_Transport_Ambulance.pdf)
- [2] STEM. *CEN 1789 - Ambulances*. URL: <https://www.stem.it/en/rules-and-regulations/cen-1789-ambulances/>
- [3] Boletín Oficial del Estado. *BOE-A-2020-3514*. URL: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2020-3514>
- [4] Servicio de Emergencias Sanitarias (SES). *¿Qué es el Servicio de Emergencias Sanitarias (SES)?* URL: <https://ses.san.gva.es/es/que-es-el-ses>
- [5] Servicio de Emergencias Sanitarias (SES). *Descripción de Recursos - Servicio de Emergencias Sanitarias (SES)*. URL: <https://ses.san.gva.es/es/descripcion-de-recursos>
- [6] Redacción Médica. *El envejecimiento amenaza al SNS: solo 3 de cada diez médicos son jóvenes*. URL: <https://www.redaccionmedica.com/secciones/empleo/el-envejecimiento-amenaza-al-sns-solo-3-de-cada-diez-medicos-son-jovenes-2745>
- [7] Ministerio de Sanidad. *Estudio de Oferta y Necesidad de Especialistas Médicos 2021-2035*. URL: [https://www.sanidad.gob.es/areas/profesionesSanitarias/profesiones/necesidadEspecialistas/docs/2022Estudio\\_Oferta\\_Necesidad\\_Especialistas\\_Medicos\\_2021\\_2035V3.pdf](https://www.sanidad.gob.es/areas/profesionesSanitarias/profesiones/necesidadEspecialistas/docs/2022Estudio_Oferta_Necesidad_Especialistas_Medicos_2021_2035V3.pdf)
- [8] Valencia Plaza. *El personal del SAMU se revuelve contra Sanidad por las condiciones laborales*. URL: <https://valenciaplaza.com/el-personal-del-samu-se-revuelve-contra-sanidad-por-las-condiciones-laborales>

- [9] Valencia Plaza. *SATSE demanda a Conselleria de Sanidad ante el TSJCV por enviar unidades SAMU sin médico*. URL: <https://valenciaplaza.com/satse-demanda-conselleria-sanidad-tsjcv-enviar-unidades-samu-sin-medico>
- [10] Naciones Unidas. *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- [11] Melanie Reuter-Opperma, Pieter van den Berg y Julie Vile. (2017). «Logistics for Emergency Medical Service systems». *Health Systems* 6(3). DOI: 10.1057/s41306-017-0023-x
- [12] Sultan Al-Shaqsi. (2010). «Models of International Emergency Medical Service (EMS) Systems». *Oman medical journal* 25(4). DOI: 10.5001/omj.2010.92
- [13] Hichem Chenaitia, Horace Massa, Cyril Noel, Fournier Marc, Marc Verges, Stephane Emeric, Guibert Stephane y Pierre Michelet. (2014). «Paramedics in Prehospital Emergency Medical Systems Across Europe». *International Paramedic Practice* 1. DOI: <https://doi.org/10.12968/ippr.2011.1.1.33>
- [14] Joseba Barroeta Urquiza y Nuria Boada Bravo. *Libro Blanco: Los Servicios de Emergencia y Urgencias Médicas Extrahospitalarias en España*. MENSOR, 2011. URL: [http://www.epes.es/wp-content/uploads/Los\\_SEM\\_en\\_Espana.pdf](http://www.epes.es/wp-content/uploads/Los_SEM_en_Espana.pdf) (visitado 06-06-2023).
- [15] M. Roessler y O. Zuzan. (2006). «EMS systems in Germany». *Resuscitation* 68(1). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2005.08.004>
- [16] European Transport Safety Council. (2020). *REVIVE CASE STUDY 2*. URL: [https://etsc.eu/wp-content/uploads/REVIVE\\_CASE-STUDY-2\\_02.pdf](https://etsc.eu/wp-content/uploads/REVIVE_CASE-STUDY-2_02.pdf)
- [17] Frederick S. Hillier y Gerald J. Lieberman. (1967). *Introduction to operations research*. Ed. Holden-Day.
- [18] Miguel Ángel Vecina García. (2022). «Optimización del problema de asignación de vehículos de emergencia sanitaria en la provincia de Valencia». Trabajo fin de máster, Máster Universitario en Ingeniería de Análisis de Datos, Mejora de Procesos y Toma de Decisiones, Universitat Politècnica de València. URL: <http://hdl.handle.net/10251/190327>
- [19] Miguel Ángel Vecina García. (2020). «Resolución de un problema real de relocalización de los vehículos de emergencia sanitaria». Trabajo fin de grado, Grado en Administración y Dirección de Empresas, Universitat Politècnica de València. URL: <http://hdl.handle.net/10251/152244>
- [20] QGIS Development Team. *QGIS*. URL: <https://www.qgis.org/es/site/>
- [21] OpenSolver Project. *OpenSolver*. URL: <https://opensolver.org/>
- [22] IBM. *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*. URL: <https://www.ibm.com/es-es/products/ilog-cplex-optimization-studio>

- [23] Conselleria de Sanitat Universal y Salud Pública. *Portal Estadístico de la Conselleria de Sanitat Universal y Salud Pública*. URL: <https://www.san.gva.es/es/web/portal-estadistico>
- [24] OpenRouteService. *OpenRouteService*. URL: <https://openrouteservice.org/>
- [25] Institut Cartogràfic Valencià. *Institut Cartogràfic Valencià*. URL: <https://icv.gva.es/es/>
- [26] European Commission - Joint Research Centre. *Global Human Settlement Layer*. URL: <https://ghsl.jrc.ec.europa.eu/>

**ANEXO I. RELACIÓN DEL TRABAJO CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA AGENDA 2030**

**Anexo al Trabajo de Fin de Grado y Trabajo de Fin de Máster: Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la agenda 2030.**

Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No Procede
ODS 1. Fin de la pobreza.			X	
ODS 2. Hambre cero.			X	
ODS 3. Salud y bienestar.	X			
ODS 4. Educación de calidad.			X	
ODS 5. Igualdad de género.			X	
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.			X	
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.			X	
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.	X			
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.	X			
ODS 10. Reducción de las desigualdades.			X	
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.			X	
ODS 12. Producción y consumo responsables.			X	
ODS 13. Acción por el clima.			X	
ODS 14. Vida submarina.			X	
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.			X	
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.			X	
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.	X			

Descripción de la alineación del TFG/TFM con los ODS con un grado de relación más alto.

\*\*\*Utilice tantas páginas como sea necesario.

ODS 3: Salud y Bienestar. En concreto, en colaboración con la Meta 3.6, que trata de reducir las muertes y lesiones causadas por accidentes de tráfico, al participar en la mejora de la atención a las emergencias sanitarias.

ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico y ODS 9: Industria, innovación e infraestructuras. En particular, colaborando con las metas 8.2 y 9.5, al incrementar la productividad del sistema de emergencias mediante herramientas innovadoras y tecnológicas.

ODS 17: Alianzas para lograr objetivos. Específicamente, con la meta 17.17, al colaborar en la mejora del Servicio de Emergencias Sanitarias de la Comunidad Valenciana desde la Universitat Politècnica de València.