



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Estadística e Investigación Operativa
Aplicadas y Calidad

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

AUTOR/A: Vecina García, Miguel Ángel

Tutor/a: Vallada Regalado, Eva

Cotutor/a: Villa Juliá, María Fulgencia

Cotutor/a externo: KARPOVA KRYLOVA, YULIA

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



OPTIMIZACIÓN DEL PROBLEMA DE ASIGNACIÓN DE VEHÍCULOS DE EMERGENCIA SANITARIA EN LA PROVINCIA DE VALENCIA

Miguel Ángel Vecina García

Tutoras: Eva Vallada Regalado, M^a Fulgencia Villa Juliá y Yulia Karpova Krylova

Trabajo Fin de Máster presentado en el Departamento de Estadística e Investigación Operativa Aplicadas y Calidad de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Máster Universitario en Ingeniería de Análisis de Datos, Mejora de Procesos y Toma de Decisiones

Curso 2021-22

Valencia, 12 de septiembre de 2022

Resumen

La rápida intervención de los Vehículos de Emergencias Sanitarias (VES) cuando surge alguna emergencia es de vital importancia en el bienestar y la salud de la ciudadanía. El tiempo de llegada a una emergencia depende del lugar desde donde parta el VES, por tanto, de la base donde esté localizado. Este trabajo tiene como finalidad diseñar un método que, teniendo en cuenta la información de la que se dispone, asigne la mejor base a cada VES de tal manera que se cubra a la mayor cantidad de población en la provincia de Valencia ante una posible emergencia. El método propuesto basado en isócronas es un concepto muy innovador en el estado del arte, y será la principal aportación de este trabajo. La metodología propuesta necesita, en cada una de sus fases, información relativa a las características de las emergencias, del servicio que gestiona las mismas y de los diferentes VES. Además, se utiliza una herramienta gráfica que permite visualizar de forma global el impacto de diferentes características demográficas y territoriales, imprescindibles en el diseño de la metodología propuesta. Finalmente, se consigue desarrollar una herramienta sencilla y muy útil para el Servicio de Emergencias Sanitarias de la provincia que es capaz de asignar la mejor base posible a cada tipo de VES, minimizando la población que se queda sin cubrir.

Palabras clave: Optimización, Cubrimiento, Demanda, Vehículos de Emergencia, Isócrona

Resum

La ràpida intervenció dels Vehicles d'Emergències Sanitàries (VES) quan sorgeix alguna emergència és de vital importància en el benestar i la salut de la ciutadania. El temps d'arribada a una emergència depèn del lloc des d'on partisca el VES, per tant, de la base on estiga localitzat. Aquest treball té com a finalitat dissenyar un mètode que, tenint en compte la informació de la qual es disposa, assigne la millor base a cada VES de tal manera que es cobrisca a la major quantitat de població a la província de València davant una possible emergència. El mètode proposat basat en isòcrones és un concepte molt innovador en l'estat de l'art, i serà la principal aportació d'aquest treball. La metodologia proposada necessita, en cadascuna de les seues fases, informació relativa a les característiques de les emergències, del servei que gestiona les mateixes i dels diferents VES. A més, s'utilitza una eina gràfica que permet visualitzar de manera global l'impacte de diferents característiques demogràfiques i territorials, imprescindibles en el disseny de la metodologia proposada. Finalment, s'aconsegueix desenvolupar una eina senzilla i molt útil per al Servei d'Emergències Sanitàries de la província que és capaç d'assignar la millor base possible a cada tipus de VES, minimitzant la població que es queda sense cobrir.

Paraules clau: Optimització, Cobriment, Demanda, Vehicles d'Emergència, Isòcrona

Abstract

The rapid intervention of Emergency Medical Vehicles (EMV) when an emergency arises is of vital importance for the well-being and health of the public. The time of arrival to an emergency depends on the place from where the EMV departs, therefore, on the base where it is located. The aim of this work is to design a method that, taking into account the information available, assigns the best base to each EMV in such a way that the greatest amount of population in the province of Valencia is covered in the event of a possible emergency. The proposed method based on isochrones is a very innovative concept in the state of the art, and will be the main contribution of this work. The proposed methodology needs, in each of its phases, information related to the characteristics of the emergencies, of the service that manages them and of the different EMV. In addition, a graphic tool is used to visualize in a global way the impact of different demographic and territorial characteristics, essential in the design of the proposed methodology. Finally, it is possible to develop a simple and very useful tool for the Health Emergency Service of the province that is capable of assigning the best possible base to each type of EMV, minimizing the population that remains uncovered.

Key words: Optimization, Coverage, Demand, Emergency Vehicles, Isochrone

Índice general

| | |
|--|------------|
| Resumen | I |
| Resum | II |
| Abstract | III |
| 1. Introducción y Objetivos | 1 |
| 1.1. Introducción | 1 |
| 1.2. Objetivos | 4 |
| 1.3. Estructura del documento | 5 |
| 2. Marco teórico | 6 |
| 2.1. Problemas de localización | 6 |
| 2.2. Modelos de cubrimiento total y de máxima cobertura | 7 |
| 3. Revisión bibliográfica | 9 |
| 3.1. Modelos deterministas de cobertura única | 9 |
| 3.2. Modelos deterministas de cobertura múltiple | 9 |
| 3.3. Modelos probabilísticos y estocásticos | 11 |
| 3.4. Modelos de supervivencia máxima | 12 |
| 3.5. Modelos de equidad | 13 |
| 3.6. Modelos de localización multiperiodo | 13 |
| 3.7. Contribución de este trabajo al estado del arte | 14 |
| 4. Descripción del problema | 15 |
| 4.1. Población versus Demanda | 15 |
| 4.2. Isócronas | 16 |
| 4.3. Tipos de vehículos | 17 |
| 4.4. Posibles bases | 18 |
| 4.5. Solapamientos entre isócronas | 18 |
| 4.6. Unidad de referencia | 20 |
| 4.7. Asignación ideal | 20 |
| 4.8. Asignación actual propuesta por el SES | 23 |
| 5. Metodología | 25 |
| 5.1. Software utilizado | 25 |
| 5.2. Algoritmo de resolución | 25 |
| 6. Modelización matemática y análisis de resultados | 29 |
| 6.1. Modelo 1: modelo inicial | 29 |
| 6.2. Modelo 2: modelo por partes | 32 |
| 6.3. Modelo 3: modelo separando el defecto y el exceso por tipo de VES | 34 |

| | |
|---|-----------|
| 6.4. Modelo 4: modelo por lotes | 35 |
| 6.5. Modelos 3 y 4 resueltos por comarcas | 38 |
| 6.5.1. Modelo 5: modelo 3 por comarcas | 39 |
| 6.5.2. Modelo 6: modelo 4 por comarcas | 39 |
| 6.6. Comparación de resultados | 41 |
| 7. Conclusiones | 46 |
| 7.1. Conclusiones | 46 |
| 7.2. Líneas de trabajo futuras | 47 |
| Bibliografía | 48 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| 1.1. Demandas asistenciales de los servicios de urgencias y emergencias 112/061. España, 2012-2019 | 2 |
| 1.2. Recursos por los que está integrado el Servicio de Emergencias Sanitarias de la provincia de Valencia | 3 |
| 1.3. Partes fundamentales del proyecto iReves | 4 |
| 2.1. Ejemplo gráfico de cubrimiento total y de cubrimiento máximo para la localización de instalaciones | 7 |
| 4.1. Ejemplo de isócronas de 3, 6 y 10 minutos viajando en coche | 16 |
| 4.2. Ejemplo gráfico para diferenciar entre el uso del centroide y el uso de la isócrona en un modelo de cubrimiento | 16 |
| 4.3. Fotografías de un SVA y un SVB de la provincia de Valencia | 17 |
| 4.4. Posibles bases de la provincia de Valencia | 18 |
| 4.5. Solapamientos entre isócronas | 19 |
| 4.6. Ejemplo numérico para explicar la cantidad de población realmente cubierta por dos isócronas, en caso de solapamiento | 19 |
| 4.7. Comparativa de las posibles unidades de referencia que se podrían tener en cuenta en la provincia de Valencia | 21 |
| 4.8. Cubrimiento ideal de la provincia de Valencia con los SVA y con los SVB, con tiempos máximos de isócrona de 12 y de 15 minutos, respectivamente | 22 |
| 4.9. Cubrimiento de la provincia de Valencia con con tiempos de isócrona de 30 y de 60 minutos | 23 |
| 4.10. Asignación actual propuesta por el SES de la provincia de Valencia | 24 |
| 5.1. Ejemplo de situación en la que una isócrona cae en dos departamentos sanitarios distintos | 26 |
| 5.2. Matriz de población cubierta por departamentos sanitarios | 27 |
| 5.3. Ejemplo de obtención del defecto real en QGIS para la solución actual propuesta por el SES con los SVA | 27 |
| 5.4. Ejemplo de obtención del defecto real en QGIS para la solución actual propuesta por el SES con los SVB | 28 |
| 6.1. Comparación del cubrimiento por tipo de VES entre la asignación propuesta por el SES y el modelo 1 | 32 |
| 6.2. Comparación del cubrimiento por tipo de VES entre la asignación propuesta por el SES y el modelo 2 | 34 |
| 6.3. Comparación del cubrimiento por tipo de VES entre la asignación propuesta por el SES y el modelo 3 | 36 |
| 6.4. Proceso de actualización de los datos de entrada para el modelo por lotes | 37 |
| 6.5. Comparación del cubrimiento por tipo de VES entre la asignación propuesta por el SES y el modelo 4 | 38 |
| 6.6. Comparación del cubrimiento por tipo de VES entre la asignación propuesta por el SES y el modelo 5 | 40 |
| 6.7. Comparación del cubrimiento por tipo de VES entre la asignación propuesta por el SES y el modelo 6 | 42 |

| | |
|---|----|
| 6.8. Comparación de la solución actual propuesta por el SES con la solución de los modelos 4 y 6 . | 43 |
| 6.9. Comparación de la solución actual propuesta por el SES con la solución de los modelos 4 y 6, y representando las emergencias surgidas entre las 8 y las 9 de la mañana durante el 2019 atendidas por un SVA | 44 |
| 6.10. Comparación de la solución actual propuesta por el SES con la solución de los modelos 4 y 6, y representando las emergencias surgidas entre las 8 y las 9 de la mañana durante el 2019 atendidas por un SVB | 45 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| 4.1. Resultados para la asignación ideal suponiendo recursos ilimitados para los SVA y los SVB . . . | 22 |
| 4.2. Resultados por departamentos sanitarios para la asignación actual propuesta por el SES de la provincia de Valencia | 23 |
| 4.3. Resultados por comarcas para la asignación actual propuesta por el SES de la provincia de Valencia | 24 |
| 6.1. Parámetros del modelo de [2] | 30 |
| 6.2. Variables de decisión del modelo de [2] | 30 |
| 6.3. Solución del modelo inicial, propuesto en [2] | 31 |
| 6.4. Solución del modelo 2 | 33 |
| 6.5. Variables de decisión del modelo separando el defecto y el exceso por tipo de VES | 34 |
| 6.6. Solución del modelo 3 | 35 |
| 6.7. Solución del modelo por lotes | 38 |
| 6.8. Solución del modelo 5 | 39 |
| 6.9. Solución del modelo 6 | 41 |
| 6.10. Resumen de los resultados totales para la provincia de Valencia para todos los modelos descritos | 41 |

Capítulo 1

Introducción y Objetivos

1.1. Introducción

La Sanidad pública es un servicio fundamental para la población porque garantiza el derecho y el acceso de ésta a prestaciones sanitarias de calidad y permite una sanidad universal a la que tiene acceso todo el mundo de acuerdo con su necesidad sin que su situación económica sea una barrera [1]. En España, el Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad es el encargado de desarrollar la política en materia de salud y de planificación y asistencia sanitaria para asegurar a los ciudadanos el derecho a la protección de la salud. El sistema sanitario en este país se organiza en dos niveles de atención.

La atención primaria es el nivel inicial de atención, que garantiza la globalidad y continuidad de la atención a lo largo de toda la vida del paciente. Se caracteriza por tener una gran accesibilidad y por la suficiente capacidad de resolución técnica como para abordar integralmente los problemas de salud de presentación frecuente.

La atención hospitalaria o especializada es el segundo nivel de atención y cuenta con los medios diagnósticos de mayor complejidad y coste dentro del sistema a los que se accede, en primera instancia, por indicación de los facultativos de atención primaria. La atención especializada garantizará el seguimiento de la atención integral al paciente hasta que pueda reintegrarse en la atención primaria.

Por otra parte, también existe la atención urgente, que podría clasificarse en cualquiera de los dos niveles de atención previamente mencionados. El sistema sanitario nacional cuenta con tres ámbitos organizativos para dar respuesta a las demandas de atención urgente de la población: el nivel de atención primaria, los servicios de urgencias de los hospitales y la coordinación y asistencia llevada a cabo por los Servicios de urgencias y emergencias. Es este último ámbito organizativo el que se detallará a continuación ya que es el que compete a este Trabajo Fin de Máster.

La asistencia llevada a cabo por los Servicios de urgencias y emergencias es conocida como asistencia o atención prehospitalaria (APH). Este concepto se corresponde con la suma de acciones y decisiones tomadas por el personal médico pertinente que se llevan a cabo para prevenir la muerte o cualquier agravio en la salud del paciente que ha sufrido algún tipo de urgencia o emergencia, y conlleva toda la gestión y coordinación que se realiza desde que se recibe la llamada de emergencia hasta que se envía el tipo de vehículo correspondiente y se traslada al paciente al hospital adecuado.

El número de demandas asistenciales de los servicios de urgencias y emergencias ha ido en aumento los últimos años, tal y como refleja la Figura 1.1. Con estos datos, se hace necesario asegurar una adecuada gestión de la atención prehospitalaria, de manera que todos los ciudadanos puedan obtener una asistencia lo más rápida y adecuada posible, es decir, que el tiempo de respuesta en la asistencia sea pequeño. Se define el tiempo de respuesta como el tiempo que tarda un paciente en recibir asistencia desde que realiza la llamada al Servicio de Emergencias correspondiente. Este tiempo de respuesta se puede ver afectado por diferentes elementos, como la ubicación de las ambulancias, la cantidad y tipología de las mismas (ya que existen diferentes tipos de

ambulancias, como se verá a continuación), la frecuencia en la aparición de emergencias, etc.

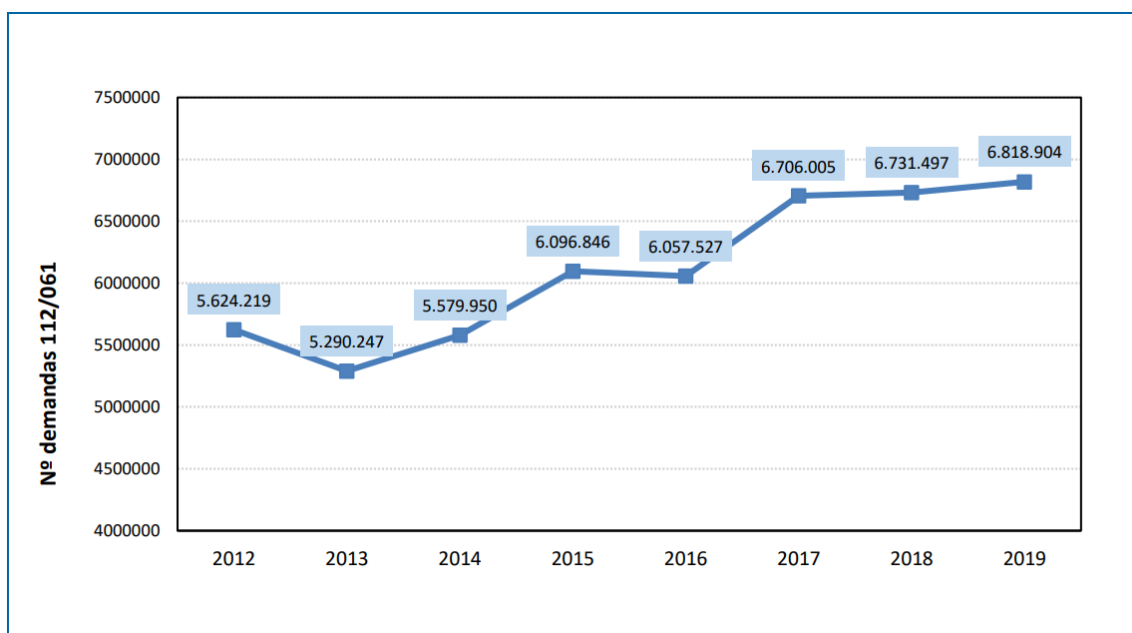


Figura 1.1: Demandas asistenciales de los servicios de urgencias y emergencias 112/061. España, 2012-2019
Fuente: *Ministerio de Sanidad. Sistema de Información de Atención Primaria (SIAP)*.

El organismo competente en materia de sanidad, salud pública, evaluación, investigación, calidad y atención al paciente es dependiente de cada Comunidad Autónoma. En el caso de la Comunidad Valenciana, el organismo que gestiona dichas competencias es la “Conselleria de Sanitat Universal i Salut Pública”. Este organismo es el encargado de gestionar toda la red de hospitales y centros públicos de atención médica de toda la comunidad y, por ende, de ofrecer una atención hospitalaria y prehospitalaria de calidad. Respecto a la atención prehospitalaria, específicamente es el Servicio de Emergencias Sanitarias (SES) el encargado de gestionarla en toda la Comunidad Valenciana y, por consiguiente, en la provincia de Valencia. Ellos son los encargados de gestionar y coordinar las urgencias y emergencias extrahospitalarias en toda la provincia y, en consecuencia, de intentar mejorar el tiempo de respuesta promedio ofrecido a la población en general. Se podría pensar que las urgencias y las emergencias son sinónimos, pero realmente no lo son. La principal diferencia radica en que, mientras que las primeras no suponen una amenaza inmediata para la vida o la salud, las segundas sí que lo suponen. Es por ello que las emergencias serán las estudiadas en este trabajo, ya que necesitan ser atendidas y tratadas inmediatamente y precisarán del desplazamiento de algún tipo de ambulancia para atenderlas.

Para realizar la mejor gestión posible de las urgencias y las emergencias médicas surgidas, el SES está integrado por una serie de recursos que lo hacen posible (tal y como muestra la Figura 1.2). El CICU es el Centro de Información y Coordinación de Urgencias y es desde donde se gestiona la demanda sanitaria en urgencias y emergencias que se recibe en el 112. Se encarga de realizar una clasificación especializada de la llamada y gestionan y coordinan los recursos de emergencias para dar respuesta a la demanda. El Servicio de Ayuda Médica Urgente (SAMU) son ambulancias medicalizadas dotadas de un médico SAMU, enfermería SAMU y un técnico en emergencias sanitarias que proporcionan apoyo vital avanzado. Los Soportes Vitales Avanzados (SVA) son ambulancias medicalizadas que proporcionan soporte vital avanzado, al igual que los SAMU, pero que se encuentran dotados de un enfermero SAMU y dos técnicos en emergencias sanitarias. Los Soportes Vitales Básicos (SVB) son ambulancias destinadas a proporcionar atención sanitaria inicial y soporte vital básico y están dotados de dos técnicos en emergencias sanitarias. El Transporte No Asistido (TNA) son ambulancias destinadas al transporte de pacientes en camilla. Los Vehículos de Intervención Rápida (VIR) son vehículos SAMU pero sin capacidad de transporte de pacientes, solo prestan atención in situ. Los EMV se definen como vehículos de transporte de equipamiento y material para la asistencia en caso de incidentes con múltiples víctimas. La incubadora de transporte son vehículos SAMU con incubadora para el transporte

de neonatos críticos. Por último, los helicópteros medicalizados son aeronaves para traslado con soporte vital avanzado.

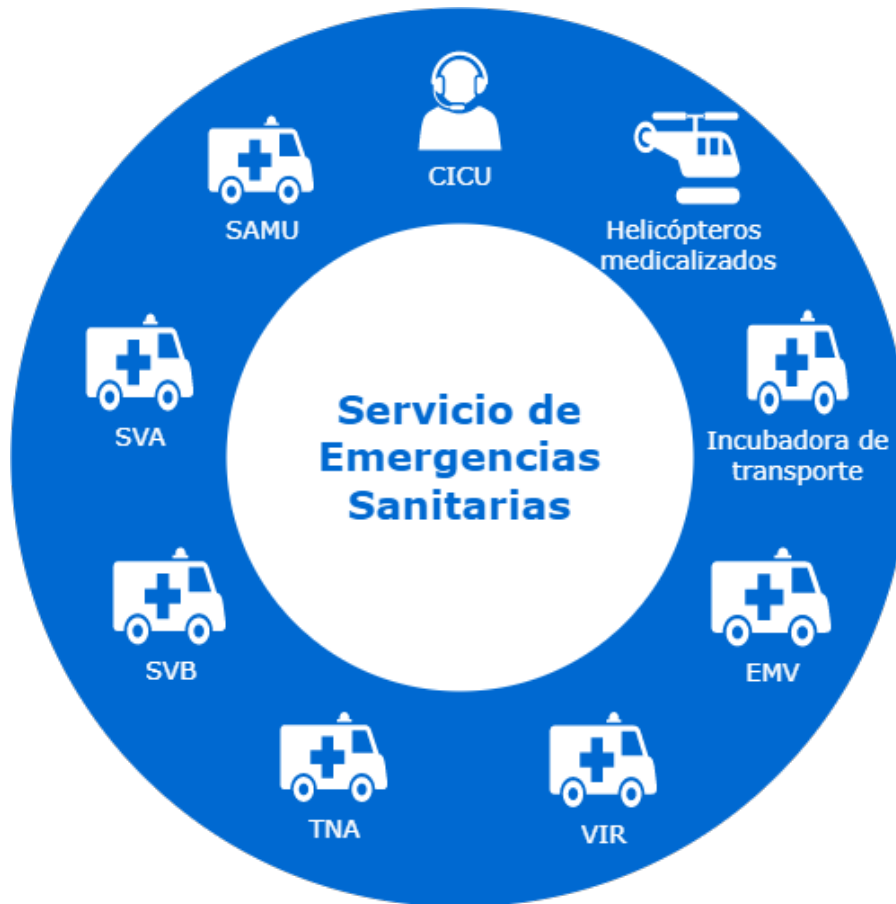


Figura 1.2: Recursos por los que está integrado el Servicio de Emergencias Sanitarias de la provincia de Valencia

Fuente: *Elaboración propia*

Para el caso que concierne en este Trabajo Fin de Máster, los tipos de vehículos que se van a tener en cuenta son los SAMU, los SVA y los SVB, debido a que son los que generalmente atienden las emergencias médicas. Además, como en la Comunidad Valenciana no se diferencia entre SAMU y SVA y se denomina a ambos recursos como SVA, para el modelo implementado tampoco se diferenciarán estos dos tipos de vehículos y se denominarán de aquí en adelante como SVA. La diferencia entre los SVA y los SVB es, además de la dotación de la ambulancia, que los primeros atienden emergencias más graves que los segundos. Para conocer con detalle los tipos de emergencias que existen, se puede consultar el trabajo de [2]. A estos vehículos (los SVA y los SVB) se les denominará en conjunto como Vehículos de Emergencia Sanitaria (VES).

Para poder mejorar el nivel de calidad de la atención prehospitalaria e indirectamente la confianza de los ciudadanos en el servicio de emergencias, sin realizar un incremento de los recursos disponibles, se hace necesario mejorar la gestión y distribución de los mismos. De esta manera, el sistema sanitario puede obtener muchas ventajas, como minimizar el tiempo de respuesta a los pacientes o un mejor aprovechamiento de los vehículos disponibles pudiendo obtener mejores resultados con la misma flota de ambulancias. Con el fin de conseguirlo, nace la idea de emplear el análisis de datos y la Investigación Operativa junto con los sistemas de información geográfica para lograr un modelo matemático que sea capaz de obtener la mejor localización posible de los vehículos de emergencia sanitaria en un tiempo mínimo. Se utilizan modelos matemáticos de cubrimiento máximo que, teniendo en cuenta diversos factores y características comunes de cualquier atención prehospitalaria, asignan los SVA o los SVB en la mejor base posible. De esta manera se consiguen reducir los tiempos de respuesta y, por ende, el número de fallecimientos medios en la provincia.

El modelo matemático que se va a implementar en este trabajo se basa en el concepto geográfico de “isócrona”, un término que se explicará en la sección 2 y que es muy novedoso con respecto al estado del arte ya que, como se explicará en la sección 3, ningún autor hasta el momento hace uso de ellas en sus modelos matemáticos. Además, cabe destacar que este trabajo forma parte de un proyecto denominado “iReves” (<https://ireves.webs.upv.es/>), que ha sido concedido por la *Agència Valenciana de la Innovació* (AVI) y que tiene como finalidad desarrollar herramientas inteligentes que proporcionen, en tiempo real, a los gestores de los vehículos de emergencia sanitaria la mejor ubicación de estos vehículos en cada momento. Este proyecto se compone de dos partes fundamentales, que se muestran en la Figura 1.3.



Figura 1.3: Partes fundamentales del proyecto iReves

Fuente: *iReves - Innovación en Reubicación de Vehículos de Emergencias Sanitarias*

La parte de *reves data* tiene la finalidad de transformar los datos en información relevante para el núcleo de **iReves**: *reves mind*.

Reves mind tiene como objetivo proporcionar soluciones a los problemas de reubicación de ambulancias y cuenta con cuatro herramientas (*reves static*, *reves dinamic*, *reves map*, *reves simula*) que se utilizan dependiendo de la decisión que se quiera tomar. Este trabajo formaría parte de la herramienta **reves static**.

1.2. Objetivos

El principal objetivo de este TFM es diseñar una herramienta que en pocos segundos sea capaz de ofrecer la mejor localización de los Vehículos de Emergencia Sanitaria para la provincia de Valencia, de manera que dicha herramienta pueda ayudar a los responsables del Servicio de Emergencias Sanitarias a ubicar sus ambulancias y a tomar decisiones de forma sencilla, rápida y eficaz ante cualquier situación o imprevisto. Una buena gestión de estos vehículos podría servir para evitar llamadas perdidas, disminuir el tiempo de respuesta, ahorrar costes y contribuir a la mejora del cambio climático ya que, al estar realizando un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles y estar gestionándolos de forma más eficiente, se reduciría el consumo de combustible. Además, todo esto conllevará a una racionalización en la inversión en ambulancias debido a que se podrá realizar el mismo trabajo sin aumentar el número de ambulancias, lo que permitirá destinar dichos recursos financieros a otras necesidades más prioritarias para los ciudadanos. Asimismo, al mejorar la calidad del servicio, podría aumentar la confianza de los ciudadanos en él puesto que se sentirían más seguros ante cualquier emergencia.

De igual manera, gracias al modelo implementado en este Trabajo Fin de Máster, se quiere ayudar a la consecución de los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible, que se pretenden alcanzar para 2030:

- **ODS Número 9. INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURAS:**
 - **Meta 9.4:** *“De aquí a 2030, modernizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles, utilizando los recursos con mayor eficacia y promoviendo la adopción de tecnologías y procesos industriales limpiamente y ambientalmente racionales, y consiguiendo que todos los países tomen medidas de acuerdo con sus respectivas capacidades”.*
- **ODS Número 11. CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES:**
 - **Meta 11.a:** *“Apoyar los vínculos económicos, sociales y ambientales positivos entre las zonas urbanas, periurbanas y rurales fortaleciendo la planificación del desarrollo nacional y regional”.*
 - **Meta 11.b:** *“De aquí a 2030, aumentar considerablemente el número de ciudades y asentamientos humanos que adopten e implementen políticas y planes integrados para promover la inclusión, el uso eficiente de los recursos, la mitigación del cambio climático y la adaptación a él y la resiliencia frente a los desastres, y desarrollar y poner en práctica, de acuerdo con el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, la gestión integral de los riesgos de desastre a todos los niveles”.*

1.3. Estructura del documento

Este Trabajo Final de Máster está formado por seis capítulos cuya identificación y breve descripción se muestra a continuación:

- **Capítulo 1. Introducción:** aquí se introduce de manera general el problema objeto de este trabajo, se detallan los conceptos básicos para el entendimiento de dicho problema y se detallan los objetivos que se desean conseguir.
- **Capítulo 2. Marco teórico:** en este capítulo se explicará de manera genérica el problema de localización y se expondrán ejemplos para entenderlo de manera clara. Asimismo, se distinguirán entre los distintos modelos aplicados a este tipo de problemas.
- **Capítulo 3. Revisión Bibliográfica:** se hará un repaso de algunos de los artículos más relevantes del estado del arte en relación con los problemas de localización de ambulancias de manera detallada, explicando la evolución de los diferentes modelos matemáticos que se han aplicado para resolver el problema. Finalmente, se explicarán las principales aportaciones que realiza el modelo de este trabajo con respecto a los demás modelos.
- **Capítulo 4. Descripción del problema:** se ofrecerá una descripción detallada de todos los elementos del problema necesarios para la construcción y resolución de los modelos implementados, para el caso en cuestión. De esta manera, se obtendrá una visión clara y concisa del problema.
- **Capítulo 5. Metodología:** se explicará paso a paso cómo se han obtenido los resultados, explicando el software utilizado así como las técnicas empleadas.
- **Capítulo 6. Modelización matemática y análisis de resultados:** se definirá el modelo matemático utilizado como referencia para formular el modelo final de este trabajo, explicando todas las variantes realizadas a raíz de la modificación de algunos de sus aspectos y analizando los resultados obtenidos. Además, se comparará la unidad de referencia utilizada hasta el momento (los departamentos de salud), con otra unidad menos extensa territorialmente (las comarcas). Finalmente, se construirá el modelo final y se compararán los resultados con los obtenidos para la solución que hay propuesta actualmente por el Servicio de Emergencias Sanitarias de la provincia de Valencia.
- **Capítulo 7. Conclusiones y trabajo futuro:** se comentarán las conclusiones del trabajo y los objetivos alcanzados. Además, se plantearán posibles líneas de trabajo futuras.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Problemas de localización

Los problemas de localización, en su forma más general, consisten en decidir dónde es mejor ubicar una serie de servicios o de instalaciones, considerando una determinada región, para satisfacer a un conjunto de clientes. Dentro de este tipo de problemas se identifican tres elementos básicos: instalaciones, clientes y localizaciones. Las **instalaciones** denotan el conjunto de elementos que serán ubicados para proporcionar un servicio. Los **clientes** serán los usuarios que demanden ese servicio ofrecido por las instalaciones. Finalmente, las **localizaciones** se refieren al conjunto de posibles puntos donde situar dichas instalaciones.

Los problemas de localización están presentes en multitud de situaciones de la vida real, como por ejemplo:

- Localización de comercios competitivos, como tiendas o restaurantes, en los que sería interesante que la ubicación fuera en algún punto donde la afluencia de gente fuera grande.
- Localización de instalaciones industriales, como fábricas, en los que interesaría una ubicación alejada de la urbe para evitar, por ejemplo, la contaminación acústica, entre otros.
- Localización de servicios públicos y privados (escuelas, parques, comisarías, etc.) donde se debería priorizar la comodidad para llegar a la instalación para los ciudadanos.
- Localización de servicios de emergencia, como hospitales o vehículos de emergencia sanitaria. Este es el caso que compete a este Trabajo Fin de Máster y que se va a llevar a cabo. En este caso, interesa que la ubicación de los vehículos sea en zonas de fácil comunicación para poder atender a la población lo más rápido posible.

En general, los problemas de localización se pueden dividir en dos grandes grupos: problemas de localización discreta y problemas de localización continua.

Los problemas de localización continua son problemas en los que las ubicaciones de las instalaciones pueden estar colocadas en cualquier lugar del espacio continuo. Por otra parte, los problemas de localización discreta consideran que el número de puntos candidatos para ubicar las instalaciones es finito. En general, la mayoría de problemas de localización son discretos ya que las instalaciones no suelen poder ubicarse (o no interesa ubicarlas) en cualquier región del mapa. Para el caso que atañe a este trabajo, como se explicará en el capítulo 4, el problema de localización es discreto, ya que las posibles ubicaciones (denominadas bases) donde ubicar los VES son finitas.

Centrándose en los problemas de localización de Vehículos de Emergencia Sanitaria (VES), éstos se pueden clasificar en problemas de localización estática y problemas de localización dinámica. El primero, que es el que compete a este TFM, consiste en asignar la mejor ubicación para los VES (en lo que a cubrimiento se refiere)

de entre un conjunto de posibles bases candidatas. Una vez se determina la base del VES correspondiente, ésta permanece fija cada vez que se inicia el turno de trabajo. No obstante, en ocasiones surgen situaciones imprevistas (indisposición de una ambulancia, cambios en la distribución de la población, nuevos vehículos disponibles para localizar, etc.) que afectan al cubrimiento de la población y que hacen que la base asignada a un VES pueda cambiar para mantener o incrementar el cubrimiento inicial. En este caso, el concepto de “localización estática” pasa a denominarse “relocalización estática”. La herramienta planteada en este TFM estará diseñada para poder tener en cuenta todos estos imprevistos y asignar, de manera rápida, todos los VES en la mejor localización posible. Por otro lado, los problemas de localización dinámica surgen a medida que el CICU comienza a recibir las llamadas de emergencia y los VES comienzan a desplazarse. Estos movimientos hacen que la zona que antes estaba cubierta por un VES determinado ahora podría no estarlo, por lo que se podría pensar en un cambio temporal en la asignación de la base de algún VES para cubrir esa zona. Estos problemas, conocidos como problemas de “relocalización dinámica”, son muy interesantes pero no se estudian en este trabajo.

Para resolver los problemas de (re)localización estática se suelen emplear dos tipos de modelos: de cubrimiento total y de cubrimiento máximo.

2.2. Modelos de cubrimiento total y de máxima cobertura

Los modelos de cubrimiento total consisten en encontrar el número mínimo de instalaciones que garanticen que toda la población (todos los clientes) de la región o zona estudiada se encuentren cubiertos, es decir, se encuentren a una distancia o a un tiempo determinado de dicha instalación. En ocasiones, hay zonas o clientes que no se pueden cubrir en el tiempo o la distancia estipulados, por distintas razones (demasiado alejados de las instalaciones, infraestructuras en mal estado, zonas de difícil acceso, etc.). En estos casos, el cubrimiento total pierde sentido ya que habría que utilizar una instalación para poder cubrir solamente a los clientes de dicha zona, lo que supondría que la instalación no fuera rentable o sostenible desde un punto de vista económico. Además, si los recursos son escasos, es decir, si el número de instalaciones que se dispone es limitado (como en la mayoría de casos), por intentar cubrir esa zona se podría estar dejando de cubrir otras zonas mucho más frecuentadas. Asimismo, al no disponer de recursos suficientes para cubrir a todos los clientes, el problema podría resultar infactible. He ahí cuando surgen los modelos de cubrimiento máximo.

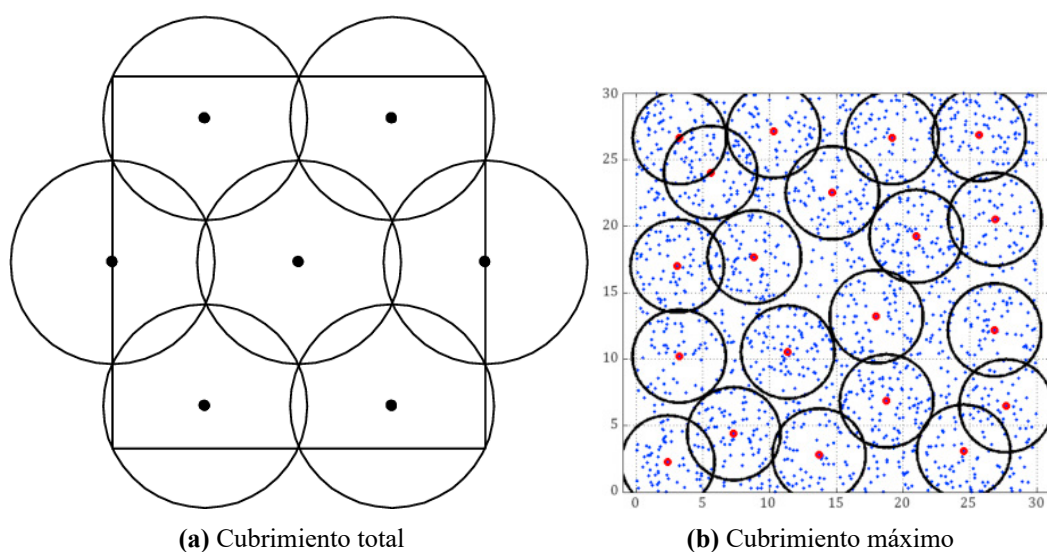


Figura 2.1: Ejemplo gráfico de cubrimiento total y de cubrimiento máximo para la localización de instalaciones

Fuente: [2]

Los modelos de cubrimiento máximo buscan maximizar la población cubierta dentro de un tiempo o distancia determinados mediante la localización de un número fijo de instalaciones. La ventaja de estos modelos es que, cuando resulta imposible cubrir a toda la población, no se utilizan más recursos para hacerlo posible sino que se intenta encontrar la mejor ubicación para dejar sin cubrir al menor número de personas posibles. En la Figura 2.1 se puede ver un ejemplo gráfico de cubrimiento total y máximo. La Figura 2.1a muestra el aspecto de un ejemplo de cubrimiento total. Los puntos negros serían las ubicaciones donde se colocan las instalaciones, el cuadrado sería la región a cubrir y los círculos se refieren al área que cubre cada una de estas instalaciones. Se puede ver como, con las siete instalaciones ubicadas se consigue cubrir todo el área de la región. Por otra parte, en la Figura 2.1b se realiza un cubrimiento máximo. Con las instalaciones disponibles, que se encuentran ubicadas en los puntos rojos, no se consigue cubrir a todos los clientes (puntos azules) de la región para el tiempo o la distancia que se haya definido (en este caso el radio de cobertura del círculo). Sin embargo, se está asegurando que el número de clientes que se quedan sin cubrir para las características del problema definidas sea el menor posible.

Como se explicará en el capítulo 4, este último modelo será el que se aplicará para el caso real de este Trabajo Fin de Máster debido a que no va a ser posible, con los recursos disponibles, la infraestructura de carreteras y los tiempos de respuesta predefinidos, cubrir a toda la población de la provincia.

Capítulo 3

Revisión bibliográfica

El problema de localización de Vehículos de Emergencia Sanitaria (VES) consiste en ubicar los mismos en puntos de servicio potenciales para reducir el retraso en la atención médica. No obstante, utilizar un elevado número de vehículos para conseguirlo no es razonable, debido a que estos vehículos son muy caros ya que se encuentran totalmente equipados con todas las necesidades que podría tener el equipo médico ([3]). Por ende, cualquier servicio de emergencias dispone de un número limitado de VES, así que es importante optimizar su localización para mejorar la capacidad de respuesta/reacción del sistema ([4]).

3.1. Modelos deterministas de cobertura única

Los primeros modelos de localización de vehículos de emergencia sanitaria surgen en la década de los 70, cuando [5] formulan explícitamente el problema de localización de vehículos de emergencia utilizando la noción de cobertura: se dice que una zona de demanda está cubierta si y solo si puede ser alcanzada por al menos un vehículo dentro de un determinado tiempo o distancia predefinidos. El modelo de cubrimiento total (LSC) propuesto por [5] tenía el objetivo de minimizar el número de ambulancias necesarias para cubrir todos los puntos de demanda. Este modelo era bastante básico y proponía soluciones caras porque requería un número de ambulancias más grande del realmente necesario. Además, no permitía la ubicación de más de una ambulancia en un centro de servicio.

Para superar las limitaciones de la metodología propuesta en [5], en el trabajo de [6] presentaron el modelo de localización de máxima cobertura (MCL), que trataba de maximizar la población cubierta dentro de una distancia S con un número predefinido de ambulancias. La ventaja de este modelo era que no proponía localizar las ambulancias en lugares improductivos, donde el tiempo fuera ocioso por falta de emergencias. Sin embargo, este modelo no maximizaba la cobertura de la demanda más de una vez, lo que, en ocasiones, es necesario por la cantidad de emergencias surgidas en poco tiempo en una zona concreta.

3.2. Modelos deterministas de cobertura múltiple

Las soluciones determinadas mediante modelos de cobertura única pueden no ser lo suficientemente robustas cuando se aplican en situaciones reales. Para aumentar la solidez de las soluciones, [7] propusieron el modelo de cobertura total de objetivo jerárquico (HOSC), siendo los primeros en considerar explícitamente el concepto de cobertura múltiple. Se trata de un tipo de LSC pero donde aparecen varios tipos o niveles de recursos (por ejemplo, dos tipos de ambulancias: Soportes Vitales Avanzados y Soportes Vitales Básicos). Este modelo HOSC tiene dos objetivos: primero trata de minimizar el número de ambulancias necesarias para una cobertura completa (es decir, que cada zona de demanda esté cubierta por al menos una ambulancia) y luego maximiza el número de ambulancias adicionales (de entre las disponibles) que pueden responder a la demanda en un tiempo

menor o igual a T (es decir, maximiza la cobertura múltiple de cada zona). Sin embargo, en la práctica puede parecer poco interesante cubrir una zona con más de dos vehículos si la probabilidad de que ambos vehículos estén simultáneamente ocupados es baja. Además, al no considerar explícitamente la demanda de cada zona, el HOSC tenderá a reagrupar los vehículos en zonas que se puedan cubrir fácilmente, dejando las zonas más difíciles de alcanzar cubiertas sólo una vez. [8] intentaron superar las debilidades del HOSC multiplicando la demanda por la cobertura adicional, lo que minimizaba simultáneamente el número de instalaciones y maximizaba la cobertura de demanda múltiple. Debido a la limitación de la capacidad computacional, desarrollaron una heurística multiobjetivo para resolver el problema.

[9] tuvieron la idea de utilizar el enfoque de la programación por objetivos. Para ello, propusieron un modelo de localización de cobertura máxima-múltiple (MMLCP), donde intentaban maximizar la cobertura múltiple y minimizar la población no cubierta utilizando un número determinado de ambulancias. Para ello, utilizaban variables de holgura definidas como el exceso y el defecto de cubrimiento. Este modelo, similarmente al HOSC, podía causar congestión de los VES [3].

Más tarde, [10] propusieron el modelo estándar doble (DSM), que integraba tanto el concepto de doble cobertura como diferentes radios de cobertura. Este modelo se basa en las normas de América del Norte, que estipulan que todas las demandas deben ser cubiertas en un cierto tiempo (en minutos) r_2 y una proporción α de la demanda total en otro determinado tiempo (en minutos) r_1 (siendo $r_2 > r_1$). Para resolver este modelo, desarrollaron una heurística de búsqueda tabú cuyos resultados computacionales, utilizando tanto datos generados aleatoriamente como datos reales, confirmaban la eficacia del enfoque propuesto. [11] aplicaron el DSM a un estudio basado en la ciudad de Viena, Austria. Integraron un término de penalización en la función objetivo para limitar el número de habitantes que podían ser asignados a una ambulancia. [12] informaron de tres trabajos que utilizaron el DSM para abordar problemas de localización de ambulancias en Canadá, Austria y Bélgica, mientras que [13] aplicaron una versión refinada del DSM para localizar ambulancias en Shanghai, China. Estos últimos plantearon una función objetivo que minimizaba tanto los costes operativos de las ambulancias como los costes esperados por el retraso del servicio de emergencia, e incluyeron una restricción que limitaba la carga de trabajo de las ambulancias. En todos estos casos, se utilizaron datos empíricos de los sistemas de emergencias estudiados para definir y resolver instancias realistas. [14] y [15] ampliaron el DSM para tratar con múltiples tipos de vehículos y varios niveles de prioridad. [14] distinguían entre zonas de demanda con alto y con bajo índice de accidentes, y disponían de dos tipos de vehículos: Soportes Vitales Avanzados (SVA) y Soportes Vitales Básicos (SVB). De esta manera, maximizaban la doble cobertura ofrecida por vehículos SVA en zonas con alto índice de accidentes y también maximizaban la doble cobertura ofrecida por cualquier tipo de vehículo en zonas con bajo índice de accidentes. Así, el modelo priorizaba el cubrimiento de zonas con alto índice de demandas pero sin descuidar las zonas con bajo índice de demanda. Para resolverlo, hicieron uso de algoritmos genéticos, que necesitaban de unas 6 horas para determinar las mejores ubicaciones de las ambulancias dentro de la gran área de estudio. [15] ya no asignaban distinta importancia o prioridad a las distintas zonas de demanda, sino que las trataban de igual manera. Otra diferencia con el modelo propuesto en [14] era que añadían un parámetro para asegurar un determinado nivel de fiabilidad en el servicio. Es decir, este modelo consideraba simultáneamente el alcance de la cobertura de la demanda y la fiabilidad de la cobertura del servicio. En ambos casos, se realizaron experimentos computacionales con datos de la ciudad de Chicago (Estados Unidos).

[17] propusieron dos modelos para localizar el servicio de ambulancias aéreo y terrestre, basados en el LSC y el MCL. El objetivo era minimizar el coste total mientras que evitaba asignar dos ambulancias terrestres diferentes para cubrir el mismo nodo, si hay al menos una ambulancia aérea cubriendo dicho nodo. Los autores definían la cobertura como una combinación del tiempo de respuesta y del tiempo total de servicio, considerando tres tipos: cobertura aérea, cobertura terrestre y cobertura conjunta. Además, consideraban la indisponibilidad del servicio médico de emergencia en tierra, por lo que modelaban la cobertura de respaldo.

[18] plantearon un método para integrar el sistema de información geográfica (SIG) con la optimización de la programación lineal con el fin de presentar soluciones óptimas alternativas. Gracias al SIG, podían representar todos los incidentes producidos en los sectores del territorio de Dallas, y distinguir de manera visual las zonas donde se ubicaban dichos incidentes. De esta manera, eran capaces de formular un modelo refinado de

localización de su patrulla policial a partir de los modelos de cobertura máxima y de respaldo empleados hasta el momento y resolverlo para según qué datos de entrada de la demanda. En este modelo cada nodo de demanda podía ser cubierto por cualquier número de instalaciones.

Sin embargo, los modelos de cobertura múltiple no tenían en cuenta la naturaleza estocástica de la demanda de emergencias. He aquí cuando aparecen los modelos de programación estocástica, que intentaban cubrir la incertidumbre de la demanda de una manera más explícita.

3.3. Modelos probabilísticos y estocásticos

En los modelos estocásticos, se consideran dos situaciones. La primera, cuando la ambulancia está ocupada y nadie sabe en qué momento volverá a estar disponible ([19] y [20]). La segunda, que es la más estudiada y problemática, es debida a que nadie sabe dónde y cuándo surgirá una emergencia (véase, por ejemplo, [21]).

[19] y [20] introdujeron el problema de localización de cobertura máxima esperada (MEXCLP). Aquí, la disponibilidad de los vehículos es la fuente de incertidumbre. El MEXCLP intenta maximizar la cobertura esperada utilizando un determinado número de vehículos. Para ello, se emplea un parámetro de la tasa de ocupación, que hace que el modelo tenga cierto nivel de sensibilidad. En [20], denominan p a la probabilidad de que una ambulancia no esté disponible y asumen que dicha p es conocida y la misma para todas las ambulancias. Además, asumen que esta probabilidad es el parámetro de una distribución binomial.

El MEXCLP y sus variantes posteriores ([22], [23]) consideran tres supuestos principales: la tasa de ocupación es conocida e igual para todos los vehículos, la tasa de ocupación es independiente de la ubicación del vehículo, y cada vehículo opera de forma independiente. Pero estas suposiciones no suelen cumplirse en la práctica y pueden dar lugar a una brecha significativa entre los resultados previstos y los reales ([24]). Para proporcionar una mejor estimación de la cobertura esperada, [24] propusieron dos variantes del MEXCLP que permiten la relajación de algunos de sus supuestos básicos: el MEXCLP ajustado (AMEXCLP) cuya función objetivo integra un factor corrector de la teoría de colas ([25]) que permite relajar el supuesto de independencia de vehículos; y el modelo de hipercubos ([25], [26]) para calcular la cobertura esperada dado un plan de localización predeterminado. Este último modelo relaja el cumplimiento de los tres supuestos básicos, además de la integración de las llamadas en cola en el cálculo de la cobertura esperada.

[27] combinaron MEXCLP con DSM y formularon el modelo MEXCLP-DS. Esta formulación puede modelar la cobertura doble estándar con una situación probabilística. Este modelo tiene como objetivo maximizar el número esperado de demandas cubiertas. En [27], resuelven este modelo mediante algoritmos genéticos. Para crear la población inicial, agrupan los puntos de demanda en clústeres atendiendo a que la distancia desde el punto de demanda al centro del clúster sea menor o igual a r_1 unidades. El centro de cada clúster será la localización de la base de las ambulancias. Si la cobertura no es del 100 % y el presupuesto es suficiente, sugieren añadir más ambulancias en el/los clúster/es correspondiente/s.

En la programación estocástica, existe un enfoque en el que al modelo se le impone un nivel esperado de fiabilidad a través de algunas restricciones probabilísticas. Por ejemplo, [28] plantearon el problema de localización de máxima disponibilidad (MALP), que maximizaba la población cubierta para un determinado nivel de fiabilidad.

Los anteriores modelos estocásticos suponen tiempos de viaje deterministas, pero este tiempo puede variar de una intervención a otra debido, por ejemplo, a la congestión del tráfico. Por esta razón, [29] y [30] propusieron modelos que determinan la localización, la asignación y la ruta que deben seguir los vehículos de emergencia para maximizar la cobertura esperada, teniendo en cuenta los tiempos de viaje estocásticos.

[31] proponen un modelo inspirado en el de [30], pero en el que también se incluye la variabilidad del tiempo transcurrido entre la llegada de la llamada y el envío de un vehículo a la emergencia correspondiente. Por otra parte, [32] elaboraron un modelo para conocer cuántas ambulancias debían localizar en cada base con el fin de minimizar el número esperado de llamadas perdidas. Para ello, definen tanto la probabilidad de que una llamada

ofrecida a una base determinada encuentre todas sus ambulancias ocupadas como la tasa de llegada de llamadas que se ofrecen a esa misma base. Para computar esa probabilidad utilizan la fórmula de pérdida de Erlang.

[16] utilizaron un modelo de programación estocástica en dos etapas para optimizar la localización y asignación de dos tipos de ambulancias teniendo en cuenta la incertidumbre de la demanda prioritaria. Así, formularon el modelo que denominaron SALT: un modelo de programación estocástica de dos etapas para ubicar y asignar los dos tipos de ambulancias que consideraban teniendo en cuenta dos grupos de prioridad de llamadas. El objetivo de este modelo es maximizar la cobertura esperada, que se expresa mediante las ganancias obtenidas cuando la demanda es respondida por el tipo de ambulancia correcto dentro del umbral de respuesta menos el coste de penalización por demandas perdidas. Además, amplían el modelo para considerar los vehículos de emergencia que no son de transporte pero que pueden ofrecer una respuesta más rápida a las demandas. Finalmente, logran un modelo más general que sustituye el criterio de cobertura de “todo o nada” por una cobertura gradual donde se permite la respuesta de ambulancias inadecuadas. Para conseguirlo, se añade un parámetro que mide el grado de coincidencia entre la demanda y el tipo de ambulancia.

Otra forma de tener en cuenta la incertidumbre es estudiando directamente el carácter aleatorio de las emergencias. En este contexto, [33] propusieron un modelo de fiabilidad para la localización de los servicios de emergencia (RELP). Aquí, se considera el problema desde la perspectiva de la fiabilidad del sistema, donde el fallo del sistema se interpreta como la incapacidad de un vehículo para responder a una llamada de demanda en un tiempo aceptable. Basándose en un límite de fiabilidad sobre la probabilidad de fallo del sistema, se realiza un modelo de optimización de programación entera, resolviéndolo mediante el procedimiento branch and bound. [21] introdujeron un modelo robusto de localización y dimensionamiento que incluía una restricción probabilística para asegurar, bajo una determinada probabilidad, la presencia de un número suficiente de vehículos cuando surgiera una emergencia. También asumieron que cada vehículo podía atender como máximo a un número determinado de llamadas de emergencia durante el horizonte de planificación.

[34] ampliaron la formulación anterior proponiendo un modelo matemático de dos etapas para incorporar la incertidumbre de la demanda. La primera etapa selecciona la ubicación de los sitios de espera. La segunda determina la asignación de las solicitudes de servicio entrantes a los sitios de espera. La función objetivo de este modelo era minimizar los costes de localización y el coste de atención de la demanda.

[35] siguieron la misma idea para formular un modelo de localización-asignación de ambulancias que minimiza simultáneamente los costes de operación y transporte de la ambulancia, así como las demandas no atendidas a tiempo. Introdujeron el concepto de número máximo de demandas concurrentes para estimar el número de vehículos a ubicar en cada base. En su artículo, comparan un modelo probabilístico con su homólogo determinista, obteniendo mejores resultados con el primero. Sin embargo, aunque la calidad del servicio (entiéndase como el porcentaje de experimentos en los que el número de ambulancias en cada base no es inferior al correspondiente número máximo de demandas concurrentes) mejora, se debe a que el número de ambulancias total también aumenta considerablemente (necesitan un mínimo de 7 ambulancias más, en el mejor de los casos).

[36] se basaron en un enfoque de muestreo para seleccionar las bases de las ambulancias, así como el número de ambulancias en cada una de las bases seleccionadas. En este caso, se supone que las demandas siguen distribuciones de probabilidad discretas conocidas. Sugirieron muestrear estas distribuciones de probabilidad para obtener un conjunto de demandas, que se resuelven como problemas deterministas. El enfoque propuesto buscaba entonces minimizar los costes fijos garantizando un nivel de cobertura determinado para todos los escenarios considerados. Para ellos, un escenario era una realización completa de las demandas. En consecuencia, un escenario definía el número de ambulancias solicitadas o requeridas por cada punto de demanda.

3.4. Modelos de supervivencia máxima

Desde un enfoque más ligado a la supervivencia del paciente, [37] vincularon, a raíz de diversos estudios, los retrasos en la intervención (como la duración desde el colapso hasta la reanimación cardiopulmonar, o la duración desde el colapso hasta la desfibrilación) a la probabilidad de supervivencia. En su modelo de localización

de máxima supervivencia (MSL), propusieron una función que depende únicamente del tiempo de respuesta. Este modelo tiene en cuenta el mismo tipo de restricciones que el MCL, pero añadiendo variables para establecer qué base servirá a cada zona de demanda.

[38] indicaron que, si el umbral de tiempo de respuesta se elige cuidadosamente, se pueden encontrar soluciones óptimas desde la perspectiva de la supervivencia utilizando medidas estándar. Asimismo, también demostraron que el uso de umbrales de tiempo de respuesta más amplios, dentro de unos límites, reducen la disparidad en los resultados de los pacientes entre las zonas urbanas y rurales, lo que da pie a los modelos de equidad.

3.5. Modelos de equidad

En ocasiones, los modelos clásicos de cobertura pueden conducir a soluciones poco equitativas, ya que pueden tender a ofrecer un mejor cubrimiento a las zonas urbanas y densamente pobladas, dejando las zonas rurales con menor cobertura. Pero, realmente, la equidad es una medida subjetiva y difícil de definir. Un cliente que ha recibido un buen servicio puede sentirse insatisfecho si se compara con otro cliente que, para su percepción, ha recibido un buen trato. [39] introdujeron la noción de envidia y la utilizaron para definir el problema de localización de la envidia mínima (MELP), aunque no se aplicaba al contexto de las emergencias médicas. Posteriormente, [40] adaptaron la noción de envidia al contexto de los servicios de ambulancia. La envidia se define como las diferencias en la calidad del servicio (distancia o tiempo de respuesta) entre todos los pares posibles de clientes. Más específicamente, [40] formularon el problema de envidia mínima p (MPELP), que utiliza una función de envidia basada en la distancia de una zona de demanda a su base más cercana y la distancia de una zona de demanda a su base de respaldo. Este modelo tiene como objetivo encontrar las ubicaciones óptimas para p vehículos con el fin de minimizar la envidia total en todas las zonas de demanda.

3.6. Modelos de localización multiperiodo

Algunas veces, podría resultar beneficioso cambiar la ubicación de las ambulancias durante un día atendiendo a la evolución de la situación a la que se enfrenta el sistema de emergencias [41]. Esto puede ser debido, entre otras cosas, a los movimientos de la población (por ejemplo, a primera hora de la mañana, al mediodía, etc.). Es lo que se conoce como estrategias de (re)localización estática multiperiodo. Un día de trabajo se divide entonces en varios periodos de tiempo, dependiendo de los distintos perfiles de demanda, y se establecen a priori distintos planes de ubicación para cada periodo de tiempo.

[42] formularon el primer modelo de localización de ambulancias multiperiodo, que era una variante multiperiodica del MEXLCP al que denominaron modelo de localización de máxima cobertura esperada con variación temporal (TIMEXCLP). Su modelo probabilístico busca maximizar la cobertura esperada teniendo en cuenta las fluctuaciones tanto en los patrones de demanda como en la cantidad de ambulancias disponibles. No obstante, no se tienen en cuenta los costes de relocalización generados entre periodos. [43] también proponen un modelo probabilístico multiperiodo que busca el número mínimo de vehículos necesarios para garantizar que cada zona de demanda esté cubierta con un nivel de fiabilidad determinado. Como en el caso de [42], este modelo no tiene en cuenta los costes que supone la reubicación de los vehículos entre periodos. Estos costes se incluyen en el modelo de [44].

[45] aplican un modelo multiperiodo con cobertura de respaldo (MPBDCM) en el área metropolitana de Estambul. Los autores consideran maximizar la población atendida por dos ambulancias distintas dentro de dos límites de tiempo de respuesta diferentes en un horizonte de planificación multiperiodo. Es decir, proponen determinar dónde y cuándo deben ubicarse las ambulancias en una determinada base a lo largo de un horizonte de planificación multiperiodo, de forma que se utilice un número limitado de bases en cada periodo de tiempo y que toda la población esté adecuadamente cubierta por dos ambulancias distintas. Este modelo difiere de otros

modelos multiperiodo debido a que considera que, cuando una base está ocupada por una ambulancia, debe permanecer así hasta el final del horizonte de planificación. En consecuencia, sugiere un periodo de planificación largo, en lugar de un día.

[46] presentan un modelo multiperiodo que considera las variaciones del tiempo de viaje entre periodos, por ejemplo, debido a la congestión de las carreteras. Sin embargo, se supone que el número de vehículos y los patrones de demanda son independientes del tiempo. Los autores también proponen integrar en la función objetivo un término de penalización para limitar el número de vehículos reubicados entre periodos.

Por último, [47] amplían el modelo propuesto por [43] para considerar la minimización del número de vehículos que deben ser reubicados entre periodos, además de la minimización del número de vehículos necesarios para lograr una cobertura adecuada.

En general, los modelos anteriores garantizan un nivel de rendimiento mínimo para toda la región de ambulancias de manera agregada, pero no lo hacen para cada punto de demanda. Esto suele llevar a un exceso de personal en algunas zonas y a un servicio de mala calidad en otras, sobre todo en las regiones con zonas urbanas y rurales, lo que conlleva a unos costes innecesariamente elevados ([48]). Los proveedores de servicios de ambulancias necesitan encontrar el equilibrio adecuado entre una buena calidad de servicio y unos costes razonables.

[48] proponen un modelo de mínima fiabilidad y máxima disponibilidad (MR-MA) aplicable a regiones con demanda urbana y rural denominado modelo de colas ajustadas (AQ-PLSCP), que proporciona generalizaciones de los modelos existentes. Este modelo es una mejora de los modelos Q, que tienden a proyectar la demanda urbana a las zonas rurales, lo que puede dar lugar a un importante exceso de personal en las zonas rurales. Mediante su modelo, resuelven este problema, mejorando además el tiempo de servicio. Para evaluar el rendimiento de la solución del modelo, utilizan datos reales de cuatro regiones de los Países Bajos.

3.7. Contribución de este trabajo al estado del arte

Hasta ahora, todos los artículos revisados basan sus modelos en el cubrimiento de los puntos de demanda, de manera que cada punto es el centroide de la demanda de esa zona en particular. Esa suposición de utilizar el centroide se convierte en poco realista cuando se habla de tiempos de respuesta, ya que la zona donde está dibujado el centroide puede ser lo suficientemente extensa como para que la diferencia entre el centroide y la verdadera localización de la demanda sea de varios minutos. Por lo tanto, se estaría dando a entender que una zona queda totalmente cubierta en un tiempo limitado porque se cubre el centroide de la demanda pero a lo mejor en ese mismo tiempo no se está llegando a la zona real de la demanda. Con el modelo planteado en este TFM, que se basa en el propuesto por [49], esto no sucedería, ya que se basa en el concepto de isócrona, que sirve para visualizar en el mapa de manera rápida todas las zonas que quedan cubiertas realmente en un tiempo determinado y cuantificar la cantidad de población que realmente queda cubierta. De esta manera, se puede utilizar esta información para conocer verdaderamente qué zonas están cubiertas y cuáles no, y convertir el modelo en una potente herramienta mucho más realista. En el siguiente capítulo se va a definir de manera detallada el concepto de isócrona y se expondrá un ejemplo gráfico para ver la diferencia entre utilizar la isócrona como concepto de cubrimiento y utilizar el centroide.

Capítulo 4

Descripción del problema

En este capítulo se van a presentar y definir todos los elementos del problema, aplicado a la provincia de Valencia, necesarios para comprender los modelos formulados posteriormente. Se va a presentar el concepto de isócrona, que ya se ha mencionado en secciones previas, la unidad territorial de referencia del modelo, los datos de entrada (posibles bases donde ubicar los vehículos y los tipos de vehículos utilizados), la población que se cubre desde cada posible base según el tiempo fijado de isócrona y, finalmente, el defecto de cubrimiento mínimo y el exceso de cubrimiento máximo que va a haber con las características del problema planteadas. Se entiende por defecto de cubrimiento la cantidad de personas que se quedan sin cubrir por el VES correspondiente para las condiciones estipuladas (tiempo de respuesta definido, localizaciones consideradas, etc.). Se entiende por exceso de cubrimiento la cantidad de población que se encuentra cubierta por más de un vehículo del mismo tipo, es decir, los ciudadanos que están cubiertos más de una vez para las condiciones definidas.

4.1. Población versus Demanda

En este problema, la demanda de emergencias es la cantidad de emergencias que surgen en la provincia de Valencia. Lo interesante sería poder conocer esta demanda de forma desagregada, es decir, conocer la ubicación y hora exacta en que sucede cada emergencia para poder utilizar esta información en los modelos matemáticos. Realmente, lo que se quiere cubrir es la demanda que surge en la provincia, ya que si se cubren las zonas con mayor frecuencia o cantidad de emergencias, se estarán evitando peores consecuencias respecto a la salud de los pacientes. Sin embargo, conocer esta demanda no es trivial, ya que no son datos públicos a los que pueda acceder todo el mundo sino que se trata de datos confidenciales que el SES de cada Comunidad Autónoma debe proporcionar. Además, las emergencias pueden surgir en cualquier lugar y se tendría que tener información de la localización exacta de todas las emergencias surgidas durante un periodo determinado. Al no disponer de dicha información, sino tan solo de la demanda agregada surgida en cada municipio de Valencia durante 3 años (información ofrecida por el SES), hay que plantearse otra opción con la que trabajar sin que eso implique que los resultados no sean ciertos o no sean útiles para el Servicio de Emergencias. Para ello, se plantea trabajar con la población de la provincia, ya que es lógico pensar que a mayor población mayor probabilidad de que surja una emergencia y, por ende, mayor cantidad de emergencias. Para confirmar dicha suposición, se calcula el coeficiente de correlación de ambas variables (demanda y población) a partir de la información agregada de la cantidad promedio de emergencias surgidas durante tres años por cada municipio de la provincia de Valencia y la población censada de dichos municipios. De esta manera, se obtiene un coeficiente de correlación de 0,995, lo que indica que existe una relación lineal positiva muy fuerte entre ambas variables. En consecuencia, se considerará que maximizar la población cubierta implica maximizar la demanda cubierta de emergencias. Por lo tanto, se justifica el hecho de que los modelos implementados trabajen con la población y no con la demanda.

4.2. Isócronas

Este es el concepto más importante en el que se basa el modelo de este TFM. La palabra “isócrona” es una palabra formada por dos componentes léxicos (isos y khronos) provenientes del griego y que significan igual y tiempo, respectivamente. Por ende, una isócrona es un polígono definido por un conjunto de puntos a los que se tarda el mismo tiempo en llegar desde un origen común, que no tiene por qué ser el centro del mismo, y utilizando un medio de transporte determinado (caminando, bicicleta, coche, etc.). También existen isócronas de distancias, en lugar de temporales, que serán polígonos formados por puntos que se encuentran a la misma distancia de un origen común utilizando un transporte determinado. El tamaño de las isócronas dependerá del tiempo o de la distancia a la que las definas, siendo más grande cuanto mayores sean dichos parámetros, e incluso del medio de transporte que se vaya a considerar. En la Figura 4.1 se puede ver un ejemplo de diferentes isócronas según el tiempo estipulado y el medio de transporte considerado partiendo desde el mismo punto de origen (punto negro de la Figura 4.1).

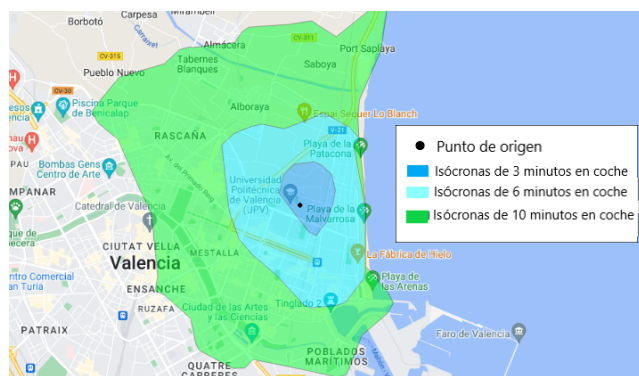


Figura 4.1: Ejemplo de isócronas de 3, 6 y 10 minutos viajando en coche

Fuente: *Elaboración propia*

Se puede conocer la población exacta que cae dentro de cada isócrona, por lo que se podrá utilizar dicha información para diseñar cualquier metodología que resuelva el problema planteado. Y es aquí donde radica la principal diferencia entre el uso de la isócrona para los modelos de cubrimiento y el uso del centroide. En la Figura 4.2 se expone un ejemplo gráfico para explicar la diferencia entre ambos conceptos.

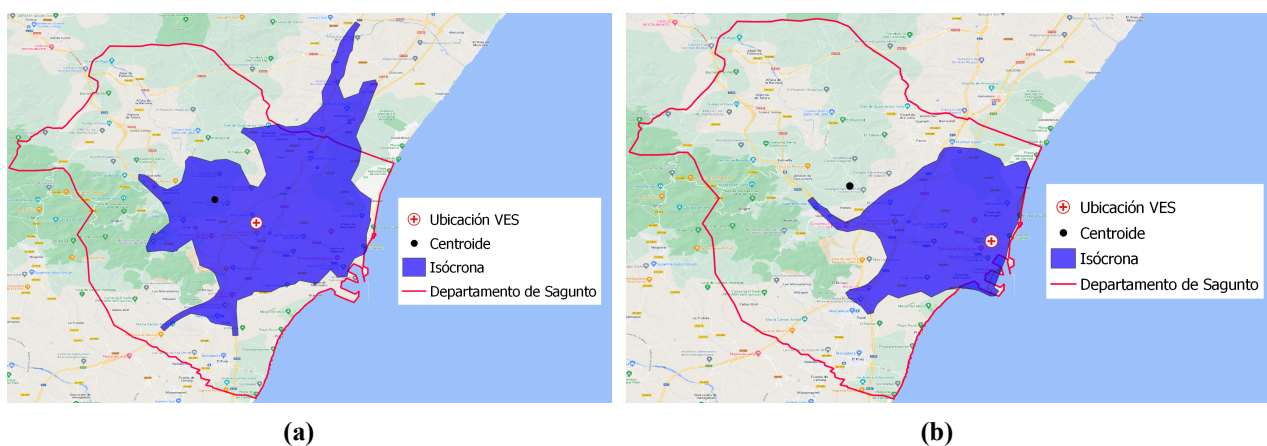


Figura 4.2: Ejemplo gráfico para diferenciar entre el uso del centroide y el uso de la isócrona en un modelo de cubrimiento

Fuente: *Elaboración propia*

En la figura se muestra la zona a cubrir (en este caso el departamento de Sagunto), el centroide de la población del departamento (representado por un punto negro), la ubicación del VES y la isócrona obtenida si el VES se

coloca en esa ubicación. En el caso de la Figura 4.2a, si se trabajara con el concepto de isócrona se conocería la población exacta que se cubre con ese vehículo, y se sabría que el departamento no está cubierto totalmente porque la población que cubre esa isócrona sería menor que la población total del departamento. En cambio, si se empleara el concepto del centroide, se estaría diciendo que sí que está todo el departamento cubierto al ubicar el VES en esa localización, ya que el centroide cae dentro del polígono coloreado en azul. Por otra parte, en la Figura 4.2b el centroide no está cubierto, por lo que se consideraría que el departamento no está cubierto cuando realmente hay una parte del mismo que sí que lo está, para el tiempo definido. En resumidas cuentas, el hecho de trabajar con la demanda agregada simplifica los cálculos porque en vez de generar miles de puntos dentro de un área, ya que el espacio es continuo, se recurre a la simplificación y se genera el centroide de ese área. Cuando se determina si la zona está o no cubierta se comprueba si desde la base de una ambulancia se llega o no se llega en un determinado tiempo a este centroide. Si se llega, se considera que toda la zona está cubierta y si no, que no lo está. Esta comprobación se hace habitualmente con la matriz de distancia, pero en nuestro caso se utiliza la isócrona.

En conclusión, ha quedado comprobada la utilidad del uso de la isócrona en este tipo de modelos de cubrimiento para que la solución obtenida sea mucho más realista.

4.3. Tipos de vehículos

El Servicio de Emergencias Sanitarias cuenta con una variedad de vehículos bastante extensa, cada uno de los cuales tiene una función determinada, como se ha podido ver en la sección 1.1. En el caso de la atención de las emergencias, se suelen emplear tres tipos de vehículos distintos: los Servicios de Asistencia Médica Urgente (SAMU), los Soportes Vitales Avanzados (SVA) y los Soportes Vitales Básicos (SVB). Tanto los SAMU como los SVA son vehículos medicalizados y son los encargados de atender emergencias más graves, con riesgo inminente de muerte del paciente y son, por consiguiente, los que más rápido deben acudir al lugar del accidente. Los SAMU están provistos de un médico cirujano especializado en medicina intensiva o en anestesia y reanimación, de un enfermero especializado en cuidados médico-quirúrgicos y de un técnico en emergencias sanitarias. Los SVA (véase la Figura 4.3a), en cambio, están dotados de un enfermero especializado y de dos técnicos en emergencias sanitarias. Aun y todo, como ya se ha mencionado en la Introducción, los SAMU y los SVA atienden el mismo tipo de emergencias (las más graves), por lo que en este trabajo no se hará distinción entre estos dos tipos de ambulancias y se denominarán a ambos como SVA.



Figura 4.3: Fotografías de un SVA y un SVB de la provincia de Valencia

Fuente: *Servei d'Emergències Sanitàries de la Comunitat Valenciana - GVA*

En el caso de los SVB (Figura 4.3b), son vehículos, también medicalizados, pero que tan solo cuentan con dos técnicos en emergencias sanitarias, ya que el tipo de emergencias que atienden son de menor gravedad. Es por este motivo por el que los SVA deben llegar más rápido al lugar de la emergencia, por lo que su tiempo de respuesta será menor. Recordemos que este tiempo será el que pasa desde que se recibe la llamada de emergencia hasta que la ambulancia llega al lugar del incidente. Cuando se recibe una llamada de emergencia, el CICU necesita clasificar la llamada para derivarla al servicio correspondiente. Este tiempo desde que se recibe la

llamada hasta que el vehículo correspondiente se pone en marcha se denomina tiempo de triaje. El tiempo de respuesta será la suma entre este tiempo de triaje y el tiempo que tarde la ambulancia desde que se pone en marcha hasta que llega al lugar del incidente (se puede denominar tiempo de viaje o de isócrona). Para el caso que aplica este TFM, los tiempos de viaje definidos para los SVA y los SVB serán de 12 y de 15 minutos, respectivamente.

4.4. Posibles bases

Para poder localizar los vehículos descritos en la anterior sección, es necesario conocer las posibles ubicaciones (bases) donde posicionarlos. Estas posibles bases son, principalmente, todos los Centros de Salud y Hospitales de la provincia de Valencia, excepto algunas bases que no lo son pero que tienen muy buena comunicación con las carreteras y el SES las tiene en cuenta también como posibles bases. El motivo de que las posibles bases que se consideran sean tan solo en o cerca de hospitales y centros de salud es porque, al tratarse de vehículos medicalizados, asiduamente se tienen que estar reponiendo de material sanitario.

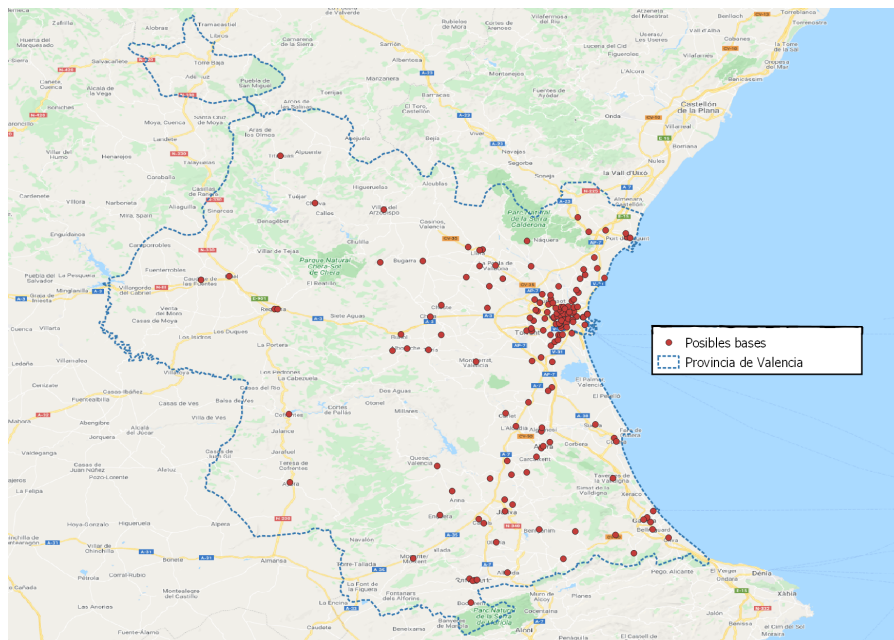


Figura 4.4: Posibles bases de la provincia de Valencia

Fuente: *Elaboración propia*

En la Figura 4.4 se pueden ver todas las posibles bases que existen en la provincia de Valencia, un total de 157. En dicha figura se aprecia que la mayoría de las posibles bases se sitúan en la ciudad de Valencia, debido a la cantidad de hospitales y centros de salud que se ubican ahí (en parte por la cantidad de población que vive en la ciudad). Fuera de la misma, la cantidad de puntos donde ubicar un VES disminuyen considerablemente, como lo hace también la población residente en dichas zonas. Cuando dos bases están relativamente juntas, o incluso cuando están separadas pero sus isócronas son muy grandes, se puede producir el solapamiento entre isócronas que, en ocasiones, puede ocasionar problemas como se explicará en la siguiente sección.

4.5. Solapamientos entre isócronas

Los solapamientos entre isócronas se producen cuando dos o más isócronas tienen una parte de su polígono por encima de otra isócrona diferente. En la Figura 4.5 se puede ver un ejemplo de solapamiento entre dos

isócronas distintas. La parte delineada en negro es la parte solapada, los puntos negros son los orígenes de las isócronas y las propias isócronas son los polígonos pintados en azul y naranja.

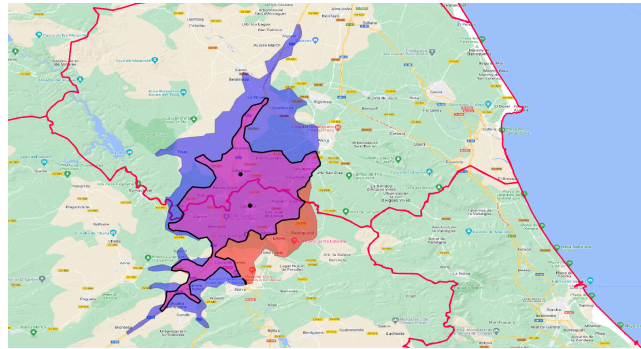


Figura 4.5: Solapamientos entre isócronas

Fuente: *Elaboración propia*

El problema de los solapamientos surge cuando la parte solapada es muy grande, como en el caso de la Figura 4.5. Lo que sucede en estos casos, es que no se podrá discernir entre la población que realmente se está cubriendo por estas dos isócronas, ya que la población que cae debajo de la parte solapada (el polígono rosa de la figura) se estará contando más de una vez cuando sumas la población de cada área individual de las isócronas (dos veces en este caso, ya que el solapamiento es entre dos isócronas). Para entenderlo de manera más clara, se expone un ejemplo numérico básico en la Figura 4.6.

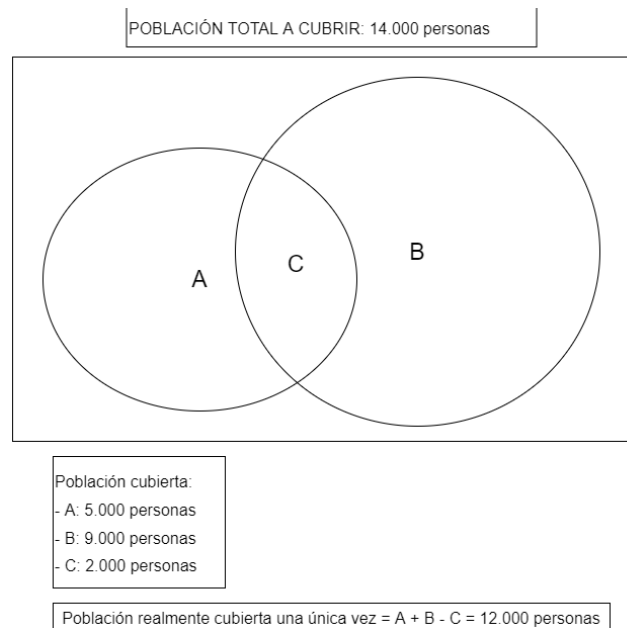


Figura 4.6: Ejemplo numérico para explicar la cantidad de población realmente cubierta por dos isócronas, en caso de solapamiento

Fuente: *Elaboración propia*

En ella, se muestran dos isócronas (A y B), que se encuentran solapadas en una parte C. El rectángulo define el territorio a cubrir y la población total que hay que cubrir en este rectángulo es de 14.000 personas. La cantidad de población que cubre la isócrona A es de 5.000 personas, la cubierta por la isócrona B es de 9.000 personas, y la población cubierta por ambas es de 2.000 personas. Esta última es la cantidad de población repetida y que, por lo tanto, se estaría contando dos veces. Si se ubicasen los vehículos en A y en B se pensaría que se ha cubierto a toda la población, ya que la suma de la población cubierta por cada una de sus isócronas (A + B) es de 14.000 personas. Sin embargo, estas isócronas se están solapando y, como se ha mencionado, comparten una zona donde

cubren a la misma población. Para obtener el cubrimiento real simple (no doble) habría que realizar la operación que aparece en la figura, es decir, $A + B - C$, obteniendo que la población realmente cubierta cuando se ubican las ambulancias en estas dos bases A y B es de 12.000 personas. En este ejemplo parece sencillo cuantificar la cobertura simple para obtener la población realmente cubierta pero este cálculo, sobre todo cuando se trabaja con problemas reales (como en este TFM) donde puede haber mucho solapamiento, no es trivial.

Es por esta razón que, si se ubicaran dos vehículos en esas dos bases que se solapan, se podría estar dando un defecto de cubrimiento irreal. No obstante, el solapamiento entre isócronas puede llegar a ser beneficioso si dicho solapamiento se produce en zonas donde la cantidad de población es alta. Y esto es así porque, como se demuestra en [2], a mayor población mayor probabilidad de que se produzca una emergencia, por lo que si hay más de un vehículo cubriendo la misma zona, si uno de ellos se queda ocupado atendiendo una emergencia y surge otra, se tendrán más vehículos disponibles para cubrirla. En definitiva, hay que saber en qué casos conviene tener solapamientos entre isócronas y en qué casos no.

4.6. Unidad de referencia

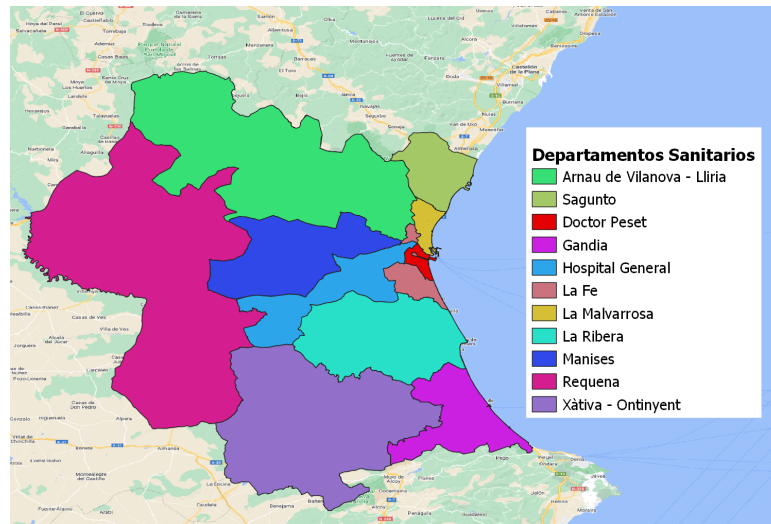
Para resolver el problema de localización que se lleva a cabo en este TFM, es necesario dividir el total de la provincia de Valencia en unidades más pequeñas de territorio con las que poder trabajar de manera más precisa. El Servicio de Emergencias Sanitarias de la provincia trabaja con los departamentos sanitarios, tal y como se explica en [2]. En la provincia, existen un total de once departamentos de salud, cuya división puede apreciarse en la Figura 4.7a. Cada departamento de salud tiene un hospital de referencia, que es el que da nombre a cada departamento.

Tanto el Rincón de Ademuz como la parte del departamento de Sagunto que se sitúa en la provincia de Castellón no están contempladas en la Figura 4.7a puesto que su gestión no compete al Servicio de Emergencias Sanitarias de la provincia de Valencia, sino que están controlados por el Servicio de Emergencias Médicas de otra provincia.

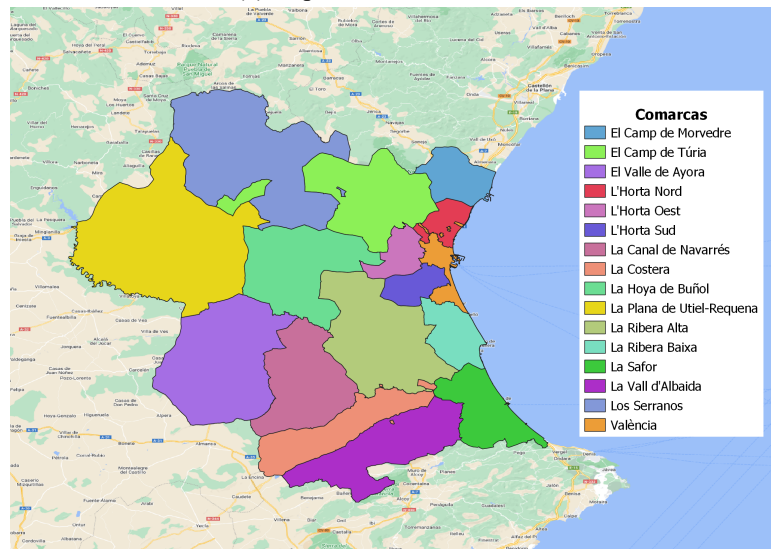
Sin embargo, hay departamentos sanitarios que tienen una extensión muy grande, por lo que el modelo podría tener problemas al intentar cubrir todo este territorio con los recursos y las bases disponibles. El problema surgiría justamente por los solapamientos, ya que el modelo podría pensar que un departamento se encuentra totalmente cubierto porque la suma de la población que está teniendo en cuenta con las bases utilizadas iguala o supera a la población del departamento, pero esto podría deberse a que está contando la misma población más de una vez y, por consiguiente, se quedan zonas del departamento descubiertas (tal y como se ha explicado en el ejemplo de la Figura 4.6). Para solucionar este problema, lo ideal sería trabajar con los infinitos puntos que cubran todo el territorio de la provincia con el fin de cubrirlos todos. Pero esto sería inviable, ya que no se puede dividir la provincia en un número infinito de puntos y, si se pudiera, el tiempo de computación para resolver ese modelo sería excesivamente elevado, lo que implicaría que no sería posible calcularlo. Por lo tanto, se tiene que encontrar un equilibrio entre factibilidad y eficiencia. En este caso, se ha pensado en utilizar otra unidad territorial de referencia, la comarca, con el objetivo de analizar el impacto que esta decisión tiene sobre los modelos planteados. En la Figura 4.7b se muestra el mapa de la provincia de Valencia dividido en las distintas comarcas que contiene. Se puede ver que hay un total de 16 comarcas (ya que, como se ha mencionado anteriormente, el Rincón de Ademuz no se tiene en cuenta). Por lo tanto, la unidad territorial pasa de 11 divisiones a 16 divisiones y, en el capítulo 6, se analizará el impacto que la unidad territorial tiene en el modelo propuesto.

4.7. Asignación ideal

En una solución ideal, el presupuesto sería infinito y se podría disponer de todos los recursos que se necesitaran. En este caso, la asignación ideal vendría dada por tener un SVA y un SVB en cada base posible, es decir,



(a) Departamentos sanitarios



(b) Comarcas

Figura 4.7: Comparativa de las posibles unidades de referencia que se podrían tener en cuenta en la provincia de Valencia

Fuente: *Elaboración propia*

157 vehículos de cada tipo en total (uno en cada una de las posibles bases). En la Figura 4.8 se puede ver el cubrimiento de la provincia en el caso mencionado.

Se puede ver en la Figura 4.8 que no es posible cubrir todo el territorio para los tiempos de isócrona definidos de 12 y de 15 minutos según se trate de un SVA o de un SVB, respectivamente. Si suponemos que en ese territorio hay población, implica que no se puede cubrir a toda la población para los tiempos máximos estipulados, por lo que siempre va a haber un defecto de cubrimiento mínimo (D_{min}) que no se va a poder superar (como se puede ver en la Tabla 4.1). Es por esta razón por la que el problema a resolver en este TFM será de cubrimiento máximo, ya que el cubrimiento total resultaría infactible.

La Tabla 4.1 muestra para cada departamento de salud, el porcentaje de población que quedaría por cubrir de ese departamento (defecto) y el porcentaje de población que se cubriría más de una vez (exceso) tanto para los SVA como para los SVB si se ubicase un vehículo de cada tipo en cada una de las 157 bases posibles con un tiempo de isócrona de 12 y de 15 minutos, respectivamente. Esto es lo que se ha denominado asignación ideal. En consecuencia, esos defectos y excesos serán los mínimos y los máximos, respectivamente, que se van

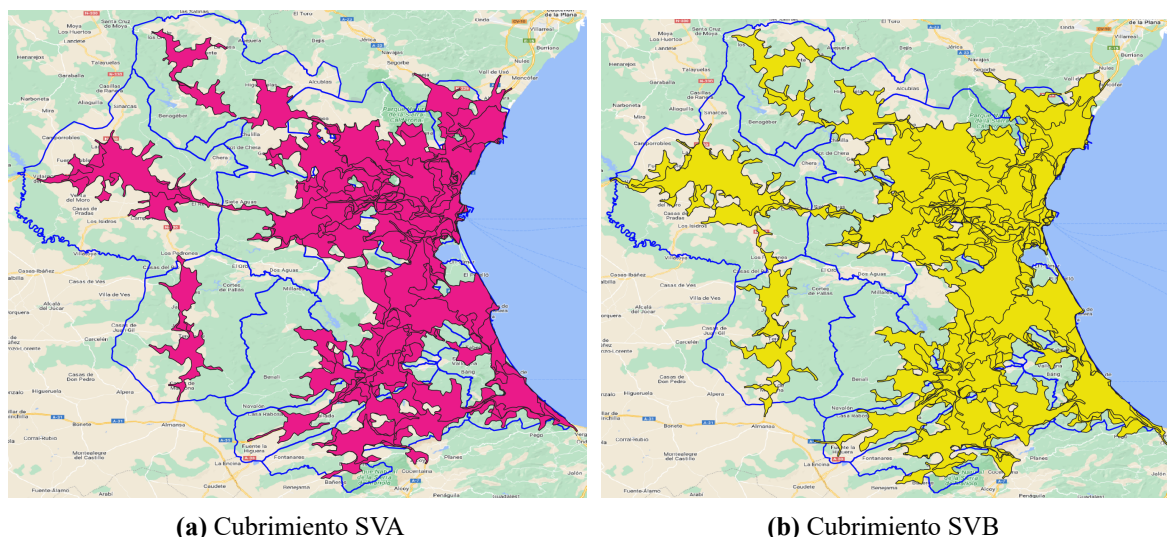


Figura 4.8: Cubrimiento ideal de la provincia de Valencia con los SVA y con los SVB, con tiempos máximos de isócrona de 12 y de 15 minutos, respectivamente

Fuente: *Elaboración propia*

| Asignación Ideal | D_{min}^{SVA} (%) | E_{max}^{SVA} (%) | D_{min}^{SVB} (%) | E_{max}^{SVB} (%) |
|----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Manises | 1,42 | 1766,84 | 0,45 | 2945,56 |
| La Ribera | 4,43 | 299,89 | 1,97 | 526,39 |
| La Malvarrosa | 0,16 | 2365,26 | 0,02 | 3472,64 |
| Xàtiva – Ontinyent | 5,93 | 190,01 | 2,90 | 349,82 |
| Requena | 19,33 | 76,18 | 13,66 | 134,56 |
| Doctor Peset | 2,04 | 3442,59 | 0,12 | 4905,49 |
| Sagunto | 2,69 | 362,50 | 0,68 | 643,06 |
| Arnau de Vilanova – Llíria | 5,46 | 1421,98 | 1,59 | 2438,11 |
| La Fe | 9,43 | 3029,44 | 4,67 | 4236,80 |
| Hospital General | 3,76 | 2679,13 | 1,55 | 3893,38 |
| Gandía | 4,20 | 286,16 | 1,90 | 411,55 |
| TOTAL PROVINCIA | 4,29 | 1746,81 | 1,82 | 2615,59 |

Tabla 4.1: Resultados para la asignación ideal suponiendo recursos ilimitados para los SVA y los SVB

a poder conseguir en cada departamento de salud de la provincia de Valencia para las características definidas en este problema.

Se aprecia claramente en la Tabla 4.1 como con los SVB el defecto mínimo es menor que con los SVA y el exceso máximo es mayor. Esto es debido al tiempo máximo de isócrona estipulado para cada tipo de vehículo, que hace que su isócrona sea más grande y se pueda cubrir a una cantidad de población mayor puesto que, como se ha explicado anteriormente, los SVB atienden emergencias menos graves que los SVA. Lo que dice el exceso de cubrimiento es la cantidad de personas que están sobrecubiertas por una ambulancia. En este caso, por ejemplo para los SVA, va a haber, en promedio, 17 SVA de refuerzo para cubrir cada emergencia en toda la provincia. Como ya se ha explicado, esta situación es ideal y jamás se va a conseguir con los recursos disponibles, pero servirá para poder comparar si la solución propuesta por el modelo se aproxima o no a la asignación ideal. Además, para tener otra opción de comparación con respecto a los modelos propuestos, se han obtenido también los resultados de la asignación que el SES tiene actualmente en la provincia (véase la sección 4.8).

Si se quisiera obtener un cubrimiento total del territorio de la provincia de Valencia, habría que aumentar el tiempo de la isócrona. En la Figura 4.9a aparecen dibujadas isócronas de 60 minutos desde cada posible base de la provincia, y se puede ver como tampoco se llega a cubrir totalmente el territorio, aunque las pocas zonas que quedan sin cubrir son zonas montañosas o de difícil acceso a las que probablemente no se podría llegar

en vehículo. No obstante, una emergencia puede surgir en cualquier lugar, por lo que es importante conocer bien el territorio a cubrir y tener en cuenta todas las posibles zonas del mismo. De todas formas, a estos lugares de difícil acceso suelen enviar helicópteros medicalizados que son capaces de llegar más rápido y con mayor facilidad. Si se disminuye el tiempo de isócrona para ver el tiempo total necesario para cubrir, ya no todo el territorio, sino la parte del mismo en la que vive gente, se puede ver en la Figura 4.9b como el tiempo necesario pasa a ser de 30 minutos. Este tiempo es el doble del definido para los SVB y más del doble del fijado para los SVA.

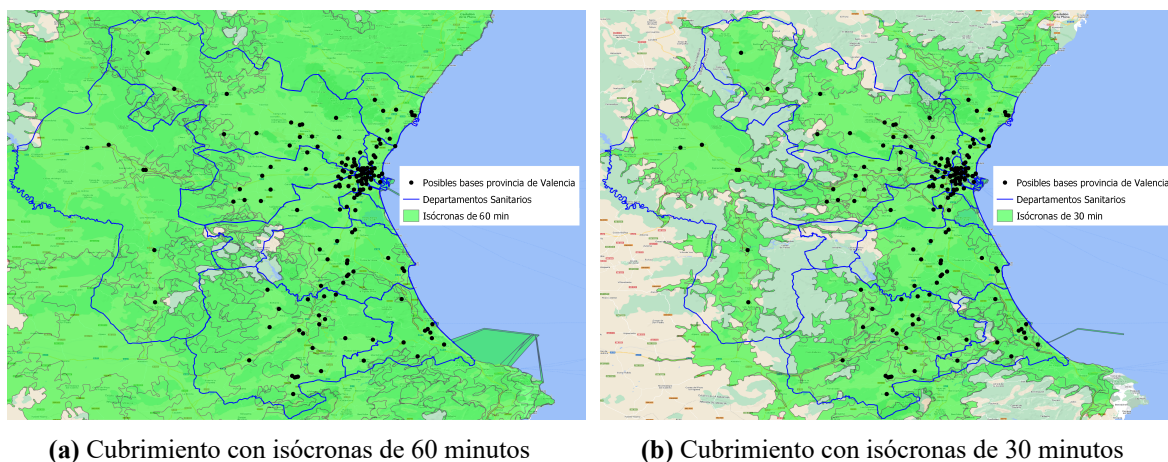


Figura 4.9: Cubrimiento de la provincia de Valencia con con tiempos de isócrona de 30 y de 60 minutos

Fuente: *Elaboración propia*

4.8. Asignación actual propuesta por el SES

La asignación actual es la solución que actualmente está implementada en la provincia de Valencia a criterio del SES. Esta solución utiliza 20 SVA y 47 SVB. En la Figura 4.10 y en las Tablas 4.2 y 4.3 se pueden ver los resultados cualitativos y cuantitativos, respectivamente. En la Tabla 4.2 se muestran los resultados por departamentos sanitarios, que es la unidad de referencia actualmente utilizada, y en la Tabla 4.3 se muestran por comarcas con el fin de poder realizar en el capítulo 6 la comparación pertinente con los resultados obtenidos en los modelos.

| Asignación Actual | D_{SVA} (%) | E_{SVA} (%) | D_{SVB} (%) | E_{SVB} (%) |
|----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Manises | 21,24 | 141,48 | 1,10 | 622,85 |
| La Ribera | 43,37 | 0,00 | 10,73 | 47,37 |
| La Malvarrosa | 18,57 | 153,30 | 0,12 | 482,62 |
| Xàtiva - Ontinyent | 61,78 | 0,00 | 22,65 | 2,39 |
| Requena | 41,13 | 0,00 | 20,37 | 32,76 |
| Doctor Peset | 10,92 | 191,65 | 0,29 | 867,34 |
| Sagunto | 33,90 | 0,00 | 2,63 | 214,99 |
| Arnau de Vilanova - Lliria | 39,72 | 101,00 | 6,08 | 442,24 |
| La Fe | 9,63 | 233,24 | 8,11 | 743,43 |
| Hospital General | 9,49 | 186,53 | 2,64 | 807,03 |
| Gandia | 32,81 | 8,37 | 5,23 | 95,68 |
| TOTAL PROVINCIA | 26,85 | 113,59 | 5,94 | 467,69 |

Tabla 4.2: Resultados por departamentos sanitarios para la asignación actual propuesta por el SES de la provincia de Valencia

Los SVA consiguen un mayor defecto que los SVB. Esto es debido a que los SVA tienen que llegar en

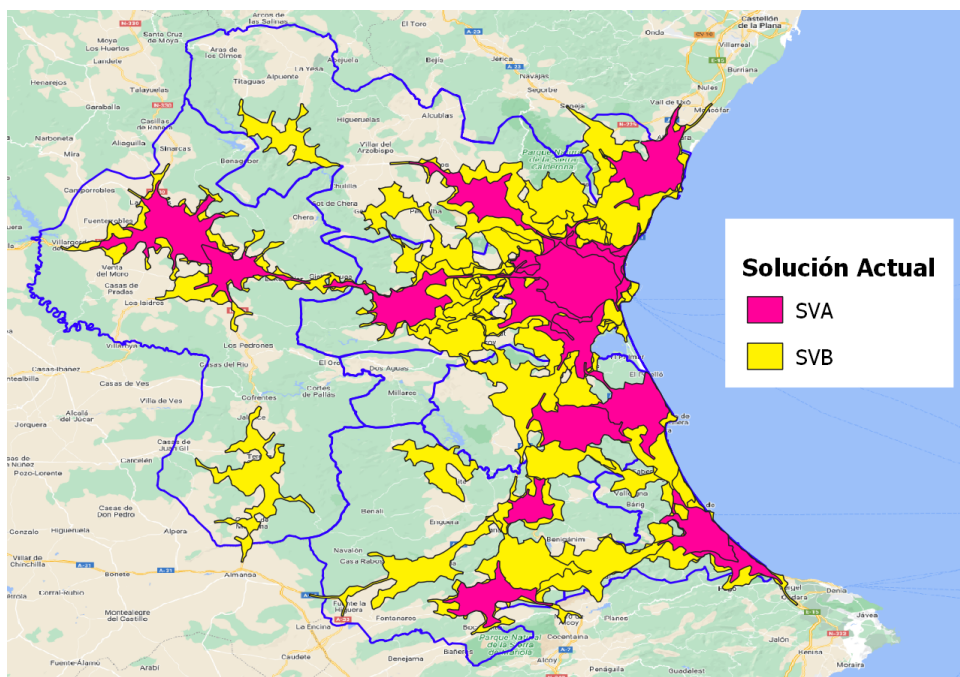


Figura 4.10: Asignación actual propuesta por el SES de la provincia de Valencia
 Fuente: *Elaboración propia*

| Asignación Actual | D_{SVA} (%) | E_{SVA} (%) | D_{SVB} (%) | E_{SVB} (%) |
|---------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| El Valle de Ayora | 100,00 | 261,01 | 22,41 | 785,55 |
| València | 8,33 | 79,62 | 2,97 | 419,00 |
| L'Horta Sud | 5,24 | 0,00 | 0,22 | 175,03 |
| La Ribera Alta | 60,39 | 0,00 | 12,59 | 179,50 |
| L'Horta Nord | 43,10 | 184,93 | 0,21 | 733,55 |
| La Ribera Baixa | 21,13 | 87,40 | 11,86 | 816,74 |
| La Canal de Navarrés | 100,00 | 11,89 | 48,94 | 96,10 |
| El Camp de Túria | 64,48 | 0,00 | 6,72 | 35,60 |
| Los Serranos | 97,36 | 0,00 | 63,62 | 35,92 |
| La Vall d'Albaida | 52,75 | 0,00 | 14,09 | 52,44 |
| La Safor | 30,63 | 0,00 | 5,50 | 227,28 |
| La Hoya de Buñol | 47,05 | 0,00 | 4,27 | 0,00 |
| La Plana de Utiel-Requena | 24,42 | 0,00 | 19,85 | 0,00 |
| La Costera | 56,78 | 0,00 | 21,71 | 0,00 |
| El Camp de Morvedre | 20,61 | 7,64 | 3,35 | 47,55 |
| L'Horta Oest | 6,64 | 0,00 | 1,54 | 0,00 |
| TOTAL PROVINCIA | 26,85 | 113,59 | 5,94 | 467,69 |

Tabla 4.3: Resultados por comarcas para la asignación actual propuesta por el SES de la provincia de Valencia

un tiempo no superior a 12 minutos, por lo que su isócrona es más pequeña que la de los SVB, que es de 15 minutos. Además, hay menos recursos disponibles de SVA que de SVB, ya que los primeros son más caros al estar más equipados y contar con personal médico. A partir de esta información, se podrán comparar los resultados obtenidos en el capítulo 6 por las variantes del modelo base de [2].

Capítulo 5

Metodología

5.1. Software utilizado

Para poder llevar a cabo este Trabajo Fin de Máster, se han utilizado diversos programas informáticos y lenguajes de programación, que se detallan a continuación.

QGIS versión 3.22.0 es un sistema de información geográfica de software libre y de código abierto disponible desde 2002 y programado en Python, Qt y C++. Se trata de un software muy útil y que cuenta con muchas funcionalidades para trabajar con mapas, crear isócronas, calcular distancias entre puntos, etc. Trabaja principalmente mediante capas, y las hay de dos tipos: vectoriales y ráster. En las capas vectoriales los elementos geográficos se representan a partir de tres estructuras básicas: puntos, líneas y polígonos. Estas estructuras almacenan las coordenadas de los vértices de cada elemento geográfico. Por otra parte, las capas ráster se caracterizan por la existencia de una red formada por celdas o cuadrículas (píxeles), de manera que cada píxel presenta una cualidad o propiedad espacial (color, altitud, población, etc.).

En este caso, las capas ráster utilizadas han sido el mapa base para poder observar todos los elementos ubicados en la provincia de Valencia y una capa que almacena datos de la población que vive en cada píxel del mapa, para poder conocer con exactitud la cantidad de habitantes que quedan cubiertos y sin cubrir. Las capas vectoriales utilizadas, por otro lado, han sido los departamentos sanitarios y las comarcas en que se divide la provincia, las posibles bases donde ubicar los VES y las isócronas de 12 y de 15 minutos calculadas. Con todos estos elementos, ya se está en disposición de obtener las matrices de población cubierta desde cada posible base por cada comarca/departamento sanitario. Todas las capas han sido obtenidas de la web del *Institut Cartogràfic de València* (ICV), a excepción de la capa de los departamentos sanitarios, que es de creación propia.

Para programar todos los modelos matemáticos se ha empleado el lenguaje de programación Python 3.9.7 mediante el entorno de desarrollo integrado de código abierto Spyder. Para resolver estos modelos, se ha utilizado la librería “docplex” que hace uso de CPLEX, un potente software de optimización para la toma de decisiones.

Para mostrar los resultados, se ha utilizado el software de hojas de cálculo de Microsoft Excel.

5.2. Algoritmo de resolución

En primer lugar, para poder resolver los modelos implementados es necesario obtener los datos de entrada a los modelos. Estos datos son, como ya se ha mencionado en la sección anterior, las matrices de población cubierta por comarcas/departamentos sanitarios desde cada posible base tanto para 12 minutos como para 15 minutos y también la población total a cubrir en cada departamento/comarca. Para obtener estas matrices hay que seguir los siguientes pasos:

1. En primer lugar, se importan en QGIS las capas ráster del mapa base (que se puede obtener de la herramienta *QuickMapServices* que ofrece QGIS), y la capa ráster de la distribución de la población, que ofrece información real y actualizada en el 2022 del número de personas que hay por celda¹. Esta última capa va a servir para calcular toda la población que cae en cada departamento a partir de las isócronas, como se explicará más adelante.
2. En segundo lugar, se importan en QGIS las capas vectoriales de las posibles bases donde ubicar los VES y de la unidad de referencia (o departamentos sanitarios o comarcas, dependiendo de la unidad que se vaya a utilizar). Una vez importadas, se utiliza la herramienta de *OpenRouteService* llamada *ORS Tools* para calcular las isócronas de 12 y 15 minutos desde cada una de las 157 posibles bases. Este proceso se realiza por lotes, para no tener que ir calculando cada isócrona una por una. Una vez calculadas todas las isócronas se representan en el mapa base, de manera que visualmente se puede observar en qué departamento/comarca cae cada parte de las isócronas. En la Figura 5.1 se puede ver un ejemplo de una isócrona que tiene una parte en el departamento de La Ribera y otra parte en el departamento de Xàtiva - Ontinyent.

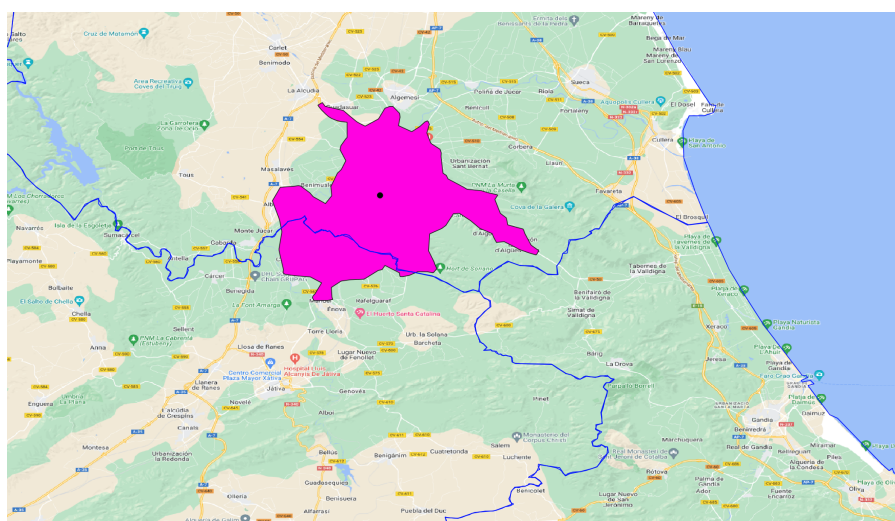


Figura 5.1: Ejemplo de situación en la que una isócrona cae en dos departamentos sanitarios distintos

Fuente: *Elaboración propia*

3. Una vez calculadas las isócronas, se utiliza la herramienta de gestión de datos de QGIS denominada “Unir capas vectoriales”, para poder trabajar con todas las isócronas a la vez y no por separado. Cuando todas las capas de las isócronas están combinadas en una sola, se realiza el geoproceso de intersección entre dichas isócronas con la capa vectorial de la unidad de referencia. De esta manera, se obtiene una capa vectorial que contiene toda la información de en qué departamento está cada parte de las isócronas. Finalmente, se utiliza otro geoproceso denominado “Estadísticas de la zona” que se encarga de extraer la cantidad de población que hay en cada una de esas intersecciones previamente calculadas. Así, se consigue obtener la matriz de población cubierta por departamento/comarca para cada posible base, que se extraerá en formato .xlsx para que sirva como dato de entrada en los modelos implementados en Python. En la Figura 5.2 se puede observar un ejemplo de la matriz de población cubierta calculada. La población total a cubrir por departamento sanitario o por comarca (según el caso), se obtendrán también a partir de QGIS y de la capa ráster mencionada.
4. Una vez obtenidos los datos de entrada, se procede a introducir el modelo matemático (que se puede ver en el capítulo 6) en Python. La salida de este modelo es un DataFrame (es como se conoce a una matriz de datos en Python) con el nombre de las bases donde se ubican los SVA y los SVB y los defectos y

¹Esta capa se obtiene de la web de GHSL - Global Human Settlement Layer. Se puede descargar desde https://ghsl.jrc.ec.europa.eu/ghs_pop2022.php

| Index | Dpto. Gandia | ... | Dpto. La Ribera |
|---|--------------|-----|-----------------|
| Gandia_Base CS Bellreguard | 106434 | ... | 0 |
| Gandia_Base CS Beniopa (Gandia) | 97496 | ... | 0 |
| Gandia_Base CS Castelló de Rugat | 6161 | ... | 0 |
| Gandia_Base CS Corea | 108360 | ... | 0 |
| Gandia_Base CS Grau de Gandia | 96974 | ... | 0 |
| ... | ... | ... | ... |
| La Ribera_Base CS Cullera | 2771 | ... | 40011 |
| La Ribera_Base CS Cullera Raval | 2382 | ... | 47328 |
| La Ribera_Base CS L'Alcúdia | 0 | ... | 89079 |
| La Ribera_Base CS Sueca | 156 | ... | 53577 |
| La Ribera_Base Hospital Universitario La Ribera | 0 | ... | 90146 |

[157 rows x 11 columns]

Figura 5.2: Matriz de población cubierta por departamentos sanitarios

Fuente: *Elaboración propia*

excesos de cubrimiento conseguidos por departamento sanitario. El problema es que esa matriz de salida no contiene información real, ya que el modelo no es capaz de discernir entre si la población que está dando por cubierta es diferente o es la misma. Todo esto es a causa de los solapamientos, ya explicados en la sección 4.5. Por lo tanto, el defecto que aparece en la matriz no es cierto y habrá que obtenerlo de otra manera. Respecto a los excesos, se considerará que sí que son reales, pero se tendrán que separar entre excesos conseguidos por los SVA y excesos conseguidos por los SVB, ya que el modelo te ofrece los resultados en conjunto. Para esto último, se realiza un script en Python que lee el DataFrame de salida de cada modelo y con la información de la ubicación de cada tipo de VES calcula la población cubierta en cada departamento por cada tipo de VES, obteniendo así los excesos deseados. Para los defectos, el proceso es un poco más complejo. Lo que hay que hacer es importar la solución obtenida por el modelo en QGIS, es decir, representar las isócronas desde las bases asignadas a los SVA y las isócronas desde las bases asignadas a los SVB. De esta manera, el defecto por tipo de VES será toda la parte de la provincia que no está cubierta por dichas isócronas. Esto se calcula mediante la herramienta “Diferencia” que hay en QGIS. En las Figuras 5.3 y 5.4 se puede ver un ejemplo para el caso de la solución actual propuesta por el SES.

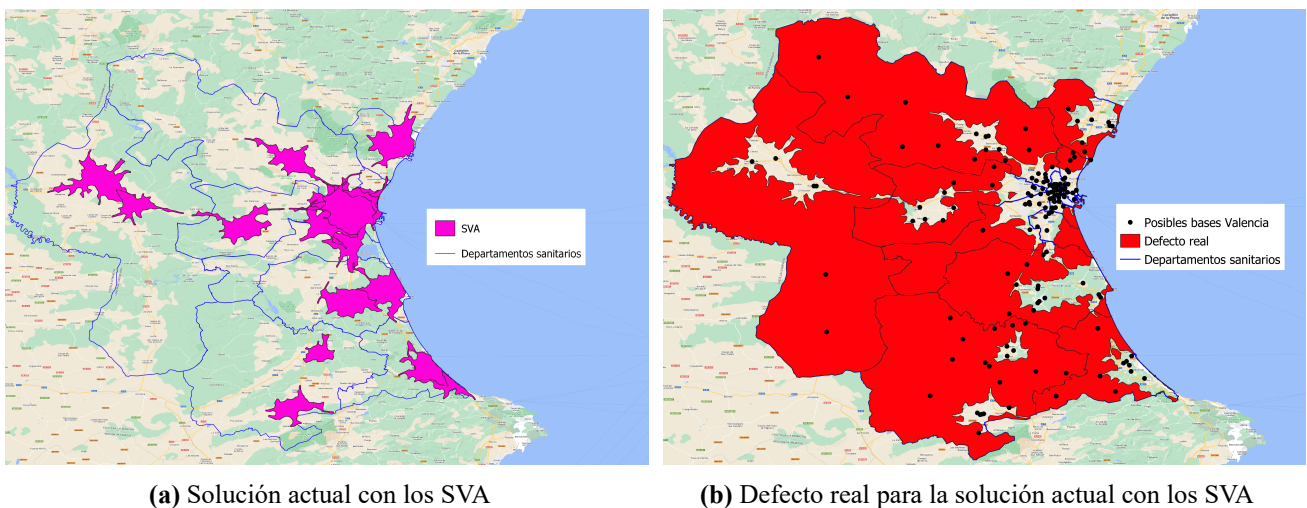


Figura 5.3: Ejemplo de obtención del defecto real en QGIS para la solución actual propuesta por el SES con los SVA

Fuente: *Elaboración propia*

En las Figuras 5.3a y 5.4a se muestra la solución obtenida para los SVA y para los SVB, respectivamente. Como el modelo está diciendo que el defecto es cero cuando no es así, se debe obtener el defecto real de cada uno de los modelos obtenidos. Para realizarlo, se dispone de la herramienta “Di-

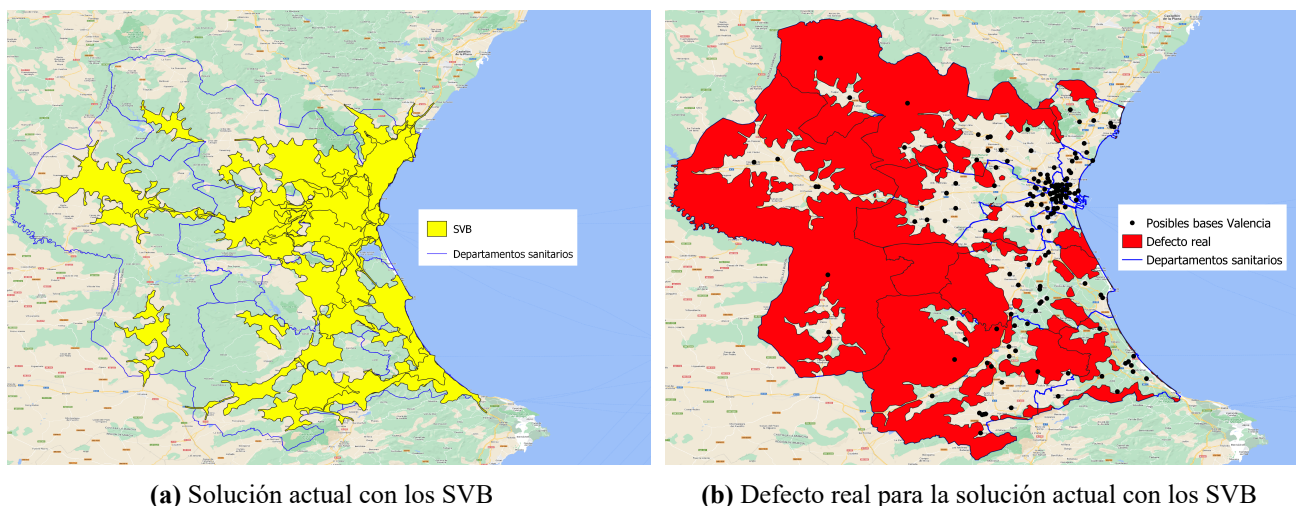


Figura 5.4: Ejemplo de obtención del defecto real en QGIS para la solución actual propuesta por el SES con los SVB

Fuente: *Elaboración propia*

ferencia”, como ya se ha mencionado, que ofrece toda la parte que no está cubierta por las isócronas y es lo que se observa en las Figuras 5.3b y 5.4b. Aunque en las figuras el defecto ocupa mucho territorio y se podría pensar que casi toda la provincia está sin cubrir, esto no es realmente así. Para hacerse una idea de la población realmente no cubierta, se han añadido al mapa las posibles bases donde ubicar un VES (puntos negros), ya que es ahí donde se supone que hay núcleos de población relativamente altos. Se puede ver que la cantidad de puntos negros que caen encima de la zona pintada en rojo es bastante pequeña por lo que, a grandes rasgos, el defecto real también lo es. Una vez obtenida esta diferencia, se pueden obtener los resultados de la población que queda realmente sin cubrir en cada departamento (o comarcas, en su caso), a partir de la capa ráster de la distribución de la población. Para no tener que repetir todo el proceso para todos los modelos o variantes calculados, se realiza un modelador gráfico en QGIS para automatizar este proceso.

5. Finalmente, una vez obtenidos todos los resultados, se exportan a formato .xlsx válido para Microsoft Excel y se realizan las tablas de resultados.

Capítulo 6

Modelización matemática y análisis de resultados

Todos los modelos que se van a presentar en este capítulo han sido resueltos en un ordenador con sistema operativo Windows 10, con RAM de 8GB y un procesador Intel® Core™ i7-7700HQ de 2,80GHz. El tiempo promedio que tardan los modelos en resolverse es de 1,3 segundos, lo que confirma la eficiencia de los mismos y resulta idóneo en este tipo de problemas en los que el Servicio de Emergencias Sanitarias han de tomar decisiones rápidas en poco tiempo. Además, los recursos utilizados de SVA y de SVB en todos los modelos han sido los mismos (20 y 47, respectivamente). Hay que destacar que todos los modelos planteados han sido pensados desde nuestro punto de vista pero intentando agregar características que podrían resultar lógicas para este tipo de servicio, ya que se desconoce la lógica utilizada por el SES para realizar su asignación de bases para los Vehículos de Emergencia Sanitaria. Por otro lado, el objetivo principal de los modelos implementados será mejorar el defecto de cubrimiento tanto para los SVA como para los SVB que tienen actualmente con la asignación propuesta por el SES de la provincia de Valencia, utilizando los mismos recursos. En este caso, mejorar quiere decir disminuir el defecto de cubrimiento. Si además de disminuir el defecto de cubrimiento, se consigue aumentar el exceso de cubrimiento, significará que la solución obtenida mejora en los dos aspectos.

6.1. Modelo 1: modelo inicial

El modelo matemático de localización estática de vehículos que se va a utilizar como punto de partida con el fin de ir adaptándolo para conseguir mejores resultados que los ofrecidos por la asignación actual (Tabla 4.2 de la sección 4.8) es el modelo que se presenta a continuación, y que se expone en [2]. La Tabla 6.1 muestra los parámetros y la nomenclatura utilizada. La Tabla 6.2 especifica las variables de decisión del modelo matemático.

A continuación, se expone la formulación del modelo.

$$\text{Min } Z = \sum_{i=A}^m D_i \quad (6.1)$$

s.a.

$$\sum_{j=1}^n (x_j^A \cdot h_{ij}^A + x_j^B \cdot h_{ij}^B) + D_i - E_i = h_i \quad \forall i \in M \quad (6.2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_j^A = F_A \quad (6.3)$$

| Parámetro | Significado |
|--------------------------------|--|
| $M = \{A, B, \dots, m\}$ | Conjunto de departamentos sanitarios en los que se divide la provincia de Valencia |
| $N = \{1, 2, \dots, n\}$ | Conjunto de posibles bases donde localizar el VES |
| $i \in M$ | Índice de los departamentos de salud |
| $j \in N$ | Índice de las posibles bases |
| h_i | Población total a cubrir en el departamento i |
| N_i | Conjunto de bases en el departamento i |
| h_{ij}^A | Población cubierta en el departamento i si se ubica un SVA en la base j |
| h_{ij}^B | Población cubierta en el departamento i si se ubica un SVB en la base j |
| F_A | Flota de SVA disponible |
| F_B | Flota de SVB disponible |
| f_A | Número mínimo de SVA a ubicar en cada departamento de salud |
| f_B | Número máximo de SVB a ubicar en cada departamento de salud |
| $K = \{k_1, k_2, \dots, k_v\}$ | Conjunto del conjunto de bases cuyas isócronas se solapan y cuya población cubierta es pequeña |
| $L = \{l_1, l_2, \dots, l_w\}$ | Conjunto del conjunto de bases cuyas isócronas se solapan y cuya población cubierta es grande |

Tabla 6.1: Parámetros del modelo de [2]

| Variable de decisión | Significado |
|----------------------|---|
| $x_j^A \in \{0, 1\}$ | Variable binaria que vale 1 si el SVA se ubica en la base j y 0 en caso contrario |
| $x_j^B \in \{0, 1\}$ | Variable binaria que vale 1 si el SVB se ubica en la base j y 0 en caso contrario |
| D_i | Denota la cantidad de población no cubierta en el departamento i |
| E_i | Denota la cantidad de población cubierta más de una vez en el departamento i |

Tabla 6.2: Variables de decisión del modelo de [2]

$$\sum_{j=1}^n x_j^B = F_B \quad (6.4)$$

$$x_j^A + x_j^B \leq 1 \quad \forall j \in N \quad (6.5)$$

$$\sum_{j=1}^{N_i} x_j^A \geq f_A \quad \forall i \in M \quad (6.6)$$

$$\sum_{j=1}^{N_i} x_j^B \leq f_B \quad \forall i \in M \quad (6.7)$$

$$\sum_{j \in k_s} (x_j^A + x_j^B) \leq 1 \quad \forall k_s \in K, \quad s = \{1, 2, \dots, v\} \quad (6.8)$$

$$\sum_{j \in l_s} (x_j^A + x_j^B) \leq 2 \quad \forall l_s \in L, \quad s = \{1, 2, \dots, w\} \quad (6.9)$$

$$x_j^A, x_j^B \in \{0, 1\} \quad \forall j \in N \quad (6.10)$$

$$D_i, E_i \geq 0 \quad (6.11)$$

La función objetivo 6.1 minimiza el defecto de cubrimiento total de la provincia de Valencia. Las restricciones 6.2 aseguran que la población de cada departamento sanitario sea cubierta por ambos tipos de VES en conjunto. Las restricciones 6.3 y 6.4 obligan a que el número de VES utilizados sea igual a los disponibles actualmente. El conjunto de restricciones 6.5 imponen que solo puede haber un VES por base. Las restricciones 6.6 y 6.7 fuerzan a que en cada departamento haya un número mínimo de SVA y un número máximo de SVB. Las restricciones 6.8 y 6.9 ayudan a resolver el problema de los solapamientos, obligando al modelo a ubicar solamente 1 o 2 VES en bases cuyas isócronas se solapen, según la cantidad de población solapada sea grande o pequeña, respectivamente. La restricción 6.10 define las variables como binarias, y la restricción 6.11 define la no negatividad de las variables de defecto y exceso.

La Tabla 6.3 muestra el defecto y el exceso de cubrimiento que se obtendría por departamentos sanitarios en términos porcentuales de la población tanto para los SVA como para los SVB. La última fila de dicha tabla muestra los resultados totales de la provincia para el caso de la asignación propuesta por el SES (sección 4.8).

| Modelo 1 | D_{SVA} (%) | E_{SVA} (%) | D_{SVB} (%) | E_{SVB} (%) |
|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Manises | 45,06 | 113,34 | 1,03 | 1015,25 |
| La Ribera | 65,88 | 0,00 | 30,45 | 0,00 |
| La Malvarrosa | 16,32 | 370,08 | 1,04 | 998,25 |
| Xàtiva - Ontinyent | 57,69 | 0,00 | 40,04 | 17,12 |
| Requena | 50,12 | 0,00 | 24,77 | 0,00 |
| Doctor Peset | 3,39 | 478,09 | 0,12 | 1580,84 |
| Sagunto | 47,38 | 0,00 | 21,84 | 58,15 |
| Arnau de Vilanova - Lliria | 54,61 | 76,03 | 10,29 | 630,20 |
| La Fe | 10,29 | 373,95 | 4,75 | 1282,67 |
| Hospital General | 35,36 | 258,36 | 3,75 | 1259,22 |
| Gandia | 31,91 | 0,00 | 19,05 | 50,38 |
| TOTAL PROVINCIA | 35,73 | 189,74 | 11,76 | 765,87 |
| TOTAL ASIGNACIÓN SES | 26,85 | 113,59 | 5,94 | 467,69 |

Tabla 6.3: Solución del modelo inicial, propuesto en [2]

Antes de comenzar a realizar el análisis de los resultados cabe mencionar que, en general, al disminuir el defecto de cubrimiento también lo hace el exceso, y viceversa. Esto es así porque minimizar el defecto implica que, generalmente, las isócronas se encuentren más distribuidas por el territorio, para poder cubrir a la mayor cantidad de habitantes posible, lo que hace que el solapamiento entre isócronas, es decir, lo que hace que haya población cubierta más de una vez, sea menor, traduciéndose todo ello en que el exceso también lo sea.

Si se compara esta solución con la obtenida por la asignación propuesta por el SES (Tabla 4.2) se aprecia que el defecto total de la provincia tanto para los SVA como para los SVB es mayor en este modelo inicial. Específicamente, se obtiene un defecto de 35,73 puntos para los SVA y de 11,76 puntos para los SVB, que es casi 9 y 6 puntos mayor que el conseguido con la asignación del SES, respectivamente. Sin embargo, el exceso de cubrimiento, tanto para SVA como para SVB, es mayor con el modelo 1.

En la Figura 6.1 se pueden comparar de manera gráfica los resultados de la asignación propuesta por el SES (Figuras 6.1a y 6.1c) con la obtenida con el modelo 1 (Figuras 6.1b y 6.1d).

La principal limitación de este modelo es que no distingue entre la población que hay cubierta por un SVA y la que hay cubierta por un SVB, sino que la trata por igual. De hecho, el modelo tiene preferencia por ubicar en primer lugar los SVB en las bases donde se cubre a mucha población ya que su tiempo de isócrona es mayor y, en segundo lugar, los SVA. Sin embargo, esto debería ser al revés ya que los segundos atienden emergencias más graves.

Para resolver estas limitación, se plantea la opción de realizar el modelo por partes, es decir, primero resolverlo para los SVA y después para los SVB.

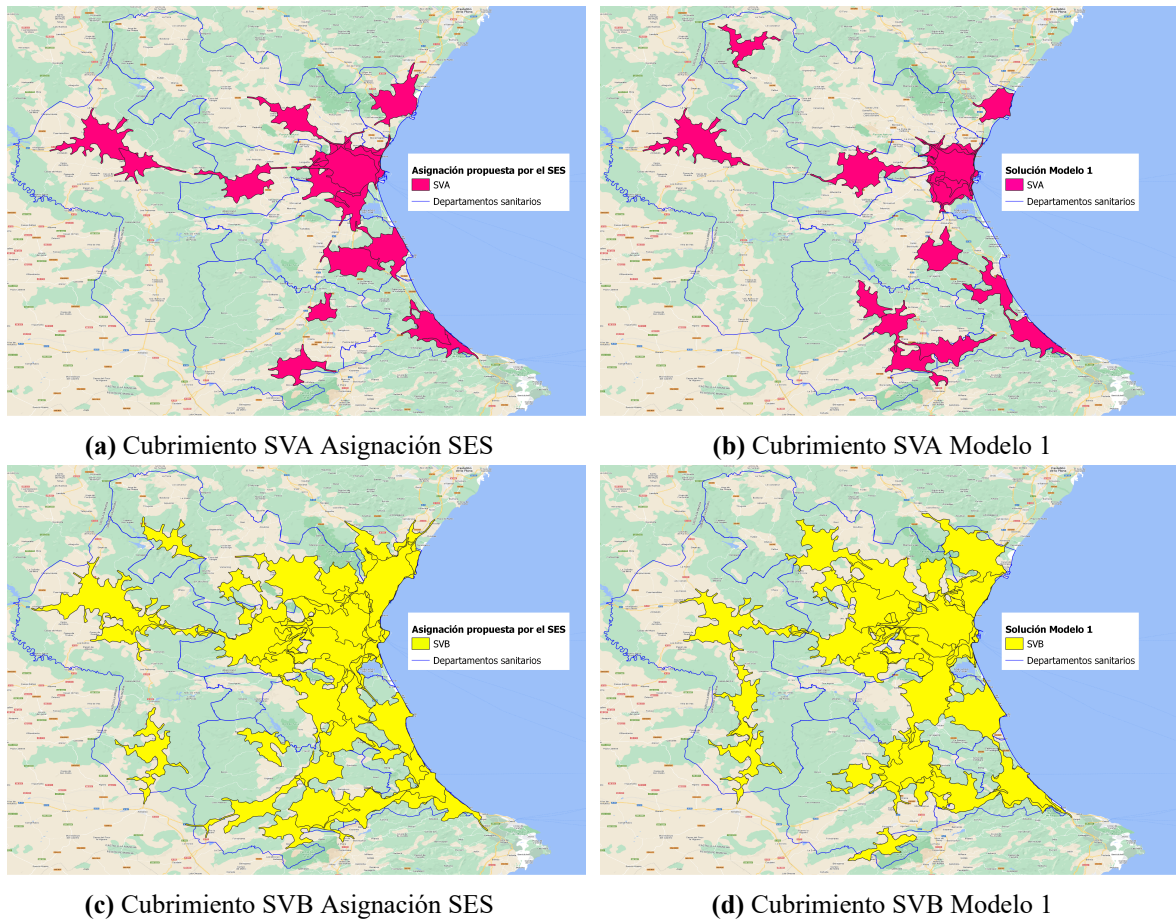


Figura 6.1: Comparación del cubrimiento por tipo de VES entre la asignación propuesta por el SES y el modelo 1

Fuente: *Elaboración propia*

6.2. Modelo 2: modelo por partes

El modelo planteado en esta sección es el mismo que el de la sección anterior pero resolviéndolo en dos iteraciones. En la primera iteración, el modelo tan solo tiene en cuenta los SVA y en la segunda iteración, una vez asignadas las bases de los SVA, se ubican los SVB. A continuación, se expone la formulación de este modelo por partes:

- Primera iteración:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=A}^m D_i \tag{6.12}$$

s.a.

$$\sum_{j=1}^n (x_j^A \cdot h_{ij}^A) + D_i - E_i = h_i \quad \forall i \in M \tag{6.13}$$

$$\sum_{j=1}^n x_j^A = F_A \tag{6.14}$$

$$\sum_{j=1}^{N_i} x_j^A \geq f_A \quad \forall i \in M \tag{6.15}$$

$$\sum_{j \in k_s} x_j^A \leq 1 \quad \forall k_s \in K, \quad s = \{1, 2, \dots, v\} \tag{6.16}$$

$$\sum_{j \in l_s} x_j^A \leq 2 \quad \forall l_s \in L, \quad s = \{1, 2, \dots, w\} \tag{6.17}$$

$$x_j^A \in \{0, 1\} \quad \forall j \in N \tag{6.18}$$

$$D_i, E_i \geq 0 \tag{6.19}$$

- Segunda iteración: aquí se repite el modelo de la sección 6.1 pero añadiendo la siguiente restricción, que es la que asigna los SVA a las bases obtenidas en la primera iteración.

$$x_j^A = 1 \quad \forall j \in \text{Solucion} \tag{6.20}$$

Realizando el modelo de esta manera, se obtienen los resultados que aparecen en la Tabla 6.4. Para visualizar los resultados de manera gráfica y poder compararlos con la asignación del SES, se presenta la Figura 6.2.

| Modelo 2 | D_{SVA} (%) | E_{SVA} (%) | D_{SVB} (%) | E_{SVB} (%) |
|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| Manises | 40,42 | 17,33 | 10,73 | 997,25 |
| La Ribera | 41,16 | 0,93 | 33,87 | 3,44 |
| La Malvarrosa | 10,03 | 34,55 | 0,09 | 1651,32 |
| Xàtiva - Ontinyent | 37,27 | 0,00 | 86,12 | 0,00 |
| Requena | 39,28 | 0,00 | 81,82 | 0,00 |
| Doctor Peset | 5,37 | 85,90 | 0,12 | 2191,72 |
| Sagunto | 18,11 | 17,19 | 10,74 | 102,14 |
| Arnau de Vilanova - Lliria | 54,16 | 1,00 | 4,44 | 862,84 |
| La Fe | 9,58 | 148,07 | 4,67 | 1809,94 |
| Hospital General | 12,89 | 62,35 | 12,53 | 1533,87 |
| Gandia | 24,03 | 23,06 | 95,64 | 0,00 |
| TOTAL PROVINCIA | 25,51 | 41,14 | 22,90 | 1031,03 |
| TOTAL ASIGNACIÓN SES | 26,85 | 113,59 | 5,94 | 467,69 |

Tabla 6.4: Solución del modelo 2

En este caso, se observa la notable mejora del defecto de cubrimiento para los SVA con respecto al modelo anterior, en contraposición con el defecto para los SVB. Ahora, se ha conseguido obtener una mejor asignación de los SVA, en lo que se refiere a disminuir el defecto de cubrimiento, pero los SVB no los está asignando del todo bien ya que el defecto de cubrimiento es mayor que el de la solución actual propuesto por el SES. La limitación anterior no se ha solucionado del todo, en el sentido de que el modelo está obteniendo el defecto en conjunto para ambos tipos de VES. Esto no debería ser así ya que, como se ha explicado en capítulos anteriores, cada tipo de VES atiende un tipo de emergencias distinto, por lo que estar cubierto por un SVB no significa que estés cubierto realmente, porque a lo mejor el tipo de emergencia surgida es muy grave y se necesita un SVA. En este caso, el SVA no llegaría en el tiempo de respuesta establecido y podría suponer un riesgo mayor en la situación del paciente. Por lo tanto, para solucionar definitivamente esta situación, se plantea dividir las variables de defecto y exceso en dos, una para cada tipo de vehículo.

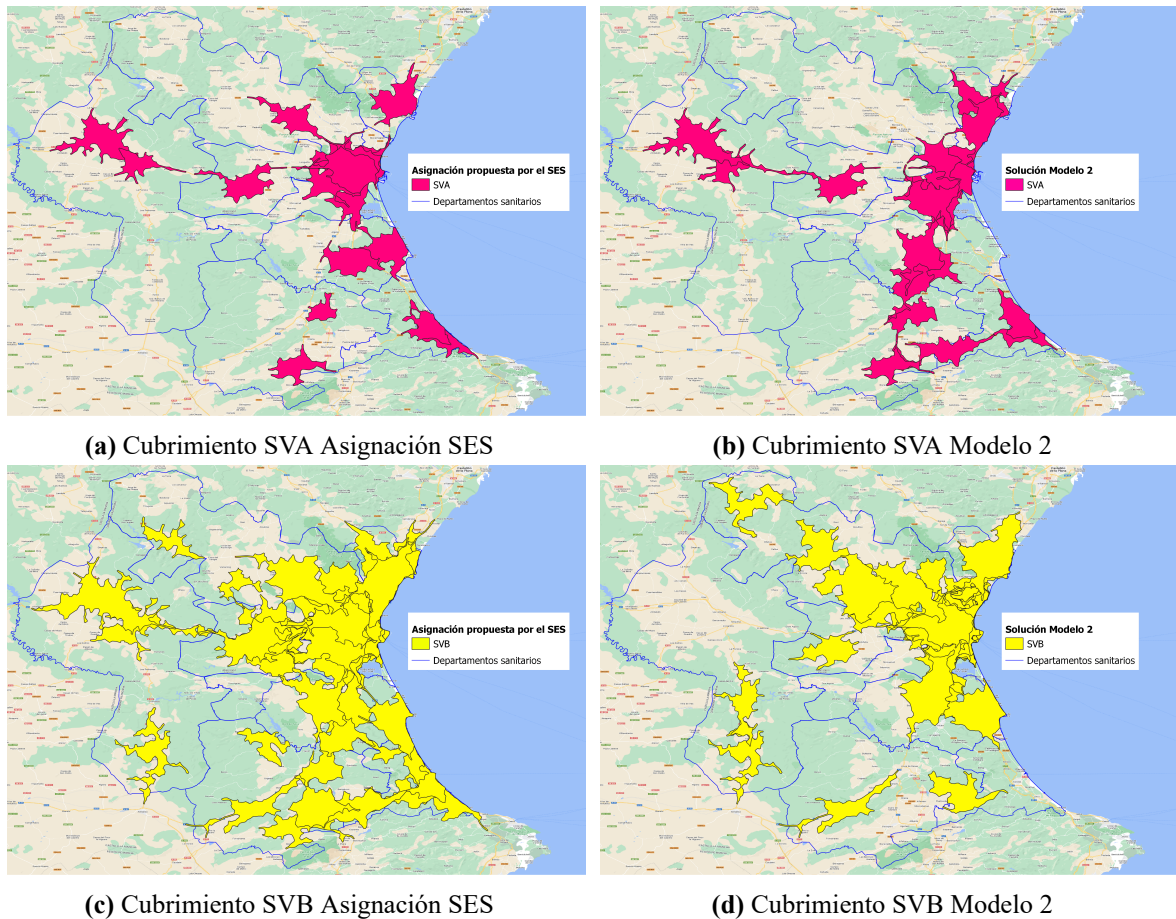


Figura 6.2: Comparación del cubrimiento por tipo de VES entre la asignación propuesta por el SES y el modelo 2

Fuente: *Elaboración propia*

6.3. Modelo 3: modelo separando el defecto y el exceso por tipo de VES

En primer lugar, se exponen en la Tabla 6.5 cómo se modifican las variables D_i y E_i en este nuevo modelo, cuyos parámetros siguen siendo los mismos que los mostrados en la Tabla 6.1.

| Variable de decisión | Significado |
|----------------------|--|
| D_i^A | Denota la cantidad de población no cubierta en el departamento i por los SVA |
| D_i^B | Denota la cantidad de población no cubierta en el departamento i por los SVB |
| E_i^A | Denota la cantidad de población cubierta más de una vez en el departamento i por los SVA |
| E_i^B | Denota la cantidad de población cubierta más de una vez en el departamento i por los SVB |

Tabla 6.5: Variables de decisión del modelo separando el defecto y el exceso por tipo de VES

La formulación del modelo matemático será como la del modelo 1 mostrado en la sección 6.1, pero modificando la función objetivo y algunas restricciones, como se muestra a continuación:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=A}^m (D_i^A + D_i^B) \quad (6.21)$$

s.a.

$$\sum_{j=1}^n (x_j^A \cdot h_{ij}^A) + D_i^A - E_i^A = h_i \quad \forall i \in M \quad (6.22)$$

$$\sum_{j=1}^n (x_j^B \cdot h_{ij}^B) + D_i^B - E_i^B = h_i \quad \forall i \in M \quad (6.23)$$

$$D_i^A, D_i^B, E_i^A, E_i^B \geq 0 \quad (6.24)$$

La función objetivo 6.21 minimiza la suma del defecto de cubrimiento para los SVA y para los SVB. La restricción 6.2 del modelo 1 ahora se divide en dos: una que hace referencia al cubrimiento de cada departamento sanitario por parte de los SVA (6.22) y otra referente al cubrimiento de los SVB (6.23). Por último, la restricción 6.24 define la no negatividad de las variables de defecto y exceso para cada tipo de VES.

La Tabla 6.6 muestra los resultados cuantitativos obtenidos para este modelo, y la Figura muestra los resultados cualitativos.

| Modelo 3 | D_{SVA} (%) | E_{SVA} (%) | D_{SVB} (%) | E_{SVB} (%) |
|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Manises | 44,30 | 5,96 | 5,56 | 218,29 |
| La Ribera | 41,16 | 0,93 | 12,02 | 27,56 |
| La Malvarrosa | 10,03 | 54,62 | 0,12 | 218,41 |
| Xàtiva - Ontinyent | 37,27 | 0,00 | 20,68 | 19,53 |
| Requena | 39,28 | 0,00 | 16,82 | 17,55 |
| Doctor Peset | 5,37 | 82,46 | 1,26 | 305,76 |
| Sagunto | 18,11 | 17,19 | 3,65 | 68,28 |
| Arnau de Vilanova - Llíria | 53,02 | 2,84 | 2,57 | 215,65 |
| La Fe | 9,58 | 165,66 | 9,24 | 342,66 |
| Hospital General | 12,89 | 69,45 | 2,80 | 319,25 |
| Gandia | 25,10 | 7,32 | 11,76 | 2,70 |
| TOTAL PROVINCIA | 25,74 | 44,16 | 6,49 | 191,61 |
| TOTAL ASIGNACIÓN SES | 26,85 | 113,59 | 5,94 | 467,69 |

Tabla 6.6: Solución del modelo 3

En este caso, el modelo ha conseguido un mejor equilibrio entre el defecto de cubrimiento para los SVA y el defecto de cubrimiento para los SVB, con respecto al modelo anterior. Si se compara la solución de este modelo con la propuesta por el SES, se puede ver que se disminuye el defecto para los SVA pero no para los SVB. Además, el exceso de cubrimiento no supera al de la solución propuesta por el SES para ningún tipo de VES, por lo que se deberían plantear otras opciones que consigan mejorar el defecto principalmente y, si es posible, también el exceso.

Los modelos que se van a presentar de aquí en adelante parten del modelo 3, es decir, con las variables de defecto y exceso de cubrimiento por separado para cada tipo de VES.

6.4. Modelo 4: modelo por lotes

Con el conocimiento de que se puede disminuir todavía más el defecto de cubrimiento que en el modelo 3, ya que existe la referencia de la asignación actual propuesta por el SES (que consigue un menor defecto de cubrimiento para los SVB que los modelos vistos hasta ahora), y teniendo como función objetivo minimizar el defecto de cubrimiento de los SVA y de los SVB, es lógico pensar que los modelos planteados hasta ahora no están teniendo en cuenta algún factor importante. Este factor es el cálculo que los modelos hacen de los defectos de cubrimiento, y todo viene por el problema de los solapamientos planteado en la sección 4.5. Todos

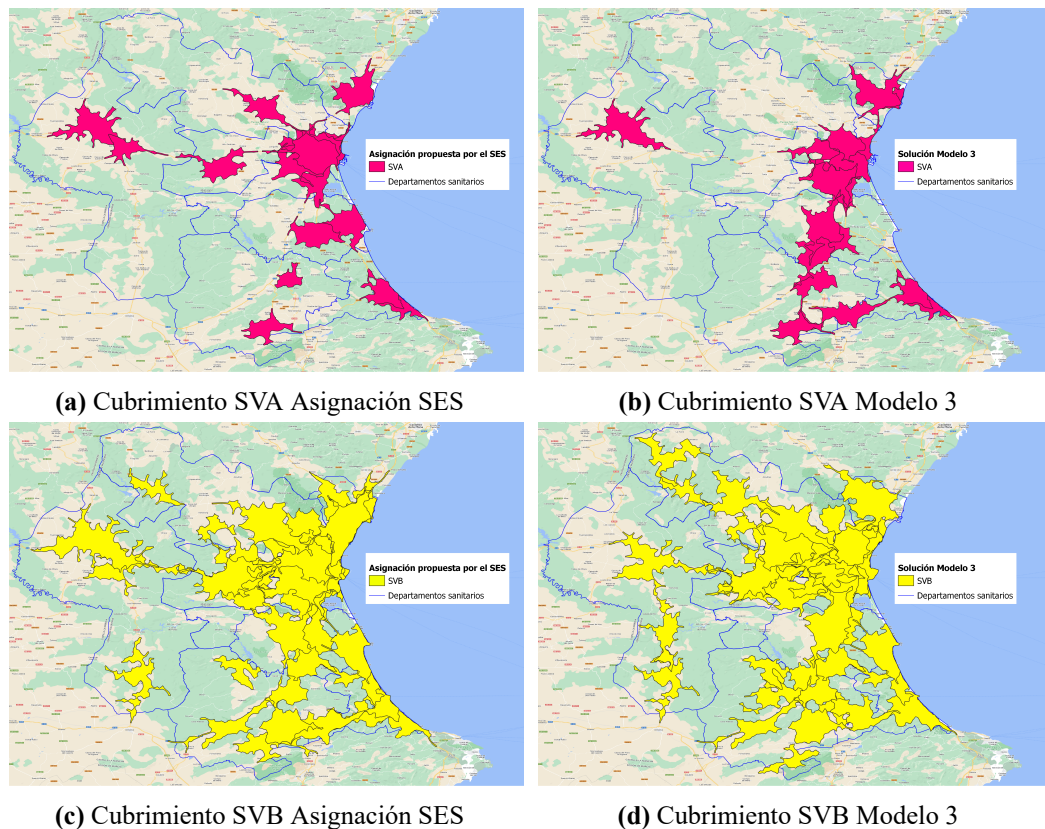


Figura 6.3: Comparación del cubrimiento por tipo de VES entre la asignación propuesta por el SES y el modelo 3

Fuente: *Elaboración propia*

los modelos están consiguiendo un resultado para la función objetivo de 0, por lo que sí que están consiguiendo el mínimo valor a su parecer. No obstante, este valor está “falseado”, no es real, debido a que se cuenta a la misma población más de una vez. En definitiva, el factor que le falta al modelo para poder realizar una mejor asignación de los VES y disminuir el defecto de cubrimiento es tener en cuenta el defecto real de la población según la asignación que realice de cada VES. Es decir, tiene que actualizar de alguna manera la información con información real de la cantidad de población que realmente no está cubriendo. Para ello, se plantea el siguiente modelo de cubrimiento cuya diferencia con el anterior radica en que se resuelve por lotes, es decir, primero se resuelve para una cantidad de SVA y SVB (siempre una cantidad menor que la disponible), se actualiza la información de los datos de entrada del modelo y se vuelve a resolver para los SVA y los SVB restantes (teniendo en cuenta la asignación de los VES obtenida en la primera iteración). Para actualizar dicha información, se sigue la metodología planteada en el capítulo 5. Se puede ver un ejemplo del proceso seguido para actualizar la información (en el caso de los SVA) en la Figura 6.4. En esta Figura se muestran las posibles bases de la provincia de Valencia (puntos negros) para que el lector pueda hacerse una idea de que, aunque el defecto real (Figura 6.4b) parezca muy grande porque el cubrimiento territorial de la solución es pequeño (Figura 6.4a), no implica que el cubrimiento de población sea pequeño, y representar estos puntos ayuda a hacerse una idea de dónde está distribuida la población.

Primero, al resolver el modelo para el primer lote de VES, se plasma la solución obtenida en QGIS (Figura 6.4a). Después, a partir de esta solución, se obtiene el defecto real de cubrimiento para cada tipo de VES, por lo que la población total a cubrir por cada departamento sanitario, que es el parámetro h_i de la Tabla 6.1, ya no será la misma, sino que será la obtenida en ese defecto real (Figura 6.4b). Seguidamente, se recalculan las matrices de población cubierta por cada VES desde cada posible base para cada departamento (parámetros h_{ij}^A y h_{ij}^B de la Tabla 6.1). Esto último se obtiene realizando la intersección de todas las isócronas de 12 o de 15 minutos (en este caso de 12, ya que se está realizando el ejemplo para los SVA) desde cada posible base con la capa del

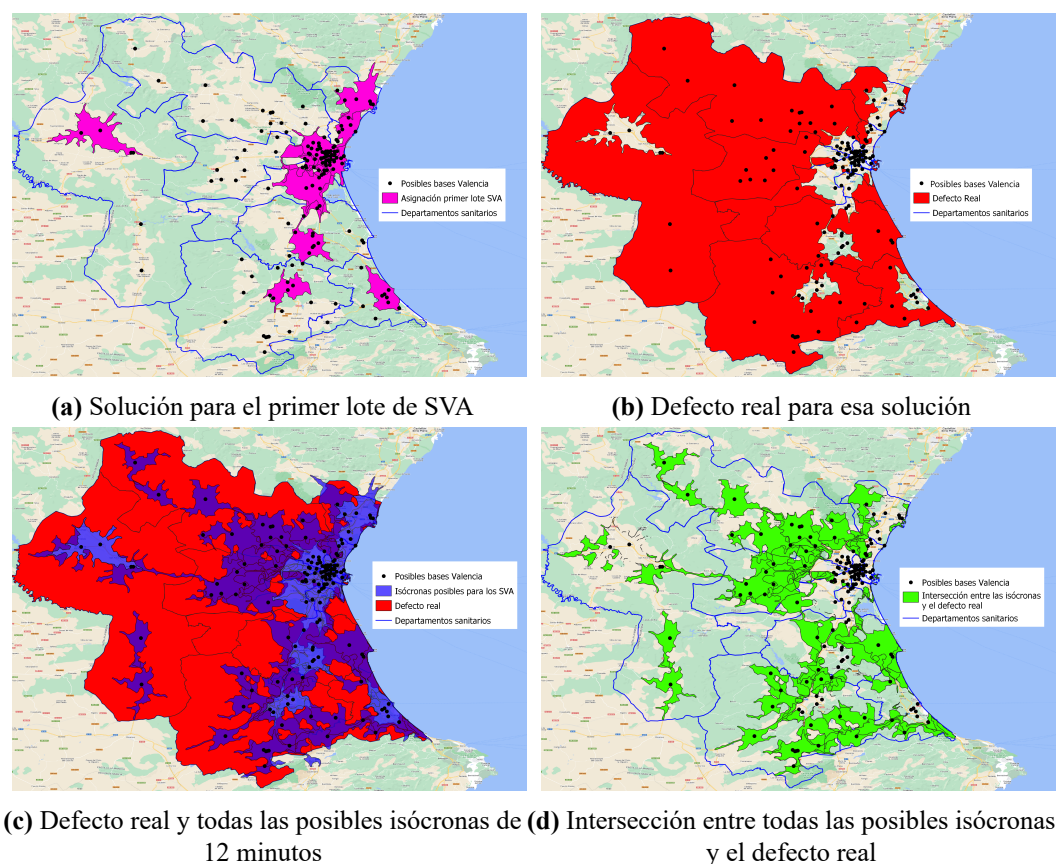


Figura 6.4: Proceso de actualización de los datos de entrada para el modelo por lotes

Fuente: *Elaboración propia*

defecto real (el polígono rojo que aparece en la Figura 6.4b). Las Figuras 6.4c y 6.4d muestran este paso. Una vez obtenidos los datos de entrada actualizados, se introducen en el modelo y se resuelve para los VES restantes. En este caso, para resolver el modelo el primer lote ha sido de 11 SVA (uno por cada departamento de salud) y de 24 SVB (más o menos la mitad de los SVB disponibles, que son 47). Por lo tanto, el segundo lote es de 9 SVA y 23 SVB.

Realizando este modelo, se obtienen los resultados de la Tabla 6.7. En dicha tabla se aprecia que se ha conseguido disminuir el defecto de los SVA en casi 4,5 puntos con respecto al modelo anterior, y en más de 5 puntos con respecto a la solución propuesta por el SES. Además, los excesos de cubrimiento de los SVA y de los SVB mejoran al del SES en aproximadamente 9 y 75 puntos, respectivamente. Por otra parte, el defecto de los SVB se queda a tan solo 0,03 puntos del de la solución del SES. En definitiva, esta solución es la que más se aproxima hasta el momento a la solución ofrecida por el SES, en lo que se refiere a los resultados totales de defecto y exceso de cubrimiento de la provincia.

Para visualizar la solución de este modelo, y poder compararlo con la solución del SES, se puede observar la Figura 6.5.

Una vez obtenido el mejor modelo planteado hasta ahora, en lo que a menor defecto de cubrimiento para los SVA y los SVB se refiere, se va a cambiar la unidad territorial pasando a comarcas para resolver tanto este modelo 4 como el modelo 3 de la sección 6.3. De esta manera, si los resultados mejoran, se podrá conocer y diferenciar el grado de importancia que ha tenido en dicha mejora el cambio de la unidad territorial de referencia y la resolución del modelo por lotes.

| Modelo 4 | D_{SVA} (%) | E_{SVA} (%) | D_{SVB} (%) | E_{SVB} (%) |
|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Manises | 14,22 | 174,08 | 10,36 | 581,41 |
| La Ribera | 54,21 | 0,00 | 7,29 | 101,44 |
| La Malvarrosa | 4,20 | 143,04 | 0,93 | 598,85 |
| Xàtiva - Ontinyent | 48,16 | 0,00 | 6,47 | 84,74 |
| Requena | 50,12 | 0,00 | 15,99 | 32,12 |
| Doctor Peset | 4,17 | 172,66 | 0,12 | 1187,11 |
| Sagunto | 18,29 | 0,00 | 5,45 | 98,73 |
| Arnau de Vilanova - Lliria | 23,41 | 111,29 | 10,09 | 339,59 |
| La Fe | 9,61 | 243,49 | 8,04 | 955,22 |
| Hospital General | 8,45 | 247,55 | 2,79 | 934,34 |
| Gandia | 39,65 | 0,00 | 8,91 | 67,89 |
| TOTAL PROVINCIA | 21,43 | 122,44 | 5,97 | 543,48 |
| TOTAL ASIGNACIÓN SES | 26,85 | 113,59 | 5,94 | 467,69 |

Tabla 6.7: Solución del modelo por lotes

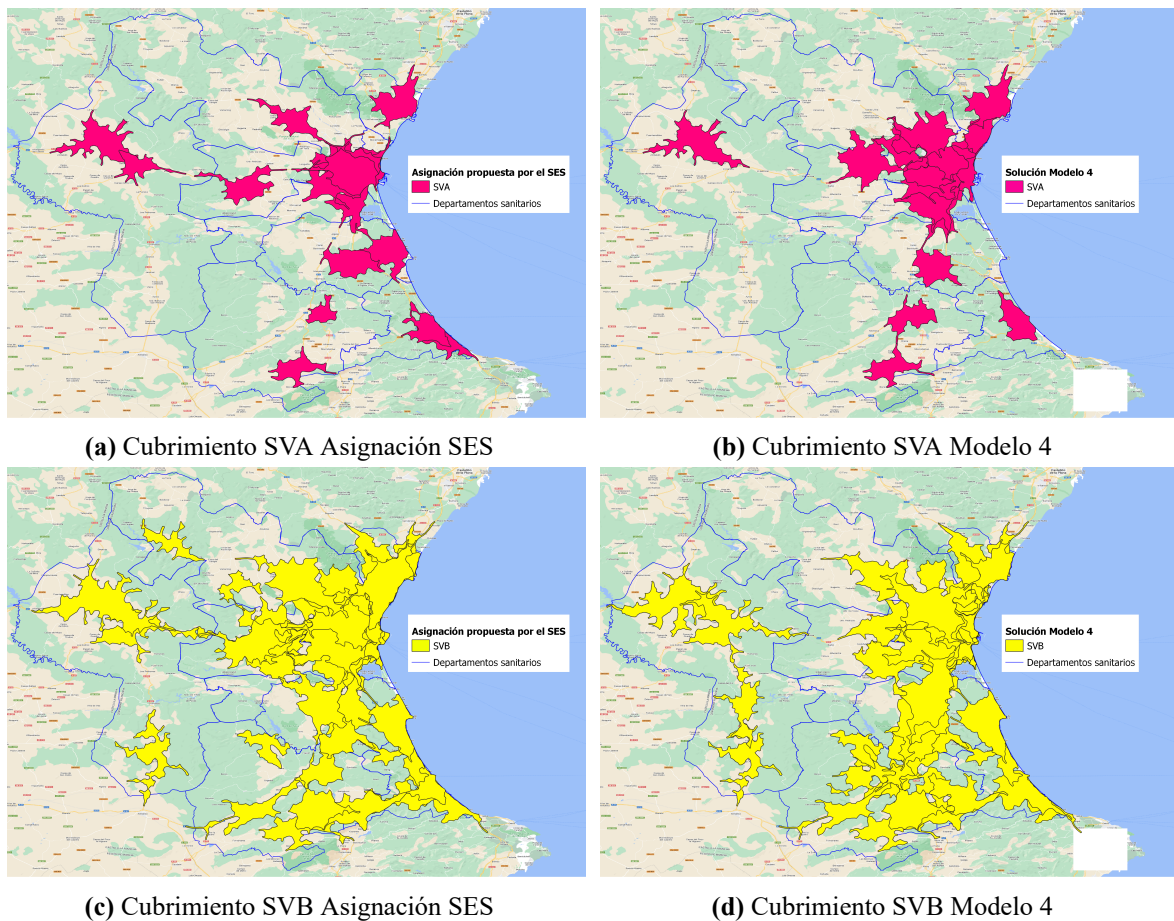


Figura 6.5: Comparación del cubrimiento por tipo de VES entre la asignación propuesta por el SES y el modelo 4

Fuente: *Elaboración propia*

6.5. Modelos 3 y 4 resueltos por comarcas

6.5.1. Modelo 5: modelo 3 por comarcas

Para conocer el impacto que puede tener en el modelo el cambio de la unidad territorial de referencia, se resuelve ahora el modelo 3 visto en la sección 6.3 por comarcas, en lugar de por departamentos sanitarios. Es decir, ahora el parámetro i que se define en la Tabla 6.1 ya no es el índice para los departamentos sanitarios, sino para las comarcas.

En la Tabla 6.8 se muestran los resultados obtenidos para este modelo. En ella se puede ver que el defecto de cubrimiento para los SVA es 5 puntos menor resolviéndolo por comarcas que resolviéndolo por departamentos sanitarios. Sin embargo, no ocurre lo mismo para los SVB, cuyo defecto es ahora casi 4 puntos mayor que el modelo 3. Si se compara la solución de este modelo por comarcas con la propuesta por el SES ocurre lo mismo, es decir, se mejora el defecto para los SVA pero no se consigue para los SVB. Además, el exceso de cubrimiento es más pequeño para ambos tipos de VES que para la asignación del SES. En la Figura 6.6 se puede comparar gráficamente la solución de este modelo con la solución del SES.

| Modelo 5 | D_{SVA} (%) | E_{SVA} (%) | D_{SVB} (%) | E_{SVB} (%) |
|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| El Valle de Ayora | 100,00 | 0,00 | 12,42 | 9,35 |
| València | 8,14 | 59,59 | 5,11 | 448,58 |
| L'Horta Sud | 1,53 | 54,70 | 0,05 | 912,22 |
| La Ribera Alta | 30,13 | 0,00 | 10,25 | 105,84 |
| L'Horta Nord | 19,93 | 1,51 | 11,54 | 136,85 |
| La Ribera Baixa | 20,80 | 0,00 | 53,67 | 7,28 |
| La Canal de Navarrés | 100,00 | 0,00 | 5,33 | 94,13 |
| El Camp de Túria | 28,24 | 1,74 | 10,14 | 113,69 |
| Los Serranos | 99,70 | 0,00 | 15,12 | 0,73 |
| La Vall d'Albaida | 48,57 | 0,00 | 25,59 | 9,41 |
| La Safor | 33,65 | 12,48 | 11,03 | 0,42 |
| La Hoya de Buñol | 26,67 | 21,74 | 9,47 | 45,77 |
| La Plana de Utiel-Requena | 22,11 | 18,95 | 15,40 | 23,53 |
| La Costera | 23,66 | 0,00 | 46,86 | 0,79 |
| El Camp de Morvedre | 23,45 | 11,04 | 7,77 | 71,43 |
| L'Horta Oest | 23,27 | 6,50 | 3,34 | 419,53 |
| TOTAL PROVINCIA | 20,76 | 24,96 | 10,17 | 290,49 |
| TOTAL MODELO 3 | 25,74 | 44,16 | 6,49 | 191,61 |
| TOTAL ASIGNACIÓN SES | 26,85 | 113,59 | 5,94 | 467,69 |

Tabla 6.8: Solución del modelo 5

Veamos ahora si realizando el modelo 4 (modelo por lotes) por comarcas se consigue mejorar dicho modelo, que es el que mejores resultados ha obtenido hasta el momento.

6.5.2. Modelo 6: modelo 4 por comarcas

En la Tabla 6.9 aparecen los resultados obtenidos para el modelo 6. En este caso, el defecto de cubrimiento para ambos tipos de vehículos ha disminuido, tanto con respecto a su modelo homólogo (el modelo 4) como con respecto a la solución propuesta por el SES. Dicha disminución del defecto total de la provincia asciende a más de 7 puntos para los SVA y casi 2 puntos para los SVB con respecto a la solución del SES. Además, el exceso de cubrimiento para los SVA se queda muy cerca del de la asignación del SES (a menos de 4 puntos). En contraposición, el exceso para los SVB empeora en poco más de 250 puntos, debido a que para disminuir el defecto de cubrimiento se ha obtenido una solución más distribuida territorialmente que hace que el solapamiento y, por ende, el exceso sea menor. Aun y todo, el exceso de SVB es de casi 200 puntos, lo cual no está nada mal ya que significa que, en promedio para toda la provincia, van a haber dos SVB para cubrir cada emergencia.

Por otro lado, se aprecia que el impacto de realizar el modelo por lotes es mayor que el de cambiar la unidad

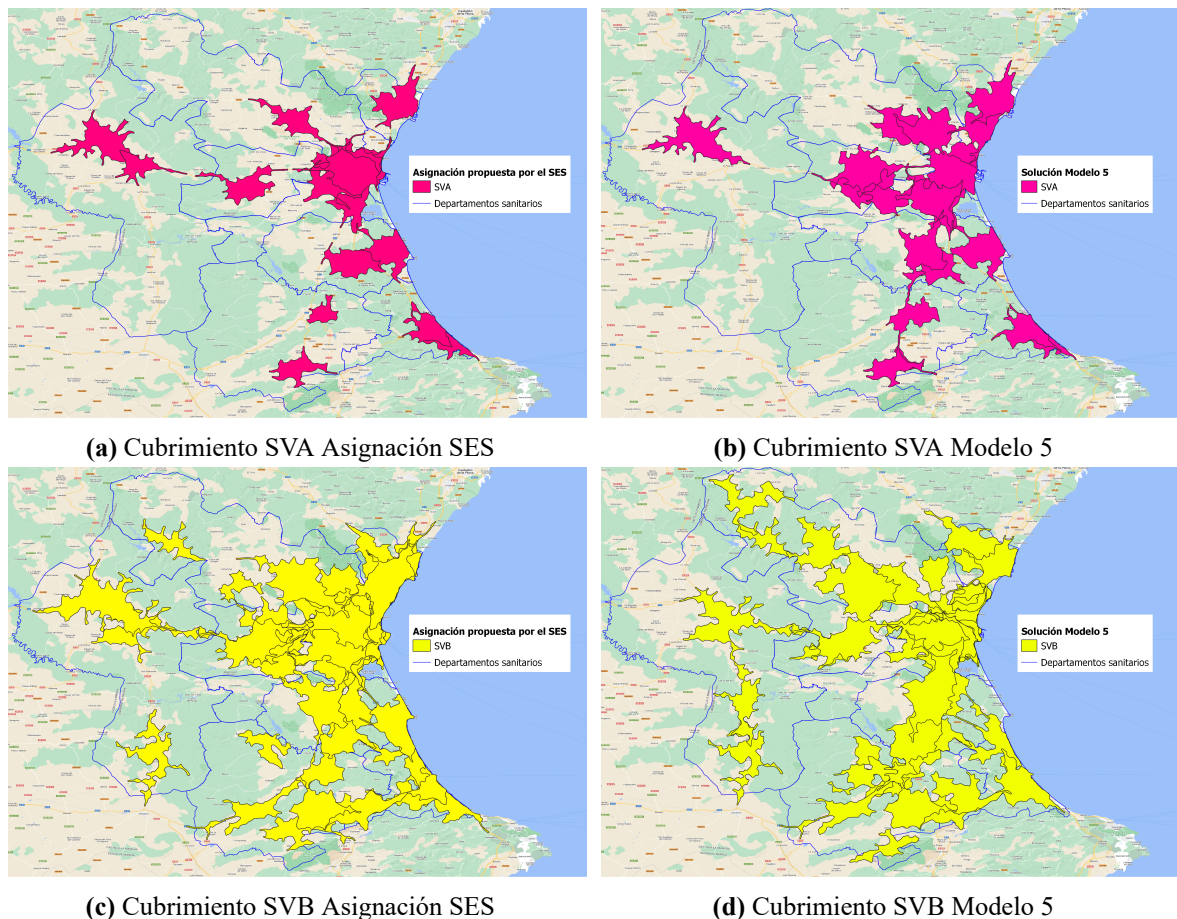


Figura 6.6: Comparación del cubrimiento por tipo de VES entre la asignación propuesta por el SES y el modelo 5

Fuente: *Elaboración propia*

territorial de referencia para el objetivo de minimizar el defecto. Es decir, resolver el modelo por lotes reduce en mayor cantidad los defectos de cubrimiento de cada tipo de VES. Por otro lado, cambiar la unidad territorial de referencia a comarcas ayuda a disminuir el defecto pero empeora el exceso. De hecho, no se podría hablar de una mejor solución entre los modelos 4 y 6, ya que depende de lo que le interese al Servicio de Emergencias Sanitarias. Para este TFM, como el objetivo es minimizar el defecto de cubrimiento, se optaría por el modelo 6, que se resuelve por lotes y por comarcas.

En la Figura 6.7 aparecen los mapas con la solución obtenida para cada tipo de VES, y se compara con la asignación de VES propuesta por el SES. Se observa como la distribución realizada por el modelo (Figuras 6.7b Figuras 6.7d) está mucho más extendida por el territorio (sobre todo los SVB), mientras que la solución propuesta por el SES (Figuras 6.7a y 6.7c) opta por una distribución más agrupada en zonas donde la población residente es muy grande. De ahí que el exceso de cubrimiento de la solución del SES sea bastante mayor (sobre todo para los SVB) que el del modelo final, que prefiere cubrir a más cantidad de personas al menos una vez, es decir, minimizar el defecto de cubrimiento.

En consecuencia, realizar el modelo por lotes ayuda a mejorar tanto el defecto como el exceso, mientras que cambiar la unidad territorial de referencia a una más pequeña (como son las comarcas en este caso) consigue que mejore el defecto, pero no el exceso. En definitiva, se ha demostrado que el mayor efecto en la mejora del defecto de cubrimiento para ambos tipos de VES lo tiene la resolución del modelo por lotes, y no tanto el cambio en la unidad de referencia. Esto es así debido a que el modelo por lotes tiene en cuenta información real y actualizada, y el modelo con esta información puede conseguir los resultados más acordes al objetivo planteado.

| Modelo 6 | D_{SVA} (%) | E_{SVA} (%) | D_{SVB} (%) | E_{SVB} (%) |
|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| El Valle de Ayora | 100,00 | 0,00 | 12,42 | 9,35 |
| València | 6,04 | 184,77 | 2,96 | 205,52 |
| L'Horta Sud | 1,66 | 176,90 | 0,21 | 416,46 |
| La Ribera Alta | 24,78 | 0,00 | 5,69 | 117,72 |
| L'Horta Nord | 11,07 | 93,48 | 0,36 | 206,17 |
| La Ribera Baixa | 87,00 | 0,00 | 5,95 | 66,62 |
| La Canal de Navarrés | 100,00 | 0,00 | 5,33 | 116,09 |
| El Camp de Túria | 28,42 | 0,00 | 8,12 | 212,19 |
| Los Serranos | 99,70 | 0,00 | 15,11 | 13,69 |
| La Vall d'Albaida | 60,36 | 0,00 | 7,83 | 86,93 |
| La Safor | 37,59 | 0,00 | 9,27 | 63,49 |
| La Hoya de Buñol | 35,17 | 0,00 | 3,43 | 181,83 |
| La Plana de Utiel-Requena | 35,20 | 0,00 | 14,78 | 42,10 |
| La Costera | 23,48 | 0,00 | 7,10 | 116,08 |
| El Camp de Morvedre | 20,61 | 0,00 | 3,45 | 82,44 |
| L'Horta Oest | 6,73 | 237,62 | 1,68 | 310,16 |
| TOTAL PROVINCIA | 19,64 | 109,71 | 4,09 | 196,07 |
| TOTAL MODELO 4 | 21,43 | 122,44 | 5,97 | 543,48 |
| TOTAL ASIGNACIÓN SES | 26,85 | 113,59 | 5,94 | 467,69 |

Tabla 6.9: Solución del modelo 6

6.6. Comparación de resultados

Para poder visualizar claramente todos los resultados obtenidos en los modelos, se resumen en la Tabla 6.10 los resultados totales de todos y cada uno de los modelos, así como de la asignación propuesta por el SES y la asignación ideal.

| Resultados Totales | Defecto SVA | Exceso SVA | Defecto SVB | Exceso SVB |
|------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| Asignación ideal | 4,29 | 1746,81 | 1,82 | 2615,59 |
| Asignación actual SES | 26,85 | 113,59 | 5,94 | 467,69 |
| Modelo 1 | 35,73 | 189,74 | 11,76 | 765,87 |
| Modelo 2 | 25,51 | 41,14 | 22,9 | 1031,03 |
| Modelo 3 | 25,74 | 44,16 | 6,49 | 191,61 |
| Modelo 4 | 21,43 | 122,44 | 5,97 | 543,48 |
| Modelo 5 | 20,76 | 24,96 | 10,17 | 290,49 |
| Modelo 6 | 19,64 | 109,71 | 4,09 | 196,07 |

Tabla 6.10: Resumen de los resultados totales para la provincia de Valencia para todos los modelos descritos

En verde aparecen pintados los resultados que mejoran el defecto de cubrimiento de la asignación propuesta por el SES y en azul los resultados que mejoran el exceso de cubrimiento. Como el objetivo perseguido es el de disminuir el defecto de la solución del SES, el único modelo que consigue mejorarlo para ambos tipos de VES es el modelo 6. Aun así, el modelo 4 consigue muy buenos resultados, ya que se queda a 0,03 puntos del defecto de cubrimiento para los SVB y el exceso de cubrimiento para estos vehículos es mayor. En consecuencia, los modelos que consiguen la mejor asignación de las ambulancias, en lo referido a que son los que menor defecto de cubrimiento consiguen, son el modelo 4 y el modelo 6. Por tanto, serán estos modelos los que se analizarán y compararán con la asignación del SES con mayor detalle.

En la Figura 6.8 se aprecia claramente como la solución del modelo 6 (Figura 6.8c) se encuentra mucho más distribuida territorialmente. Es por esto por lo que el defecto de cubrimiento es el más pequeño de todos, aunque esto se consigue en detrimento del exceso de cubrimiento. Respecto al modelo 4 (Figura 6.8b), ofrece una solución más parecida a la propuesta por el SES (Figura 6.8a) tanto visualmente como cuantitativamente,

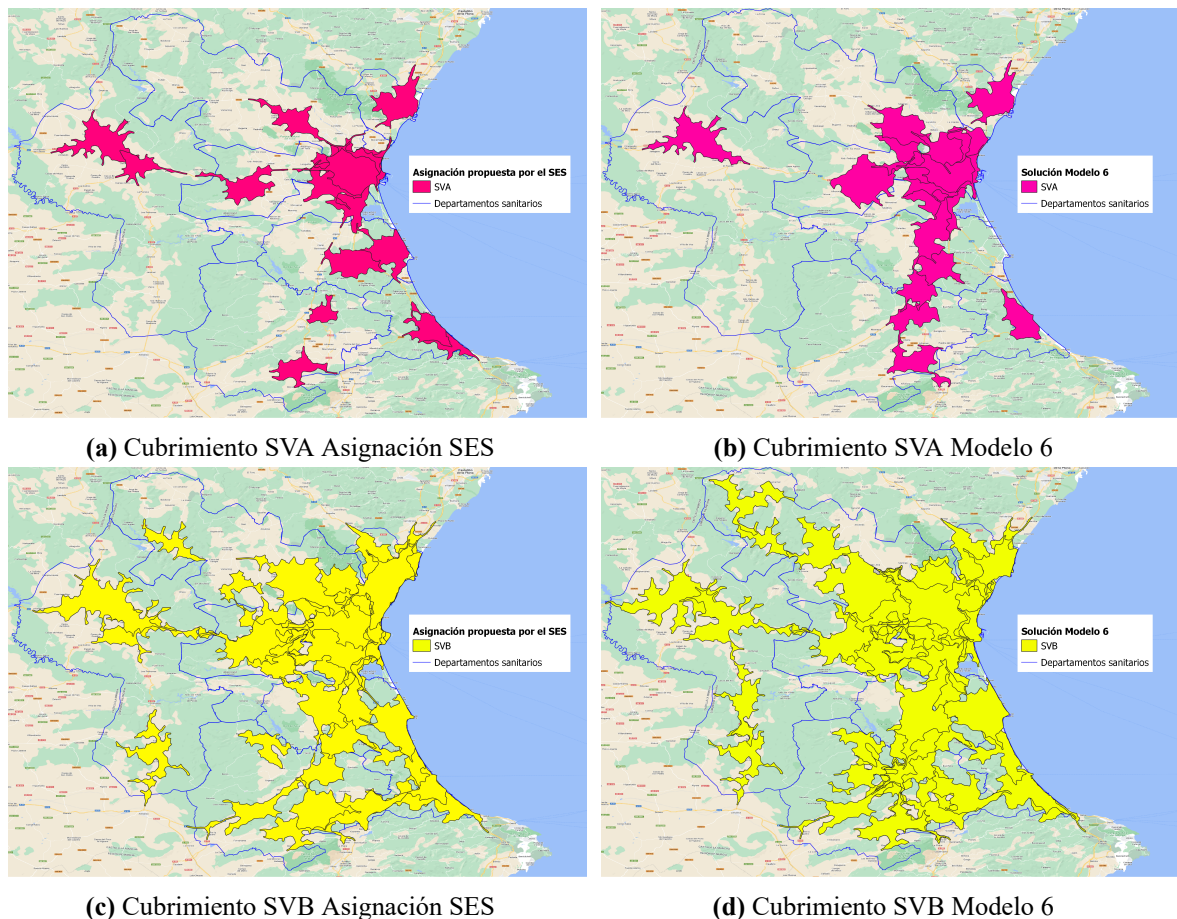


Figura 6.7: Comparación del cubrimiento por tipo de VES entre la asignación propuesta por el SES y el modelo 6

Fuente: *Elaboración propia*

como se muestra en la Tabla resumen 6.10. Sin embargo, el modelo 4 realiza una mejor asignación de los VES, ya que supera en casi todo a la solución del SES. Esta solución está menos distribuida territorialmente que la del modelo 6, pero concentra los VES en zonas con mucha población, lo que hace que el exceso aumente y que si surgen muchas emergencias en poco tiempo, se disponga de VES de refuerzo.

Para analizar de manera un poco más realista las soluciones obtenidas, se dispone de información de la demanda de emergencias surgidas en el año 2019 entre las 8 y las 9 de la mañana². Este trabajo se basa en los problemas de (re)localización estática, es decir, obtener la mejor asignación de los VES en sus bases al comienzo de la jornada laboral, aunque a lo largo del día las ambulancias se van desplazando para cubrir las emergencias. Como se dispone de los datos mencionados, que bien podrían ser las emergencias surgidas al “inicio” de la jornada laboral (aunque realmente el servicio de emergencias tiene que estar disponible las 24 horas, por lo que no habría un “inicio” de la jornada laboral propiamente dicho) y de su localización exacta, se van a representar estas emergencias encima de las soluciones obtenidas para poder hacerse una idea de, si al principio de la jornada laboral cuando las ambulancias acaban de ser ubicadas, las emergencias habrían podido ser cubiertas o no en cada solución. En las Figuras 6.9 y 6.10 se muestran las emergencias surgidas durante todo el 2019 entre las 8 y las 9 de la mañana según hayan sido atendidas por un SVA o un SVB, respectivamente, para las soluciones analizadas (la propuesta por el SES, la del modelo 4 y la del modelo 6).

En las Figuras 6.9 y 6.10, los puntos negros son las emergencias surgidas durante el 2019 entre las 8 y las

²Cabe mencionar que tan solo se disponía de esta pequeña información con respecto a las demandas de emergencias y, además, dicha información se consiguió cuando el Trabajo Fin de Máster estaba muy avanzado.

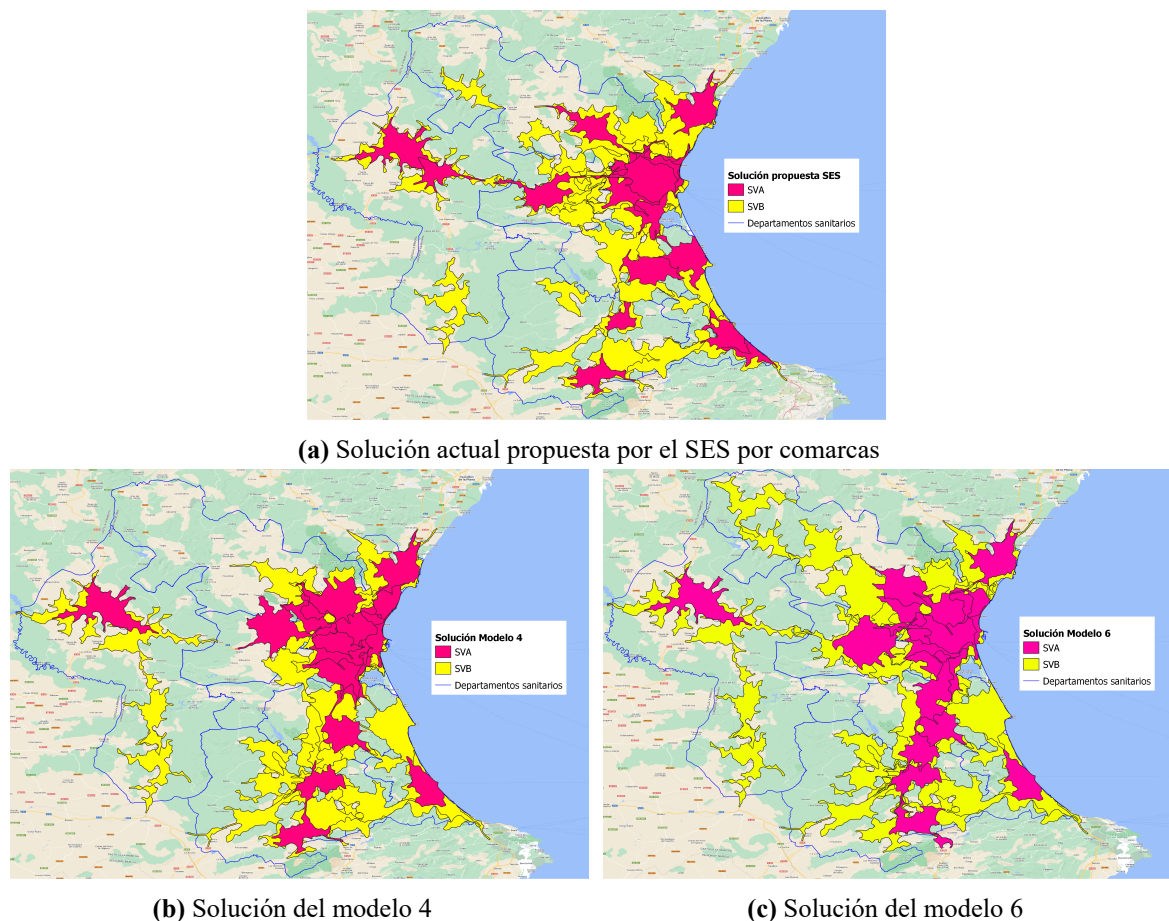
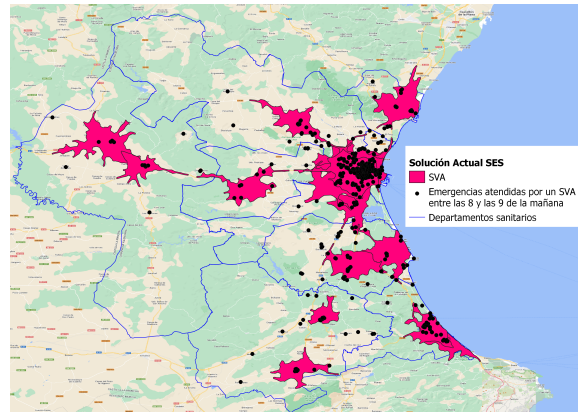


Figura 6.8: Comparación de la solución actual propuesta por el SES con la solución de los modelos 4 y 6

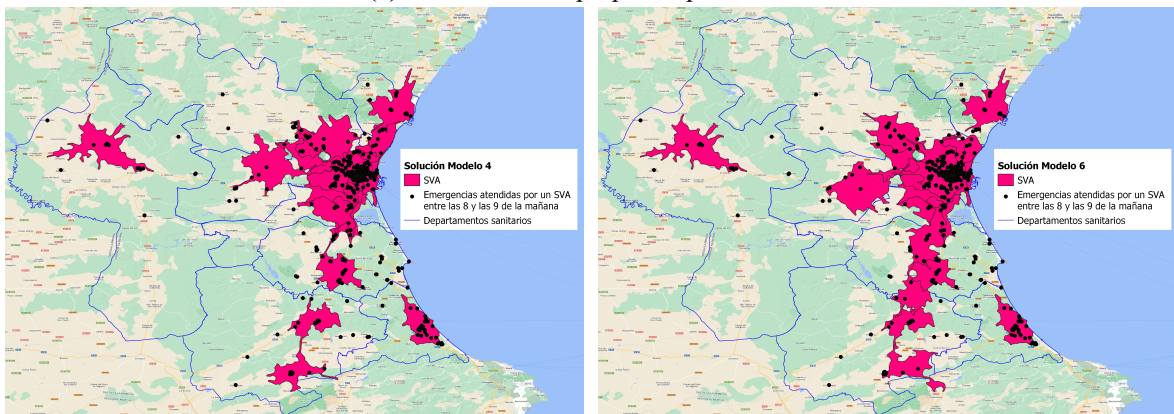
Fuente: *Elaboración propia*

9 de la mañana, y se puede ver cómo la mayoría surgen en la ciudad de Valencia. La cantidad de emergencias no cubiertas en el tiempo estipulado para los SVA es aproximadamente la misma en las tres soluciones. Con respecto a los SVB, la solución que más emergencias cubriría en el tiempo máximo de respuesta definido sería el modelo 6. Sin embargo, esto no es una forma fiable de medir la eficacia de las soluciones, sino más bien orientativa, ya que puede ser que en muy poco tiempo surjan varias emergencias a la vez en la misma zona y, entonces, el exceso sería lo ideal. Por otra parte, podrían surgir varias emergencias en poco tiempo pero en zonas distintas y alejadas, por lo que en este caso lo ideal sería el defecto. En conclusión, medir la eficacia de los modelos con información estática no es trivial, ya que hay muchos factores que podrían influir en la adecuación de la solución propuesta (día de la semana, hora del día, temporal, festivos, etc.). No obstante, estos análisis pueden ayudar a hacerse una idea orientativa de si las soluciones propuestas son adecuadas o no en general.

Cabe destacar que no existe una solución única y óptima, sino que según las preferencias de los responsables del Servicio de Emergencias Sanitarias de la provincia, será mejor una solución u otra. Hay modelos que ofrecen una asignación de VES más distribuida territorialmente, por lo que cubres más territorio pero a lo mejor no más población. Por otro lado, hay modelos que ofrecen una solución con mucho exceso en zonas realmente pobladas y dejan menos cubiertas a las zonas más alejadas de la urbe y que están menos pobladas. Se está intentando conseguir un equilibrio entre ambas variables y para ambos tipos de VES, pero estas variables parecen estar directamente relacionadas y es complicado obtener una solución idónea. Cualquier persona tiene derecho a un servicio de emergencias de calidad, por lo que se está intentando conseguir un modelo equitativo, es decir, que tenga en cuenta que cualquier persona es igual a los demás sin importar el lugar de residencia. Por otra parte, como no se conocen los objetivos del SES, es muy difícil replicar un modelo cuyas características imiten a lo que ellos tienen en mente, y por eso se hace mucho más difícil comparar realmente los resultados obtenidos.



(a) Solución actual propuesta por el SES



(b) Solución del modelo 4

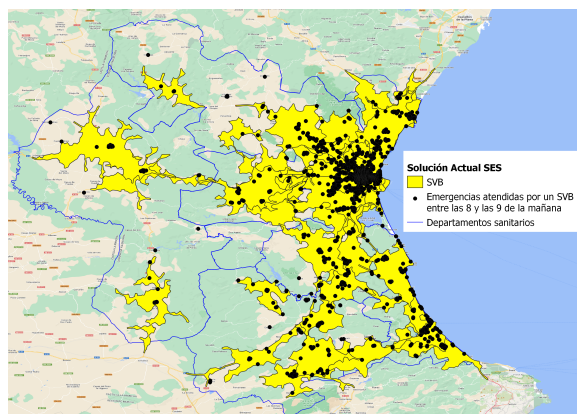
(c) Solución del modelo 6

Figura 6.9: Comparación de la solución actual propuesta por el SES con la solución de los modelos 4 y 6, y representando las emergencias surgidas entre las 8 y las 9 de la mañana durante el 2019 atendidas por un SVA

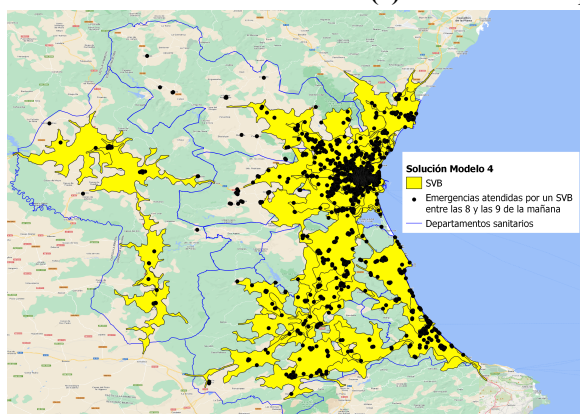
Fuente: *Elaboración propia*

El objetivo es que ellos tengan una herramienta útil y que la puedan adaptar a sus necesidades, resolviendo el modelo que crean oportuno en cada momento según sus preferencias.

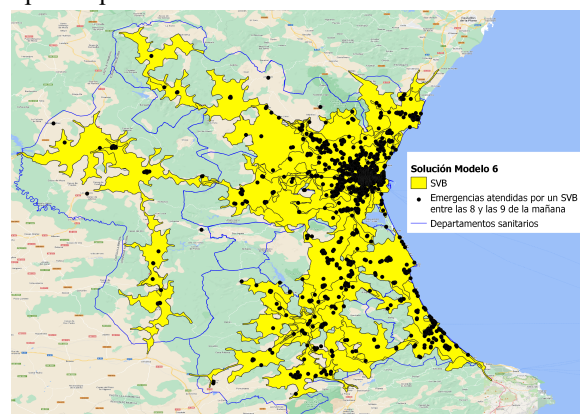
En conclusión, y para el objetivo perseguido, se ha conseguido mejorar mediante los modelos 4 y 6 el defecto de cubrimiento obtenido para la asignación propuesta por el Servicio de Emergencias Sanitarias, ya que dicho defecto para ambos tipos de VES es menor o casi igual a dicha asignación, utilizando la misma cantidad de recursos.



(a) Solución actual propuesta por el SES



(b) Solución del modelo 4



(c) Solución del modelo 6

Figura 6.10: Comparación de la solución actual propuesta por el SES con la solución de los modelos 4 y 6, y representando las emergencias surgidas entre las 8 y las 9 de la mañana durante el 2019 atendidas por un SVB

Fuente: *Elaboración propia*

Capítulo 7

Conclusiones

7.1. Conclusiones

En este trabajo se ha expuesto la importancia que tiene para la ciudadanía una adecuada gestión, por parte del Servicio de Emergencias Sanitarias (SES), en la Atención Prehospitalaria (APH), y la relevancia que tiene una correcta localización de los Vehículos de Emergencia Sanitaria en lo que se refiere a la rapidez con la que se atiende a los pacientes cuando surge cualquier emergencia.

Por otro lado, mediante la potente herramienta QGIS, se ha podido obtener de manera gráfica una visualización del cubrimiento de la provincia de Valencia para todas las soluciones obtenidas por los diferentes modelos propuestos y para la solución actual propuesta por el SES. A partir de la representación de estas soluciones, se puede obtener el defecto de cubrimiento real de la provincia de Valencia, lo cual resulta muy útil para verificar la eficacia de los modelos. El simple hecho de poder visualizar en el mapa de la provincia de Valencia los distintos cubrimientos del territorio obtenidos según las diferentes asignaciones de las bases de los VES, resulta de mucha utilidad para el SES y les puede ayudar a la toma de decisiones.

En este trabajo se ha presentado también un concepto innovador en el estado del arte, que es el concepto de isócrona. Se ha visto como el uso de este concepto es mucho más realista para resolver los modelos matemáticos que el uso del centroide, que es el concepto utilizado en la mayoría de los artículos relacionados con los problemas de localización. Además, las isócronas son los polígonos que permiten obtener la visualización de las diferentes soluciones gracias a la herramienta QGIS.

Al no disponer de la suficiente información para trabajar con la demanda de emergencias, había que utilizar otro concepto con el que poder desarrollar los modelos y que se ajustara a la realidad. Como sí que se disponía de los datos agregados de la demanda de emergencias por municipios durante los años 2017, 2018 y 2019 (proporcionados por el SES), se ha podido estudiar la relación de esta variable con la variable de la población residente por municipios. Mediante el coeficiente de correlación, se ha podido concluir que ambas variables están directamente relacionadas con un alto grado de asociación y que, por lo tanto, maximizar la población cubierta supondrá maximizar la demanda cubierta.

Se han propuesto 6 modelos matemáticos, cada uno de ellos con alguna característica distinta y resueltos de diferente manera. Se ha podido apreciar que separar las variables de defecto y de exceso según el tipo de VES consigue que se asignen más adecuadamente estos vehículos en la provincia, ya que el defecto de cubrimiento mejora en comparación a la solución sin separar dichas variables. Para superar el problema de los solapamientos, que hace que los modelos crean que el defecto es cero cuando realmente no es así, se resuelve el modelo por lotes. Este modelo se resuelve en dos iteraciones y tiene la característica de que actualiza los datos de entrada antes de la segunda iteración, por lo que el modelo tiene en cuenta datos reales, como por ejemplo el defecto obtenido tras la primera iteración. Con este modelo se consigue mejorar todavía más los resultados de los modelos anteriores, en lo que se refiere a un menor defecto de cubrimiento. Además, se disminuye el defecto de cubrimiento conseguido

por los SVA para la solución propuesta por el SES, y casi se iguala el obtenido por los SVB. Por otra parte, el exceso de cubrimiento es superior para ambos tipos de VES mediante este modelo.

También, se ha comprobado como la unidad territorial de referencia tiene un impacto beneficioso en los resultados obtenidos. Cambiando la unidad territorial de departamentos sanitarios a comarcas (que es una unidad territorial más dividida), se consigue disminuir todavía más el defecto de cubrimiento de los SVA y de los SVB con respecto al modelo por lotes. Aun así, se ha visto como el mayor impacto para disminuir el defecto de cubrimiento lo tiene la resolución del modelo por lotes. Además, se ha podido ver que, al resolver el modelo por comarcas, se disminuye el defecto pero también lo hace el exceso. Esto se debe a que la solución va a estar más distribuida territorialmente, por lo que los solapamientos serán menores y, en consecuencia, también lo serán los excesos.

Finalmente, cabe destacar que no hay un modelo mejor o peor, ya que dependerá de las necesidades del SES en cada momento. Lo que se ha diseñado en este TFM es una herramienta eficaz y eficiente, ya que es capaz de obtener en muy pocos segundos soluciones adecuadas para las restricciones impuestas. Todos los modelos se podrían adaptar a las necesidades del SES, incluyendo en los mismos restricciones o características que ellos decidan. Además, esta herramienta les permite visualizar las soluciones obtenidas y adaptarse a posibles imprevistos surgidos, como que algún VES no esté disponible durante la jornada laboral, o incluso a realizar asignaciones en las bases a los nuevos VES que puedan estar disponibles en un futuro. Asimismo, se puede obtener también de manera rápida una cuantificación de los resultados, por lo que van a disponer de resultados tanto visuales como numéricos.

7.2. Líneas de trabajo futuras

Para finalizar, resulta conveniente establecer una línea de investigación futura que permita conocer más en detalle las características del SES, las ampliaciones de los modelos implementados o incluso la demanda de emergencias de la provincia de forma desagregada.

La población en la provincia de Valencia varía con respecto a la estación del año en la que nos encontremos. Al tratarse de una provincia costera, las personas residentes en zonas del interior se trasladan en verano a las zonas de playa. Es por esto por lo que se debería tratar el problema de manera distinta dependiendo de si se está en época estival o no.

Si se consiguiesen datos reales de la demanda, se podrían realizar modelos espacio-temporales que permitieran predecir la demanda de emergencias futura y así aproximarse aun más a la realidad del problema. En consecuencia, se podría diseñar un modelo estocástico que tuviera en cuenta la situación probabilística del problema, ya que la demanda de emergencias es dinámica y pueden surgir emergencias donde sea y cuando sea.

Bibliografía

- [1] ¿Por qué es fundamental la Sanidad pública? URL: https://www.eldiario.es/opinion/tribuna-abierta/fundamental-sanidad-publica_129_1001729.html.
- [2] Vecina, Villa y Vallada. “Resolucion de un problema real de relocalizacion de los vehiculos de emergencia sanitaria”. En: *Universitat Politecnica de Valencia* (2020).
- [3] Valerie Belanger, Angel Ruiz y Patrick Soriano. “Deployment and redeployment of Ambulance Vehicles in the management of a Prehospital Emergency Service”. En: *INFOR* 50.1 (2012), págs. 1-30.
- [4] Othman Alsalloum y Graham Rand. “Extensions to Emergency Vehicle Location Models”. En: *Computers & Operations Research* 33 (sep. de 2006), págs. 2725-2743. DOI: 10.1016/j.cor.2005.02.025.
- [5] Constantine Toregas, Ralph Swain, Charles ReVelle y Lawrence Bergman. “The Location of Emergency Service Facilities”. En: *Operations Research* 19.6 (1971), págs. 1363-1373. DOI: 10.1287/opre.19.6.1363. eprint: <https://doi.org/10.1287/opre.19.6.1363>. URL: <https://doi.org/10.1287/opre.19.6.1363>.
- [6] Richard L. Church y Charles R. Velle. “The Maximal Covering Location Problem”. En: 1974.
- [7] Mark S. Daskin y Edmund H. Stern. “A Hierarchical Objective Set Covering Model for Emergency Medical Service Vehicle Deployment”. En: *Transportation Science* 15.2 (1981), págs. 137-152. DOI: 10.1287/trsc.15.2.137. eprint: <https://doi.org/10.1287/trsc.15.2.137>. URL: <https://doi.org/10.1287/trsc.15.2.137>.
- [8] David J. Eaton, Héctor M L. Sánchez U, Ricardo Ricardo Lantigua y John Morgan. “Determining Ambulance Deployment in Santo Domingo, Dominican Republic”. En: *Journal of the Operational Research Society* 37.2 (1986), págs. 113-126. DOI: 10.1057/jors.1986.21. eprint: <https://doi.org/10.1057/jors.1986.21>. URL: <https://doi.org/10.1057/jors.1986.21>.
- [9] James E. Storbeck. “Slack, natural slack, and location covering”. En: *Socio-Economic Planning Sciences* 16.3 (1982), págs. 99-105. ISSN: 0038-0121. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0121\(82\)90020-9](https://doi.org/10.1016/0038-0121(82)90020-9). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038012182900209>.
- [10] Michel Gendreau, Gilbert Laporte y Frédéric Semet. “Solving an ambulance location model by tabu search”. En: *Location Science* 5.2 (1997), págs. 75-88. ISSN: 0966-8349. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0966-8349\(97\)00015-6](https://doi.org/10.1016/S0966-8349(97)00015-6). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966834997000156>.
- [11] K. F. Doerner, W. J. Gutjahr, R. F. Hartl, M. Karall y M. Reimann. “Heuristic solution of an extended double-coverage ambulance location problem for Austria”. En: *Central European Journal of Operations Research* 13.4 (2005). Cited By :89, págs. 325-340. URL: www.scopus.com.
- [12] Gilbert Laporte, François V. Louveaux, Frédéric Semet y Arnaud Thirion. “Application of the Double Standard Model for Ambulance Location”. En: *Innovations in Distribution Logistics*. Ed. por Jo A.E.E. Nunen, M. Grazia Speranza y Luca Bertazzi. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, págs. 235-249. ISBN: 978-3-540-92944-4.

- [13] Qiang Su, Qinyi Luo y Samuel H. Huang. “Cost-effective analyses for emergency medical services deployment: A case study in Shanghai”. En: *International Journal of Production Economics* 163 (2015), págs. 112-123. ISSN: 0925-5273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.02.015>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527315000493>.
- [14] Yi Liu, Arash M. Roshandeh, Zongzhi Li, Konstantinos Kepaptsoglou, Harshingar Patel y Xi Lu. “Heuristic Approach for Optimizing Emergency Medical Services in Road Safety within Large Urban Networks”. En: *Journal of Transportation Engineering* 140.9 (2014), pág. 04014043. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000684. eprint: <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29TE.1943-5436.0000684>. URL: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29TE.1943-5436.0000684>.
- [15] Yi Liu, Zongzhi Li, Jingxian Liu y Harshingar Patel. “A double standard model for allocating limited emergency medical service vehicle resources ensuring service reliability”. En: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 69 (2016), págs. 120-133. ISSN: 0968-090X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.05.023>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X16300602>.
- [16] Soovin Yoon, Laura A. Albert y Veronica M. White. “A Stochastic Programming Approach for Locating and Dispatching Two Types of Ambulances”. En: *Transportation Science* 55.2 (2021), págs. 275-296. DOI: 10.1287/trsc.2020.1023. eprint: <https://doi.org/10.1287/trsc.2020.1023>. URL: <https://doi.org/10.1287/trsc.2020.1023>.
- [17] Elif Erdemir, Rajan Batta, Peter Rogerson, Alan Blatt y Marie Flanigan. “Joint ground and air emergency medical services coverage models: A greedy heuristic solution approach”. En: *European Journal of Operational Research* 207 (dic. de 2010), págs. 736-749. DOI: 10.1016/j.ejor.2010.05.047.
- [18] Kevin Curtin, Karen Hayslett-McCall y Fang Qiu. “Determining Optimal Police Patrol Areas with Maximal Covering and Backup Covering Location Models”. En: *Networks and Spatial Economics* 10 (mar. de 2010), págs. 125-145. DOI: 10.1007/s11067-007-9035-6.
- [19] Mark S. Daskin. “Application of an Expected Covering Model to Emergency Medical Service System Design*”. En: *Decision Sciences* 13.3 (1982), págs. 416-439. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1982.tb00159.x>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1540-5915.1982.tb00159.x>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1540-5915.1982.tb00159.x>.
- [20] Mark S. Daskin. “A Maximum Expected Covering Location Model: Formulation, Properties and Heuristic Solution”. En: *Transportation Science* 17.1 (1983), págs. 48-70. DOI: 10.1287/trsc.17.1.48. eprint: <https://doi.org/10.1287/trsc.17.1.48>. URL: <https://doi.org/10.1287/trsc.17.1.48>.
- [21] P. Beraldi, M.E. Bruni y D. Conforti. “Designing robust emergency medical service via stochastic programming”. English. En: *European Journal of Operational Research* 158.1 (2004), págs. 183-193. DOI: 10.1016/S0377-2217(03)00351-5.
- [22] Geoffrey Bianchi y Richard L. Church. “A hybrid fleet model for emergency medical service system design”. En: *Social Science & Medicine* 26.1 (1988), págs. 163-171. ISSN: 0277-9536. DOI: [https://doi.org/10.1016/0277-9536\(88\)90055-X](https://doi.org/10.1016/0277-9536(88)90055-X). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/027795368890055X>.
- [23] M S Daskin, K Hogan y C ReVelle. “Integration of Multiple, Excess, Backup, and Expected Covering Models”. En: *Environment and Planning B: Planning and Design* 15.1 (1988), págs. 15-35. DOI: 10.1068/b150015. eprint: <https://doi.org/10.1068/b150015>. URL: <https://doi.org/10.1068/b150015>.

- [24] Rajan Batta, June M. Dolan y Nirup N. Krishnamurthy. “The Maximal Expected Covering Location Problem: Revisited”. En: *Transportation Science* 23.4 (1989), págs. 277-287. DOI: 10.1287/trsc.23.4.277. eprint: <https://doi.org/10.1287/trsc.23.4.277>. URL: <https://doi.org/10.1287/trsc.23.4.277>.
- [25] Richard C. Larson. “Approximating the Performance of Urban Emergency Service Systems”. En: *Operations Research* 23.5 (1975), págs. 845-868. DOI: 10.1287/opre.23.5.845. eprint: <https://doi.org/10.1287/opre.23.5.845>. URL: <https://doi.org/10.1287/opre.23.5.845>.
- [26] Richard C. Larson. “A hypercube queuing model for facility location and redistricting in urban emergency services”. En: *Computers & Operations Research* 1.1 (1974), págs. 67-95. ISSN: 0305-0548. DOI: [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(74\)90076-8](https://doi.org/10.1016/0305-0548(74)90076-8). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0305054874900768>.
- [27] Chun-Ling Chuang y Rong-Ho Lin. “A Maximum Expected Covering Model for an Ambulance Location Problem”. En: *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers* 24.6 (2007), págs. 468-474. DOI: 10.1080/10170660709509061. eprint: <https://doi.org/10.1080/10170660709509061>. URL: <https://doi.org/10.1080/10170660709509061>.
- [28] Charles ReVelle y Kathleen Hogan. “The Maximum Availability Location Problem”. En: *Transportation Science* 23.3 (1989), págs. 192-200. DOI: 10.1287/trsc.23.3.192. eprint: <https://doi.org/10.1287/trsc.23.3.192>. URL: <https://doi.org/10.1287/trsc.23.3.192>.
- [29] M. S. Daskin. “Location, Dispatching and Routing Models for Emergency Services With Stochastic Travel Times”. En: (1987). Cited By :1, págs. 224-265. URL: www.scopus.com.
- [30] Jeffrey Goldberg, Robert Dietrich, Jen Ming Chen, M.George Mitwasi, Terry Valenzuela y Elizabeth Criss. “Validating and applying a model for locating emergency medical vehicles in Tucson, AZ”. En: *European Journal of Operational Research* 49.3 (1990), págs. 308-324. ISSN: 0377-2217. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90402-W](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90402-W). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037722179090402W>.
- [31] Armann Ingolfsson, Susan Budge y Erhan Erkut. “Optimal Ambulance Location with Random Delays and Travel Times”. En: *Health care management science* 11 (oct. de 2008), págs. 262-74. DOI: 10.1007/s10729-007-9048-1.
- [32] Mateo Restrepo, Shane Henderson y Huseyin Topaloglu. “Erlang loss models for the static deployment of ambulances”. En: *Health Care Management Science* 12 (feb. de 2009), págs. 67-79. DOI: 10.1007/s10729-008-9077-4.
- [33] Michael O. Ball y Feng L. Lin. “A Reliability Model Applied to Emergency Service Vehicle Location”. En: *Operations Research* 41.1 (1993), págs. 18-36. DOI: 10.1287/opre.41.1.18. eprint: <https://doi.org/10.1287/opre.41.1.18>. URL: <https://doi.org/10.1287/opre.41.1.18>.
- [34] P. Beraldi y M.E. Bruni. “A probabilistic model applied to emergency service vehicle location”. En: *European Journal of Operational Research* 196.1 (2009), págs. 323-331. ISSN: 0377-2217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.02.027>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221708002336>.
- [35] Zhi-Hai Zhang y Hai Jiang. “A robust counterpart approach to the bi-objective emergency medical service design problem”. En: *Applied Mathematical Modelling* 38.3 (2014), págs. 1033-1040. ISSN: 0307-904X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.07.028>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X13004721>.
- [36] Stefan Nickel, Melanie Reuter-Oppermann y Francisco Saldanha da Gama. “Ambulance location under stochastic demand: A sampling approach”. En: *Operations Research for Health Care* 8 (2016), págs. 24-32. ISSN: 2211-6923. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.orhc.2015.06.006>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211692315300217>.

- [37] Erhan Erkut, Armann Ingolfsson y Güneş Erdoğan. “Ambulance location for maximum survival”. En: *Naval Research Logistics (NRL)* 55.1 (2008), págs. 42-58. DOI: <https://doi.org/10.1002/nav.20267>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/nav.20267>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/nav.20267>.
- [38] Laura Albert y Maria Mayorga. “Evaluating Emergency Medical Services Performance Measures”. En: *Health care management science* 13 (jun. de 2010), págs. 124-36. DOI: 10.1007/s10729-009-9115-x.
- [39] Inmaculada Espejo, Alfredo Marín, Justo Puerto y Antonio M. Rodríguez-Chía. “A comparison of formulations and solution methods for the minimum-envy location problem”. En: *Computers & Operations Research* 36.6 (2009), págs. 1966-1981. ISSN: 0305-0548. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2008.06.013>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054808001196>.
- [40] Sunarin Chanta, Maria E. Mayorga, Mary E. Kurz y Laura A. McLay. “The minimum p-envy location problem: a new model for equitable distribution of emergency resources”. En: *IIE Transactions on Healthcare Systems Engineering* 1.2 (2011), págs. 101-115. DOI: 10.1080/19488300.2011.609522. eprint: <https://doi.org/10.1080/19488300.2011.609522>. URL: <https://doi.org/10.1080/19488300.2011.609522>.
- [41] V. Bélanger, A. Ruiz y P. Soriano. *Recent Advances in Emergency Medical Services Management*. [Documento de trabajo]. CIRRELT, Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d’entreprise, la logistique et le transport = Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks, Logistics y Transportation, 2015. URL: <https://books.google.es/books?id=KdW1jwEACAAJ>.
- [42] John F. Repede y John J. Bernardo. “Developing and validating a decision support system for locating emergency medical vehicles in Louisville, Kentucky”. En: *European Journal of Operational Research* 75.3 (1994), págs. 567-581. ISSN: 0377-2217. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)90297-6](https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90297-6). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0377221794902976>.
- [43] Hari K. Rajagopalan, Cem Saydam y Jing Xiao. “A multiperiod set covering location model for dynamic redeployment of ambulances”. En: *Computers & Operations Research* 35.3 (2008). Part Special Issue: New Trends in Locational Analysis, págs. 814-826. ISSN: 0305-0548. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.04.003>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054806001213>.
- [44] Pieter L. van den Berg y Karen Aardal. “Time-dependent MEXCLP with start-up and relocation cost”. En: *European Journal of Operational Research* 242.2 (2015), págs. 383-389. ISSN: 0377-2217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.10.013>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221714008170>.
- [45] A Başar, B Çatay y T Ünlüyurt. “A multi-period double coverage approach for locating the emergency medical service stations in Istanbul”. En: *Journal of the Operational Research Society* 62.4 (2011), págs. 627-637. DOI: 10.1057/jors.2010.5. eprint: <https://doi.org/10.1057/jors.2010.5>. URL: <https://doi.org/10.1057/jors.2010.5>.
- [46] Verena Schmid y Karl F. Doerner. “Ambulance location and relocation problems with time-dependent travel times”. En: *European Journal of Operational Research* 207.3 (2010), págs. 1293-1303. ISSN: 0377-2217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.06.033>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221710004728>.
- [47] Cem Saydam, Hari K Rajagopalan, Elizabeth Sharer y Kay Lawrimore-Belanger. “The dynamic redeployment coverage location model”. En: *Health Systems* 2.2 (2013), págs. 103-119. DOI: 10.1057/hs.2012.27. eprint: <https://doi.org/10.1057/hs.2012.27>. URL: <https://doi.org/10.1057/hs.2012.27>.
- [48] Martin van Buuren, van der Mei Rob y Sandjai Bhulai. “Demand-point constrained EMS vehicle allocation problems for regions with both urban and rural areas”. En: *Operations Research for Health Care* 18 (2018), págs. 65-83. ISSN: 2211-6923. DOI: 10.1016/j.orhc.2017.03.001.

- [49] Vecina, Villa, Vallada y Karpova. “A Mixed Integer Linear Program for a Real Relocation Problem of Emergency Medical Vehicles in the Province of Valencia”. En: *Journal of Applied Research in Technology & Engineering* 3 (2022), págs. 85-92. ISSN: 2695-8821. DOI: <https://doi.org/10.4995/jarte.2022.16984>.