



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Estadística e Investigación Operativa
Aplicadas y Calidad

Optimización del problema de asignación de la población a
centros sanitarios: aplicación a un caso real

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería de Análisis de Datos, Mejora de
Procesos y Toma de Decisiones

AUTOR/A: Pérez Asensio, Damián

Tutor/a: Sánchez Anguix, Víctor

Cotutor/a: Villa Juliá, María Fulgencia

Director/a Experimental: KARPOVA KRYLOVA, YULIA

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

*A Ful
por su confianza, dedicación y apoyo
siempre que lo necesitaba.
Estaré siempre agradecido.*

*A Víctor y a Yulia
por su implicación y ayuda
No podría haber tenido más suerte.*

*A mi familia y amigos
por acompañarme y enseñarme
en esta etapa de mi vida.
En especial a mi madre
por los valores que me ha dado.
No sería el mismo sin la gente que me rodea*

*A la fundación ValgrAI
por el apoyo financiero y la promoción
del conocimiento en la Inteligencia Artificial.*

RESUMEN:

La sanidad es una parte destacada de los servicios del estado del bienestar y, por tanto, de las políticas públicas. Teniendo en cuenta la jerarquía, son los departamentos de salud los encargados de la organización y planificación de los recursos sanitarios, ofreciendo atención a quienes se encuentran en su interior a través de los centros sanitarios. Pese a los cambios que se producen socialmente, las delimitaciones de los departamentos de salud se han mantenido idénticas a lo largo de los años, haciendo que la asignación y organización haya quedado obsoleta con el tiempo. En este proyecto se plantea una nueva asignación de la población a los departamentos, redefiniendo estos y haciendo uso de métodos de optimización. De esta manera se podría equilibrar la carga asistencial entre los centros sanitarios ya construidos haciendo un uso más eficiente de los recursos actuales. Para ello se propone el uso tanto de modelos matemáticos como de algoritmos heurísticos.

Palabras clave: optimización, heurísticas, modelos matemáticos, programación lineal entera, investigación operativa, salud.

RESUM:

La sanitat és una part destacada dels serveis de l'estat del benestar i, per tant, de les polítiques públiques. Tenint en compte la jerarquia, són els departaments de salut els encarregats de l'organització i planificació dels recursos sanitaris, oferint atenció als qui es troben en el seu interior a través dels centres sanitaris. Malgrat els canvis que es produeixen socialment, les delimitacions dels departaments de salut s'han mantingut idèntiques al llarg dels anys, fent que l'assignació i organització haja quedat obsoleta amb el temps. En este projecte es planteja una nova assignació de la població als departaments, redefinint estos i fent ús de mètodes d'optimització. D'esta manera es podria equilibrar la càrrega assistencial entre els centres sanitaris ja construïts fent un ús més eficient dels recursos actuals. Per a això es proposa l'ús tant de models matemàtics com d'algorismes heurístics.

Paraules clau: optimització, heurístiques, models matemàtics, programació lineal sencera, investigació operativa, salut.

ABSTRACT:

Health is an important part of the welfare state services and, therefore, of public policies. Taking into account the hierarchy, it is the health departments that are responsible for the organisation and planning of health resources, offering care to those within them through the health centres. Despite social changes, the delimitations of the health departments have remained identical over the years, making the allocation and organisation obsolete over time. This project proposes a new allocation of the population to the departments, redefining them and making use of optimisation methods. In this way, it would be possible to balance the care load between the health centres already built, making more efficient use of current resources. To this end, the use of both mathematical models and heuristic algorithms is proposed.

Key words: optimisation, heuristics, mathematical modelling, integer linear programming, operations research, health

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE TABLAS	9
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	11
1.1 Motivación.....	14
1.2 Objetivos.....	15
1.3 Estructura del documento.....	15
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	17
2.1 Departamentos de salud en la Comunidad Valenciana	17
2.2 Centros de especialidades y centros sanitarios integrados	18
2.3 Estructura demográfica de la provincia de Valencia.....	20
2.4 Revisión bibliográfica: Problemas de distritación	22
2.5 Algoritmos relevantes	25
2.5.1 Dijkstra.....	26
2.5.2 Heurística.....	27
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	28
3.1 Software utilizado.....	30
CAPÍTULO IV: MODELO MATEMÁTICO	31
4.1 Parámetros y variables	31
4.2 Modelo completo	32
4.3 Función objetivo	33
4.4 Restricciones.....	34
4.5 Modelo en Excel	34
4.6 Otras configuraciones.....	40
4.7 Limitaciones del modelo.....	42
CAPÍTULO V: HEURÍSTICA PROPUESTA	45
5.1 Método constructivo	45
5.2 Método de búsqueda local.....	55
CAPÍTULO VI: CASOS DE ESTUDIO SINTÉTICOS.....	59
6.1 Primer escenario.....	59
6.1.1 Método constructivo	60
6.1.2 Método de búsqueda local.....	62
6.1.3 Análisis de la capacidad	63

6.2	Segundo escenario	63
6.2.1	Método constructivo	64
6.2.2	Método de búsqueda local	67
6.2.3	Análisis de la capacidad	68
6.3	Tercer escenario	69
6.3.1	Método constructivo	69
6.3.2	Método de búsqueda local	72
6.3.3	Análisis de la capacidad	73
CAPÍTULO VII: APLICACIÓN A UN CASO REAL		75
7.1	Tipos de capas en QGIS	75
7.2	Pasos previos a la resolución	75
7.3	Aplicación de la heurística	81
7.3.1	Método constructivo	82
7.3.2	Método de búsqueda local	87
7.3.3	Análisis de la capacidad	88
CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO		90
8.1	Conclusiones	90
8.2	Trabajo futuro	91
Bibliografía		93
ANEXOS		96
ANEXO I: Objetivos de Desarrollo Sostenible implicados		96
ANEXO II: Código de la heurística con Python		97
ANEXO III: Matrices de vecinos y de distancias		100

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. PACIENTES EN ESPERA PARA UNA PRIMERA CONSULTA EN ATENCIÓN ESPECIALIZADA POR 1000 HAB. EN LA C. VALENCIANA.....	11
FIGURA 2. PROPORCIÓN DE PERSONAS QUE HAN CONSULTADO UN MÉDICO ESPECIALISTA DURANTE LAS 4 SEMANAS ANTERIORES A LA ENCUESTA EN ESPAÑA POR RANGO DE EDAD.	12
FIGURA 3. ESTRUCTURA DE LA POBLACIÓN EN 2022 Y LA PROYECCIÓN PARA 2037.	12
FIGURA 4. VALORACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA SANITARIO.	13
FIGURA 5. DEPARTAMENTOS DE SALUD DE LA COMUNIDAD VALENCIANA.	17
FIGURA 6. DEPARTAMENTOS DE LA PROVINCIA DE VALENCIA.	18
FIGURA 7. LOCALIZACIÓN DE LOS OCHO MUNICIPIOS.	21
FIGURA 8. POBLACIÓN EN FUNCIÓN DEL TIEMPO EN: A) MUNICIPIOS DE INTERIOR B) MUNICIPIOS DE COSTA.	21
FIGURA 9. GRAFO PARA LA EXPLICACIÓN DEL ALGORITMO DIJKSTRA.	26
FIGURA 10. REPRESENTACIÓN DE LAS PARTICIONES DEL TERRENO EN FORMA DE: A) CUADRÍCULA B) GRAFO.	31
FIGURA 11. REPRESENTACIÓN DE LOS CENTROS SANITARIOS EN LAS PARTICIONES DEL TERRENO EN FORMA DE: A) CUADRÍCULA B) GRAFO	35
FIGURA 12. GRAFO QUE MUESTRA LA FORMACIÓN DE LAS REGIONES POR LAS DISTINTAS PARTICIONES.	38
FIGURA 13. GRAFO QUE MUESTRA LA FORMACIÓN DE LAS REGIONES POR LAS DISTINTAS PARTICIONES. PRIMERA CONFIGURACIÓN.	41
FIGURA 14. GRAFO QUE MUESTRA LA FORMACIÓN DE LAS REGIONES POR LAS DISTINTAS PARTICIONES. SEGUNDA CONFIGURACIÓN.	42
FIGURA 15. NÚMERO DE COMBINACIONES DE N PARTICIONES TOMADAS POR PAREJAS.	43
FIGURA 16. GRAFO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS PARTICIONES. EJEMPLO MÉTODO CONSTRUCTIVO	45
FIGURA 17. PSEUDOCÓDIGO PARA LAS PRIMERAS ASIGNACIONES.....	47
FIGURA 18. GRAFO CON LAS PRIMERAS ASIGNACIONES. EJEMPLO MÉTODO CONSTRUCTIVO.	47
FIGURA 19. GRAFO CON LA ASIGNACIÓN DE LOS VECINOS PRÓXIMOS. EJEMPLO MÉTODO CONSTRUCTIVO.....	48
FIGURA 20. PSEUDOCÓDIGO PARA LAS ASIGNACIONES TENIENDO EN CUENTA LA DISTANCIA.	49
FIGURA 21. GRAFO CON LA ASIGNACIÓN DE LA PARTICIÓN D. EJEMPLO MÉTODO CONSTRUCTIVO.	50
FIGURA 22. GRAFO CON LA ASIGNACIÓN DE LAS PARTICIONES B Y C. EJEMPLO MÉTODO CONSTRUCTIVO.	52
FIGURA 23. GRAFO CON LA ASIGNACIÓN DE TODAS LAS PARTICIONES. EJEMPLO MÉTODO CONSTRUCTIVO.....	53
FIGURA 24. PSEUDOCÓDIGO PARA LA FORMACIÓN DE LOS DEPARTAMENTOS.	53
FIGURA 25. GRAFO DE LOS DEPARTAMENTOS DE SALUD. EJEMPLO MÉTODO CONSTRUCTIVO.	55
FIGURA 26. PSEUDOCÓDIGO PARA LA BÚSQUEDA LOCAL.	56
FIGURA 27. GRAFO QUE MUESTRA EL CAMBIO DE ASIGNACIÓN DE LA PARTICIÓN Ñ. EJEMPLO MÉTODO DE BÚSQUEDA LOCAL.	58
FIGURA 28. GRAFO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS PARTICIONES. PRIMER ESCENARIO.....	59
FIGURA 29. GRAFO QUE MUESTRA EL CAMBIO DE LA PARTICIÓN 2 TRAS LA BÚSQUEDA LOCAL. PRIMER ESCENARIO.	62
FIGURA 30. GRAFO REPRESENTATIVO DE LAS PARTICIONES Y DE LOS CENTROS. SEGUNDO ESCENARIO.....	64
FIGURA 31. GRAFO TRAS LAS PRIMERAS ASIGNACIONES. SEGUNDO ESCENARIO.....	65
FIGURA 32. GRAFO TRAS LAS ASIGNACIONES TENIENDO EN CUENTA LA DISTANCIA. SEGUNDO ESCENARIO.	66
FIGURA 33. GRAFO TRAS LA FORMACIÓN DE LOS DEPARTAMENTOS. SEGUNDO ESCENARIO.	67
FIGURA 34. GRAFO TRAS LA BÚSQUEDA LOCAL. SEGUNDO ESCENARIO.	68
FIGURA 35. GRAFO REPRESENTATIVO DE LAS PARTICIONES Y DE LOS CENTROS. TERCER ESCENARIO.	69
FIGURA 36. GRAFO TRAS LAS PRIMERAS ASIGNACIONES. TERCER ESCENARIO.	70
FIGURA 37. GRAFO TRAS LAS ASIGNACIONES TENIENDO EN CUENTA LA DISTANCIA. TERCER ESCENARIO.	71
FIGURA 38. GRAFO TRAS LA FORMACIÓN DE LOS DEPARTAMENTOS. TERCER ESCENARIO.....	72
FIGURA 39. GRAFO TRAS LA BÚSQUEDA LOCAL. TERCER ESCENARIO.	73
FIGURA 40. CAPAS VECTORIALES DE LAS FRONTERAS DE LA PROVINCIA DE VALENCIA Y DE LA UBICACIÓN DE LOS CENTROS SANITARIOS.....	76
FIGURA 41. CAPA VECTORIAL DE LA CUADRÍCULA QUE CUBRE LA PROVINCIA DE VALENCIA.....	77
FIGURA 42. AMPLIACIÓN DE LA CAPA VECTORIAL DE LA CUADRÍCULA PARA LA CIUDAD DE VALENCIA.	78
FIGURA 43. CAPA VECTORIAL CON LOS CENTROIDES DE CADA UNA DE LAS PARTICIONES.....	79

FIGURA 44. CAPA VECTORIAL CON LAS PARTICIONES QUE PERTENECEN A LA PROVINCIA DE VALENCIA.	80
FIGURA 45. PARTICIONES COLOREADAS TRAS LAS PRIMERAS ASIGNACIONES. CASO REAL.....	82
FIGURA 46. AMPLIACIÓN DE LAS PARTICIONES DE VALENCIA Y ALREDEDORES TRAS LAS PRIMERAS ASIGNACIONES. CASO REAL.	83
FIGURA 47. PARTICIONES COLOREADAS TRAS LAS ASIGNACIONES TENIENDO EN CUENTA LA DISTANCIA. CASO REAL.	84
FIGURA 48. AMPLIACIÓN DE LAS PARTICIONES DE VALENCIA Y ALREDEDORES TRAS LAS ASIGNACIONES TENIENDO EN CUENTA LA DISTANCIA. CASO REAL.	85
FIGURA 49. PARTICIONES COLOREADAS TRAS LA FORMACIÓN DE LOS DEPARTAMENTOS. CASO REAL.	86
FIGURA 50. PARTICIONES DE VALENCIA Y ALREDEDORES TRAS LA FORMACIÓN DE LOS DEPARTAMENTOS. CASO REAL.....	87
FIGURA 51. CÓDIGO DE PYTHON PARA LAS LIBRERÍAS.	97
FIGURA 52. CÓDIGO PYTHON PARA LA CREACIÓN DE LA MATRIZ DE VECINOS.	97
FIGURA 53. CÓDIGO PYTHON PARA LAS PRIMERAS ASIGNACIONES.	97
FIGURA 54. CÓDIGO PYTHON PARA LA FUNCIÓN QUE SELECCIONA EL CAMINO MÁS CORTO DESDE UNA PARTIÇÃO A VARIAS. 98	
FIGURA 55. CÓDIGO PYTHON PARA LAS ASIGNACIONES TENIENDO EN CUENTA LA DISTANCIA.	98
FIGURA 56. CÓDIGO PYTHON PARA LA FUNCIÓN QUE SELECCIONA EL CAMINO MÁS CORTO DESDE UNA PARTIÇÃO A OTRA... 98	
FIGURA 57. CÓDIGO PYTHON PARA LA CREACIÓN DE LOS DEPARTAMENTOS DE SALUD.....	99
FIGURA 58. CÓDIGO DE PYTHON PARA LA BÚSQUEDA LOCAL.....	99
FIGURA 59. MATRIZ DE VECINOS. SEGUNDO ESCENARIO.	100
FIGURA 60. MATRIZ DE DISTANCIAS. SEGUNDO ESCENARIO.	100
FIGURA 61. MATRIZ DE VECINOS. TERCER ESCENARIO.....	101
FIGURA 62. MATRIZ DE DISTANCIAS. TERCER ESCENARIO.....	101

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. CENTROS DE ESPECIALIDADES Y CENTROS SANITARIOS INTEGRADOS DE LA PROVINCIA DE VALENCIA.....	19
TABLA 2. MUNICIPIOS CONTEMPLADOS PARA EL ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA DEMOGRÁFICA.	20
TABLA 3. POBLACIÓN Y CAPACIDAD DE CADA UNA DE LAS PARTICIONES.	35
TABLA 4. MATRIZ DE VECINOS.	35
TABLA 5. VARIABLES λ_{klj}^c UTILIZADAS PARA CONSEGUIR LA CONTIGÜIDAD.....	36
TABLA 6. VARIABLES μ_{klj} UTILIZADAS PARA CONSEGUIR LA CONTIGÜIDAD.....	37
TABLA 7. ASIGNACIÓN DE LAS PARTICIONES A LAS REGIONES.	38
TABLA 8. VALOR DE LA FUNCIÓN OBJETIVO.	38
TABLA 9. RESTRICCIÓN QUE RELACIONA LA POBLACIÓN ASIGNADA Y LA CAPACIDAD.	38
TABLA 10. RESTRICCIONES QUE ASEGURAN QUE CADA PARTICIÓN QUEDA ASIGNADA A UNA REGIÓN SANITARIA QUE CONTIENE TODAS LAS ESPECIALIDADES PRINCIPALES.....	39
TABLA 11. RESTRICCIONES QUE ACTIVAN LAS VARIABLES μ_{klj}	39
TABLA 12. RESTRICCIONES QUE ACTIVAN LAS VARIABLES λ_{klj}^c	40
TABLA 13. RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES μ_{klj} Y λ_{klj}^c	40
TABLA 14. PARÁMETROS EN LA PRIMERA CONFIGURACIÓN.	41
TABLA 15. ASIGNACIÓN DE LAS PARTICIONES A LAS REGIONES. PRIMERA CONFIGURACIÓN.	41
TABLA 16. PARÁMETROS EN LA SEGUNDA CONFIGURACIÓN.	42
TABLA 17. ASIGNACIÓN DE LAS PARTICIONES A LAS REGIONES. SEGUNDA CONFIGURACIÓN.	42
TABLA 18. POBLACIÓN Y CAPACIDAD DE CADA UNA DE LAS PARTICIONES. EJEMPLO MÉTODO CONSTRUCTIVO.	46
TABLA 19. MATRIZ DE VECINOS. EJEMPLO MÉTODO CONSTRUCTIVO.	46
TABLA 20. MATRIZ DE DISTANCIAS. EJEMPLO MÉTODO CONSTRUCTIVO.....	46
TABLA 21. CAPACIDAD Y DISTANCIA MÁXIMA DE LOS CENTROS EN EL MOMENTO INICIAL. EJEMPLO MÉTODO CONSTRUCTIVO.	47
TABLA 22. CAPACIDAD Y DISTANCIA MÁXIMA DE LOS CENTROS TRAS LA ASIGNACIÓN DE LOS VECINOS PRÓXIMOS. EJEMPLO MÉTODO CONSTRUCTIVO.	48
TABLA 23. CAMINOS PARA ALCANZAR UN CENTRO SANITARIO DESDE D. EJEMPLO MÉTODO CONSTRUCTIVO.	49
TABLA 24. CAMINOS FORMADOS PARTIENDO DE LAS PARTICIONES D, C Y B. EJEMPLO MÉTODO CONSTRUCTIVO.	50
TABLA 25. CAPACIDAD Y DISTANCIA MÁXIMA DE LOS CENTROS TRAS LA ASIGNACIÓN DE LA PARTICIÓN D. EJEMPLO MÉTODO CONSTRUCTIVO.....	50
TABLA 26. CAMINOS PARA ALCANZAR UN CENTRO SANITARIO DESDE C. EJEMPLO MÉTODO CONSTRUCTIVO.	51
TABLA 27. CAMINOS FORMADOS CON 4 PARTICIONES DESDE C. EJEMPLO MÉTODO CONSTRUCTIVO.	51
TABLA 28. CAPACIDAD Y DISTANCIA MÁXIMA DE LOS CENTROS TRAS LA ASIGNACIÓN DE LA PARTICIÓN C Y B. EJEMPLO MÉTODO CONSTRUCTIVO.....	51
TABLA 29. CAMINOS PARA ALCANZAR UN CENTRO SANITARIO DESDE G. EJEMPLO MÉTODO CONSTRUCTIVO.	52
TABLA 30. CAPACIDAD Y DISTANCIA MÁXIMA DE LOS CENTROS TRAS LA ASIGNACIÓN DE LA PARTICIÓN G. EJEMPLO MÉTODO CONSTRUCTIVO.....	53
TABLA 31. CÁLCULO DE LAS DISTANCIAS PARA TODAS LAS COMBINACIONES POSIBLES. EJEMPLO MÉTODO CONSTRUCTIVO.....	54
TABLA 32. CAPACIDAD Y DISTANCIA MÁXIMA DE LOS CENTROS TRAS LA CREACIÓN DE LOS DEPARTAMENTOS. EJEMPLO MÉTODO CONSTRUCTIVO.....	55
TABLA 33. CAPACIDAD Y DISTANCIA MÁXIMA DE LOS CENTROS TRAS CAMBIAR LA ASIGNACIÓN DE LA PARTICIÓN F. EJEMPLO MÉTODO DE BÚSQUEDA LOCAL.....	57
TABLA 34. CAPACIDAD Y DISTANCIA MÁXIMA DE LOS CENTROS TRAS CAMBIAR LA ASIGNACIÓN DE LA PARTICIÓN F. EJEMPLO MÉTODO DE BÚSQUEDA LOCAL.....	57
TABLA 35. VALORES INICIALES PARA LA ASIGNACIÓN DE LAS PARTICIONES. PRIMER ESCENARIO.	60
TABLA 36. VALORES INICIALES DE LA DISTANCIA MÁXIMA Y LA CAPACIDAD. PRIMER ESCENARIO.	60
TABLA 37. PARTICIONES ASIGNADAS TRAS LA PRIMERA ASIGNACIÓN. PRIMER ESCENARIO.	60
TABLA 38. VALORES DE LA DISTANCIA Y LA CAPACIDAD TRAS LA PRIMERA ASIGNACIÓN. PRIMER ESCENARIO.	60
TABLA 39. PARTICIONES ASIGNADAS TRAS LAS ASIGNACIONES CONTEMPLANDO LA DISTANCIA. PRIMER ESCENARIO.	61
TABLA 40. VALORES DE LA DISTANCIA Y LA CAPACIDAD TRAS LAS ASIGNACIONES CONTEMPLANDO LA DISTANCIA. PRIMER ESCENARIO.	61

TABLA 41. PARICIONES ASIGNADAS TRAS LA FORMACIÓN DE LOS DEPARTAMENTOS. PRIMER ESCENARIO.	61
TABLA 42. VALORES DE LA DISTANCIA Y LA CAPACIDAD TRAS LA FORMACIÓN DE LOS DEPARTAMENTOS. PRIMER ESCENARIO. 61	61
TABLA 43. PARICIONES ASIGNADAS TRAS LA BÚSQUEDA LOCAL. PRIMER ESCENARIO.	62
TABLA 44. VALORES DE LA DISTANCIA Y LA CAPACIDAD TRAS LA BÚSQUEDA LOCAL. PRIMER ESCENARIO.	62
TABLA 45. CÁLCULO DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA LA CAPACIDAD DE LOS DEPARTAMENTOS. PRIMER ESCENARIO.	63
TABLA 46. VALORES INICIALES DE LA DISTANCIA MÁXIMA Y LA CAPACIDAD. SEGUNDO ESCENARIO.	64
TABLA 47. VALORES DE LA DISTANCIA Y LA CAPACIDAD TRAS LA PRIMERA ASIGNACIÓN. SEGUNDO ESCENARIO.....	65
TABLA 48. VALORES DE LA DISTANCIA Y LA CAPACIDAD TRAS LAS ASIGNACIONES CONTEMPLANDO LA DISTANCIA. SEGUNDO ESCENARIO.	66
TABLA 49. VALORES DE LA DISTANCIA Y LA CAPACIDAD TRAS LA FORMACIÓN DE LOS DEPARTAMENTOS. SEGUNDO ESCENARIO.	67
TABLA 50. VALORES DE LA DISTANCIA Y LA CAPACIDAD TRAS LA BÚSQUEDA LOCAL. SEGUNDO ESCENARIO.	68
TABLA 51. CÁLCULO DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA LA CAPACIDAD DE LOS DEPARTAMENTOS. SEGUNDO ESCENARIO.	68
TABLA 52. VALORES INICIALES DE LA DISTANCIA MÁXIMA Y LA CAPACIDAD. TERCER ESCENARIO.....	70
TABLA 53. VALORES DE LA DISTANCIA Y LA CAPACIDAD TRAS LA PRIMERA ASIGNACIÓN. TERCER ESCENARIO.....	70
TABLA 54. VALORES DE LA DISTANCIA Y LA CAPACIDAD TRAS LAS ASIGNACIONES CONTEMPLANDO LA DISTANCIA. TERCER ESCENARIO.	71
TABLA 55. VALORES DE LA DISTANCIA Y LA CAPACIDAD TRAS LA FORMACIÓN DE LOS DEPARTAMENTOS. TERCER ESCENARIO..	72
TABLA 56. VALORES DE LA DISTANCIA Y LA CAPACIDAD TRAS LA BÚSQUEDA LOCAL. TERCER ESCENARIO.	73
TABLA 57. CÁLCULO DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA LA CAPACIDAD DE LOS DEPARTAMENTOS. TERCER ESCENARIO.....	73
TABLA 58. LISTA DE TODOS LOS CENTROS JUNTO CON SU CAPACIDAD Y SI CONTIENEN TODAS LAS ESPECIALIDADES.	81
TABLA 59. VALORES DE LA DISTANCIA Y LA CAPACIDAD TRAS LAS ASIGNACIONES CONTEMPLANDO LA DISTANCIA. CASO REAL.	83
TABLA 60. VALORES DE LA DISTANCIA Y LA CAPACIDAD TRAS LAS ASIGNACIONES CONTEMPLANDO LA DISTANCIA. CASO REAL.	85
TABLA 61. VALORES DE LA DISTANCIA Y LA CAPACIDAD TRAS LA CREACIÓN DE LOS DEPARTAMENTOS.	87
TABLA 62. VALORES DE LA CAPACIDAD TRAS LA BÚSQUEDA LOCAL.....	88
TABLA 63. CÁLCULO DE LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA LA CAPACIDAD DE LOS DEPARTAMENTOS. CASO REAL.....	89

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

La sanidad es un componente crucial en los servicios del estado del bienestar y, por tanto, de las políticas públicas. Esto queda reflejado en la cantidad de dinero que se destina cada año de los presupuestos del Estado a este sector.

Sin embargo, esto no parece ser suficiente para paliar la gran carga asistencial que sufren los centros de salud. Un exceso de carga asistencial en determinados momentos del año suele ser habitual debido a diversas enfermedades que se propagan con mayor velocidad cuando se dan ciertas características atmosféricas (e.g., gripe, COVID). No obstante, si este problema se prolonga en el tiempo, cabe estudiar si la población asignada a un centro es mayor que su capacidad.

Prestando atención a los centros de especialidades, una forma de conocer si un centro está colapsado es estudiar su lista de espera. En la Figura 1 se muestra el número de personas que se encuentran en espera para consultar por primera vez un especialista por 1000 habitantes en la Comunidad Valenciana. Como se puede apreciar, en 2019 y 2020 hubo un aparente aplanamiento de la tendencia, posiblemente motivado por el temor de acudir al médico durante los años de la pandemia Covid-19. Sin embargo, desde 2021 hasta la actualidad se ha producido un aumento considerable de la lista de espera, con una tendencia positiva en la curva que hace pensar que, pese a estabilizarse en 2023, esta situación pueda agravarse en un futuro próximo por sus valores elevados.

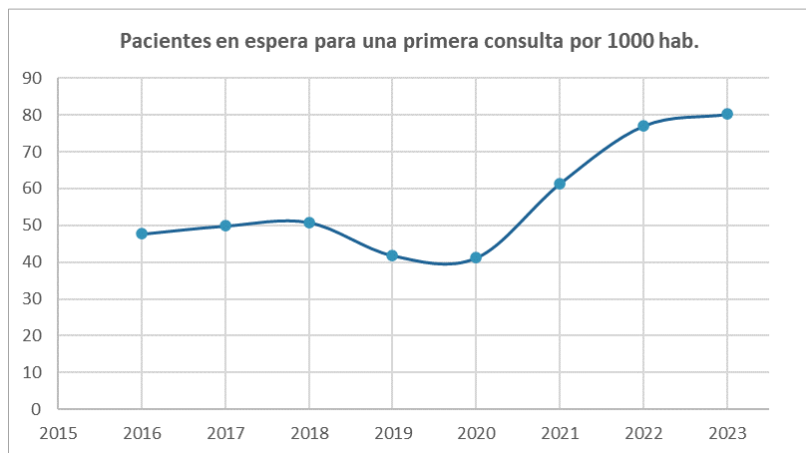


Figura 1. Pacientes en espera para una primera consulta en atención especializada por 1000 hab. en la C. Valenciana.
Fuente: (Indicadores clave del Sistema Nacional de Salud, s. f.).

Si a esta situación poco favorable se suma el efecto que puede causar el envejecimiento de la población, parece evidente que este hecho puede pronunciar el deterioro que ya se percibe del sistema sanitario.

Basándose en el estudio realizado por Eurostat, donde se ha obtenido la proporción de personas que han consultado a un médico especialista durante las cuatro semanas anteriores a la encuesta, se muestra que a medida que aumenta la edad también lo hace el número de consultas realizadas (*Eurostat Statistics Explained*, 2023).

Atendiendo a los valores relativos a España mostrados en el gráfico de barras de la Figura 2, se puede apreciar que, para el primer rango de edad, personas menores de 15 años, también se tienen valores altos en el porcentaje de las visitas a un médico especialista. Este valor va descendiendo en los siguientes rangos hasta que alcanza el de 35 a 44 años donde se produce un aumento considerable del porcentaje con respecto al anterior, siendo este aumento progresivo hasta encontrar un porcentaje máximo de 12,3 % en el rango de mayores de 75 años.

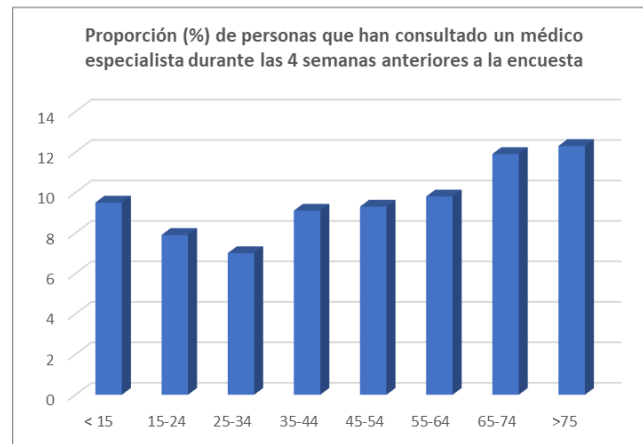


Figura 2. Proporción de personas que han consultado un médico especialista durante las 4 semanas anteriores a la encuesta en España por rango de edad.
Fuente: (Eurostat Statistics Explained, 2023)

Teniendo en cuenta la realidad observada, es conveniente estudiar la evolución de estos rangos de edad en los próximos años, ya que de su progreso dependerá en gran medida el incremento de la carga asistencial. Para ello, en la pirámide poblacional de la Figura 3 se indica la composición de la población de la Comunidad Valenciana por rango de edad y sexo para el año 2022 y la predicción para el año 2037.

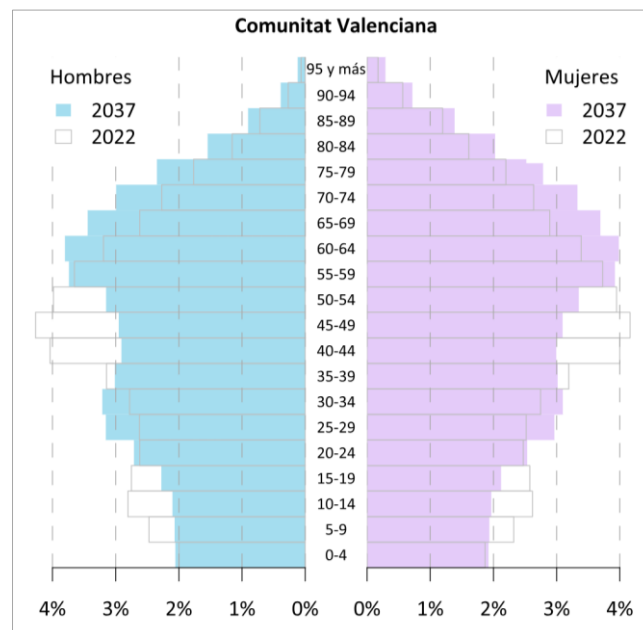


Figura 3. Estructura de la población en 2022 y la proyección para 2037.
Fuente: (Institut Valencià d'Estadística, 2023).

En ella se advierte que el grueso de la población tiene una edad aproximada a los 45 años para el año 2022, mientras que para el año 2037, es el rango de edad entre 60 y 64 años el que más habitantes recoge. Apreciando la figura, para 2037 se tendría una pirámide prácticamente invertida debido al continuo envejecimiento de la población en el transcurso de los años (Institut Valencià d'Estadística, 2023).

Se tendría una situación en la que se continuaría asignando población a centros que ya se encuentran colapsados, profundizando el problema y, repercutiendo directamente en la calidad de vida de las personas. Cuando una persona tiene un problema de salud, desea ser atendido lo antes posible, puesto que en muchas ocasiones un pronto diagnóstico evita futuras complicaciones.

Centrándose en la percepción que tienen los pacientes sobre el sistema sanitario, la carga asistencial es un factor muy importante que considerar. Una mayor carga asistencial supone unas listas de espera más largas y, en consecuencia, un deterioro del servicio prestado.

En un estudio realizado por el CIS muestra la valoración de la población al sistema sanitario. Los valores obtenidos desde 2015 hasta 2023 se muestran en la Figura 4. Prestando atención a los años del COVID 19 y posteriores, se comprueba que la percepción del sistema sanitario fue cada vez peor hasta producir un rebote en la tendencia a partir de la primera oleada de 2023. En la actualidad, un 60,1 % de la población considera que funciona bastante bien o bien, aunque necesita unos cambios, un 27,4% opina que necesita cambios fundamentales y un 11,4% que funciona mal y necesita cambios profundos. Aunque los últimos valores muestran una cierta mejora en la impresión de los ciudadanos, queda aún mucho trabajo para alcanzar los valores prepandemia (CIS, 2023).

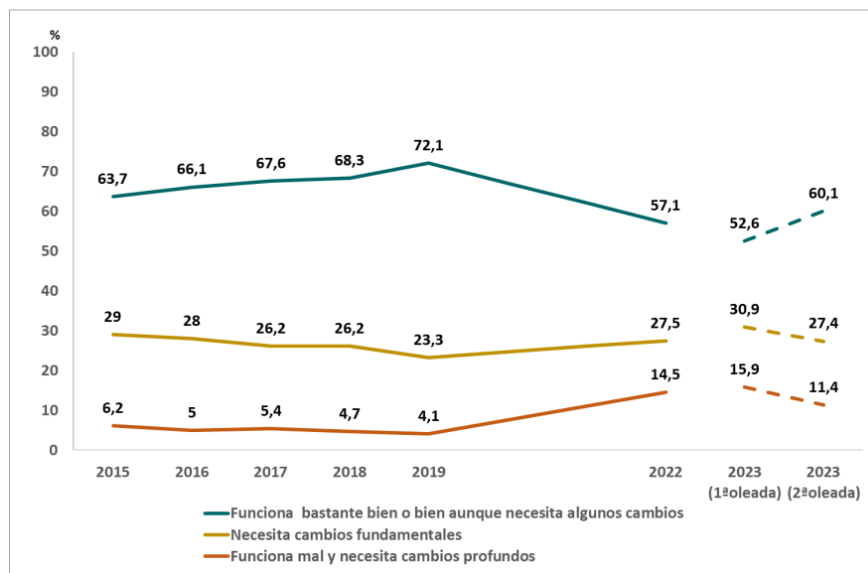


Figura 4. Valoración del funcionamiento del sistema sanitario.
Fuente:(CIS, 2023).

Siendo conscientes de que la presión sobre los centros de especialidades se va agravando con el transcurso de los años y de que los cambios demográficos en la

Comunidad Valenciana son innegables, la reversión de este problema se puede afrontar de diversas maneras: invirtiendo una mayor cantidad en recursos sanitarios, optimizando los recursos ya existentes o realizando una combinación de las dos anteriores. Este trabajo se centra en la optimización de los recursos que se tienen en la actualidad, donde la solución que se propone supone una **distribución balanceada de la población a centros de especialidades partiendo de una situación en la que cada habitante acude a su centro más cercano**. De esta manera, se estaría aumentando ligeramente la distancia que hay que recorrer para alcanzar el centro a cambio de una atención más temprana, modificando las fronteras de los departamentos de salud. Aunque la nueva asignación perjudique a una parte de los pacientes, parece evidente que es más importante una asistencia rápida antes que un trayecto más corto.

Pese a los cambios que se producen socialmente, tanto en el lugar de residencia como en la edad de los pacientes, las delimitaciones de los departamentos de salud se han mantenido idénticas a lo largo de los años desde su creación. La determinación de unos nuevos límites para los departamentos supondría una gran modificación administrativa que debería de mantenerse en el tiempo. Es por ello, por lo que esta herramienta pretende ser de utilidad a la toma de decisiones, facilitando un mejor empleo de los recursos escasos y permitiendo el estudio previo de todas las posibles combinaciones.

Por lo tanto, este Trabajo Fin de Máster está relacionado con un problema sanitario actual, como es una nueva asignación de la población a los recursos sanitarios disponibles. De esta manera, haciendo uso de métodos de optimización se equilibraría la carga asistencial entre los centros sanitarios ya construidos haciendo un uso más eficiente de los recursos actuales.

1.1 Motivación

La motivación para abordar este trabajo surge al tratarse de un problema actual en con el objetivo primordial de mejorar los servicios sanitarios de la provincia de Valencia. Además, la implementación de la metodología propuesta contribuiría a una asignación más eficiente de la población a los centros sanitarios, equilibrando su carga asistencial y, en consecuencia, reduciendo las listas de espera.

También, al surgir como continuación del Trabajo de Fin de Grado *Algoritmos para resolver un problema real de asignación de centros sanitarios* (Pérez Asensio, 2022), supone renovar el interés depositado en el estudio de esta materia.

Para la realización de este trabajo se han aplicado los conocimientos adquiridos en el Máster Universitario en Ingeniería de Análisis de Datos, Mejora de Procesos y Toma de Decisiones. Especialmente las habilidades y capacidades desarrolladas en asignaturas como:

- Análisis de datos funcionales: destreza para analizar datos que dependen de parámetros continuos como puede ser el tiempo. Se centra en datos que pueden ser representados como funciones.
- Modelización y optimización: habilidad para conocer, comprender y analizar un problema con el objetivo de escoger la mejor técnica para resolverlo, proporcionando un conocimiento general de las técnicas de investigación operativa para la formulación y resolución de modelos de programación lineal y entera.
- Heurísticas: capacidad para entender qué es una heurística, los diferentes tipos que existen y evaluar su calidad.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster es la creación de una herramienta que apoye el proceso de toma de decisiones al posibilitar una asignación eficiente y rápida a los centros de salud de la provincia de Valencia, o en cualquier otra región si se desea extrapolar la solución. El reparto se condiciona a la localización actual de los centros de especialidades y de los centros sanitarios integrados.

Se aborda así un problema real de optimización que busca utilizar de manera efectiva los recursos disponibles para lograr una distribución equitativa de la carga asistencial. Además, como punto de partida para llevar a cabo la reasignación se persigue que cada persona quede asignada al centro sanitario más cercano de su lugar de residencia. La combinación de ambos propósitos posibilita mejorar la calidad del servicio recibida por el ciudadano.

Mirando hacia el futuro, la herramienta desarrollada permitiría observar cómo se redistribuiría la población teniendo en cuenta tanto la ubicación de los centros sanitarios como los cambios demográficos producidos.

Desde un punto de vista teórico, este trabajo serviría como base para investigaciones futuras orientadas a la asignación de la población a centros sanitarios. Además, los modelos obtenidos pueden ser adaptados y aplicados en contextos diversos modificando los parámetros y las variables, extendiendo su utilidad más allá del ámbito específico de este trabajo.

1.3 Estructura del documento

Este TFM está estructurado en seis capítulos cuya denominación y breve descripción se muestran a continuación:

- Capítulo I. Introducción: se situará el problema dentro del contexto económico y social para comprender la motivación detrás del trabajo y los objetivos que se buscan lograr.

- Capítulo II. Marco teórico: se explicará la división del terreno de la Comunidad Valenciana en un contexto sanitario, así como los centros sanitarios de interés. También se presentará la estructura demográfica de la provincia de Valencia. Además, se introducirá el algoritmo Dijkstra, pues tiene un papel fundamental en la resolución del problema propuesto, junto con algunos de los algoritmos más con mayor relevancia en la resolución del problema. A continuación, se hará referencia a los problemas de distribución y al cumplimiento de unos requisitos comunes con el objetivo de obtener una solución factible. Para concluir con el capítulo, se comentarán brevemente los distintos métodos de resolución que han empleado otros autores al enfrentarse a problemas similares.
- Capítulo III. Metodología: se proporcionará una breve explicación sobre cómo se ha realizado el trabajo, detallando los pasos seguidos para abordar y resolver el problema planteado. Además, se presentará el software utilizado en la elaboración del TFM.
- Capítulo IV. Modelo matemático: se introducirá el modelo matemático con sus parámetros, variables, función objetivo y restricciones. Las limitaciones de este modelo motivarán la creación del segundo procedimiento, una heurística.
- Capítulo V. Heurística propuesta: se podrá diferenciar entre el método constructivo, formado por tres pasos, y el método de búsqueda local.
- Capítulo VI. Casos de estudio sintéticos: se realizará un estudio empleando tres escenarios diferentes con la finalidad de comprobar el correcto funcionamiento de la heurística propuesta. Se podrán apreciar los resultados obtenidos en cada paso del método constructivo y tras la aplicación de la búsqueda local.
- Capítulo VII. Aplicación a un caso real: se empleará la heurística propuesta para el territorio de la provincia de Valencia teniendo en cuenta la población y las características disponibles de cada uno de los centros de especialidades o centros sanitarios integrados.
- Capítulo VIII. Conclusiones y trabajo futuro: se recogerán todas las deducciones derivadas de este trabajo, junto con las posibles vías de desarrollo que podrían explorarse haciendo uso de la herramienta actual.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta la estructura sanitaria de la Comunidad Valenciana, recordando los dos tipos de centros que disponen de especialidades médicas. También se menciona la estructura demográfica de la provincia de Valencia junto con previsiones de la población para el próximo año. A continuación, se hace referencia al tipo de problema que se tiene que afrontar y a algunos de los algoritmos relevantes utilizados en la propuesta planteada. Finalmente, la lectura de artículos relacionados con este tema permite conocer el procedimiento que han utilizado otros autores para resolver problemas parecidos a este.

2.1 Departamentos de salud en la Comunidad Valenciana

La parte más importante y sobre la que gira todo este trabajo es la figura de los departamentos de salud, también conocidos como áreas de salud en la Ley General de Sanidad. La Comunidad Valenciana cuenta en total con 24 departamentos distribuidos entre las tres provincias como se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Departamentos de salud de la Comunidad Valenciana.
Fuente: (Cobertura asistencial - Departament Salut Castelló, s. f.)

Los departamentos de salud surgen debido a la descentralización del territorio y son los encargados de la administración y planificación de los recursos sanitarios. Se tratan de demarcaciones territoriales delimitadas bajo la exclusiva responsabilidad de las Comunidades Autónomas.

La delimitación de estas demarcaciones territoriales se debe a factores geográficos, socioeconómicos, demográficos, laborales, epidemiológicos, culturales, climatológicos y de dotación de vías y medios de comunicación, así como las instalaciones sanitarias de las que se disponen, tratando de mantener la proximidad de los servicios a los usuarios (Ley General de Sanidad, 1986).

En cualquier escenario, y siguiendo lo dispuesto en la Ley General de Sanidad, las Áreas de Salud deben de llevar a cabo las siguientes acciones. En el ámbito de la atención primaria de salud, a través de enfoques de trabajo en equipo, se atenderá al individuo, la familia y la comunidad. Se llevarán a cabo programas para desempeñar funciones que abarcan la promoción de la salud, la prevención el tratamiento y la rehabilitación. En el nivel de atención especializada, a realizar en los hospitales y centros de especialidades, se proporcionará atención a los problemas sanitarios de mayor complejidad además del resto de funciones propias de los hospitales (Ley General de Sanidad, 1986).

Tras la explicación de lo que se conoce como departamento de salud y centrándose en el territorio de interés, cabe remarcar que la provincia de Valencia está cubierta por 11 departamentos tal y como se aprecia en la Figura 6. Además, también se observan las siglas correspondientes a cada uno de los departamentos construidas a partir de las iniciales de los territorios que lo forman.



Figura 6. Departamentos de la provincia de Valencia.

Fuente: (Cobertura asistencial - Departament Salut Castelló, s. f.). Editada

2.2 Centros de especialidades y centros sanitarios integrados

Puesto que el trabajo se centra en la búsqueda de una nueva asignación o distribución de la población a los centros sanitarios que contienen especialidades médicas, se presentan estos dos tipos de centros. La diferencia entre los centros de especialidades y los centros sanitarios integrados es relativamente insignificante en

cuanto al tipo de servicio especializado que ofrecen. Ambas son instituciones sanitarias que prestan atención a la población en régimen ambulatorio.

Los centros de especialidades son recursos sanitarios donde se concentran la mayoría de las consultas de las diferentes especialidades médicas (SESCAM, s. f.). Están integrados totalmente en el hospital como una prolongación de las consultas externas del mismo. Por otra parte, los centros sanitarios integrados cuentan con una extensa cartera de servicios que incluye tanto prestaciones propias del ámbito de la Atención Primaria como de la especializada, pudiendo prestar atención de corta estancia y atención quirúrgica de cirugía mayor ambulatoria (Decreto 74/2007, 2007).

En cuanto a su gestión, los centros de especialidades son dirigidos por la Generalitat Valenciana, mientras que los centros sanitarios integrados están adscritos al hospital correspondiente en cada departamento, que en muchas ocasiones corre a cargo de la diputación provincial.

En total, la provincia de Valencia cuenta con 27 centros, combinando los centros de especialidades y los centros sanitarios integrados. En la Tabla 1 se muestra una lista con el nombre de los centros y su sigla correspondiente que indica el departamento al que pertenecen. En la creación de la sigla se ha empleado el orden alfabético para ser capaces de diferenciar entre los distintos centros de un mismo departamento. Por ejemplo, el departamento de Gandía (G) contiene tres centros denominados Ga, Gb y Gc.

Tabla 1. Centros de especialidades y centros sanitarios integrados de la Provincia de Valencia.

CENTRO	
Territorio / Área	Sigla
Centro de especialidades de Gandia	Ga
Centro sanitario integrado de Oliva	Gb
Centro sanitario integrado de Tavernes de la Vallidigna	Gc
Centro de especialidades de Sueca	LRa
Centro sanitario integrado de Cullera	LRb
Centro sanitario integrado de Carlet	LRc
Centro sanitario integrado de Alzira II	LRd
Centro sanitario integrado de Benifaio	LRe
Centro de especialidades de Aldaia	Ma
Centro de especialidades de Mislata	Mb
Centro sanitario integrado de Buñol	Mc
Centro de especialidades de Puerto de Sagunt / Sagunto	Sa
Centro de especialidades de Burjassot	VALa
Centro sanitario integrado de Paterna C/Valencia	VALb
Centro sanitario integrado de Liria	VALc
Centro de especialidades de Valencia el Grao	VMAa
Centro casa del mar (ISM de Valencia)	VMAb
Centro de especialidades de Valencia Monteolivete	VDPa
Centro sanitario integrado de Torrent	VHGa
Centro sanitario integrado de Paiporta	VHGb
Centro sanitario integrado de Xirivella	VHGc
Centro sanitario integrado de Juan Llorens	VHGd
Centro sanitario integrado de Alaquas	VHGe
Centro de especialidades de Valencia C/Alboraya	VLFa
Centro de especialidades de Catarroja	VLfb
Centro de especialidades de Xativa	XOa
Centro de especialidades de Ontinyent	XOb

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar, el departamento de Requena no aparece debido a que no contiene ningún centro de especialidades en su interior. A partir de este momento, se emplearán las siglas para hacer referencia a los centros presentados.

A lo largo del trabajo, las palabras “centros”, “centros de especialidades” y “centros sanitarios” se emplearán para hacer referencia al conjunto de centros de especialidades y centros sanitarios integrados. De esta manera se evitan repeticiones que puedan dificultar la lectura y resulten redundantes.

Además, el número de especialidades que contiene cada centro no es el mismo. Por lo tanto, hay centros completos e incompletos dependiendo de si poseen o no todas las especialidades consideradas como esenciales.

2.3 Estructura demográfica de la provincia de Valencia

La distribución de la población a lo largo del territorio de la provincia de Valencia es diversa. Esto se puede deber principalmente a la geografía del territorio que propicia a que las grandes ciudades se encuentren próximas a la costa dejando en el interior localidades con poca población.

Para mostrar los cambios demográficos que se han producido a lo largo de los años considerando la ubicación de las localidades, se parte de una situación en la que se observa un envejecimiento progresivo de la población. A este escenario se le añade el desplazamiento de los habitantes de las zonas rurales hacia las grandes ciudades en búsqueda de nuevas oportunidades.

Con la finalidad de observar el comportamiento mencionado, se ha obtenido del INE una base de datos en la que se tienen recogida la población desde 1998 hasta 2022 de cada uno de los 266 municipios de la provincia (INE, 2023). Dado que la representación temporal de la población no permite visualizar claramente las tendencias de las curvas cuando existe una disparidad significativa entre los valores poblacionales de dos municipios, se ha decidido seleccionar cuidadosamente ocho localidades distribuidas en el territorio, procurando que cada una tuviera una población cercana a mil habitantes para el año 2022. Estos municipios quedan recogidos en la Tabla 2.

Tabla 2. Municipios contemplados para el estudio de la estructura demográfica.

Municipios		Población
Territorio / Área	Letra	2022
Ademuz	A	1000
Chelva	B	1597
Estivella	C	1559
Alborache	D	1328
Zarra	E	370
Alcántara de Júcar	F	1427
Montesa	G	1152
Ador	H	1706

Fuente: Elaboración propia.

La nomenclatura utilizada se ha determinado según la disposición geográfica de los municipios en el mapa. De esta manera, siguiendo una secuencia de izquierda a derecha

y de arriba abajo, se ha asignado a cada municipio una letra en orden alfabético utilizando desde la A hasta la H como se aprecia en la Figura 7.

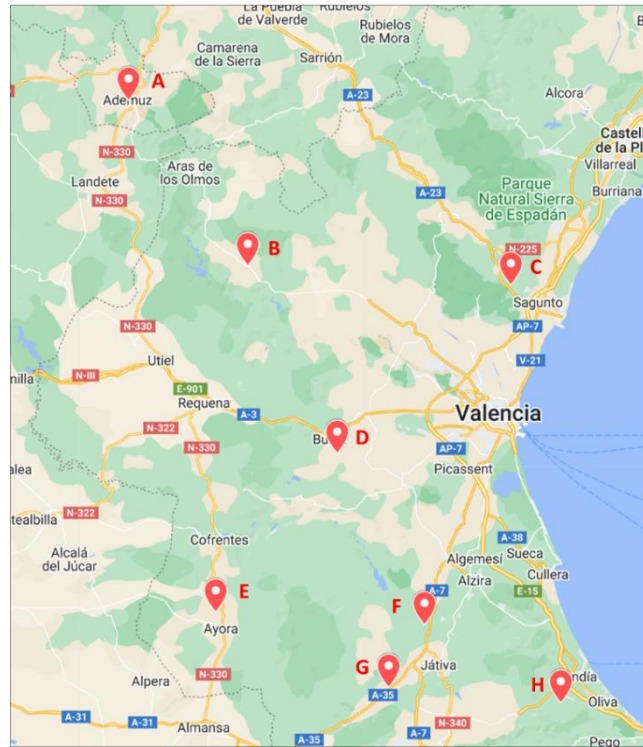


Figura 7. Localización de los ocho municipios.
Fuente: My maps de Google maps.

La representación temporal de la población permite observar diferencias en la tendencia de las curvas. Esta diferencia en la tendencia viene determinada por la ubicación en el mapa. Aquellos municipios próximos a la costa o cercanos a grandes ciudades como C, D, F y H presentan una tendencia positiva, es decir, la población en términos generales tiende a aumentar a lo largo del tiempo. Por otra parte, aquellos municipios situados en el interior como A, B, D y E tienen una tendencia negativa, por lo que en general el número de habitantes tiende a disminuir con el paso de los años. La representación de estas curvas diferenciando entre los dos grupos se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Población en función del tiempo en: a) municipios de interior b) municipios de costa.
Fuente: Elaboración propia utilizando R.

Se observa un patrón en la tendencia de la población influenciado por la ubicación del municipio.

Sin embargo, pese a los cambios demográficos mostrados en este apartado, las delimitaciones de los departamentos de salud se han mantenido intactas. Cabe la posibilidad que modificando los límites se pueda conseguir una mejor asignación de la población a los centros sanitarios, pues parece evidente que cambios en la demografía del territorio traigan consigo un reajuste de los recursos sanitarios que se disponen.

2.4 Revisión bibliográfica: Problemas de distritación

El área de diseño de distritos o territorio puede considerarse como una subdisciplina de optimización vinculada a las decisiones de partición. En un problema típico de división de distritos, se busca dividir un área en distritos. Esta partición no es arbitraria, sino que debe de cumplir con requisitos específicos según la aplicación o contexto urbanístico (Ríos-Mercado, 2020).

En este marco, el problema que se plantea es un proceso inverso, siendo el objetivo el mismo. Se tienen las particiones del territorio de estudio, con sus correspondientes características, que hay que ir asignando a los centros de especialidades con la finalidad de crear regiones, conocidas como departamentos de salud.

Aunque cada problema de distritación es diferente con unas características particulares, hay unos criterios o requisitos que son comunes (Ríos-Mercado, 2020).

- **Compacidad territorial** implica la formación de distritos por unidades básicas lo más próximas posible entre sí. Se trata de un criterio que normalmente hace referencia a la forma regular de los distritos.
- **Asignación única** significa que cada unidad básica debe de ser asignada tan solo a un distrito. Esta característica asegura una partición del conjunto de unidades básicas.
- **Equilibrio territorial** implica que la cantidad total de trabajo debe distribuirse equitativamente entre los distritos. Por trabajo se refiere a cualquier atributo o atributos particulares que se midan en cada unidad básica.
- **Contigüidad**, también conocida como conectividad territorial, aparece cuando existe un grafo subyacente que representa la adyacencia entre unidades básicas, y asegura que cada distrito debe inducir un subgrafo conectado. Es decir, debe de existir un camino que conecte las unidades básicas que forman un distrito.
- **Similitud con el plan existente** tiene que ver con la redistribución de distritos de una partición actual de tal manera que sea lo más similar posible a la existente.

Debido a la dificultad en la generación de restricciones para este tipo de problemas, se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva. Tras analizar diversos artículos, se puede concluir que el problema de la asignación de población es un desafío complejo, pues cada autor ha elaborado un modelo de resolución diferente haciendo sus propias asunciones.

En primer lugar, cabe destacar que el problema de distritación surge en EE. UU. como consecuencia de la creación de distritos legislativos para favorecer a un determinado partido político en particular. Esta práctica tiene como objetivo influir en los resultados de las elecciones al trazar los límites contemplando un interés específico. Por tanto, se demuestra que la modificación de las fronteras entre territorios para conseguir ciertos intereses es posible (Almeida & Manquinho, 2022).

En Portugal, los investigadores Tiago Almeida y Vasco Manquinho han llevado a cabo un estudio sobre la distritación electoral basada en restricciones utilizando una nueva medida de compacidad. Se centran en dibujar distritos electorales ampliando el trabajo previo sobre los modelos de programación lineal entera (ILP), presentando una nueva formulación para el problema de la distritación electoral basada en los **caminos más cortos** en el **grafo de contigüidad** de las unidades territoriales. Un grafo de contigüidad es un grafo ponderado conectado donde cada vértice corresponde a una unidad territorial considerada en la distritación. Se propone un algoritmo para redistribuir grandes áreas densamente pobladas haciendo una primera partición utilizando las divisiones administrativas existentes (Almeida & Manquinho, 2022).

En cuanto a las características propias de un problema de distritación, los autores Antonio Diglio y Juanjo Peiró han elaborado esquemas de aproximación para problemas con restricciones probabilísticas. Conocido el número de distritos a diseñar, la finalidad que se persigue consiste en dividir un área geográfica que contiene muchas unidades territoriales en distritos más pequeños teniendo en cuenta aspectos como la integridad, el equilibrio, la contigüidad y la compacidad. Las restricciones de **contigüidad** se consideran explícitamente de manera que, al moverse entre dos unidades territoriales dentro de un mismo distrito, siempre haya un camino que no cruce un distrito diferente. La **integridad** también se asegura a través de la imposición de que cada unidad territorial tan solo debe de estar incluida en un solo distrito. Finalmente, se adopta una medida sustituta de la **compacidad** que define un objetivo a optimizar. Suponiendo que se usa una **demanda estocástica**, el objetivo es tomar una decisión minimizando el valor esperado de la demanda máxima en los distritos (Diglio et al., 2023).

Este tipo de problemas también se ha estudiado en otros ámbitos como puede ser el problema de distritación policial. En este caso, el objetivo es dividir el territorio bajo la jurisdicción de un departamento de policía de la mejor manera posible buscando una distribución homogénea de la carga de trabajo para garantizar la equidad a los policías y, en consecuencia, un aumento de su satisfacción.

La carga de trabajo es un factor muy importante a tener en cuenta y, a la hora de introducirla en el modelo, cada autor la ha definido de una manera. Mitchell la calcula como la suma del tiempo de servicio total esperado y el tiempo de viaje total esperado (Mitchell, 1972). Curtin et al utilizan el número o frecuencia de llamadas o incidentes que ocurren en cada distrito (Curtin et al., 2010). Para D'Amico et al la carga de trabajo se define como la fracción de tiempo de trabajo que un agente dedica para atender llamadas (D'Amico et al., 2002). Más reciente, Camacho-Collados et al definen la carga de trabajo como la combinación ponderada de múltiples atributos: área, riesgo,

aislamiento y diámetro (Camacho-Collados et al., 2015). Además de examinar la mejor forma de definir la carga de trabajo, surge otra dificultad relacionada con la obtención de los datos necesarios para poder calcularla, ya que no suelen estar disponibles al público.

También se considera de utilidad conocer algunos de los modelos de optimización que han utilizado estos autores. Mitchell define un modelo de partición de conjuntos que considera **minimizar la distancia** esperada dentro de cada subconjunto e **igualar la carga de trabajo** entre todos los subconjuntos. Curtin et al proponen modelos de cobertura máxima. Por otra parte, Camacho-Collados et al introducen un problema multicriterio que proporciona un equilibrio entre la eficiencia y la homogeneidad de la carga de trabajo. Para finalizar, es importante comentar que todas las formulaciones a menudo se resuelven mediante una **heurística** debido al tamaño del contexto de la aplicación.

A continuación, debido a que el problema presentado en este Trabajo de Fin de Máster está relacionado con el sistema sanitario, se presentan aquellos artículos que investigan la distritación en la asistencia sanitaria. A raíz de la complejidad computacional inherente de la mayoría de los problemas, en la mayor parte de los casos han resuelto el problema mediante enfoques heurísticos y metaheurísticos.

El primer ejemplo que se presenta es la optimización para los distritos sanitarios en condiciones de incertidumbre basado en datos en Irán. Los autores consideran que es difícil de obtener una aproximación precisa del valor de la demanda, aunque es muy importante para planificar adecuadamente un sistema de salud. Proponen el uso de la **demanda hedónica**, método para estimar la demanda de un bien o un servicio, que debe desglosarse en características esenciales y obtenerse estimando el valor contributivo de cada característica. La demanda de atención médica para cada nivel de servicio deberá tener en cuenta la demografía de la población: envejecimiento de la población, porcentaje de mujeres casadas, tasa de desempleo, promedio de nivel de ingresos, nivel de alfabetización, desarrollo urbano, porcentaje de hombres, densidad de población y factores ambientales como la contaminación del aire en comparación con su nivel estándar. Además, emplean el **algoritmo Dijkstra** para encontrar la ruta más corta (Mostafayi Darmian et al., 2021)

Otra investigación también llevada a cabo en Irán por los autores Hiwa Farughi y Madjid Tavana propone un modelo matemático multiobjetivo para diseñar los distritos compactos, equilibrados y contiguos en los sistemas de salud. El problema investigado en este trabajo es el de realizar la distritación de áreas pobladas y asignar los servicios que necesitan las áreas a los distritos correspondientes utilizando un **modelo matemático biobjetivo** con los objetivos de maximizar el cumplimiento del plan y minimizar el costo de implementación. Estos objetivos se consiguen minimizando la heterogeneidad de los servicios requeridos por los núcleos de población que componen las particiones y minimizando el número de desplazamientos de equipos que se producen entre las distintas particiones, respectivamente. Además, remarcan el poco consenso sobre la idoneidad de los criterios de distritación, su importancia y medición

en problemas del mundo real. De nuevo emplean el algoritmo Dijkstra para especificar los puntos en la ruta más corta entre dos nodos (Farughi et al., 2020).

La obtención de los datos necesarios para la resolución de este tipo de problemas no resulta sencilla. Un ejemplo de ello es la investigación realizada por Tao Jia y Hongbing Tao en la que utilizan un modelo mejorado de p-mediana que considera tanto la accesibilidad geográfica como la calidad de servicio. Para poder aplicarlo, es necesario conocer la información relativa al hospital que incluye la ubicación geográfica en términos de latitud y longitud, nombre del hospital, número de camas, número de departamentos especiales clave, número de médicos por cada mil residentes y número de camas por cada mil residentes. Por otra parte, la demanda de la ciudad se define como el número de pacientes potenciales con enfermedades complejas que deben ser transferidos a un centro de salud para su tratamiento. Este valor se obtiene considerando tres variables: número de residentes, tasa media de hospitalización y la incidencia de enfermedades complejas (Jia et al., 2014).

Tampoco es sencillo determinar la función objetivo ya que en muchos casos sucede que cuando se trata de mejorar una de las variables del problema se empeora otra. La investigadora Maria Teresinha Arns Steiner propone el uso de un modelo de optimización multiobjetivo. El problema que plantea considera tres funciones objetivo: maximizar la homogeneidad de la población en las microrregiones, maximizar la variedad de procedimientos médicos ofrecidos en las microrregiones y minimizar las distancias entre microrregiones que deben recorrer los pacientes (Steiner et al., 2015).

Tras la lectura de múltiples artículos científicos y, de acuerdo con lo expresado por algunos expertos, se deduce que es muy complicada la comparación entre los distintos modelos que se han propuesto para la resolución de este tipo de problemas. Esto se debe a la falta de un consenso común en la creación de las variables involucradas y en la cuantificación de los resultados obtenidos.

Para concluir este apartado y teniendo en cuenta lo expuesto, es importante resaltar el problema que aborda este trabajo. Se busca una nueva asignación de la población de la provincia de Valencia a los centros de especialidades, teniendo en cuenta la capacidad de cada centro. Lo que diferencia al método de asignación propuesto del resto es que también tiene en cuenta las especialidades de los centros, garantizando un conjunto mínimo para cada departamento formado. De esta manera, se aporta un nuevo enfoque todavía no considerado en la bibliografía existente.

2.5 Algoritmos relevantes

Dentro de este apartado se recogen los algoritmos más relevantes que se han utilizado en el modelo para la asignación de la población. Estos algoritmos son el Dijkstra y los relacionados con la creación una heurística.

2.5.1 Dijkstra

La búsqueda del camino más corto en el contexto de la teoría de grafos queda estrechamente vinculado al algoritmo Dijkstra. El algoritmo Dijkstra, es una herramienta eficiente con complejidad $O(n^2)$, donde n es el número de vértices, que encuentra el camino de costo mínimo desde un nodo origen hacia todos los demás nodos del grafo.

Dado un grafo a cuyos arcos se han asociado una serie de pesos, el concepto de camino de costo mínimo de un vértice u a otro v se define como la ruta donde la suma de los pesos de los arcos es la más baja en comparación con todos los caminos posibles entre estos vértices (Torrubia & Lozano Terrazas, s. f.).

Este algoritmo se basa en el principio de optimalidad, que sostiene que, si el camino más corto entre dos vértices u y v pasa por el vértice w , se da por supuesto que la parte de este camino que se recorre desde w hasta v también debe de ser el recorrido más corto que une a estos vértices. De esta manera, se construyen sucesivamente los caminos de costo mínimo desde un vértice inicial hasta cada uno de los vértices del grafo.

Utilizando un ejemplo sencillo para la explicación del algoritmo Dijkstra se presenta el grafo de la Figura 9. El vértice u se corresponde con la partición C y el vértice v con la partición I, considerando ambas particiones como punto de partida y de destino respectivamente. El camino más corto que permite conectar ambas particiones es el que pasa por D y E. Esto significa que este recorrido será también el más corto que permitirá conectar estos dos vértices w con la partición I.

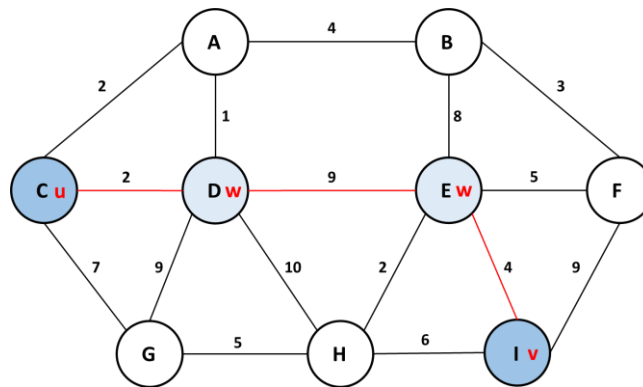


Figura 9. Grafo para la explicación del algoritmo Dijkstra.
Fuente: Elaboración propia.

En el problema que se plantea, cada uno de los vértices podría representar las distintas particiones de terreno y los arcos tendrían asociada la distancia entre los centroides de las particiones adyacentes. De esta manera, se obtendrían las rutas más cortas que deberían de seguir los pacientes de cada territorio para alcanzar los centros de especialidades.

Se recurre al concepto de centroide porque simplifica los cálculos al proporcionar un punto de referencia para un grupo de población en lugar de tener en cuenta la ubicación exacta de cada persona.

2.5.2 Heurística

Un algoritmo heurístico se plantea en diversas situaciones como por ejemplo cuando no se conoce un método exacto para conocer el problema, cuando existe un método exacto computacionalmente muy costoso y cuando se quieren incorporar condiciones de difícil modelización.

El término heurísticas cuenta con diversas definiciones en la literatura. Para Zanakis et al se trata de procedimientos simples a menudo basados en el sentido común que se supone que obtendrán una buena solución (no necesariamente óptima) a problemas difíciles de un modo sencillo y rápido (Zanakis, 1981).

Además, hay que diferenciar entre un método constructivo que permite obtener una solución factible para el problema y un método de búsqueda local cuya función es mejorar la solución obtenida. Si se trabaja con *first improvement*, al examinar la vecindad se selecciona el primer movimiento que produce una mejora en la solución actual (Duarte Muñoz, 2007).

Un ejemplo de heurísticas son los algoritmos *voraces*. Estos parten de una solución vacía a la cual en cada paso siguiente se le añade un elemento escogido entre los candidatos. Hay que tener en cuenta que, una vez tomada la decisión, ésta no se podrá deshacer. Este proceso se finaliza cuando el conjunto de elementos seleccionados constituya una solución. En la práctica, este tipo de algoritmos suelen ser bastante rápidos, encontrándose dentro de órdenes de complejidad polinomiales.

Para resolver el problema de asignación de población a los centros de especialidades y centros sanitarios integrados ha sido necesaria la creación de una heurística.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

Como ya se ha expuesto anteriormente, este trabajo afronta una nueva asignación de la población de la provincia de Valencia a los centros de especialidades y centros sanitarios integrados. Por lo tanto, se trata de un problema real que afecta a los recursos sanitarios con los que cuenta la Comunidad Valenciana.

El área de trabajo está dividida en unidades de trabajo básicas conocidas como particiones. Cada unidad básica tiene una población correspondiente que se tiene que asignar íntegramente a un centro de especialidades o centro sanitario integrado siguiendo una serie de criterios. Esta asignación es la que determina la composición de cada distrito o departamento de salud. Es decir, se tienen que agrupar varias unidades territoriales básicas para formar un distrito.

En este trabajo se busca que las particiones se encuentren lo más próximas entre sí, ya que de esta manera se minimiza la distancia de los desplazamientos y se favorece a la contigüidad en la creación los departamentos de salud. Por otra parte, cada una de las particiones del territorio tan solo se puede asignar a un centro de especialidades. El equilibrio territorial se consigue haciendo que la capacidad de los centros sea lo más parecida posible a la población asignada a éstos, evitando una elevada carga asistencial. Finalmente, la solución obtenida debe de ser similar a la ya existente para facilitar la incorporación de los nuevos cambios, tanto a nivel administrativo como a nivel del paciente.

Organizar las actividades realizadas en la elaboración de este trabajo según las secciones en las que se llevaron a cabo facilita la comprensión del proceso de ejecución. Por lo tanto, su realización se ha estructurado de la siguiente manera:

1. Trabajo previo:
 - 1.1. Lectura y búsqueda de información sobre los métodos para resolver problemas de distritación en un contexto general, centrándose en mayor medida en el sector sanitario.
 - 1.2. Proceso de aprendizaje de los comandos básicos en el manejo de Python. Necesario para la creación de la heurística y, por lo tanto, para la resolución del problema.
 - 1.3. Investigación de algoritmos que permitan calcular la distancia entre dos particiones.
2. Planteamiento del problema:
 - 2.1. Identificación de la función objetivo, de las variables y parámetros. Imprescindible para la modelización del modelo.
 - 2.2. Establecimiento de las restricciones que consiguen el cumplimiento de los requisitos propios de un problema de distritación.
 - 2.3. Creación del modelo matemático.

3. Aplicación del modelo matemático:
 - 3.1. Cálculo de la distancia máxima y la capacidad disponible para cada uno de los centros.
 - 3.2. Apreciación de las limitaciones del modelo matemático.
4. Resolución del problema:
 - 4.1. Programación de la heurística.
 - 4.2. Verificación del funcionamiento esperado de la heurística a través de su aplicación en tres escenarios diferentes.
 - 4.3. Aplicación de la heurística para asignar la población de la provincia de Valencia a los centros de especialidades y centros sanitarios integrados de este territorio.
 - 4.4. Cálculo de la distancia máxima y la capacidad disponible para cada uno de los centros.
5. Redacción y posterior revisión de la memoria

En el contexto del problema es muy importante conocer la distribución de la población a lo largo del territorio estudiado. En la provincia de Valencia se tiene un desequilibrio demográfico donde la población se concentra alrededor de grandes ciudades o cerca de la costa. Además, la tendencia de los datos a lo largo de los años hace pensar que esta situación sea cada vez más pronunciada en los próximos años.

La dificultad en la asignación de la población a los centros de especialidades y centros sanitarios integrados reside en el cumplimiento de ciertos requisitos comunes, siendo el más importante el de contigüidad. Para facilitar su cumplimiento, el terreno con el que se trabaja se divide en particiones cuadradas del mismo tamaño forzando a que una partición tan solo puede ser vecina de otras cuatro.

Para abordar este desafío, se propone un modelo matemático que ofrezca una solución válida. La modelización del problema sirve de gran ayuda para su comprensión y posterior resolución. No obstante, tan solo resulta útil cuando se trabaja con un número muy reducido de particiones, lo que propicia la programación de una heurística.

Para comprobar el buen funcionamiento de la heurística, se han creado tres escenarios para los que la población de cada una de las particiones, la capacidad de los centros sanitarios y las distancias entre particiones adyacentes se han establecido de manera aleatoria.

Este proceso se ha seguido con el objetivo de poder emplear la heurística en un caso real en el que el territorio de estudio sea la provincia de Valencia. Al dividir la provincia en cuadrados iguales, se tienen particiones de terreno que mediante un software se puede determinar la distancia entre ellas y el número de personas que habita en cada partición. Para poder abordar el problema tan solo queda conseguir la capacidad de los centros.

Profundizando en la heurística, el método constructivo está diseñado para asignar la población a aquel centro más cercano. Posteriormente, la búsqueda local se encarga de equilibrar la carga asistencial entre los distintos centros permitiendo reasignar las particiones. Aunque esta última etapa puede aumentar las distancias, permite una atención sanitaria más rápida evitando la saturación de los centros.

La forma de medir la bondad del proceso es a través de la distancia máxima que un paciente tendría que recorrer hasta alcanzar su centro de referencia y de la diferencia entre la capacidad de los centros que forman un mismo departamento y la población asignada a estos. Para la formación de departamentos, se busca que cada uno cuente con un centro que ofrezca todas las especialidades. En lo que respecta a los centros incompletos, éstos se incluirán en aquel departamento que minimice la distancia máxima.

3.1 Software utilizado

En la elaboración de este trabajo se han utilizado diferentes softwares.

Con el fin de obtener resultados en la utilización del modelo matemático propuesto se ha considerado conveniente el uso de Microsoft Excel con el programa complemento Solver. Solver se encarga de ajustar los valores de las celdas de variables de decisión para que cumplan con los límites de las celdas de restricción y den el resultado deseado en la celda objetivo (*Solver*, s. f.).

En cuanto a la heurística se ha utilizado Spyder, un entorno integrado de desarrollo (IDE) y de código abierto para el uso de Python que permite funciones avanzadas de edición, análisis y depuración de datos (*Spyder*, s. f.). Python es un lenguaje de programación interpretado que destaca por su sintaxis clara y legible. Es conocido por su versatilidad y se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones, desde desarrollo web hasta inteligencia artificial (*Python*, s. f.).

Finalmente, se ha empleado el software de información geográfica QGIS 3.28.14. Este software permite a sus usuarios la visualización, gestión, edición y análisis de datos geográficos. QGIS es una aplicación construida sobre software libre y de código abierto accesible a través de cualquier sistema operativo (*QGIS*, s. f.). En el trabajo ha sido útil para la representación en mapas del territorio de la provincia de Valencia, la ubicación de los centros sanitarios, el cálculo de la distancia entre particiones y la obtención del número de habitantes.

CAPÍTULO IV: MODELO MATEMÁTICO

La resolución del problema explicado previamente, en el que se pretende asignar la población a un centro sanitario para la posterior formación de los departamentos de salud, se ha llevado a cabo en primer lugar a través de un modelo matemático.

Dada la complejidad del problema, se ha considerado necesario reducir la dimensión con el fin de mostrar y describir el planteamiento del modelo.

La principal simplificación se basa en la reducción de la dimensión del terreno. Para la explicación de este modelo, tan solo se han considerado seis particiones denominadas desde la A hasta la F como se muestra en la Figura 10. En este contexto, una partición hace referencia a una unidad básica de división del territorio en forma de cuadrícula.

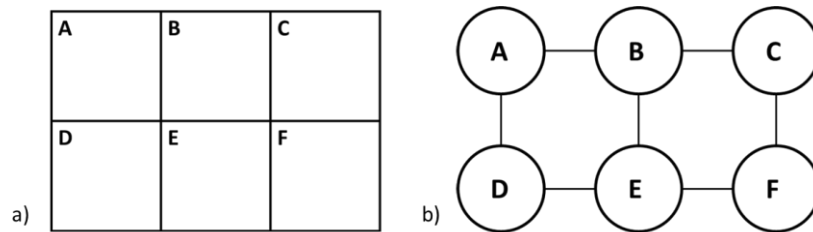


Figura 10. Representación de las particiones del terreno en forma de: a) cuadrícula b) grafo.
Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, debido a la disposición en la que se ha dividido el terreno, se considera que tan solo se puede acceder de una partición a otra si comparten alguna arista del cuadrado. A estas particiones a la que se puede acceder se les conoce como vecinos próximos. Como ejemplo, si se parte desde A tan solo se puede acceder a B y a D, mientras que los vecinos próximos de B son las particiones A, C y E.

Finalmente, el número de regiones o departamentos viene determinado por el número de centros sanitarios que contienen todas las especialidades que se consideran como esenciales. Es decir, habrá tantos departamentos como centros de especialidades y centros sanitarios integrados completos.

4.1 Parámetros y variables

Para modelizar el problema es necesario conocer los parámetros y variables que entran en juego.

Los principales parámetros que se utilizan son la demanda estimada de atención médica en cada partición k , d_k , y la capacidad de servicio en cada una de las divisiones, c_k , siendo nula en aquellas que no cuentan con centro de salud. Ambos parámetros son fundamentales para el cálculo de la función objetivo. La demanda estimada de atención médica se considera que es equivalente a la población que habita en cada una de las particiones.

Además de la capacidad de cada centro, es necesario conocer si se ofrece la totalidad de las especialidades básicas. Para ello, se elabora una matriz de ceros y unos donde en columnas se tienen las particiones y en filas cada una de las especialidades. De esta manera quedan reflejadas qué especialidades n tiene cada partición k , e_{kn} .

En los parámetros presentados hasta el momento se produce un efecto de confusión de los centros con las particiones. Es decir, las características asociadas a los centros sanitarios pasan a ser atributos de las particiones que contienen al centro sanitario. De esta forma, se facilita la modelización del problema.

También se ha necesitado un parámetro que muestra si una partición k es vecina de otra l . Para ello se tiene una matriz con tantas filas y columnas como número de particiones donde un 1 representa el vecindario de cada partición, a_{kl} . Toma el valor de 1 si las particiones k y l son vecinas y 0 en caso contrario.

El último parámetro que se ha utilizado es aquel que indica el número de particiones que forman el camino c desde la partición k hasta la l en la región j , $num\theta_{klj}^c$.

En cuanto a las variables, las de mayor relevancia son el resultado de la función objetivo, v , debido a su naturaleza y las que indican a qué región j pertenece cada partición, θ_{kj} .

Por otra parte, se tienen variables binarias que se utilizan para conseguir la contigüidad de las particiones que forman la región. En primer lugar, un grupo de variables indica si dos particiones pertenecen a la misma región μ_{klj} . Si estas dos particiones no son contiguas, se pasa a hablar de la existencia de caminos c que permiten conectar ambas divisiones de terreno en la misma región, λ_{klj}^c , haciendo uso de particiones intermedias.

4.2 Modelo completo

En este apartado se muestra el modelo de manera conjunta expresado de forma matemática. Esta notación permite la comprensión de la interacción que tienen los distintos parámetros y variables en la resolución del problema.

Parámetros:

d_k : demanda estimada de atención médica en cada partición k .
 k : particiones A, B, C, D, E y F.

c_k : capacidad de servicio médico en cada partición k .

e_{kn} : binaria. 1 si la partición k tiene la especialidad n . 0 en caso contrario.
 n : cada una de las especialidades principales.

a_{kl} : binaria. 1 si la partición k es adyacente a la l . 0 en caso contrario.
 l : particiones A, B, C, D, E y F.

$num\theta_{klj}^c$: número de particiones que forman el camino c de k a l en la región j .
 j : número de regiones.

Variables:

θ_{kj} : binaria. 1 si la partició k pertenece a la región j. 0 en caso contrario.

μ_{klj} : binaria. 1 si la partició k y la l pertenecen a la misma región j. 0 en caso contrario.

λ_{klj}^c : binaria. 1 si existe camino c entre particiones k y l no adyacentes en la región j. 0 en caso contrario.

c : número de caminos que permiten conectar las particiones.

Función Objetivo:

$$\min z = v$$

Sujeto a las restricciones:

$$-v \leq \sum_1^k \theta_{kj} * d_k - \theta_{kj} * c_k \leq v \quad ; \forall j. \quad (1)$$

$$\sum_1^j \theta_{kj} = 1 \quad ; \forall k. \quad (2)$$

$$\sum_1^k \theta_{kj} * e_{kn} \geq 1 \quad ; \forall n, \forall j. \quad (3)$$

$$2 * \mu_{klj} \leq \theta_{kj} + \theta_{lj} \leq \mu_{klj} + 1 \quad ; \forall k, \forall l, \forall j. \quad (4)$$

$$num\theta_{klj}^c * \lambda_{klj}^c \leq \theta_{kj} + \dots + \theta_{lj} \leq \lambda_{klj}^c + num\theta_{klj}^c - 1 \quad ; \forall k, \forall l, \forall j, \forall c. \quad (5)$$

$$\sum_1^c \lambda_{klj}^c \geq \mu_{klj} \quad ; \forall k, \forall l, \forall j. \quad (6)$$

$$\theta_{kj} \text{ binaria} \quad ; \forall k, \forall j.$$

$$\mu_{klj} \text{ binaria} \quad ; \forall k, \forall l, \forall j.$$

$$\lambda_{klj}^c \text{ binaria} \quad ; \forall k, \forall l, \forall j, \forall c.$$

La creación tanto de las variables y parámetros como de las restricciones del modelo surgen de la lectura de distintos artículos científicos y de la experiencia personal en el contexto del trabajo. A través de la prueba y error se ha conseguido obtener un modelo válido para realizar una nueva asignación de la población a los centros de especialidades.

4.3 Función objetivo

El objetivo de este problema es minimizar la saturación del sistema. Es decir, se busca reducir la diferencia entre la cantidad de personas asignadas a una región y la

capacidad que tienen los centros médicos para atender. Es por ello por lo que es oportuno utilizar un modelo *minimax* que permita minimizar la máxima diferencia entre asignación y capacidad.

4.4 Restricciones

Dado que se tiene una función objetivo del tipo *minimax*, ésta viene acompañada con las correspondientes restricciones que comprenden entre dos valores, $-v$ y v , la diferencia entre la cantidad de personas asignadas a una región y la capacidad que tienen los centros médicos para atender.

Por otra parte, se tiene que cumplir que cada partición tan solo puede pertenecer a una región de salud. Además, el centro o conjunto de centros de salud que forman parte de una misma región deben albergar todas las especialidades principales.

Finalmente se tienen tres grupos de restricciones que se utilizan para conseguir la contigüidad en las particiones que forman una misma región. La primera de ellas es la que hace que $\mu_{k|l}$ tome el valor 1 cuando se la partición k y la partición l formen parte de la misma región j . La segunda es la que activa $\lambda_{k|l}^c$ cuando hay un camino entre las particiones no adyacentes k y l de manera que todas estas divisiones que forman el camino pertenezcan a la misma región. Cabe destacar la posible existencia de más de un camino c que permita unir ambas particiones. La última es la que relaciona las anteriores variables de manera que si $\mu_{k|l}$ toma el valor de 1, debe de haber algún $\lambda_{k|l}^c$ que también lo sea. Dicho de otra forma, si dos particiones no adyacentes pertenecen a la misma región debe de haber algún camino que las una.

4.5 Modelo en Excel

En este apartado se pretende explicar en detalle cómo se ha introducido el modelo en el software Excel. Además, haciendo uso del Solver es posible obtener soluciones óptimas para el problema que se plantea.

A continuación, se presentan los parámetros con unos valores introducidos de forma aleatoria, ya que el propósito de este modelo no es obtener resultados reales sino comprobar que funciona tal y como se esperaba que lo hiciera.

En primer lugar, en la Tabla 3 se muestran los valores de la población para cada una de las particiones junto con la capacidad asistencial que tienen aquellas que cuentan con un centro sanitario en su interior. Anteriormente se ha comentado el efecto de confusión de los centros con las particiones, por lo tanto, no es de extrañar que las características de los centros queden asociadas a las particiones.

En este caso, se ha obtenido que las particiones C y D serán las que contengan un centro con todas las especialidades que se han considerado como fundamentales. Por lo tanto, se conoce que en la nueva asignación se van a crear dos departamentos.

Tabla 3. Población y capacidad de cada una de las particiones.

Partición (k)	A	B	C	D	E	F
Población (dk)	25.000	30.000	20.000	40.000	5.000	12.000
Capacidad (ck)			60.000	70.000		

Especialidades (ekn)	A	B	C	D	E	F
Cardiología			1	1		
Rehabilitación			1	1		
Alergología			1	1		
Endocrinología			1	1		
Nefrología			1	1		
Neurología			1	1		
Odontología			1	1		
Pediatría			1	1		

Fuente: Elaboración propia.

De esta manera, añadiendo los centros sanitarios a la distribución del terreno propuesta en la Figura 10 se tiene la representación de la Figura 11.

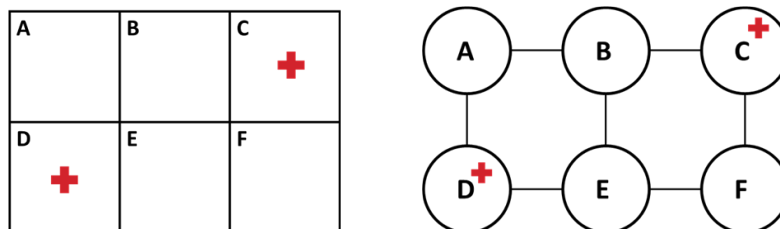


Figura 11. Representación de los centros sanitarios en las particiones del terreno en forma de: a) cuadrícula b) grafo

Fuente: Elaboración propia.

Considerando la disposición del territorio, resulta sencilla la construcción de la matriz de vecinos de la Tabla 4. Esta matriz muestra un valor de 1 para indicar que las particiones, representadas en las filas y en las columnas, son limítrofes.

Tabla 4. Matriz de vecinos.

¿Vecinos?	A	B	C	D	E	F
A		1		1		
B	1		1		1	
C		1				1
D	1				1	
E		1		1		1
F			1		1	

Fuente: Elaboración propia.

Aunque no se introduzca esta información directamente en el modelo, su conocimiento resulta muy útil, pues facilita la activación de las variables λ_{klj}^c . Estas variables, como se ha detallado previamente, señalan la existencia de un camino que conecta ambas particiones, siendo relevante en aquellas que no son contiguas entre sí. Por ejemplo, si se agrupan en el mismo departamento las particiones A y B no sería necesario realizar ninguna comprobación puesto que son contiguas. Sin embargo, si se agrupan en un mismo departamento las particiones A y C, para que puedan estar dentro de un mismo departamento es necesario que las particiones que forman el camino entre ambas también se agrupen dentro del mismo departamento. Esto se tiene que cumplir para cada par de particiones no contiguas que pertenecen a un mismo departamento.

En este caso, al tratarse de un ejemplo sencillo, los caminos también se pueden conseguir observando el territorio de estudio.

En la Tabla 5 se presentan todas las variables λ_{kij}^c necesarias para la resolución de este ejemplo. Diferenciando entre los dos departamentos o regiones que se van a crear, se tienen todos los caminos posibles que permiten el acceso de una partición a otra. Por ejemplo, al analizar los caminos que permiten conectar la partición A con la C, se observa que hay dos rutas: una que pasa por B y otra que incluye a D, E y F. Como se trabaja con la matriz de vecinos, ciertos caminos como el formado por B, E y F o D, E y B carecen de sentido, ya que la partición B es capaz de conectar a A y C por sí misma. Por tanto, se busca el camino que contenga el mínimo número de particiones posible.

Tabla 5. Variables λ_{kij}^c utilizadas para conseguir la contigüidad.

¿Camino Región 1?		¿Camino Región 2?	
λ_{AC1}^1	0	λ_{AC2}^1	0
λ_{AC1}^2	0	λ_{AC2}^2	0
λ_{AE1}^1	0	λ_{AE2}^1	0
λ_{AE1}^2	1	λ_{AE2}^2	0
λ_{AF1}^1	0	λ_{AF2}^1	0
λ_{AF1}^2	0	λ_{AF2}^2	0
λ_{AF1}^3	0	λ_{AF2}^3	0
λ_{BD1}^1	0	λ_{BD2}^1	0
λ_{BD1}^2	0	λ_{BD2}^2	0
λ_{BF1}^1	0	λ_{BF2}^1	1
λ_{BF1}^2	0	λ_{BF2}^2	0
λ_{CD1}^1	0	λ_{CD2}^1	0
λ_{CD1}^2	0	λ_{CD2}^2	0
λ_{CF1}^1	0	λ_{CE2}^1	0
λ_{CE1}^2	0	λ_{CE2}^2	0
λ_{DF1}^1	0	λ_{DF2}^1	0
λ_{DF1}^2	0	λ_{DF2}^2	0

Fuente: Elaboración propia.

La combinación de particiones que forman estos caminos viene prefijada y es la misma para ambas regiones. Es por ello por lo que a continuación se muestra una lista con la composición de cada uno de los caminos que harían que la variable λ_{kij}^c se active:

- λ_{ACj}^1 : particiones A, D, E, F y C.
- λ_{ACj}^2 : particiones A, B y C.
- λ_{AEj}^1 : particiones A, B y E.
- λ_{AEj}^2 : particiones A, D y E.
- λ_{AFj}^1 : particiones A, B, C y F.
- λ_{AFj}^2 : particiones A, B, E y F.
- λ_{AFj}^3 : particiones A, D, E y F.
- λ_{BDj}^1 : particiones B, A y D.
- λ_{BDj}^2 : particiones B, E y D.
- λ_{BFj}^1 : particiones B, C y F.
- λ_{BFj}^2 : particiones B, E y F.
- λ_{CDj}^1 : particiones C, B, A y D.

- λ_{CDj}^2 : particiones C, F, E y D.
- λ_{CEj}^1 : particiones C, B y E.
- λ_{CEj}^2 : particiones C, F y E.
- λ_{DFj}^1 : particiones D, E y F.
- λ_{DFj}^2 : particiones D, A, B, C y F.

Por otra parte, las variables de la Tabla 6 son las que antes se han presentado como μ_{kij} . Se han generado todas las combinaciones posibles para cada uno de los departamentos, permitiendo conocer si dos particiones pertenecen a una misma región. Además, es importante destacar que es equivalente ir desde la partición k a la l que ir desde la l a la k, pues se obtendría el mismo resultado.

Tabla 6. Variables μ_{kij} utilizadas para conseguir la contigüidad.

¿Misma Región 1?		¿Misma Región 2?	
μ_{AB1}	0	μ_{AB2}	0
μ_{AC1}	0	μ_{AC2}	0
μ_{AD1}	1	μ_{AD2}	0
μ_{AE1}	1	μ_{AE2}	0
μ_{AF1}	0	μ_{AF2}	0
μ_{BC1}	0	μ_{BC2}	1
μ_{BD1}	0	μ_{BD2}	0
μ_{BE1}	0	μ_{BE2}	0
μ_{BF1}	0	μ_{BF2}	1
μ_{CD1}	0	μ_{CD2}	0
μ_{CE1}	0	μ_{CE2}	0
μ_{CF1}	0	μ_{CF2}	1
μ_{DE1}	1	μ_{DE2}	0
μ_{DF1}	0	μ_{DF2}	0
μ_{EF1}	0	μ_{EF2}	0

Fuente: Elaboración propia.

Al tratarse en ambos casos de variables binarias, tan solo resulta de interés el estudio de aquellas que tras la simulación muestran un valor de 1. El análisis de los resultados obtenidos se especifica diferenciando entre los dos departamentos. Para el primero, las variables μ_{AD1} , μ_{AE1} , μ_{DE1} y λ_{AE1}^2 son las que se encuentran activas. Esto indica que el primer departamento queda formado por las particiones A, D y E, y que para acceder desde A hasta E se ha utilizado el camino 2, el cual emplea la partición D para conectar ambas particiones. Para el segundo, las variables activas son μ_{BC2} , μ_{BF2} , μ_{CF2} y λ_{BF2}^1 . Por lo tanto, el segundo departamento está compuesto por las particiones B, C y F, y para conectar la partición B con la F se ha utilizado el camino 1, que utiliza la partición C para unir ambas particiones.

Conociendo las parejas de particiones que se encuentran en cada región junto con el camino que se forma para la unión de aquellas no adyacentes, parece evidente la composición de cada una de las regiones. No obstante, el grupo de variables θ_{ki} muestra a qué región pertenece cada una de las particiones. Como se puede advertir en la Tabla 7, se comprueba que un departamento quedará formado por las particiones A, D y E mientras el otro estará compuesto por B, C y F.

Tabla 7. Asignación de las particiones a las regiones.

θ_{kj}	A	B	C	D	E	F
1	1	0	0	1	1	0
2	0	1	1	0	0	1

Fuente: Elaboración propia.

Representando los resultados obtenidos tras la asignación de la población a los centros de especialidades, se colorean las particiones del grafo como se muestra en la Figura 12. Se comprueba que haciendo uso de las restricciones propuestas se ha logrado la contigüidad de las particiones que forman un mismo departamento.

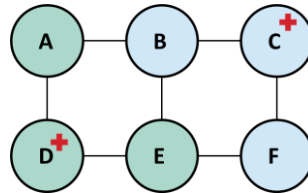


Figura 12. Grafo que muestra la formación de las regiones por las distintas particiones.

Fuente: Elaboración propia.

Antes de pasar a la explicación de las restricciones del modelo, se finaliza con la presentación de la última variable, correspondiente a la función objetivo. El resultado obtenido es el que hace mínima la máxima diferencia entre demanda y capacidad en las regiones, siendo este valor de 2.000 personas como especifica la Tabla 8. Al ser positivo, indica que la población asignada es superior a la capacidad del centro sanitario al menos en una de las regiones.

Tabla 8. Valor de la Función Objetivo.

FO		
min	v	2000

Fuente: Elaboración propia.

Para conocer qué región tiene una cantidad de población asignada superior a la capacidad de los centros hay que recurrir a las restricciones del modelo. En la Tabla 9 se muestran las restricciones correspondientes a la ecuación (1). En ella se puede apreciar que es la región 2 la que posee una cantidad de población asignada superior a la capacidad.

Tabla 9. Restricción que relaciona la población asignada y la capacidad.

Demanda - Servicio		
Reg. 1	-2000	0 <= 2000
Reg. 2	-2000	2000 <= 2000

Fuente: Elaboración propia.

Para concluir este apartado, se presentan el resto de las restricciones necesarias para la obtención de los resultados. Al igual que los parámetros y las variables, estas restricciones se presentan con los resultados obtenidos tras la ejecución del Solver. De esta manera, se pueden explicar cada una de las restricciones de manera detallada.

En la Tabla 10 se muestra el primer grupo de restricciones. En primer lugar, se tienen las correspondientes con la ecuación (2), que aseguran que cada partición sea asignada a una región sanitaria. A continuación, se advierten aquellas relacionadas con la ecuación

(3), donde se garantiza que la nueva región sanitaria contiene las especialidades consideradas como fundamentales. En este caso, como ambos centros contienen la totalidad de las especialidades basta con que cada uno quede asignado a una región diferente.

Tabla 10. Restricciones que aseguran que cada partición queda asignada a una región sanitaria que contiene todas las especialidades principales.

Partición - 1 región		
A	1	= 1
B	1	= 1
C	1	= 1
D	1	= 1
E	1	= 1
F	1	= 1

Especialidades mínimas					
Reg. 1			Reg. 2		
Esp. 1	1	>= 1	Esp. 1	1	>= 1
Esp. 2	1	>= 1	Esp. 2	1	>= 1
Esp. 3	1	>= 1	Esp. 3	1	>= 1
Esp. 4	1	>= 1	Esp. 4	1	>= 1
Esp. 5	1	>= 1	Esp. 5	1	>= 1
Esp. 6	1	>= 1	Esp. 6	1	>= 1
Esp. 7	1	>= 1	Esp. 7	1	>= 1
Esp. 8	1	>= 1	Esp. 8	1	>= 1

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, la ecuación (4) queda reflejada en las restricciones de la Tabla 11. Cuando dos particiones pertenezcan a una misma región, se activarán las variables μ_{klj} pudiendo observar un 2 en ambas partes de la desigualdad. Hay que destacar que si estas dos particiones no son contiguas deberá existir un camino que las conecte.

Tabla 11. Restricciones que activan las variables μ_{klj} .

¿2 particiones en una misma región?					
Reg. 1			Reg. 2		
AB	0	<= 1	<= 1	AB	0 <= 1 <= 1
AC	0	<= 1	<= 1	AC	0 <= 1 <= 1
AD	2	<= 2	<= 2	AD	0 <= 0 <= 1
AE	2	<= 2	<= 2	AE	0 <= 0 <= 1
AF	0	<= 1	<= 1	AF	0 <= 1 <= 1
BC	0	<= 0	<= 1	BC	2 <= 2 <= 2
BD	0	<= 1	<= 1	BD	0 <= 1 <= 1
BE	0	<= 1	<= 1	BE	0 <= 1 <= 1
BF	0	<= 0	<= 1	BF	2 <= 2 <= 2
CD	0	<= 1	<= 1	CD	0 <= 1 <= 1
CE	0	<= 1	<= 1	CE	0 <= 1 <= 1
CF	0	<= 0	<= 1	CF	2 <= 2 <= 2
DE	2	<= 2	<= 2	DE	0 <= 0 <= 1
DF	0	<= 1	<= 1	DF	0 <= 1 <= 1
EF	0	<= 1	<= 1	EF	0 <= 1 <= 1

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan las restricciones destinadas a garantizar que, en caso de que dos particiones no sean adyacentes, haya un camino que las conecte. Si se tiene en cuenta la ecuación (5) se concluye que tan solo se activará un camino si todas las particiones que lo forman pertenecen a la misma región. Además, por la forma en la que se han creado estas restricciones, las variables λ_{klj}^c tan solo se activarán cuando en

la parte izquierda de la desigualdad haya un valor distinto de 0. Además, este valor indica el número de particiones que forman el camino.

Como cabía esperar conociendo los resultados de las variables y , observando los valores obtenidos en la Tabla 12, la región 1 hace uso del segundo camino que conecta las particiones A y E y la región 2 del primer camino que enlaza B y F. Ambos caminos están formados por tres particiones.

Tabla 12. Restricciones que activan las variables λ_{kij} .

¿Camino entre 2 particiones?											
Reg. 1			Reg. 2								
AC (1)	0	<=	3	<=	4	AC (1)	0	<=	2	<=	4
AC (2)	0	<=	1	<=	2	AC (2)	0	<=	2	<=	2
AE(1)	0	<=	2	<=	2	AE(1)	0	<=	1	<=	2
AE(2)	3	<=	3	<=	3	AE(2)	0	<=	0	<=	2
AF(1)	0	<=	1	<=	3	AF(1)	0	<=	3	<=	3
AF(2)	0	<=	2	<=	3	AF(2)	0	<=	2	<=	3
AF(3)	0	<=	3	<=	3	AF(3)	0	<=	1	<=	3
BD(1)	0	<=	2	<=	2	BD(1)	0	<=	1	<=	2
BD(2)	0	<=	2	<=	2	BD(2)	0	<=	0	<=	2
BF(1)	0	<=	0	<=	2	BF(1)	3	<=	3	<=	3
BF(2)	0	<=	1	<=	2	BF(2)	0	<=	2	<=	2
CD(1)	0	<=	2	<=	3	CD(1)	0	<=	2	<=	3
CD(2)	0	<=	2	<=	3	CD(2)	0	<=	2	<=	3
CE(1)	0	<=	1	<=	2	CE(1)	0	<=	2	<=	2
CE(2)	0	<=	1	<=	2	CE(2)	0	<=	2	<=	2
DF (1)	0	<=	2	<=	2	DF (1)	0	<=	1	<=	2
DF (2)	0	<=	2	<=	4	DF (2)	0	<=	3	<=	4

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el último conjunto de restricciones mostrado en la Tabla 13 hace referencia a la ecuación (6). Si dos particiones no adyacentes pertenecen a la misma región, debe de haber al menos un camino que las conecte. La región 1 incluye las particiones no vecinas A y E, por lo que se fuerza la activación de un camino como mínimo que las conecte. Lo mismo ocurre con las particiones B y F en la región 2.

Tabla 13. Relación entre las variables μ_{kij} y λ_{kij} .

Relación entre variables $\mu - \lambda$							
Reg. 1			Reg. 2				
AC	0	>=	0	AC	0	>=	0
AE	1	>=	1	AE	0	>=	0
AF	0	>=	0	AF	0	>=	0
BD	0	>=	0	BD	0	>=	0
BF	0	>=	0	BF	1	>=	1
CD	0	>=	0	CD	0	>=	0
CE	0	>=	0	CE	0	>=	0
DF	0	>=	0	DF	0	>=	0

Fuente: Elaboración propia.

4.6 Otras configuraciones

Con el fin de apreciar el correcto funcionamiento del modelo en otro entorno, se ha decidido modificar los parámetros en dos ocasiones. Tan solo se han aplicado

pequeños cambios que inciden en el resultado final. En ambas configuraciones se siguen manteniendo los valores de la población para cada una de las particiones.

Como las restricciones siguen siendo las mismas, en este apartado se van a mostrar tan solo los parámetros y resultados obtenidos tras realizar la optimización.

➤ Primera configuración

La variación se produce en la localización de los centros sanitarios, ya que el centro se encontraba anteriormente en la partición C, ahora se ha colocado en la partición E. Se conserva la capacidad que tenía el centro y la oferta de especialidades, es decir, la totalidad de las consideradas como primordiales. Todos los parámetros quedan recogidos en la Tabla 14.

Tabla 14. Parámetros en la primera configuración.

Partición (k)	A	B	C	D	E	F
Población (dk)	25.000	30.000	20.000	40.000	5.000	12.000
Capacidad (ck)				70.000	60.000	

Especialidades (ekn)	A	B	C	D	E	F
Cardiología				1	1	
Rehabilitación				1	1	
Alergología				1	1	
Endocrinología				1	1	
Nefrología				1	1	
Neurología				1	1	
Odontología				1	1	
Pediatría				1	1	

Fuente: Elaboración propia.

Tras realizar la optimización con el Solver se obtiene que la región 1 quedará formada por las particiones B, C, E y F mientras que la región 2 por las particiones A y D. Estos resultados se aprecian en la Tabla 15.

Tabla 15. Asignación de las particiones a las regiones. Primera configuración.

θ_{kj}	A	B	C	D	E	F
1	0	1	1	0	1	1
2	1	0	0	1	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Si se colorean las particiones de acuerdo con la región a la que pertenecen se consigue el grafo de la Figura 13.

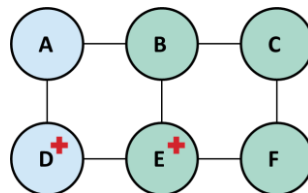


Figura 13. Grafo que muestra la formación de las regiones por las distintas particiones. Primera configuración.

Fuente: Elaboración propia.

Se logra un valor para la función objetivo de 7.000 que, al ser positivo, indica que la población asignada es superior a la capacidad de los centros en al menos una de las regiones.

➤ Segunda configuración

De nuevo, la modificación tan solo se produce en la localización del centro sanitario. El centro que en primer lugar se encontraba en la partición C y posteriormente en la E, ahora se halla en la partición A conservando las características que tenía. Todos los parámetros quedan recogidos en la Tabla 16.

Tabla 16. Parámetros en la segunda configuración.

Partición (k)	A	B	C	D	E	F
Población (dk)	25.000	30.000	20.000	40.000	5.000	12.000
Capacidad (ck)	60.000			70.000		

Especialidades (ekn)	A	B	C	D	E	F
Cardiología	1			1		
Rehabilitación	1			1		
Alergología	1			1		
Endocrinología	1			1		
Nefrología	1			1		
Neurología	1			1		
Odontología	1			1		
Pediatría	1			1		

Fuente: Elaboración propia.

Después de utilizar el Solver para realizar la optimización, los valores conseguidos en la Tabla 17 indican que las particiones A y B formarán la región 1 y las particiones C, D, E y F la región 2.

Tabla 17. Asignación de las particiones a las regiones. Segunda configuración.

θ_{kj}	A	B	C	D	E	F
1	1	1	0	0	0	0
2	0	0	1	1	1	1

Fuente: Elaboración propia.

Coloreando las particiones según a la región a la que pertenecen se genera el grafo de la Figura 14.

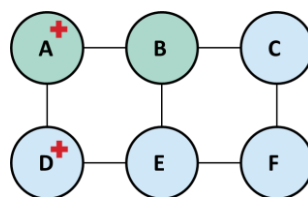


Figura 14. Grafo que muestra la formación de las regiones por las distintas particiones. Segunda configuración.

Fuente: Elaboración propia.

Se logra el mismo valor para la función objetivo que en el caso anterior, 7.000, que al ser positivo denota que la población asignada es superior a la capacidad de los centros en al menos una de las regiones.

4.7 Limitaciones del modelo

El uso del modelo matemático, si bien ayuda a comprender el problema, en muchas ocasiones imposibilita la obtención de soluciones debido a la complejidad que se genera a medida que aumenta la dimensión del problema.

Enfocado en este problema, trabajar con un número elevado de particiones supone un aumento considerable de las distintas combinaciones posibles para la formación de las regiones sanitarias y, por consiguiente, de las restricciones del modelo. Un ejemplo de ello es la creación de las variables μ_{klj} . La cantidad de parejas de particiones posibles que se pueden formar se obtiene haciendo uso de la siguiente fórmula donde n hace referencia al número de particiones del territorio consideradas:

$$C(n, 2) = \frac{n!}{2!(n-2)!} = \frac{n * (n - 1)}{2}$$

En el ejemplo dado, tan solo se tienen 6 particiones, lo que resulta en un total de 15 combinaciones posibles. Sin embargo, este número de particiones es bastante limitado si se quiere trabajar con precisión en un entorno real donde se requiere mayor precisión. Conforme se incrementa el número de particiones, también aumenta el número de posibles combinaciones. A medida que n crece, el valor de su factorial aumenta exponencialmente. Aunque el denominador también aumenta, su tasa de crecimiento es comparativamente menor. Es por ello, por lo que se tiene un incremento del número de restricciones conforme aumenta la cantidad de particiones. Contemplando que se replican en cada una de las regiones, el valor de combinaciones obtenido se debería de multiplicar por el número de regiones, aumentando todavía más las restricciones del modelo.

La Figura 15 recoge la evolución que se produce en el número de combinaciones cuando se va aumentando el número de particiones. Llama la atención que para un terreno dividido en 1.000 partes se necesitarían 495.000 restricciones para cada una de las regiones generadas.

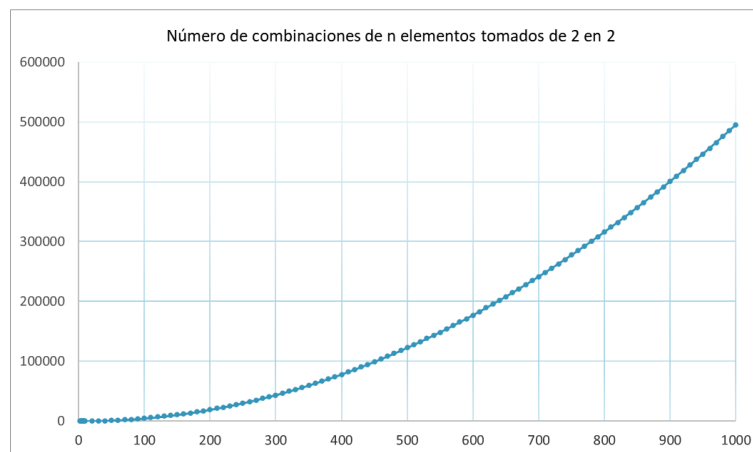


Figura 15. Número de combinaciones de n particiones tomadas por parejas.
Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, las variables λ_{klj}^c se crean teniendo en cuenta la matriz de vecinos, por lo que aumentar la cantidad de particiones se traduce en un mayor esfuerzo. Esto es debido a que su introducción en el modelo se realiza de forma manual prestando atención a todos los posibles caminos que permiten el acceso de una partición a otra, lo que dificulta su automatización.

Es importante señalar que este ejemplo presenta una división del territorio bastante simplificada, lo que facilita la generación de la matriz de vecinos. No obstante, en la realidad, la distribución del territorio suele ser más compleja y variada.

CAPÍTULO V: HEURÍSTICA PROPUESTA

Tras el análisis del modelo matemático exacto y siendo conscientes de sus limitaciones al aumentar la dimensión, se considera necesaria la creación de una heurística. En este capítulo se introduce la heurística propuesta, pudiendo diferenciar entre un método constructivo que va a permitir obtener una solución factible para el problema y un método de búsqueda local cuya función va a ser mejorar la solución obtenida.

5.1 Método constructivo

Como indica el nombre de este tipo de algoritmo, consiste en construir una solución factible paso a paso partiendo desde cero. Puesto que se pretende que en cada iteración se seleccione la mejor elección, se emplea el algoritmo voraz.

El objetivo que se contempla en la creación de esta heurística es conseguir una distribución balanceada de la carga asistencial entre los centros sanitarios que contienen especialidades médicas. Para lograrlo se toma como punto de partida una situación en la que la población de cada una de las particiones queda asignada a su centro más cercano.

Para explicar el procedimiento que sigue la heurística se hace uso de un ejemplo en el que se contemplan 16 particiones del mismo tamaño en una distribución de tipo 4x4. Se tiene la distribución en forma de grafo que se muestra en la Figura 16 donde de manera aleatoria se han asignado los centros sanitarios a alguna de las particiones. Se han introducido en total tres centros: uno en la partición E, otro en la L y el último en la N. El centro ubicado en la partición N no cuenta con la totalidad de las especialidades, por lo que para la creación de los departamentos se tendrá que combinar con alguno de los otros centros.

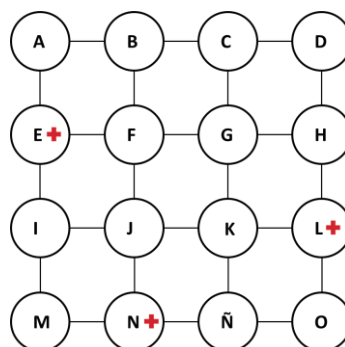


Figura 16. Grafo de la distribución de las particiones. Ejemplo método constructivo
Fuente: Elaboración propia.

Una vez se tiene la disposición de las particiones, se muestran los datos asociados a cada partición obtenidos aleatoriamente y comprendidos en un determinado rango de valores.

En primer lugar, en la Tabla 18 se presenta la población que habita en cada una de estas particiones junto con la capacidad de los centros de especialidades.

Tabla 18. Población y capacidad de cada una de las particiones. Ejemplo método constructivo.

Partición	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O
Población	7.672	5.367	2.764	1.625	7.211	9.785	6.442	6.583	1.850	3.615	3.212	6.524	6.468	5.016	3.683	1.027

CE	E	L	N
Capacidad	28.789	25.627	18.694

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se crea la matriz de vecinos que, al ser simétrica, observando las filas o las columnas se aprecia el vecindario de cada una de las particiones. Esta matriz queda reflejada en la Tabla 19.

Tabla 19. Matriz de vecinos. Ejemplo método constructivo.

Vecinos	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O
A	1															
B		1														
C			1													
D				1												
E					1											
F						1										
G							1									
H								1								
I									1							
J										1						
K											1					
L												1				
M													1			
N														1		
Ñ															1	
O																1

Fuente: Elaboración propia.

De la misma forma, se genera una matriz simétrica que hace referencia a la distancia en kilómetros entre los centroides de particiones adyacentes, pudiendo observar sus valores en la Tabla 20.

Tabla 20. Matriz de distancias. Ejemplo método constructivo.

Distancias	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	Ñ	O
A	40															
B		12														
C			29													
D				23												
E					48											
F						50										
G							43									
H								35								
I									42							
J										37						
K											44					
L												36				
M													33			
N														42		
Ñ															42	
O																42

Fuente: Elaboración propia.

Conociendo los datos necesarios para afrontar el problema, se implementa la heurística de forma manual, paso a paso, para apreciar el comportamiento que debe de seguir.

➤ **Primer paso:** primeras asignaciones

Una forma de entender el proceso que se ha seguido en la asignación de las primeras particiones es a través del pseudocódigo que se muestra en la Figura 17. Se busca la asignación de las particiones adyacentes a los centros sanitarios empleando como entradas al algoritmo los centros sanitarios y su capacidad, las particiones y su población y las matrices de vecinos y distancias.

ALGORITMO 1: Primeras asignaciones.

```

Centros c
Se asignan las particiones c a los centros c
Capacidad centros c - población particiones c
for cada partición k que sea vecina al menos de un centro
  Cálculo de la distancia d desde la partición k al(a los) centro(s) vecino(s) v
  min(d)
  Se asigna k al centro v correspondiente con min(d)
  Capacidad v - población k
  if min(d) > max(distancia) asociada al centro v
    max(distancia) asociada al centro v = min(d)
  
```

Figura 17. Pseudocódigo para las primeras asignaciones.
Fuente: Elaboración propia.

Aplicándolo al caso presentado anteriormente se siguen los siguientes pasos. Una vez conocida la ubicación de los centros *c*, a su capacidad se le descuenta la población que habita en esa misma partición, ya que se da por hecho su asignación a ese centro. Estos cálculos se aprecian en la Tabla 21.

Tabla 21. Capacidad y distancia máxima de los centros en el momento inicial. Ejemplo método constructivo.

CE	Capacidad			Dist. máx.
	Disponible	Asignada	Actual	
E	28.789	7.211	21.578	0
L	25.627	6.524	19.103	0
N	18.694	5.016	13.678	0

Fuente: Elaboración propia.

De manera que se pueda visualizar en el grafo el progreso de asignación de las particiones a los centros de especialidades, se ha establecido un código de colores en el que aquellas que formen parte del centro ubicado en la partición E estarán coloreadas de azul, al de la partición L de verde y al de la N de naranja. Atendiendo a las asignaciones que se han realizado, el grafo quedará tal y como muestra la Figura 18.

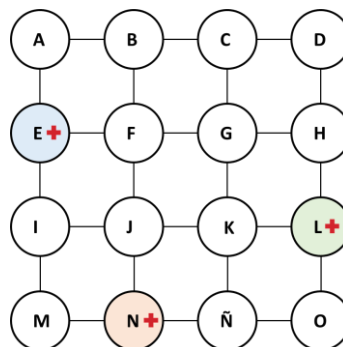


Figura 18. Grafo con las primeras asignaciones. Ejemplo método constructivo.
Fuente: Elaboración propia.

A continuació, se seleccionan una por una las particiones que son vecinas a algún centro sanitario. Puesto que el criterio que se está siguiendo en un principio es la reducción de la distancia en el desplazamiento, se calculará la distancia d desde la partición k a cada uno de sus centros vecinos v y se seleccionará aquella que es mínima. Conocido el centro sanitario v más cercano a la partición k , se realiza la asignación descontándole a la capacidad del centro v la población que habita en la partición k .

Si la partición k tan solo se tiene un centro v como vecino, parece evidente que se asignaría directamente a este sin necesidad del cálculo de la distancia mínima. Sin embargo, se ha realizado de esta manera para que el código contemple todas las posibles situaciones que se puedan dar.

Además, conforme se asigna una partición k a un centro v , se va actualizando la distancia máxima asociada al centro v si la distancia d es superior a la que se tenía recogida.

En el ejemplo, la población de las particiones A, F e I acudirán al centro de E, la de H, K y O al centro de L y la de M, J y Ñ al centro de N. Tras incorporar a las particiones vecinas, es necesario actualizar la capacidad y la distancia máxima asociadas a cada uno de los centros, apreciando el cómputo en la Tabla 22.

Tabla 22. Capacidad y distancia máxima de los centros tras la asignación de los vecinos próximos. Ejemplo método constructivo.

CE	Capacidad			Dist. máx.
	Disponible	Asignada	Actual	
E	21.578	19.307	2.271	48
L	19.103	10.822	8.281	44
N	13.678	13.766	-88	48

Fuente: Elaboración propia.

Estas nuevas asignaciones quedan reflejadas en la Figura 19 coloreadas considerando el código de colores establecido. Cada centro sanitario prestaría servicio a la población de cuatro particiones.

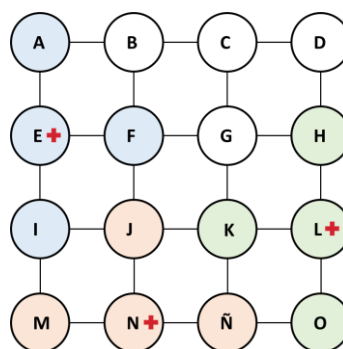


Figura 19. Grafo con la asignación de los vecinos próximos. Ejemplo método constructivo.

Fuente: Elaboración propia.

En este ejemplo no se ha dado la situación en la que una partición sea adyacente a más de un centro sanitario, por lo que las particiones se podrían haber asignado directamente a los centros sin necesidad de calcular la distancia mínima. Sin embargo, es importante contemplar todas las posibilidades para estar preparados por si se diera en futuras ocasiones.

➤ **Segundo paso:** asignaciones teniendo en cuenta la distancia

Las particiones que todavía no tienen centro sanitario de referencia se asignan minimizando el trayecto que tienen que recorrer sus habitantes hasta alcanzar el centro. El pseudocódigo que describe este proceso iterativo se muestra en la Figura 20. El algoritmo toma como entrada los centros sanitarios, su capacidad actual y la distancia máxima, las particiones sin asignar y su población y las matrices de vecinos y distancias.

ALGORITMO 2: Asignaciones aleatorias.

```

while haya particiones  $k$  sin asignar
  Selección aleatoria de una partición  $k$ 
  Algoritmo Dijkstra -> obtener el camino  $cam$  y la distancia  $d$  desde  $k$  hasta el centro  $c$  más cercano
  for cada partición  $m$  que pertenece a  $cam$ 
    if  $m$  no está asignada
      Se asigna  $m$  a  $c$ 
      Capacidad  $c$  - población  $m$ 
  if  $d > \max(\text{distancia})$  asociada a  $c$ 
     $\max(\text{distancia})$  asociada a  $c = d$ 
  
```

Figura 20. Pseudocódigo para las asignaciones teniendo en cuenta la distancia.
Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo con el ejemplo, una vez se han asignado las particiones vecinas, se procede a asignar el resto de las particiones k . Tomando como punto de partida una de las particiones k seleccionada aleatoriamente y como puntos de destino cada uno de los centros sanitarios, se ejecuta el algoritmo Dijkstra. Como resultado se obtiene el camino cam que permite conectar la partición k con el centro c más cercano, junto con la distancia d de este trayecto. A continuación, cada una de las particiones m que forman el camino cam y que todavía no han sido asignadas, se asignan al centro c . Consecuentemente, la capacidad asistencial del centro c se ve disminuida por la población de estas particiones m . Finalmente, se actualiza la distancia máxima asociada a c en caso de que la distancia d sea superior a esta. Este proceso de asignación es el mismo para todas las particiones k , las cuales se van seleccionando aleatoriamente hasta que ya no quede ninguna por asignar.

Aunque el algoritmo Dijkstra proporciona el camino cam y la distancia d directamente, se ha considerado de utilidad mostrar paso a paso su funcionamiento. Para ello se va a ir seleccionando de manera aleatoria las particiones k , siendo la primera que se ha obtenido la D. Se conoce que esta partición no tiene ningún centro adyacente, por lo que hay que prestar atención a los vecinos de sus vecinos. Los vecinos de C y de H son B, G y L, así pues, los caminos posibles son que se detallan en la Tabla 23.

Tabla 23. Caminos para alcanzar un centro sanitario desde D. Ejemplo método constructivo.

Particiones			
Camino			Distancia
D	C	B	41
D	C	G	69
D	H	G	66
D	H	L	58

Fuente: Elaboración propia.

Se sabe que la partici3n L tiene un centro en su interior, por lo que todos aquellos caminos que superen los 58 km quedan descartados. El 3nico que no supera esta barrera es el formado por las particiones D, C y B. Entonces se estudian los vecinos de B como se muestra en la Tabla 24. En ambos casos se supera la m3nima distancia que se hab3a establecido para alcanzar un centro y todav3a no se ha llegado a uno.

Tabla 24. Caminos formados partiendo de las particiones D, C y B. Ejemplo m3todo constructivo.

Particiones				
Camino				Distancia
D	C	B	A	81
D	C	B	F	84

Fuente: Elaboraci3n propia.

En consecuencia, la partici3n D queda asignada al centro de la partici3n L. Como la partici3n H tambi3n pertenece a este centro, tan solo se considera la poblaci3n de la partici3n D en el c3lculo de la capacidad. Adem3s, siendo la distancia d de 58 km superior a los 44 km que se ten3an, se actualiza la distancia m3xima de este centro. Los nuevos valores quedan recogidos en la Tabla 25.

Tabla 25. Capacidad y distancia m3xima de los centros tras la asignaci3n de la partici3n D. Ejemplo m3todo constructivo.

CE	Capacidad			Dist. m3x.
	Disponible	Asignada	Actual	
E	2.271		2.271	48
L	8.281	1.625	6.656	58
N	-88		-88	48

Fuente: Elaboraci3n propia.

Teniendo en cuenta esta nueva asignaci3n, se colorea la partici3n D en el grafo con el color correspondiente al centro L como se percibe en la Figura 21.

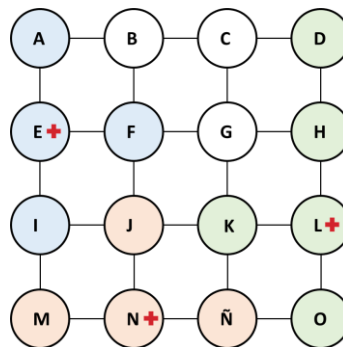


Figura 21. Grafo con la asignaci3n de la partici3n D. Ejemplo m3todo constructivo.

Fuente: Elaboraci3n propia.

Seguidamente, la segunda partici3n seleccionada aleatoriamente es la C. De nuevo, se tiene que atender a los vecinos de sus vecinos. Las particiones contiguas a B, G y D son A, F, K y H. Por tanto, los caminos posibles son los observados en la Tabla 26. Como se puede apreciar ninguno de ellos permite alcanzar un centro sanitario, por lo que se van a tener que contemplar los vecinos de las 3ltimas particiones que forman el camino.

Tabla 26. Caminos para alcanzar un centro sanitario desde C. Ejemplo método constructivo.

Particiones			
Camino			Distancia
C	B	A	52
C	B	F	55
C	G	F	90
C	G	K	50
C	G	H	83
C	D	H	52

Fuente: Elaboración propia.

Las últimas particiones de los caminos son A, F, K y H. Considerando sus particiones adyacentes se pueden formar todos los caminos que se presentan en la Tabla 27.

Tabla 27. Caminos formados con 4 particiones desde C. Ejemplo método constructivo.

Particiones				
Camino				Distancia
C	B	A	E	83
C	B	F	E	103
C	B	F	J	85
C	B	F	G	105
C	G	F	B	133
C	G	F	E	138
C	G	F	J	120
C	G	K	J	87
C	G	K	L	94
C	G	K	Ñ	91
C	G	H	D	106
C	G	H	L	118
C	D	H	G	95
C	D	H	L	87

Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia que la distancia más pequeña es de 83 km y viene dada por el camino formado por las particiones C, B, A y E. Como la partición E contiene un centro sanitario en su interior, ya se ha alcanzado la solución. Tanto la partición C, por ser el punto de partida, como la partición B, por encontrarse en el camino y no pertenecer todavía a algún centro, se van a asignar al centro de especialidades de la partición E. Estas nuevas asignaciones modifican el valor de la capacidad del centro y de su distancia máxima, presentando los valores actuales en la Tabla 28.

Tabla 28. Capacidad y distancia máxima de los centros tras la asignación de la partición C y B. Ejemplo método constructivo.

CE	Capacidad			Dist. máx.
	Disponible	Asignada	Actual	
E	2.271	8.131	-5.860	83
L	6.656		6.656	58
N	-88		-88	48

Fuente: Elaboración propia.

Considerando la doble asignación, las particiones B y C del grafo se resaltan con el color correspondiente al centro E, como se aprecia en la Figura 22.

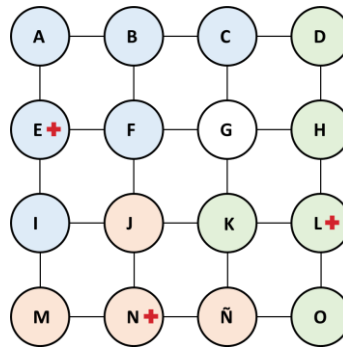


Figura 22. Grafo con la asignación de las particiones B y C. Ejemplo método constructivo.
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, queda una única partición por asignar, que es la partición G. Siguiendo el mismo proceso que se ha utilizado anteriormente, se realiza la búsqueda de los centros sanitarios a partir de los vecinos de los vecinos. Todos los caminos que se pueden generar junto con su distancia se muestran en la Tabla 29.

Tabla 29. Caminos para alcanzar un centro sanitario desde G. Ejemplo método constructivo.

Particiones			
Camino			Distancia
G	C	B	52
G	C	D	69
G	F	B	93
G	F	E	98
G	F	J	80
G	H	D	66
G	H	L	78
G	K	J	47
G	K	L	54
G	K	Ñ	51

Fuente: Elaboración propia.

De todos los caminos mostrados, tan solo hay tres que alcanzan un centro de especialidades, siendo el formado por las particiones G, K y L el que presenta una menor distancia con 54 km.

No obstante, hay tres caminos que tienen un recorrido ligeramente más corto, siendo las últimas particiones la B, la J y la Ñ, siguiendo el orden en el que se presentan. Desde la B no se puede acceder directamente a ningún centro y la distancia más corta ya supone 12 km adicionales a los 52 ya computados y, por tanto, superando la distancia de 54 km que se había establecido como mínima para alcanzar un centro. Por otra parte, la distancia mínima que se tiene que recorrer para alcanzar una partición desde J es de 30 km. Sumando esta cantidad a los 47 km superaría de nuevo la distancia de 54 km. Finalmente, desde Ñ se puede acceder directamente al centro de la partición N recorriendo una distancia de 33 km añadidos a los 51 ya contemplados. Pese a tratarse de la partición más cercana a Ñ, supera también los 54 km.

Por lo tanto, el camino más corto es el que asigna la partición G al centro L pasando por la K. Los nuevos valores para la capacidad de los centros se observan en la Tabla 30. La distancia máxima no varía ya que la que se tenía para el centro L es de 58 km y, por tanto, superior.

Tabla 30. Capacidad y distancia máxima de los centros tras la asignación de la partición G. Ejemplo método constructivo.

CE	Capacidad			Dist. máx.
	Disponible	Asignada	Actual	
E	-5.860		-5.860	83
L	6.656	6.442	214	58
N	-88		-88	48

Fuente: Elaboración propia.

Puesto que la partición G era la última que quedaba por asignar, el grafo de la Figura 23 muestra una solución factible donde las particiones quedan asignadas al centro más cercano con el objetivo de reducir la distancia en el desplazamiento.

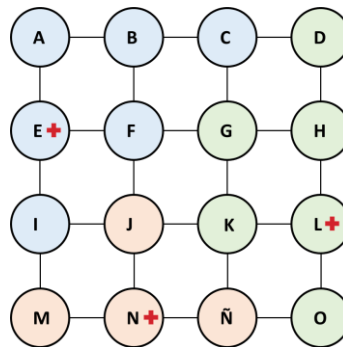


Figura 23. Grafo con la asignación de todas las particiones. Ejemplo método constructivo. Fuente: Elaboración propia.

➤ **Tercer paso:** formación de los departamentos

Una vez se tienen todas las particiones asignadas a un centro de especialidades, se procede a la creación de los departamentos. En cada uno de estos departamentos debe de haber centros que en conjunto contengan la totalidad de las especialidades consideradas como básicas. El procedimiento para su creación se especifica en el pseudocódigo de la Figura 24 teniendo como entradas del algoritmo los centros completos e incompletos, la capacidad actual de estos, la matriz de distancias y las particiones asignadas a cada centro sanitario.

ALGORITMO 3: Creación de departamentos.

```

for cada centro incompleto ci
  Selección de las k particiones asignadas a ci
  Algoritmo Dijkstra -> mínima distancia d desde las k hasta cada uno de los centros completos cc
  max(d) para cada cc
  mínima distancia dmin de las max(d)
  Asignar las k al cc que tiene dmin
  Capacidad cc + capacidad ci
  if dmin > max(distancia) asociada a cc
    max(distancia) asociada a cc = dmin
  
```

Figura 24. Pseudocódigo para la formación de los departamentos. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, el último paso que se realiza en el constructivo es la creación de los departamentos. El proceso que se va a repetir para cada uno de los centros incompletos *ci* comienza con la selección de las *k* particiones asignadas a un centro *ci*. A continuación,

se vuelve a emplear el algoritmo Dijkstra para conseguir la mínima distancia desde cada una de las particiones k hasta cada uno de los centros completos cc . Para cada centro cc , de entre todas las distancias mínimas se selecciona la de mayor valor. Este proceso se realiza para todos los centros cc y, finalmente, se comparan todas las distancias seleccionando aquella que es mínima $dmin$. Esta estrategia persigue la reducción del trayecto que tienen que recorrer los habitantes que viven en la partición más lejana para acudir a su centro de especialidades correspondiente. Seguidamente, a la capacidad de centro cc relacionado con la distancia mínima $dmin$ se le añade la capacidad del centro ci . Para concluir, si esta distancia mínima $dmin$ fuera superior a la distancia máxima asociada al centro cc , pasaría a ser la distancia máxima de ese centro.

Retomando el ejemplo y de acuerdo con lo especificado al principio de este apartado, el centro asociado a la partición N no cuenta con todas las especialidades, por lo que necesita combinarse con otro centro para poder ofrecer la totalidad de las especialidades consideradas como esenciales.

El procedimiento que se va a implementar consiste en asignar la totalidad de las particiones que pertenecen al centro N a aquel centro cc que sea el más cercano para la partición más lejana. Las particiones k asignadas al centro N son J, M, N y Ñ. Tomando estas 4 particiones como puntos de partida se aplica el algoritmo Dijkstra para conseguir las distancias mínimas hasta alcanzar los centros E y L.

En la Tabla 31 se presentan todas las combinaciones posibles prestando atención tan solo al origen y al destino. Asimismo, se muestran los cálculos referentes a la distancia donde en la primera columna se tiene la distancia mínima que permitiría el acceso de cada partición k a un centro cc . En la siguiente columna se tiene el valor máximo entre las distancias que alcanzan un mismo centro. Si se asignaran las particiones al centro E la máxima distancia que se recorrería sería de 149 km mientras que si fuera al centro L sería de 154 km. Entre estas dos distancias máximas se escoge la menor, conocida como $dmin$ y remarcada en color naranja.

Tabla 31. Cálculo de las distancias para todas las combinaciones posibles. Ejemplo método constructivo.

Particiones		Distancia	
Origen	Destino	Mínima	Máxima
J	E	78	149
M	E	96	
N	E	126	
Ñ	E	149	
J	L	81	154
M	L	154	
N	L	118	
Ñ	L	85	

Fuente: Elaboración propia.

La asignación de las particiones J, M, N y Ñ al centro E para la formación de los departamentos provoca cambios, ya que la capacidad de ambos centros se combina para prestar servicio a su población. Los nuevos valores se aprecian en la Tabla 32 donde la capacidad asignada de 88 personas hace referencia al valor negativo que tenía el centro N como resultado de la diferencia entre su capacidad y su población asignada.

Además, se actualiza la distancia máxima para el departamento formado por los centros E y N como consecuencia de su unión.

Tabla 32. Capacidad y distancia máxima de los centros tras la creación de los departamentos. Ejemplo método constructivo.

CE	Capacidad			Dist. máx.
	Disponible	Asignada	Actual	
E-N	-5.860	88	-5.948	149
L	214		214	58

Fuente: Elaboración propia.

Contemplando la formación de los departamentos, el grafo definitivo de la Figura 25 muestra la contigüidad de las particiones que pertenecen a un mismo departamento. El departamento creado por la combinación de las particiones asignadas a E y a N queda representado en color amarillo.

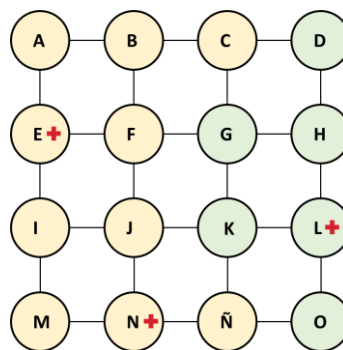


Figura 25. Grafo de los departamentos de salud. Ejemplo método constructivo.

Fuente: Elaboración propia.

De esta manera, se garantiza que los ciudadanos puedan acceder a su centro más cercano en la mayoría de las ocasiones. Además, en caso de requerir una especialidad que no esté disponible en este centro, se procura que el aumento de la distancia para aquellos que se encuentran más alejados sea mínimo.

5.2 Método de búsqueda local

En base a la solución obtenida anteriormente, se llevan a cabo procedimientos de búsqueda o mejora local con el objetivo de mejorar progresivamente el resultado del problema. Se trata de un proceso iterativo en el cual, en cada paso, se realiza un cambio de una solución a otra con un mejor valor.

En el contexto del problema, se estaría priorizando la mejora del equilibrio de la carga asistencial entre los distintos departamentos, incluso si esto implica un ligero aumento en la distancia que tienen que recorrer los pacientes. Además, se utiliza la técnica de *First Improvement*, lo que significa que una vez se logra reducir la diferencia máxima entre la capacidad y la población asignada, se realizará el cambio.

Al igual que se ha realizado en todos los pasos anteriores, se ha creado un pseudocódigo para explicar de forma compacta el funcionamiento de la búsqueda local, el cual se muestra en la Figura 26. Este algoritmo toma como entradas el número de iteraciones,

la capacidad y distancia máxima de los departamentos, la matriz de vecinos, la población de cada una de las particiones y las particiones que constituyen los departamentos.

ALGORITMO 4: Búsqueda local.

```

for cada una de las iteraciones  $i$ 
  Selección del departamento  $d$  con  $\min(\text{capacidad})$  actual  $mca$ 
  Selección de las  $k$  particiones asignadas a  $d$ 
  for cada una de las particiones  $k$  seleccionadas aleatoriamente
    Obtención de los vecinos  $v$  de  $k$  que pertenecen a otro departamento  $p$ 
    for cada uno de los departamentos  $p$ 
      se calcula:  $\text{capacidad } d + \text{población } k$ 
                 $\text{capacidad } p - \text{población } k$ 
      if  $\min(\text{capacidad})$  tras los cálculos  $> mc$ 
        Asignar  $k$  a  $p$ 
        Actualización de las capacidades de  $d$  y de  $p$ 
      break
    Se retira  $k$  de la selección aleatoria
  if se ha reasignado una partición  $k$ 
    break

```

Figura 26. Pseudocódigo para la búsqueda local.
Fuente: Elaboración propia.

El primer paso que se realiza es la selección de aquel departamento de salud d que posee la mínima capacidad actual mca . Un valor negativo indica que la capacidad del departamento es inferior a la población asignada. Seguidamente se seleccionan las k particiones pertenecientes al departamento d . Entre estas particiones se escoge una al azar y se identifican las particiones vecinas v que pertenecen a otro departamento de salud p .

Para cada uno de los departamentos p , se calcula la capacidad actual que tendrían si la partición k se reasignara, sumando la población de esta partición al departamento d y restándosela al departamento p . Si tras estos cambios la capacidad mínima es mayor que la capacidad mca , se asigna definitivamente la partición k al departamento p y se actualiza el valor de la capacidad actual de ambos departamentos. En cambio, si no se produce ninguna mejora, se va probando para cada uno de los departamentos p . Bien si se produce una mejora o bien si se acaban los posibles departamentos p , se retira la partición k de la selección aleatoria de manera que ya no pueda ser seleccionada.

Si se ha producido una reasignación de una partición k , se pasa a la siguiente iteración. Por otra parte, si no se ha conseguido mejorar el equilibrio de la carga asistencial, se prueba con los vecinos v del resto de las particiones k . Si se retiran todas las particiones k sin producirse una reasignación, se pasaría a la siguiente iteración. Este proceso se repetiría tantas veces como el número de iteraciones.

En consecuencia, lo que se pretende es asignar particiones a otros departamentos tratando de liberar carga a los centros que se encuentran saturados. Conociendo el departamento, se escogen las particiones que se encuentran en la frontera, adyacentes a otros departamentos. El objetivo es mejorar la rapidez del servicio prestado evitando las listas de espera, así pues, la distancia pasa a un segundo plano.

Aplicándolo al ejemplo, el departamento con menor capacidad actual es el formado por los centros E y N. Prestando atención al grafo, el color que representa a este departamento es el amarillo, por lo que las particiones que hacen de frontera entre departamentos son la C, la F, la J y la Ñ. Se selecciona de forma aleatoria una de ellas y se comprueba a qué departamento pertenecen sus vecinas próximas. En este ejemplo, el tener tan solo dos departamentos facilita los cálculos, ya que al realizar los cambios en la asignación únicamente se contempla una posible variación.

Aleatoriamente se extrae la partición F. Esta partición pasaría a quedar asignada al centro L produciendo así un aumento en la capacidad del departamento E-N. Los nuevos valores de la capacidad serían los mostrados en la Tabla 33.

Tabla 33. Capacidad y distancia máxima de los centros tras cambiar la asignación de la partición F. Ejemplo método de búsqueda local.

Dpto.	Capacidad			Dist. máx.
	Disponible	Asignada	Actual	
E-N	-5.948	-9.785	3.837	149
L	214	9.785	-9.571	104

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar, la capacidad mínima de los departamentos se ve perjudicada tras realizar este cambio debido a que muestra un valor más negativo del que se tenía, indicando una mayor saturación del centro. Este cambio no se produce y, como no hay más departamentos a los que se pueda asignar esta partición, se selecciona al azar otra.

La nueva partición escogida es la Ñ que, siguiendo el mismo procedimiento que para la F, se realiza un estudio de la capacidad para ver si es conveniente su asignación al centro L. Los valores de este estudio quedan reflejados en la Tabla 34.

Tabla 34. Capacidad y distancia máxima de los centros tras cambiar la asignación de la partición F. Ejemplo método de búsqueda local.

Dpto.	Capacidad			Dist. máx.
	Disponible	Asignada	Actual	
E-N	-5.948	-3.683	-2.265	149
L	214	3.683	-3.469	85

Fuente: Elaboración propia.

En la solución obtenida, aunque parece empeorar debido a que ambos centros muestran una capacidad actual negativa, en realidad se ha logrado un reparto equilibrado de la carga asistencial. Dado que se conocía que la población total era ligeramente superior a la capacidad total de los centros, esta solución se puede considerar aceptable debido a que el exceso de población queda distribuido de una manera más equilibrada.

Sin embargo, la parte negativa de este cambio en la asignación para equilibrar la carga asistencial es el incremento en la distancia. En este caso, los habitantes de la partición Ñ pasan de realizar un desplazamiento de 33 km para acceder al centro de N, a tener que recorren un trayecto de 85 km para llegar al centro de la partición L.

En resumen, esta solución mejora la que se tenía de partida y, como se trabaja con *First Improvement*, se acepta este cambio que modifica los departamentos de salud como se percibe en el grado de la Figura 27.

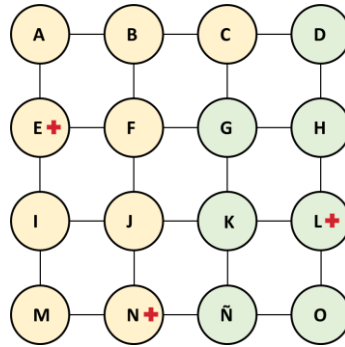


Figura 27. Grafo que muestra el cambio de asignación de la partición Ñ. Ejemplo método de búsqueda local.
Fuente: Elaboración propia.

Este proceso de búsqueda local se puede llevar a cabo un número determinado de iteraciones o hasta que no se produzca una mejora. Hay que considerar que un número elevado de cambios en la asignación provoca que se obtengan soluciones con un reparto más equilibrado de la carga, pero no se asegura que sean buenos en cuanto a la distancia recorrida.

CAPÍTULO VI: CASOS DE ESTUDIO SINTÉTICOS

Para poder comprobar el funcionamiento de la heurística, es conveniente llevar a cabo su programación de manera que permita la obtención de resultados en un corto periodo de tiempo. El código, que se encuentra en el ANEXO II: Código de la heurística, se ha organizado manteniendo la estructura que se ha seguido en el capítulo anterior. Es decir, se diferencia entre el método constructivo y el método de búsqueda local.

El método constructivo queda distribuido en tres apartados. En primer lugar, se asignan las primeras particiones a los centros de especialidades siguiendo el criterio de adyacencia. Posteriormente, el resto de las particiones son asignadas teniendo en cuenta la distancia al centro más cercano haciendo uso del algoritmo Dijkstra. Finalmente, se procede a la creación de los departamentos de salud.

Con la finalidad de estudiar el comportamiento de la heurística, se han propuesto tres escenarios diferentes. En cada uno de ellos se van a analizar los resultados obtenidos para ambos métodos contemplando la asignación de las particiones al centro correspondiente y la capacidad de cada centro junto con la mayor distancia mínima que tienen que recorrer los pacientes para alcanzarlos.

6.1 Primer escenario

El primer escenario que se va a analizar es aquel que se ha utilizado en la explicación teórica de la heurística. Por lo tanto, se van a introducir los mismos datos que se han presentado en el capítulo anterior.

Se tiene la matriz de vecinos, la matriz de distancias, un vector con el número de las particiones en las que se encuentran los centros, dos vectores para indicar aquellas particiones que el centro que contienen está completo o incompleto, un vector con los valores de la población para cada una de las particiones y la capacidad de cada uno de los centros.

Para hacer más sencillo el código, en vez de utilizar el orden alfabético para referirse a las particiones, se han numerado como se observa en el grafo de la Figura 28.

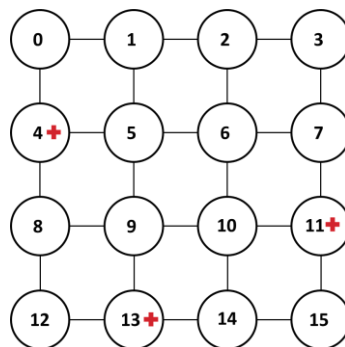


Figura 28. Grafo de la distribución de las particiones. Primer escenario.
Fuente: Elaboración propia.

6.1.1 Método constructivo

Antes de empezar, se establecen estructuras de datos para almacenar los resultados. En la Tabla 35 se muestran los valores iniciales en la asignación de las particiones, siendo todos ellos nulos.

Tabla 35. Valores iniciales para la asignación de las particiones. Primer escenario.

Partición	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Población	7.672	5.367	2.764	1.625	7.211	9.785	6.442	6.583	1.850	3.615	3.212	6.524	6.468	5.016	3.683	1.027
Asignados																

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, en la Tabla 36 se observa la capacidad de cada uno de los centros y la distancia desde las particiones. Al no tener ninguna partición asignada, los valores de la distancia se encuentran vacíos.

Tabla 36. Valores iniciales de la distancia máxima y la capacidad. Primer escenario.

CE	Dist. máx.	Capacidad
4		28.789
11		25.627
13		18.694

Fuente: Elaboración propia.

➤ Primer paso: primeras asignaciones

Tras la asignación de las particiones contiguas, se rellenan los huecos con el centro al que han sido asignadas. En la Tabla 37 se aprecia que, a excepción de cinco particiones, el resto ya tienen un centro de especialidades de referencia.

Tabla 37. Particiones asignadas tras la primera asignación. Primer escenario.

Partición	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Población	7.672	5.367	2.764	1.625	7.211	9.785	6.442	6.583	1.850	3.615	3.212	6.524	6.468	5.016	3.683	1.027
Asignados	4				4	4		11	4	13	11	11	13	13	13	11

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 38 se advierte que la capacidad del centro situado en la partición 13 ya ha sido superada por la población asignada, ya que tiene signo negativo.

Tabla 38. Valores de la distancia y la capacidad tras la primera asignación. Primer escenario.

CE	Dist. máx.	Capacidad
4	48	2.271
11	44	8.281
13	48	-88

Fuente: Elaboración propia.

Como cabía esperar, se han obtenido los mismos resultados que en el ejemplo teórico. Por lo tanto, si se coloreara el grafo teniendo en cuenta las asignaciones realizadas, se obtendría el mismo que en la Figura 19.

➤ Segundo paso: asignaciones teniendo en cuenta la distancia

Tras la asignación del resto de particiones a los centros más cercanos, se vuelven a modificar los resultados como se aprecia en la Tabla 39.

Tabla 39. Particiones asignadas tras las asignaciones contemplando la distancia. Primer escenario.

Partición	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Población	7.672	5.367	2.764	1.625	7.211	9.785	6.442	6.583	1.850	3.615	3.212	6.524	6.468	5.016	3.683	1.027
Asignados	4	4	4	11	4	4	11	11	4	13	11	11	13	13	13	11

Fuente: Elaboración propia.

Puesto que de momento tan solo se está contemplando el criterio de cercanía al centro, se ha producido un desequilibrio bastante importante en la carga asistencial como se evidencia en la Tabla 40. Al conocer que la capacidad total de los centros era inferior a la población total, es evidente que se iban a obtener valores negativos para la capacidad, siendo el centro correspondiente a la partición 4 el que tendrá una presión hospitalaria superior a la del resto.

Tabla 40. Valores de la distancia y la capacidad tras las asignaciones contemplando la distancia. Primer escenario.

CE	Dist. máx.	Capacidad
4	83	-5.860
11	58	214
13	48	-88

Fuente: Elaboración propia.

De nuevo se consiguen los mismos resultados que en la explicación teórica, por lo que el grafo coloreado con las asignaciones correspondientes se encuentra en la Figura 23.

➤ Tercer paso: formación de los departamentos

Para formar los departamentos, es crucial conocer los centros de especialidades que no cuentan con la totalidad de las especialidades consideradas como principales. Las particiones que pertenecen a este centro incompleto deben de ser reasignadas a aquel centro que se encuentre más cercano para el paciente que habita más lejos. En este caso, el centro 13 pasará a formar parte del 4, dejando la asignación que se detalla en la Tabla 41.

Tabla 41. Particiones asignadas tras la formación de los departamentos. Primer escenario.

Partición	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Población	7.672	5.367	2.764	1.625	7.211	9.785	6.442	6.583	1.850	3.615	3.212	6.524	6.468	5.016	3.683	1.027
Asignados	4	4	4	11	4	4	11	11	4	4	11	11	4	4	4	11

Fuente: Elaboración propia.

Tras los cambios producidos se actualiza la distancia mínima que permite alcanzar el centro sanitario desde la partición más lejana. Los valores correspondientes se encuentran en la Tabla 42.

Tabla 42. Valores de la distancia y la capacidad tras la formación de los departamentos. Primer escenario.

Dpto.	Dist. máx.	Capacidad
4	149	-5.948
11	58	214

Fuente: Elaboración propia.

El grafo con los departamentos de salud coloreados es el mismo que se ha obtenido en la Figura 25.

6.1.2 Método de búsqueda local

En el método de búsqueda local se permite empeorar la distancia mínima para mejorar el equilibrio de la carga asistencial para los distintos departamentos de salud.

Tras 10 iteraciones en las que se recorre de forma aleatoria todas las asignaciones posibles, se ha obtenido que tan solo reasignando la partición 14 al centro 11 es posible equilibrar la carga asistencial. Las nuevas asignaciones se muestran en la Tabla 43.

Tabla 43. Particiones asignadas tras la búsqueda local. Primer escenario.

Partición	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Población	7.672	5.367	2.764	1.625	7.211	9.785	6.442	6.583	1.850	3.615	3.212	6.524	6.468	5.016	3.683	1.027
Asignados	4	4	4	11	4	4	11	11	4	4	11	11	4	4	11	11

Fuente: Elaboración propia.

Al modificar el centro al que pertenece, la población de esta partición deja de acudir a su centro de especialidades más próximo. El nuevo valor que tiene el desplazamiento y la capacidad en la Tabla 44.

Tabla 44. Valores de la distancia y la capacidad tras la búsqueda local. Primer escenario.

Dpto.	Dist. máx.	Capacidad
4	149	-2.265
11	85	-3.469

Fuente: Elaboración propia.

Se conoce que el valor de la mayor distancia máxima ha aumentado para departamento 11. No obstante, esta distancia tan solo la recorrerían aquellos pacientes que viven en la partición 14, que han visto incrementado el desplazamiento, ya que el trayecto para acceder al centro 13 era de 33 km y ahora es de 85 km. No obstante, este empeoramiento en la distancia ha permitido cumplir con el objetivo de equilibrar la carga de trabajo.

También es importante recalcar que la capacidad del departamento 4 ha aumentado a costa del empeoramiento de la del 11, siendo ahora ambos valores negativos.

El grafo coloreado con la reasignación de la partición 14 tras la ejecución de la búsqueda local se muestra en la Figura 29.

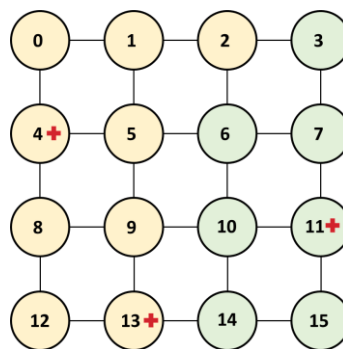


Figura 29. Grafo que muestra el cambio de la partición 2 tras la búsqueda local. Primer escenario.

Fuente: Elaboración propia.

6.1.3 Análisis de la capacidad

Para comprobar si la solución obtenida tras la aplicación del método de búsqueda local cumple con el objetivo de equilibrar la carga asistencial se emplea la desviación estándar. Para ello, se va a comparar con los resultados obtenidos tras la formación de los departamentos, donde cada partición queda asignada a su centro más cercano.

La desviación estándar es una medida que indica cuanto se desvían los valores de datos de la media. Aplicado al ejemplo, un valor alto para la desviación estándar indica que los valores de capacidad de los centros están más dispersos, alejados de la media. Por otra parte, un valor bajo señala que las capacidades están más cerca a la media y, por tanto, que se tiene un mayor equilibrio de la carga asistencial.

Se aplica la fórmula que se muestra a continuación:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{N}}$$

Contemplando que N es el número de departamentos, x es la capacidad de cada uno de los departamentos y \bar{x} es la media de la capacidad se puede calcular la desviación estándar como se muestra en la Tabla 45.

Tabla 45. Cálculo de la desviación estándar para la capacidad de los departamentos. Primer escenario.

N		2				
Media		-2.867				
Formación de los departamentos	Dpto.	Capacidad	$(x - \bar{x})^2$	Sumatorio	Fracción	s
	4	-5.948	9.492.561	18.985.122	9.492.561	3.081
	11	214	9.492.561			
Método de búsqueda local	Dpto.	Capacidad	$(x - \bar{x})^2$	Sumatorio	Fracción	s
	4	-2.265	362.404	724.808	362.404	602
	11	-3.469	362.404			

Fuente: Elaboración propia.

La media, como cabía esperar, es la misma para ambos casos, pues los valores de capacidad de los centros y los de población de las particiones son los mismos.

Midiendo la desviación estándar cuando se han formado los departamentos se obtiene un valor de 3.081. Tras la búsqueda local, este valor pasa a ser 602. Esto quiere decir que la búsqueda local cumple su objetivo, produciendo un reparto más equitativo de la carga de trabajo entre todos los centros de especialidades.

6.2 Segundo escenario

El segundo escenario que se va a analizar es similar al primero, pero introduciendo más particiones y centros sanitarios. Se tiene un total de 36 particiones de igual tamaño situadas en una distribución de tipo 6x6.

Los valores de población de cada partición, la capacidad de los centros de especialidades y su ubicación se han obtenido de manera aleatoria. Se ha estipulado que los dos últimos centros obtenidos no tendrán todas las especialidades, por lo que no podrán formar departamentos por ellos mismos.

La matriz de vecinos y la matriz de distancias se pueden observar en la Figura 59 y en la Figura 60 respectivamente, incluidas en el ANEXO III: Matrices de vecinos y de distancias.

Para poder interpretar visualmente los resultados de la asignación, se van a emplear los grafos utilizando distintos colores para cada uno de los centros. El grafo empleado en este escenario se presenta en la Figura 30.

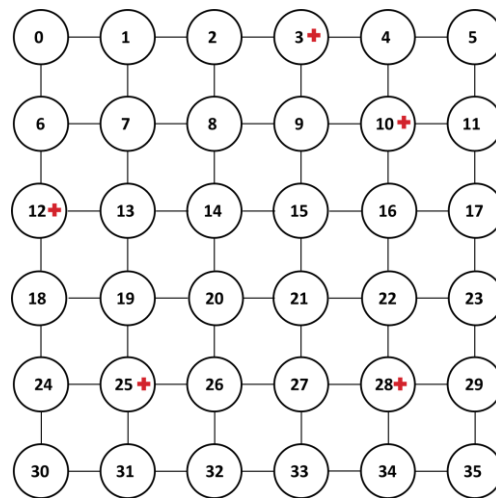


Figura 30. Grafo representativo de las particiones y de los centros. Segundo escenario.
Fuente: Elaboración propia.

6.2.1 Método constructivo

Como se ha comentado anteriormente, en este ejemplo se va a hacer uso de un grafo para comprobar las asignaciones que se van realizando. En cuanto a la capacidad se va a seguir mostrando a través de la Tabla 46. Como aún no se ha asignado ninguna partición a los centros, los valores de la distancia están vacíos.

Tabla 46. Valores iniciales de la distancia máxima y la capacidad. Segundo escenario.

CE	Dist. máx.	Capacidad
3		45.348
10		44.757
12		49.252
25		10.037
28		31.243

Fuente: Elaboración propia.

➤ Primer paso: primeras asignaciones

En este paso, y como se aprecia en el grafo de la Figura 31, se han asignado las particiones en las que se encuentran ubicados los centros de especialidades y sus vecinos. Observando el grafo, se aprecia que desde las particiones 4 y 9 se puede acceder directamente al centro 3 o al 10. Evaluando la distancia recorrida, ambas particiones

quedan asignadas al centro 3. Por lo tanto, este escenario permite comprobar que aquellas particiones adyacentes a dos centros quedan asignadas a aquel más cercano.

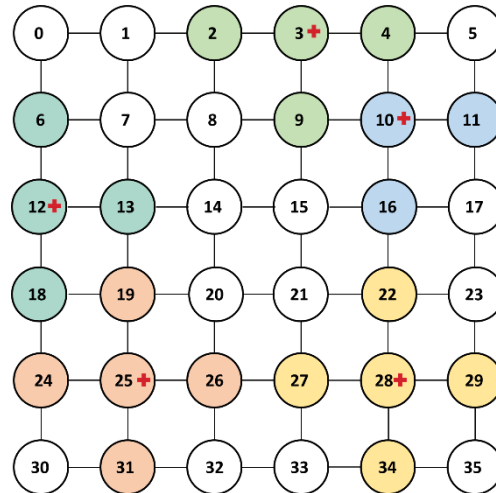


Figura 31. Grafo tras las primeras asignaciones. Segundo escenario.
Fuente: Elaboración propia.

Estas primeras asignaciones reducen la capacidad de los centros por la población de cada una de las particiones. Además, se puede calcular la distancia máxima que debería recorrer un paciente hasta alcanzar su centro correspondiente. Estos valores quedan recogidos en la Tabla 47.

Tabla 47. Valores de la distancia y la capacidad tras la primera asignación. Segundo escenario.

CE	Dist. máx.	Capacidad
3	29	18.400
10	43	33.654
12	37	28.341
25	31	-15.820
28	42	6.434

Fuente: Elaboración propia.

➤ **Segundo paso:** asignaciones teniendo en cuenta la distancia

Las particiones restantes se asignan al centro más cercano haciendo uso del algoritmo Dijkstra para el cálculo de la distancia mínima. El procedimiento ya se ha explicado previamente, por lo que tan solo se muestra el grafo obtenido tras la aplicación del código, como se aprecia en la Figura 32.

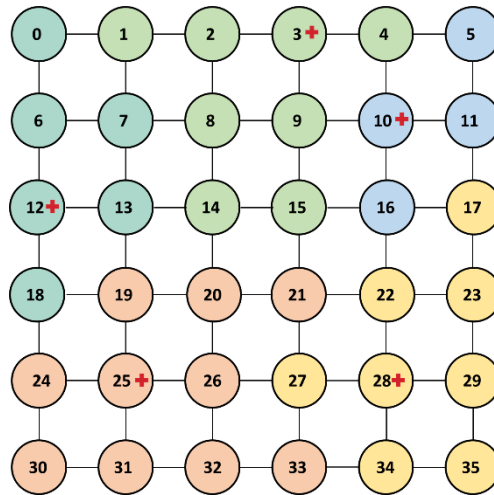


Figura 32. Grafo tras las asignaciones teniendo en cuenta la distancia. Segundo escenario.
Fuente: Elaboración propia.

Estas nuevas asignaciones suponen un cambio en la capacidad de los centros y en la distancia máxima. Cabe recordar que valores negativos de capacidad hacen referencia a que la población asignada es superior que la capacidad asistencial que dispone ese centro. En la Tabla 48 se aprecian los nuevos valores, pudiendo percibir un gran exceso de población asignada en el centro 25 y una capacidad infrautilizada en el centro 10.

Tabla 48. Valores de la distancia y la capacidad tras las asignaciones contemplando la distancia. Segundo escenario.

CE	Dist. máx.	Capacidad
3	74	-784
10	43	30.609
12	55	19.415
25	64	-52.024
28	69	-7.883

Fuente: Elaboración propia.

En general se percibe un gran desbalance en la capacidad actual de los centros, que se traduce en un desequilibrio pronunciado de la carga asistencial.

➤ **Tercer paso:** formación de los departamentos

Para finalizar la formación de los departamentos, aquellos centros que no poseen todas las especialidades se deben de juntar a otros que sí que las tienen. Los centros incompletos son el 3 y el 25, por ser las dos últimas ubicaciones obtenidas al establecer la localización de los centros al azar.

Las particiones que pertenecen al centro 3 quedan reasignadas al centro 10, mientras que las particiones del centro 25 se asignan al centro 12. Por lo tanto, se crean tres departamentos, misma cantidad que número que centros sanitarios con todas las especialidades. Estos cambios se observan en la Figura 33.

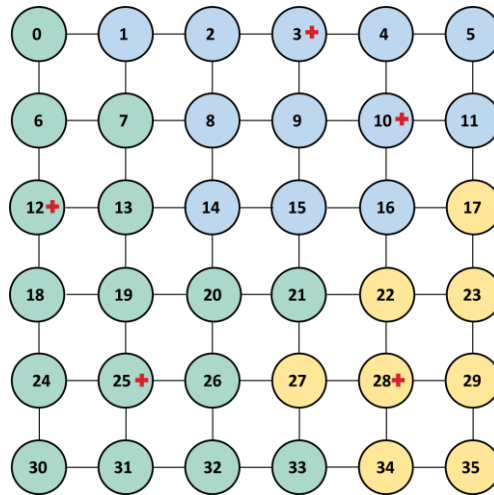


Figura 33. Grafo tras la formación de los departamentos. Segundo escenario.
Fuente: Elaboración propia.

Para un mismo departamento, el cálculo de la distancia máxima se obtiene a partir del trayecto desde cada una de las particiones que lo forman hasta el centro que tiene todas las especialidades. En consecuencia, aparte de modificarse los valores de la capacidad, también cambian los de la distancia máxima. Estos nuevos valores se muestran en la Tabla 49.

Tabla 49. Valores de la distancia y la capacidad tras la formación de los departamentos. Segundo escenario.

Dpto.	Dist. máx.	Capacidad
10	94	29.825
12	102	-32.609
28	69	-7.883

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que el valor tan negativo que tenía el centro 25 en la variable capacidad queda ligeramente atenuado después de la creación de los departamentos. No obstante, se sigue apreciando un gran desequilibrio en la carga asistencial, con valores para la capacidad actual bastante dispares.

6.2.2 Método de búsqueda local

A continuación, se aplica el método de búsqueda local que consiste en la obtención de una solución que mejore el reparto de la carga asistencial entre los distintos departamentos, pudiéndose ver perjudicada la distancia que deben de recorrer los pacientes hasta alcanzar el centro.

En aquellos departamentos donde la variable capacidad tiene valores negativos, 12 y 28, se va a intentar que algunas de las particiones que han sido asignadas a éstos pasen a formar parte de otro departamento para que se pueda igualar la carga asistencial. La nueva asignación tras este proceso se muestra en la Figura 34.

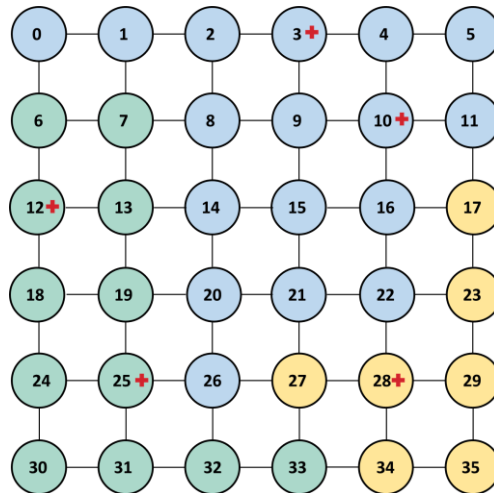


Figura 34. Grafo tras la búsqueda local. Segundo escenario.
Fuente: Elaboración propia.

Tras los cambios producidos, los valores de las variables distancia máxima y capacidad se ven afectados. Por lo tanto, se vuelven a calcular obteniendo los resultados que se aprecian en la Tabla 50.

Tabla 50. Valores de la distancia y la capacidad tras la búsqueda local. Segundo escenario.

Dpto.	Dist. máx.	Capacidad
10	141	-1.253
12	102	-5.195
28	69	-4.219

Fuente: Elaboración propia.

Observando los valores de la capacidad, se ha conseguido obtener un reparto más equilibrado de la carga asistencial.

6.2.3 Análisis de la capacidad

De nuevo se comprueba si se ha conseguido un reparto más equilibrado de la carga asistencial haciendo uso de la desviación estándar. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 51.

Tabla 51. Cálculo de la desviación estándar para la capacidad de los departamentos. Segundo escenario.

N	3					
Media	-3.556					
Formación de los departamentos	Dpto.	Capacidad	$(x - \bar{x})^2$	Sumatorio	Fracción	s
	10	29.825	1.114.268.907	1.977.090.899	659.030.300	25.672
	12	-32.609	844.096.178			
	28	-7.883	18.725.814			
Método de búsqueda local	Dpto.	Capacidad	$(x - \bar{x})^2$	Sumatorio	Fracción	s
	10	-1.253	5.302.274	8.429.699	2.809.900	1.676
	12	-5.195	2.687.414			
	28	-4.219	440.011			

Fuente: Elaboración propia.

El valor de la desviación estándar pasa de 25.672 cuando se trabaja con los resultados de la formación de departamentos a 1.676 tras la aplicación del método de búsqueda

local. Esta reducción se debe a la reasignación de la población a los centros sanitarios buscando un equilibrio entre la capacidad del centro y los habitantes asignados, lo que contribuye a equilibrar la carga de trabajo.

6.3 Tercer escenario

El tercer y último escenario en el que se va a aplicar la heurística tiene una disposición de las particiones distinta a las anteriores. Deja de ser un cuadrado, pudiendo observar particiones que tan solo tienen como vecina otra partición. Este cambio trata de reflejar una imagen más realista de la delimitación de los territorios como se muestra en la Figura 35.

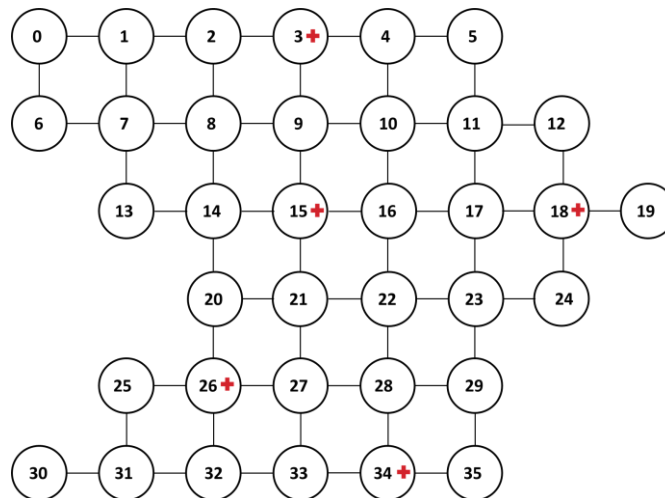


Figura 35. Grafo representativo de las particiones y de los centros. Tercer escenario.
Fuente: Elaboración propia.

La matriz de vecinos y la matriz de distancias se pueden observar en la Figura 61 y en la Figura 62 respectivamente, incluidas en el ANEXO III: Matrices de vecinos y de distancias.

De la misma forma que en el escenario anterior, los valores de población de cada partición, la capacidad de los centros de especialidades y su ubicación se han obtenido de manera aleatoria. Los dos últimos centros obtenidos no tendrán todas las especialidades, por lo que no podrán formar departamentos por ellos mismos. Estos centros están situados en las particiones 15 y 34.

6.3.1 Método constructivo

Los valores iniciales de la variable capacidad para cada uno de los centros vienen reflejados en la Tabla 52. Por su parte, la distancia máxima todavía no tiene valores debido a que aún no se ha asignado ninguna partición a los centros.

Tabla 52. Valores iniciales de la distancia máxima y la capacidad. Tercer escenario.

CE	Dist. máx.	Capacidad
3		44.261
15		13.361
18		46.020
26		35.294
34		37.331

Fuente: Elaboración propia.

➤ **Primer paso:** primeras asignaciones

Como se conoce, las primeras asignaciones se corresponden con las particiones donde se encuentran los centros y sus vecinos próximos. El grafo coloreado con las particiones asignadas a cada centro se puede observar en la Figura 36. En él se puede apreciar que la partición 9 es vecina directa de dos centros, por lo que pertenecerá al centro que se encuentre más cerca, en este caso al 3.

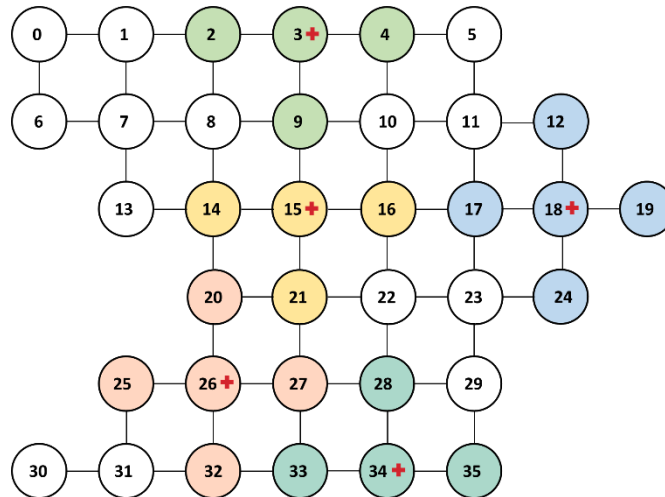


Figura 36. Grafo tras las primeras asignaciones. Tercer escenario.

Fuente: Elaboración propia.

Tras las primeras asignaciones, los valores de la población de las particiones se descuentan de la capacidad del centro de referencia. Además, se puede calcular la distancia que tendría que recorrer un paciente desde el centroide de la partición en la que habita hasta su correspondiente centro de especialidades. Todos estos valores se muestran en la Tabla 53.

Tabla 53. Valores de la distancia y la capacidad tras la primera asignación. Tercer escenario.

CE	Dist. máx.	Capacidad
3	41	20.056
15	26	-1.672
18	36	14.329
26	50	8.894
34	45	23.308

Fuente: Elaboración propia.

➤ **Segundo paso:** asignaciones teniendo en cuenta la distancia

A continuación, se van seleccionando de manera aleatoria las particiones que todavía no han sido asignadas y se calcula la distancia a cada uno de los centros. Cada

partición será asignada al centro que se encuentre más próximo. Si en el camino al centro pasa por otra partición que todavía no ha sido asignada, esta también será asignada al mismo centro, pues será de igual modo su centro más cercano. El grafo con las nuevas asignaciones se muestra en la Figura 37.

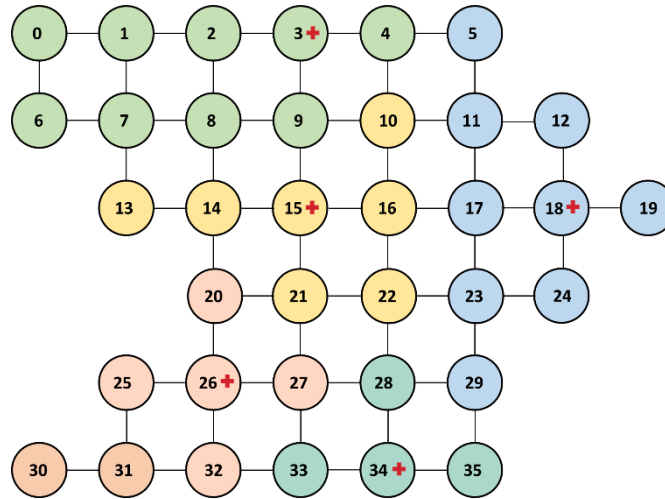


Figura 37. Grafo tras las asignaciones teniendo en cuenta la distancia. Tercer escenario.
Fuente: Elaboración propia.

Estas nuevas asignaciones suponen cambios en la distancia máxima que deben de recorrer algunos de los pacientes y en la capacidad de los centros de especialidades. Los nuevos valores quedan recogidos en la Tabla 54.

Tabla 54. Valores de la distancia y la capacidad tras las asignaciones contemplando la distancia. Tercer escenario.

CE	Dist. máx.	Capacidad
3	108	-9.330
15	54	-16.848
18	53	-3.799
26	94	-3.298
34	45	23.308

Fuente: Elaboración propia.

➤ Tercer paso: formación de los departamentos

Una vez cada partición está asignada a un centro, se procede a crear los departamentos de salud. En este caso, los centros que no cuentan con todas las especialidades son el 15 y el 34. Por lo tanto, las particiones asignadas a estos centros deberán de reasignarse a otro centro que se encuentre completo.

Para ello, se seleccionan las particiones asignadas a un centro incompleto y se calcula la distancia mínima entre estas y los centros completos, situados en las particiones 3, 18 y 26. Para cada uno de estos centros completos se escoge aquella distancia que es máxima. Una vez contempladas las distancias máximas, se elige la que presenta un menor valor. El centro asociado con esta distancia será al que se le asignen todas las particiones que pertenecían al centro incompleto. De esta manera se busca minimizar la distancia máxima que tendrían que recorrer los pacientes para alcanzar el centro que posee todas las especialidades.

Este procedimiento se realiza para los dos centros incompletos obteniendo como resultado la formación de los departamentos que se muestran en el grafo de la Figura 38.

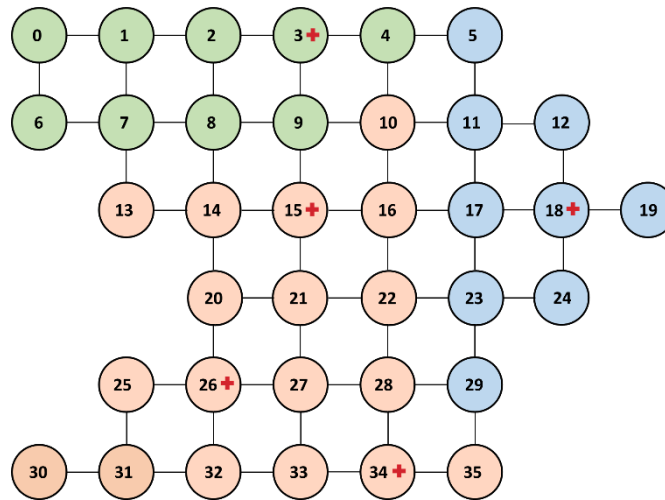


Figura 38. Grafo tras la formación de los departamentos. Tercer escenario.
Fuente: Elaboración propia.

Como se han modificado las particiones que pertenecen a cada uno de los centros, la distancia y la capacidad también se han visto alteradas. Los nuevos valores se exponen en la Tabla 55. No resulta sorprendente encontrar valores negativos en la variable capacidad, ya que la población total de las particiones es superior a la capacidad total de todos los centros.

Tabla 55. Valores de la distancia y la capacidad tras la formación de los departamentos. Tercer escenario.

Dpto.	Dist. máx.	Capacidad
3	108	-9.330
18	53	-3.799
26	118	3.162

Fuente: Elaboración propia.

6.3.2 Método de búsqueda local

Seguidamente, se implementa la búsqueda local para alcanzar una solución que distribuya la carga asistencial entre los diferentes departamentos de la forma más equilibrada posible. Es posible que estos cambios afecten negativamente a la distancia que los pacientes deben de recorrer para llegar al centro.

Se está trabajando con dos objetivos que, debido a la naturaleza del problema, actúan como si fueran opuestos. Cuando se minimiza la distancia de desplazamiento, se obtienen valores de capacidad dispares. Si se busca equilibrar la carga asistencial entre los distintos centros, se producen aumentos en la distancia que los pacientes deben de recorrer.

En el proceso que se va a llevar a cabo, cabe esperar que aquellos departamentos con capacidad negativa, el 3 y el 18, traten de reasignar algunas de sus particiones al departamento 26.

En la Figura 39 se muestra el grafo tras la búsqueda local, produciéndose tan solo un cambio en la asignación de la partición 7.

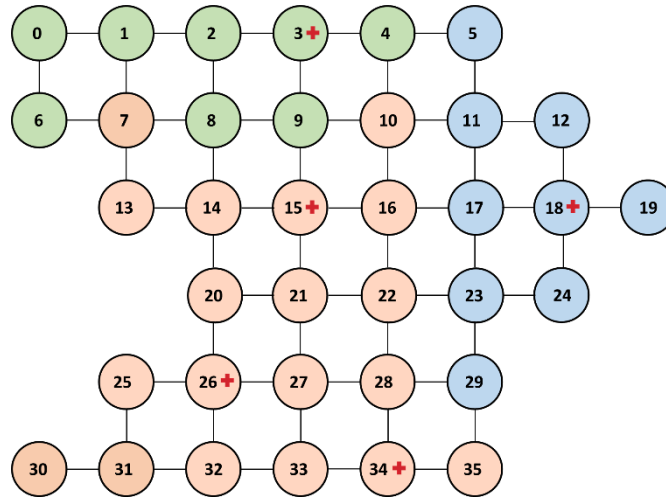


Figura 39. Grafo tras la búsqueda local. Tercer escenario. Fuente: Elaboración propia.

Este cambio supone también una modificación en los valores de la distancia máxima y de la capacidad de cada uno de los departamentos. La Tabla 56 contiene estos valores.

Tabla 56. Valores de la distancia y la capacidad tras la búsqueda local. Tercer escenario.

Dpto.	Dist. máx.	Capacidad
3	108	-4.972
18	53	-3.799
26	148	-1.196

Fuente: Elaboración propia.

Al producirse tan solo un cambio en la asignación, los únicos departamentos implicados son el 3 y el 26.

6.3.3 Análisis de la capacidad

La forma de comparar si tras la aplicación de la búsqueda local se ha conseguido un reparto equitativo de la carga asistencial es empleando la desviación estándar. Los resultados para ambos casos se muestran en la Tabla 57.

Tabla 57. Cálculo de la desviación estándar para la capacidad de los departamentos. Tercer escenario.

N		3					
Media		-3.322					
Formación de los departamentos	Dpto.	Capacidad	$(x - \bar{x})^2$	Sumatorio	Fracción	s	
	3	-9.330	36.092.059	78.365.849	26.121.950	5.111	
	18	-3.799	227.211				
	26	3.162	42.046.579				
Método de búsqueda local	Dpto.	Capacidad	$(x - \bar{x})^2$	Sumatorio	Fracción	s	
	3	-4.972	2.721.400	7.469.905	2.489.968	1.578	
	18	-3.799	227.211				
	26	-1.196	4.521.293				

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar, la desviación estándar antes de aplicar el método de búsqueda local es de 5.111. Después de su implementación, disminuye significativamente a 1.578. Esta reducción se debe a la redistribución de algunas particiones a otros departamentos buscando un equilibrio entre la capacidad de los centros y el número de habitantes asignados, lo que contribuye al equilibrio de la carga asistencial.

CAPÍTULO VII: APLICACIÓN A UN CASO REAL

Una vez comprobado el buen funcionamiento de la heurística propuesta, se quiere implementar en un caso real. Se trata del territorio de la provincia Valencia y de los centros de especialidades y centros sanitarios integrados ubicados en esta superficie. Al trabajar con datos que se pueden representar geográficamente se va a emplear QGIS.

7.1 Tipos de capas en QGIS

En este apartado se describen los tipos de capas de QGIS empleadas en la implementación de la heurística a un caso real: capas vectoriales y capas ráster.

Las capas vectoriales contienen datos geográficos llamados objetos, que se representan mediante coordenadas y se dividen en tres tipos: puntos, líneas (segmentos que unen dos puntos) y polígonos (unión de varias líneas).

En este trabajo se utilizan varias capas vectoriales, pues este tipo de capa se va creando conforme va siendo necesaria. La capa que recoge la localización de los centros sería un ejemplo del uso de una capa de puntos. Por otra parte, tanto la capa que contiene el contorno de la provincia de Valencia como la posterior cuadrícula para dividir el terreno en cuadrados de igual tamaño, son ejemplos de capa de tipo polígono.

Las capas ráster están formadas por una matriz de píxeles, cada uno de los cuales contiene un valor que representa las condiciones para el área cubierta por esa celda. Se utilizan cuando se quiere mostrar información que es continua en un área y no se puede dividir fácilmente en características vectoriales. Cada píxel representa una región geográfica, y el valor en ese píxel representa alguna característica de dicha región (*Documentación de QGIS 3.28*, s. f.).

En este proyecto se utilizan dos capas ráster. La de Google Maps, que muestra imágenes de mapas que se pueden desplazar como si se estuviera usando directamente la aplicación Google Maps. Esta capa permite ubicar los centros sanitarios en el mapa al igual que delimitar el territorio de la provincia de Valencia, favoreciendo la posterior visualización de los resultados obtenidos. La otra capa utilizada es la que recoge la distribución de la población en la península Ibérica. Esta capa es proporcionada por GHSL-Global Human Settlement Layer de la Comisión Europea. Recoge la distribución de la población teniendo en cuenta la cantidad de habitantes que hay en cada lugar basándose en datos demográficos de 2022.

7.2 Pasos previos a la resolución

Para poder resolver el problema y encontrar los valores de los parámetros es necesaria la creación de las distintas capas de QGIS. En este apartado se van a presentar todas las capas que se han creado, así como su posterior utilidad.

En primer lugar, en la Figura 40 se aprecia la capa vectorial en la que un polígono representa los límites de la provincia de Valencia. El uso de esta capa es primordial, ya que permite acotar el estudio a la zona seleccionada. También se muestra la capa vectorial que recoge las posiciones de los 27 centros sanitarios pertenecientes a este territorio como puntos en el mapa.

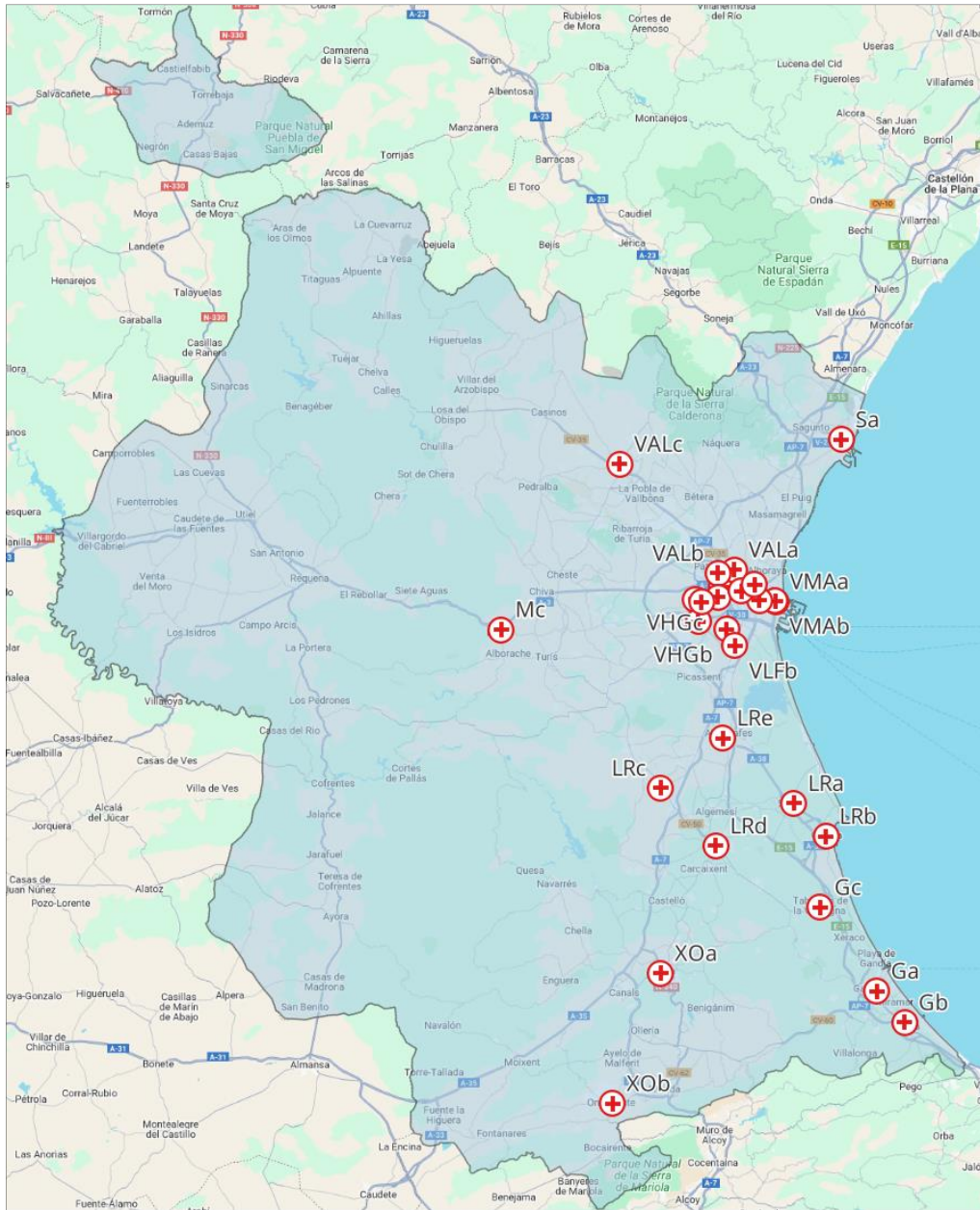


Figura 40. Capas vectoriales de las fronteras de la provincia de Valencia y de la ubicación de los centros sanitarios.
Fuente: Elaboración propia utilizando QGIS.

Posteriormente, se procede a crear la cuadrícula que permita la utilización del código propuesto. Para ello, se crea una nueva capa vectorial que contiene cuadrados, cuyas dimensiones se pueden modificar, cubriendo la provincia de Valencia.

El problema surge en la modificación de los valores de las dimensiones debido a que se busca que los centros pertenezcan a cuadrados diferentes. Por lo tanto, en aquellos

lugares donde la concentración de hospitales es mayor, un pequeño cambio en el valor del lado del cuadrado puede causar que se pueda o no conseguir este propósito. Tras comprobar manualmente distintas combinaciones y apreciar los cambios producidos en el resultado, el mayor valor que se ha obtenido para este lado es de 2,793 km. Como se aprecia en la Figura 41 la cuadrícula queda formada por 79 filas y 60 columnas, teniendo un total de 4.740 particiones.

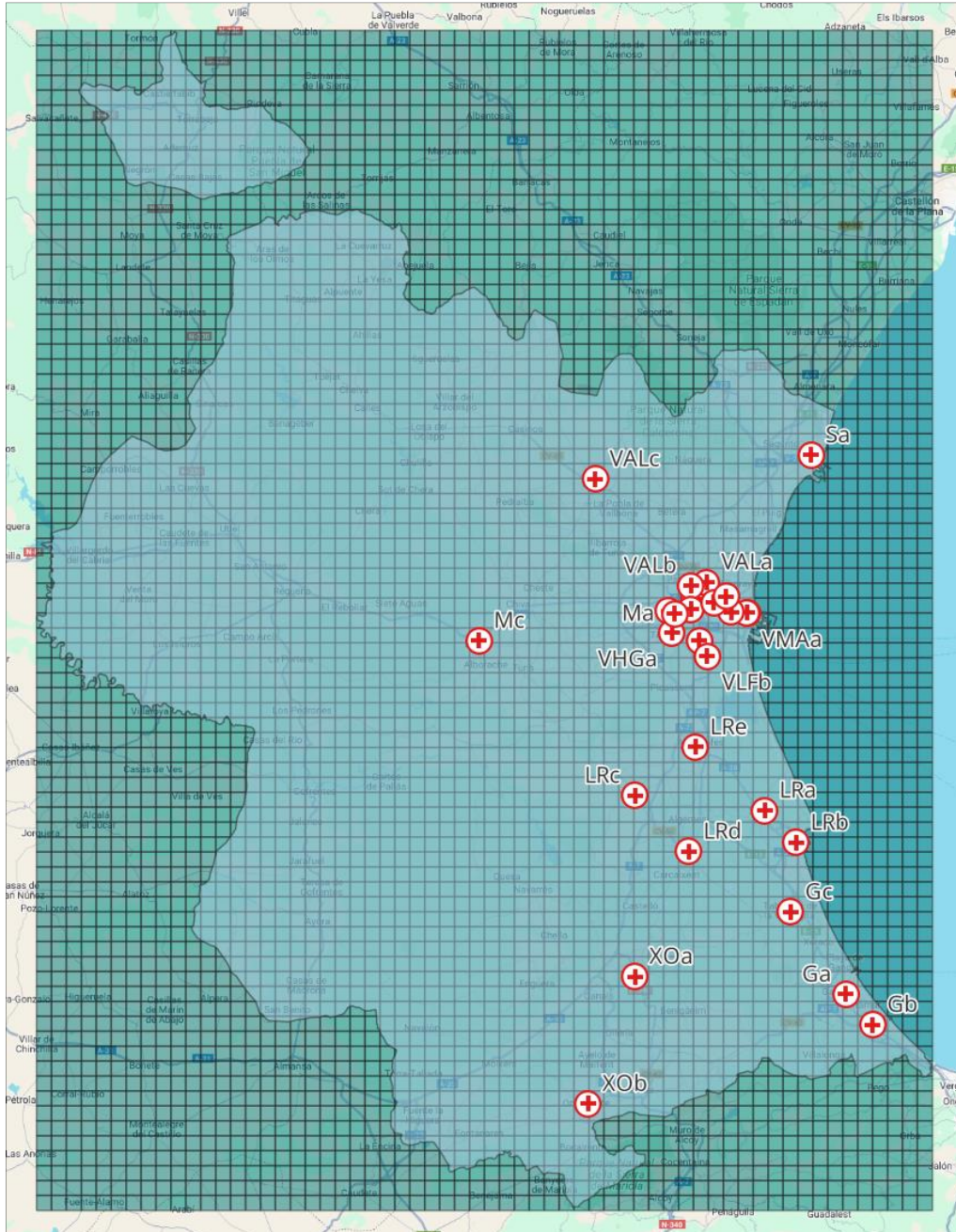


Figura 41. Capa vectorial de la cuadrícula que cubre la provincia de Valencia.
Fuente: Elaboración propia utilizando QGIS.

Ampliando la visualización de las capas en aquella parte donde los centros sanitarios se encuentran más próximos se puede observar que cada uno de los centros próximos a la ciudad de Valencia están ubicados en particiones diferentes. Esta ampliación de la capa vectorial se aprecia en la Figura 42.

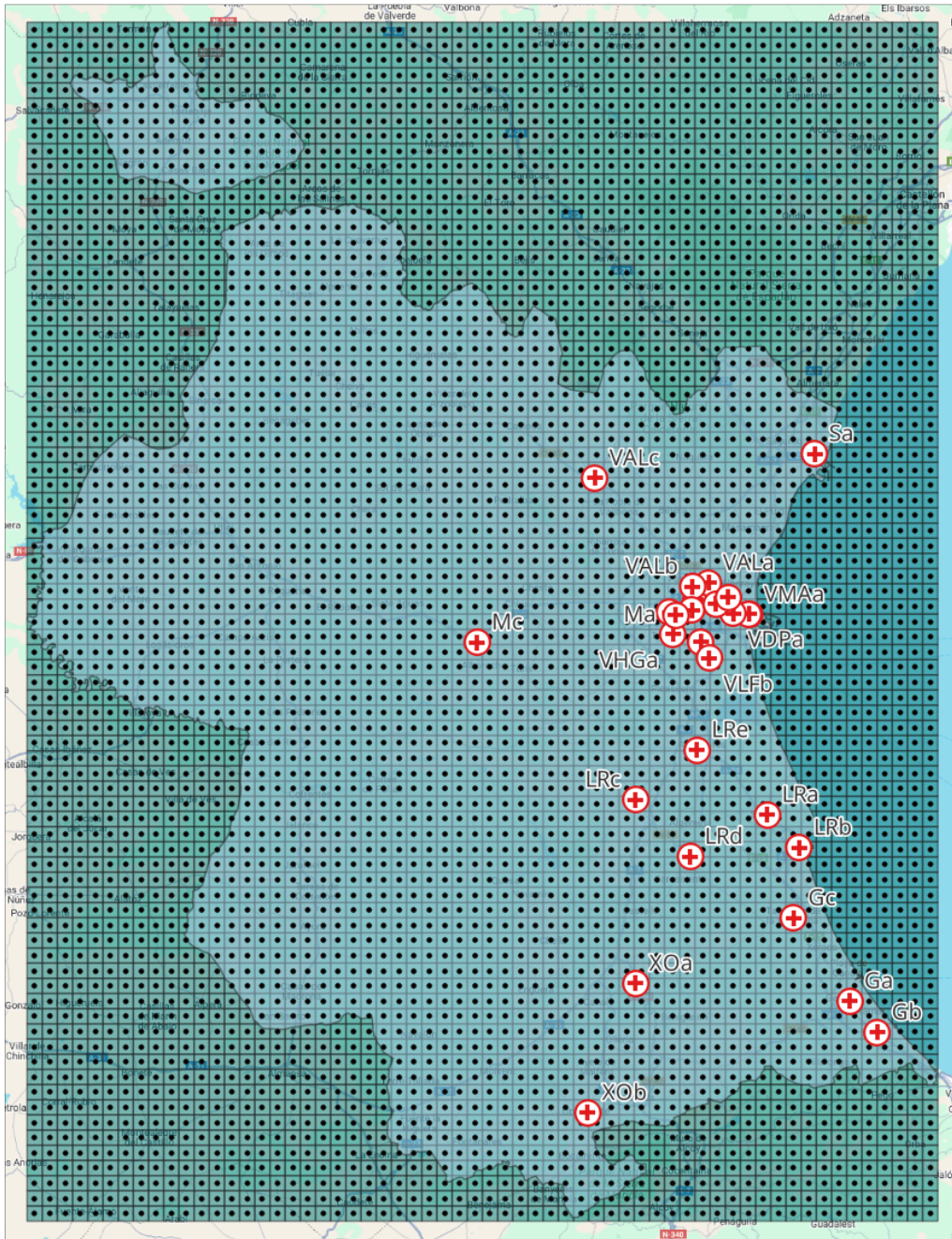


Figura 43. Capa vectorial con los centroides de cada una de las particiones.
Fuente: Elaboración propia utilizando QGIS.

El uso de toda la cuadrícula para la obtención de la matriz de vecinos y de distancias se justifica por la ubicación geográfica del Rincón de Ademuz, que está rodeado por territorios de la provincia de Teruel y de Cuenca. Si no fuera así, resultaría imposible conectar a los habitantes del Rincón de Ademuz con alguno de los centros sanitarios debido a la ausencia de un camino que los conecte.

Para el cálculo de la **población** de interés, que es la que habita en la provincia de Valencia, es necesario realizar una intersección entre la capa de la provincia de Valencia y la cuadrícula. Permitiendo de esta manera la obtención de una nueva capa en la que la provincia de Valencia queda dividida en particiones como se muestra en la Figura 44.

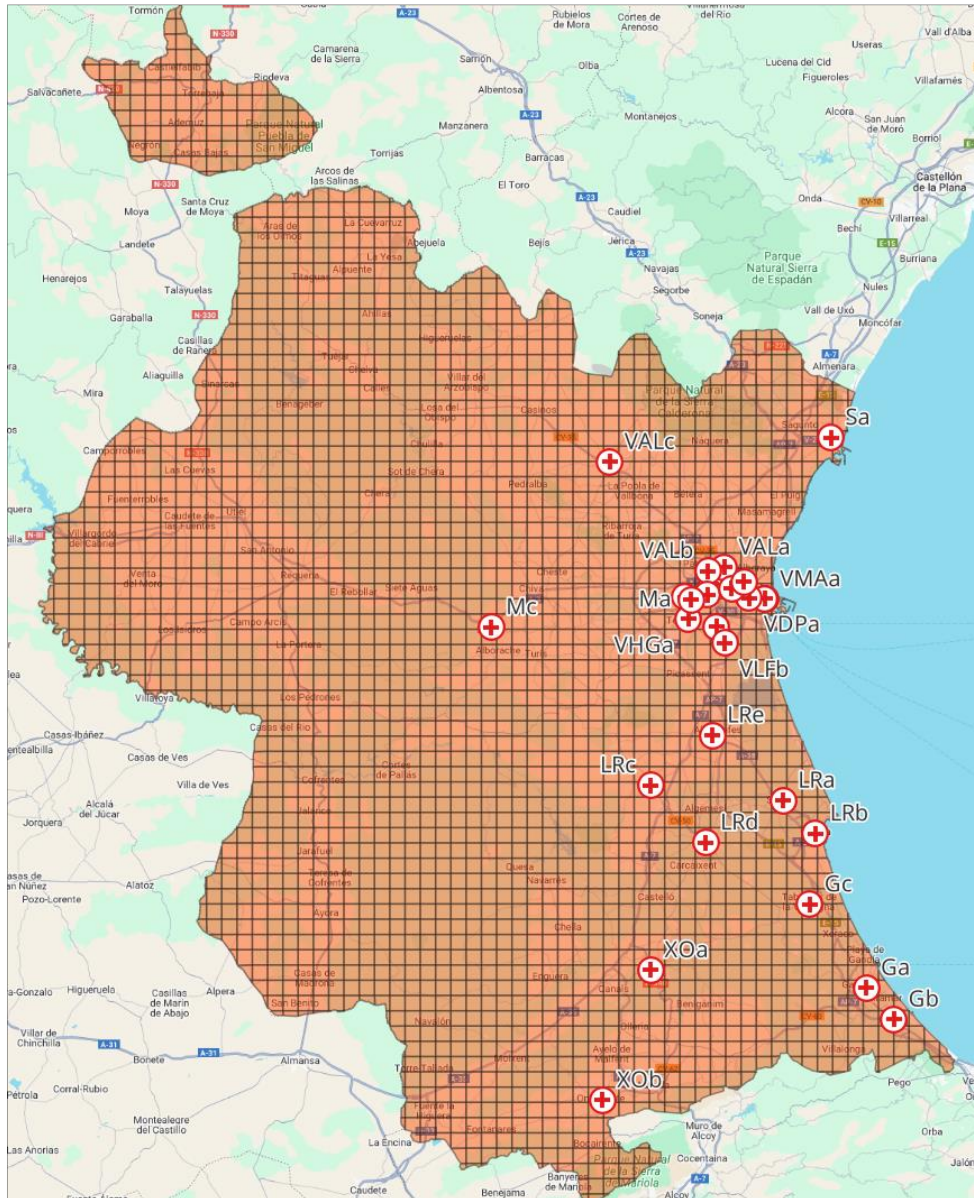


Figura 44. Capa vectorial con las particiones que pertenecen a la Provincia de Valencia.
Fuente: Elaboración propia utilizando QGIS.

Una vez conseguidas las particiones de la provincia de Valencia, aplicando estadísticas de zona y utilizando como capa ráster la que recoge la distribución de la población en la península Ibérica, se obtiene el número de habitantes de cada una de estas particiones. Al resto de particiones que no pertenecen a la provincia de Valencia se les impone una población nula de manera que no afecte al cálculo de la capacidad disponible de los centros.

Por otra parte, conocer la **capacidad** de cada centro de especialidades o centro sanitario integrado es esencial para el equilibrio de la carga asistencial. Este dato no se ha podido obtener de manera directa debido a que no hay información publicada por la Administración sobre el número de consultas o sobre el número de especialidades que posee cada centro. Consecuentemente, se realiza una aproximación para poder continuar con la resolución y demostrar que el procedimiento empleado funciona para este tipo de situaciones.

Simplificando el problema se puede considerar que la capacidad total de los centros es la misma que la población para la provincia de Valencia obtenida en QGIS. Por lo tanto, en un supuesto en el que todos los centros tienen la misma capacidad y, contemplando que se disponen de 27 centros, la capacidad de cada uno representa un 3,7% del total. Si en total se cuenta con 2.370.166 habitantes, se obtiene que cada centro posee una capacidad de 87.784 pacientes.

Finalmente, tampoco se conoce el **número de especialidades** que ofrece cada centro. De ahí que no se puede averiguar qué centros pueden ser considerados como completos o incompletos. De nuevo, para continuar con la resolución del problema se tiene que llevar a cabo otra aproximación. Teniendo en cuenta los centros que pertenecen en la actualidad a un mismo departamento, se selecciona uno aleatoriamente que será el que se considere como completo. Este proceso se repite en cada uno de los departamentos, y como se tienen 10 departamentos, se tendrán 10 centros completos.

En la Tabla 58 quedan recogidas todas estas aproximaciones.

Tabla 58. Lista de todos los centros junto con su capacidad y si contienen todas las especialidades.

CENTRO		Capacidad		Especialidades	
Territorio / Área	Sigla	% Total	Cap. Centro	Todas	Faltan
CENTRO DE ESPECIALIDADES DE GANDIA	Ga	3,70%	87.784		X
CENTRO SANITARIO INTEGRADO DE OLIVA	Gb	3,70%	87.784	X	
CENTRO SANITARIO INTEGRADO DE TAVERNES DE LA VALLDIGNA	Gc	3,70%	87.784		X
CENTRO DE ESPECIALIDADES DE SUECA	LRa	3,70%	87.784		X
CENTRO SANITARIO INTEGRADO DE CULLERA	LRb	3,70%	87.784		X
CENTRO SANITARIO INTEGRADO DE CARLET	LRc	3,70%	87.784		X
CENTRO SANITARIO INTEGRADO DE ALZIRA II	LRd	3,70%	87.784		X
CENTRO SANITARIO INTEGRADO DE BENIFAIO	LRe	3,70%	87.784	X	
CENTRO DE ESPECIALIDADES DE ALDAIA	Ma	3,70%	87.784		X
CENTRO DE ESPECIALIDADES DE MISLATA	Mb	3,70%	87.784	X	
CENTRO SANITARIO INTEGRADO DE BUÑOL	Mc	3,70%	87.784		X
CENTRO DE ESPECIALIDADES DE PUERTO DE SAGUNT / SAGUNTO	Sa	3,70%	87.784	X	
CENTRO DE ESPECIALIDADES DE BURJASSOT	VALa	3,70%	87.784	X	
CENTRO SANITARIO INTEGRADO DE PATERNA C/VALENCIA	VALb	3,70%	87.784		X
CENTRO SANITARIO INTEGRADO DE LLIRIA	VALc	3,70%	87.784		X
CENTRO DE ESPECIALIDADES DE VALENCIA EL GRAO	VMaAa	3,70%	87.784	X	
CENTRO CASA DEL MAR (ISM DE VALENCIA)	VMaAb	3,70%	87.784		X
CENTRO DE ESPECIALIDADES DE VALENCIA MONTEOLIVETE	VDPa	3,70%	87.784	X	
CENTRO SANITARIO INTEGRADO DE TORRENT	VHGa	3,70%	87.784		X
CENTRO SANITARIO INTEGRADO DE PAIORTA	VHGb	3,70%	87.784		X
CENTRO SANITARIO INTEGRADO DE XIRIVELLA	VHGc	3,70%	87.784		X
CENTRO SANITARIO INTEGRADO DE JUAN LLORENS	VHGd	3,70%	87.784	X	
CENTRO SANITARIO INTEGRADO DE ALAQUAS	VHGe	3,70%	87.784		X
CENTRO DE ESPECIALIDADES DE VALENCIA C/ALBORAYA	VLFa	3,70%	87.784		X
CENTRO DE ESPECIALIDADES DE CATARROJA	VLFB	3,70%	87.784	X	
CENTRO DE ESPECIALIDADES DE XATIVA	XOa	3,70%	87.784	X	
CENTRO DE ESPECIALIDADES DE ONTINYENT	XOb	3,70%	87.784		X

Fuente: Elaboración propia.

7.3 Aplicación de la heurística

Al igual que se ha realizado en el anterior apartado, el uso de la heurística se va a dividir entre el método constructivo y el de búsqueda local. De esta manera se permite comprobar su funcionamiento a través de la evolución de los resultados para el caso real propuesto.

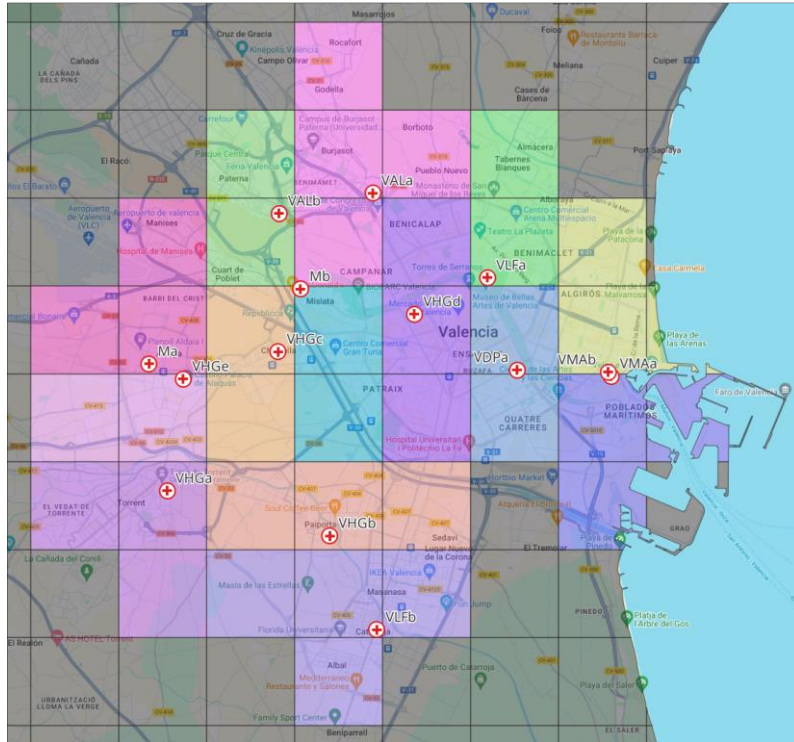


Figura 46. Ampliació de les particions de València i al voltant després de les primeres assignacions. Cas real. Fuente: Elaboració pròpia utilitzant QGIS.

A continuació, en la Taula 59 se mostren els valors de capacitat i de distància màxima per a cada un dels centres.

Taula 59. Valors de la distància i la capacitat després de les assignacions contemplant la distància. Cas real.

CENTRO		RESULTADOS	
Sigla	Partición	Dist. Max	Capacidad
Ga	4.331	2,17	2.540
Gb	4.491	2,17	57.376
Gc	4.010	2,17	73.009
LRa	3.845	2,17	62.245
LRb	4.005	2,17	69.351
LRc	3.212	2,17	63.634
LRd	3.452	2,17	42.953
LRe	3.524	2,16	61.732
Ma	3.357	2,16	-4.808
Mb	3.515	2,16	-185.550
Mc	2.332	2,16	77.518
Sa	4.058	2,15	42.914
VALa	3.513	2,16	-112.866
VALb	3.435	2,15	17.969
VALc	2.954	2,15	70.989
VMAa	3.753	2,16	-139.597
VMAb	3.752	2,16	-149.529
VDPa	3.673	2,15	-240.988
VHGa	3.359	2,16	39.490
VHGb	3.517	2,16	-59.408
VHGC	3.436	2,16	-48.454
VHGd	3.594	2,15	-379.376
VHGe	3.358	2,16	-1.423
VLFa	3.672	2,15	-170.118
VLfb	3.518	2,16	-46.319
XOa	3.224	2,17	54.349
XOb	2.916	2,18	45.756

Fuente: Elaboració pròpia.

➤ **Segundo paso:** asignaciones teniendo en cuenta la distancia

Seguidamente, se emplea el algoritmo Dijkstra para el cálculo de la distancia mínima y del camino que permite conectar cada una de las particiones con los centros de especialidades. Si tan solo se tuviera en cuenta la cercanía al centro de especialidades, cada una de las particiones de la provincia de Valencia quedarían asignadas, y por tanto coloreadas, como se aprecia en la Figura 47.

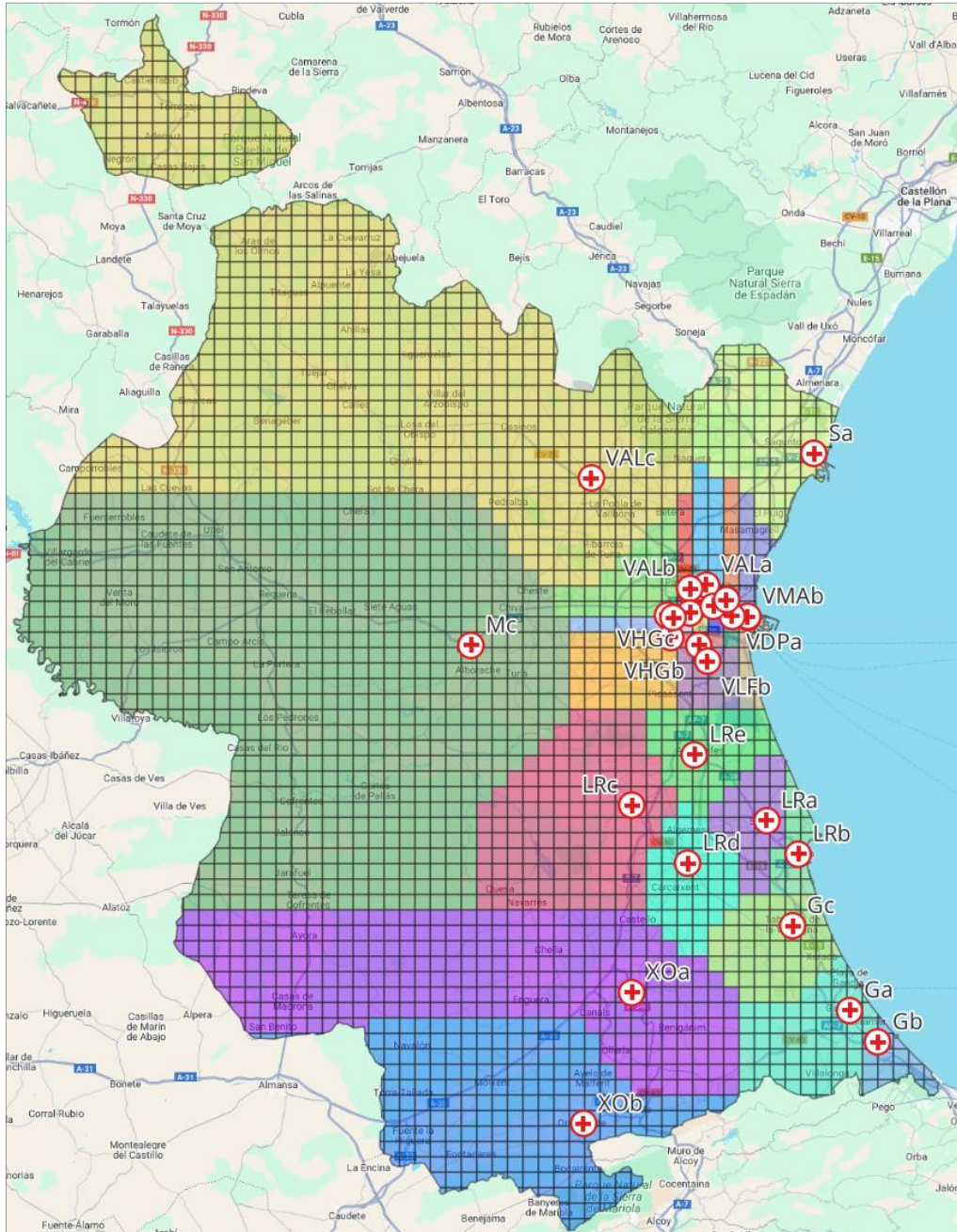


Figura 47. Particiones coloreadas tras las asignaciones teniendo en cuenta la distancia. Caso real. Fuente: Elaboración propia utilizando QGIS.

De la misma manera que se ha realizado en el primer paso, se va a ampliar la captura para el territorio próximo a la ciudad de Valencia. Así pues, en la se puede apreciar qué particiones quedan asignadas a cada uno de los centros sanitarios.

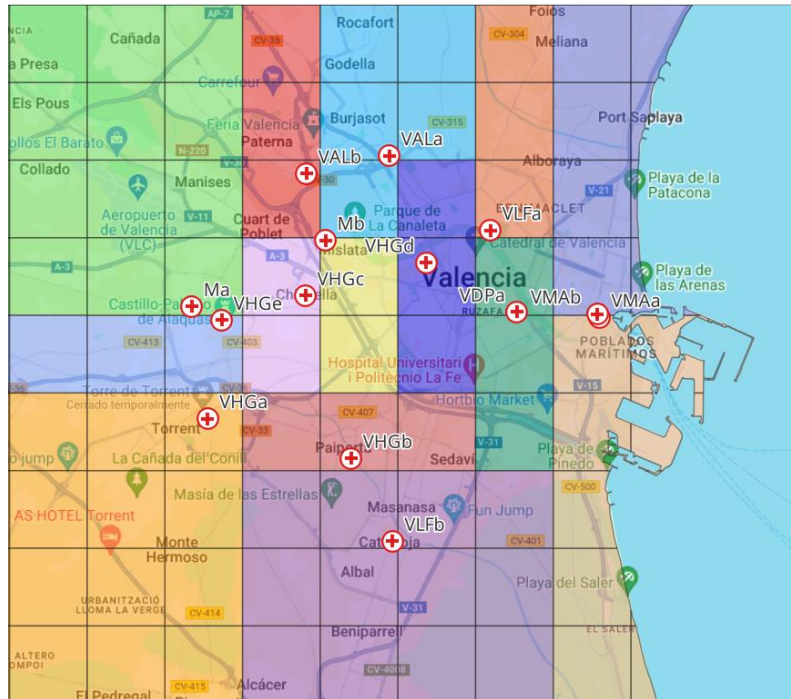


Figura 48. Ampliación de las particiones de Valencia y alrededores tras las asignaciones teniendo en cuenta la distancia. Caso real.

Fuente: Elaboración propia utilizando QGIS.

Tras las asignaciones teniendo en cuenta la distancia, los valores de la capacidad y de la distancia máxima quedan reflejados en la Tabla 60.

Tabla 60. Valores de la distancia y la capacidad tras las asignaciones contemplando la distancia. Caso real.

CENTRO		RESULTADOS	
Sigla	Partición	Dist. Max	Capacidad
Ga	4.331	26,04	-12.123
Gb	4.491	15,19	62.515
Gc	4.010	15,18	55.266
LRa	3.845	10,80	56.686
LRb	4.005	12,94	60.020
LRc	3.212	34,61	23.379
LRd	3.452	15,13	8.354
LRe	3.524	15,12	18.472
Ma	3.357	17,25	-33.327
Mb	3.515	2,16	-4.183
Mc	2.332	77,66	16.995
Sa	4.058	27,87	-18.059
VALa	3.513	15,03	-56.310
VALb	3.435	12,88	48.917
VALc	2.954	132,47	-31.940
VMAa	3.753	12,92	-23.805
VMAb	3.752	15,03	-63.906
VDPa	3.673	4,30	-71.404
VHGa	3.359	21,56	1.428
VHGb	3.517	2,16	22.423
VHGc	3.436	2,16	60.624
VHGD	3.594	2,15	-145.796
VHGe	3.358	12,95	49.428
VLFa	3.672	15,03	-18.203
VLFB	3.518	10,78	-7.336
XOa	3.224	75,90	-23.532
XOb	2.916	56,50	25.420

Fuente: Elaboración propia.

Puesto que la suma total de la capacidad de los centros se impone que sea igual a la población total de la provincia de Valencia, si se suman todos los valores de capacidad tras asignar todas las particiones, el resultado debe de ser 0. En este caso al trabajar con valores de densidad se ha producido un pequeño desajuste de dos unidades.

➤ **Tercer paso: formación de los departamentos**

Para la creación de los departamentos es primordial conocer el número de centros de especialidades completos e incompletos. Los completos indican la cantidad de departamentos que se van a generar y los incompletos son los que se tienen que reasignar para poder ofrecer a sus pacientes la totalidad de las especialidades. Tras esta reasignación, los departamentos quedan formados como se muestra en la Figura 49.

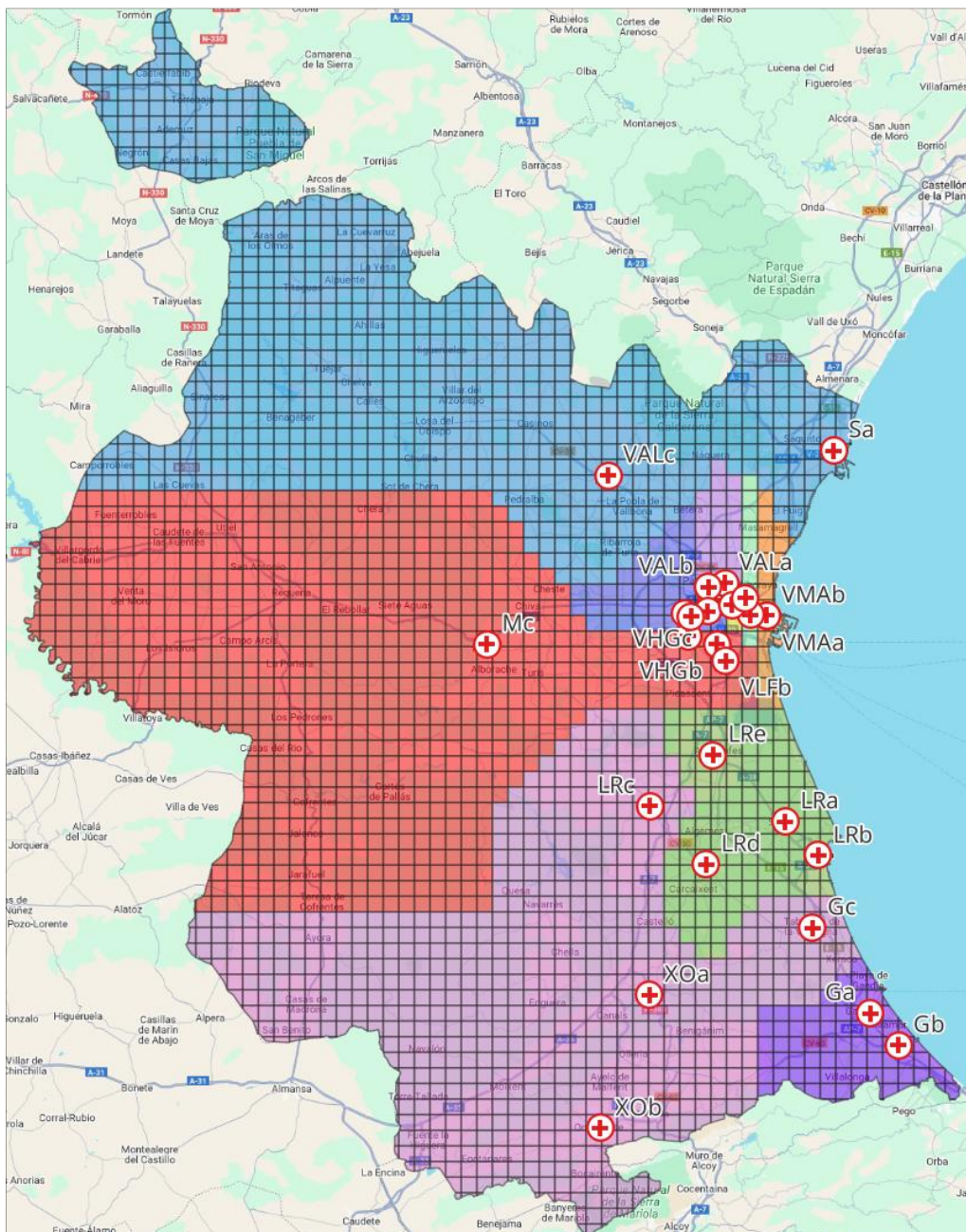


Figura 49. Particiones coloreadas tras la formación de los departamentos. Caso real.
Fuente: Elaboración propia utilizando QGIS.

Focalizando en la ciudad de Valencia, las particiones quedan asignadas de la siguiente manera:

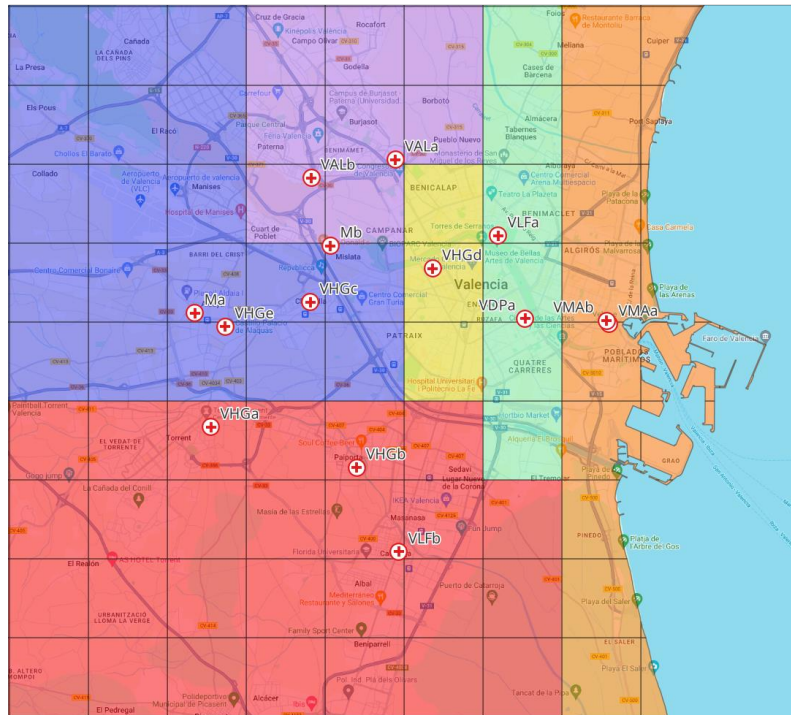


Figura 50. Particiones de Valencia y alrededores tras la formación de los departamentos. Caso real. Fuente: Elaboración propia utilizando QGIS.

Con la creación de los departamentos, los valores de capacidad y de distancia máxima se ven alterados. La diferencia principal es que antes la población quedaba asignada a 27 centros, mientras que ahora está distribuida en 10 departamentos. Todos estos cambios se reflejan en la Tabla 61.

Tabla 61. Valores de la distancia y la capacidad tras la creación de los departamentos.

DPTO.		RESULTADOS	
Sigla	Partición	Dist. Max	Capacidad
Gb	4.491	26,07	50.391
LRe	3.524	36,72	143.531
Mb	3.515	21,56	72.542
Sa	4.058	158,09	-49.998
VALa	3.513	15,03	-7.393
VMAa	3.753	17,18	-87.712
VDPa	3.673	17,18	-89.606
VHGd	3.594	2,15	-145.796
VLFb	3.518	111,99	33.510
XOa	3.224	75,90	80.532

Fuente: Elaboración propia.

7.3.2 Método de búsqueda local

Finalmente, se emplea el código creado para la búsqueda local. Partiendo de la solución en la que cada partición queda asignada a su centro más cercano, se producirán reasignaciones de algunas particiones de manera que se consiga un mayor equilibrio de la carga asistencial en los centros de especialidades.

En la búsqueda local ya no resulta tan interesante conocer la distancia que recorren los pacientes de las distintas particiones hasta alcanzar los centros de especialidades, ya que el objetivo que se busca es el equilibrio de la carga asistencial. Así pues, los valores de la capacidad tras la búsqueda local se muestran en la Tabla 62.

Tabla 62. Valores de la capacidad tras la búsqueda local.

DPTO.		RESULTADOS
Sigla	Partición	Capacidad
Gb	4.491	50.391
LRe	3.524	143.531
Mb	3.515	-19.361
Sa	4.058	-52.464
VALa	3.513	-50.080
VMAa	3.753	-54.913
VDPa	3.673	-34.768
VHGd	3.594	-61.892
VLFb	3.518	-974
XOa	3.224	80.532

Fuente: Elaboración propia.

Debido a las características del problema al haber considerado que todos los centros tienen la misma capacidad independientemente de donde se encuentren, ha causado que se produzcan muy pocas reasignaciones. Esto es debido a que, las particiones en la ciudad de Valencia y sus alrededores concentran un número elevado de habitantes y además los centros de esta área son los que se encuentran más colapsados. Por lo tanto, al cambiar la asignación de las particiones pertenecientes al centro con mayor carga asistencial y no producirse ninguna mejora en el equilibrio, el algoritmo no consigue efectuar ninguna reasignación más.

7.3.3 Análisis de la capacidad

Para comprobar si se ha conseguido equilibrar, aunque sea ligeramente, la carga asistencial se va a utilizar la desviación estándar.

El proceso para la obtención de la desviación estándar en ambas situaciones se presenta en la Tabla 63. Se puede apreciar que, pese a producirse pocas reasignaciones, la desviación se ha reducido sustancialmente pasando de 86.916 tras la formación de los departamentos a 48.493 después de aplicar el método de búsqueda local.

Por lo tanto, se ha conseguido un reparto más equitativo de la carga de trabajo entre los centros de especialidades, mejorando la atención a los ciudadanos y, por tanto, la percepción que tienen sobre el sistema sanitario.

Tabla 63. Cálculo de la desviación estándar para la capacidad de los departamentos. Caso real.

N	10
Media	0

Formación de los departamentos	Sigla	Partición	Capacidad	$(x - \bar{x})^2$	Sumatorio	Fracción	s
	Gb	4.491	50.391	2.539.285.004	75.544.769.722	7.554.476.972	86.916
	LRe	3.524	143.531	20.601.100.020			
	Mb	3.515	72.542	5.262.382.395			
	Sa	4.058	-49.998	2.499.816.685			
	VALa	3.513	-7.393	54.649.741			
	VMAa	3.753	-87.712	7.693.360.147			
	VDPa	3.673	-89.606	8.029.304.934			
	VHGd	3.594	-145.796	21.256.481.985			
	VLfb	3.518	33.510	1.122.919.406			
XOa	3.224	80.532	6.485.469.406				

Método de búsqueda local	Sigla	Partición	Capacidad	$(x - \bar{x})^2$	Sumatorio	Fracción	s
	Gb	4.491	50.391	2.539.252.881	23.515.267.225	2.351.526.723	48.493
	LRe	3.524	143.531	20.601.147.961			
	Mb	3.515	-19.361	374.866.383			
	Sa	4.058	-52.464	2.752.489.328			
	VALa	3.513	-50.080	2.508.021.910			
	VMAa	3.753	-54.913	3.015.426.805			
	VDPa	3.673	-34.768	1.208.832.728			
	VHGd	3.594	-61.892	3.830.678.795			
	VLfb	3.518	-974	947.810			
XOa	3.224	80.532	6.485.403.024				

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Para finalizar el trabajo se hace mención a las conclusiones obtenidas tras su realización junto con las posibles investigaciones que se pueden desarrollar a partir del estudio realizado.

8.1 Conclusiones

Tras la realización del trabajo es importante recopilar todas las deducciones y conocimientos adquiridos.

La búsqueda de información acerca del problema ha sido exhaustiva puesto que lo que se perseguía era encontrar un espacio de trabajo en el que todavía no hubiera artículos publicados. Esto ha requerido una gran inversión de tiempo que ha sido compensado por los conocimientos adquiridos en la resolución de problemas tanto de asignación como de distribución.

Además, resulta complicado trabajar en un entorno donde no hay unas bases claras para la resolución de los problemas de distribución. Cada investigador puede interpretar las variables desde un punto de vista diferente, dificultando la comparación entre los distintos métodos.

Todos los autores coinciden en que la complejidad en este tipo de problemas reside en cumplimiento de los criterios o requisitos comunes. Enfocándose en el trabajo, ha sido el cumplimiento de la contigüidad entre las particiones de un mismo departamento el que ha generado más problemas en la modelización.

Pese a todo esto, se ha conseguido obtener un modelo matemático y una heurística que han permitido alcanzar el propósito del trabajo. Una asignación de las particiones a los centros de especialidades considerando como objetivo el reparto equilibrado de la carga asistencial entre los distintos centros. Además, el constructivo de la heurística genera los departamentos teniendo en cuenta el acceso de las particiones al centro sanitario más cercano. Por lo tanto, partiendo de una solución de distancias mínimas, se realiza una reasignación de las particiones para alcanzar el equilibrio en el reparto.

El problema con el uso del modelo matemático es que su complejidad va aumentando a medida que se incrementa la dimensión del problema. El proceso de creación de las variables junto con sus restricciones ha potenciado la creación de la heurística.

La forma de calcular las distancias mínimas en la heurística es a través del algoritmo Dijkstra. Su aplicación es bastante buena y se ciñe a las necesidades que el problema requiere. No obstante, a medida que el tamaño del problema aumenta, el tiempo de computación crece considerablemente.

A través de la desviación estándar se ha comprobado que tras la aplicación del método de búsqueda local se consigue un mayor equilibrio de la carga asistencial que el obtenido

en la formación de departamentos, donde las particiones se asignan al centro más cercano.

En cuanto a la aplicación de la heurística en el caso real, el software QGIS ha tomado un papel relevante, ya que ha facilitado todos los cálculos relacionados con las distancias y ha permitido visualizar los resultados obtenidos sobre el mapa de la provincia de Valencia.

El uso de esta heurística permite, en caso de ser necesario, una asignación más precisa de la población a los centros de especialidades tan solo incrementando el número de particiones del territorio. Disminuir el tamaño de las particiones implica que la población se puede asignar cada vez en grupos más pequeños. Sin embargo, esto causaría un aumento del tiempo computacional

Al final, la capacidad de los centros de especialidades y la cantidad de especialidades que poseen cada uno no se han podido conseguir debido a la falta de acceso a estos datos. Sin embargo, se han realizado las aproximaciones oportunas para que este hecho no afectara a la aplicación de la heurística en un entorno real. Se ha apreciado su correcto funcionamiento, por lo que podría ser utilizada en cualquier escenario similar.

En definitiva, se ha creado una herramienta que sirve de apoyo a la toma de decisiones.

8.2 Trabajo futuro

Para finalizar este Trabajo Fin de Máster, es importante mencionar aquellas líneas de trabajo futuro que se puedan llevar a cabo.

El modelo matemático se ha diseñado de manera que se penaliza igual un exceso de capacidad como un exceso de población asignada. En la realidad, desde el punto de vista del paciente no implicaría la misma apreciación, pues en la primera situación podría ser atendido sin ningún problema y en la segunda con total probabilidad le tocaría esperar. Para penalizar aquellas situaciones en las que la población asignada sea superior a la capacidad, el modelo matemático se podría haber planteado como metas donde se minimiza la suma de las desviaciones negativas.

La dificultad en la obtención de los datos ha sido muy alta. Resultaría conveniente conseguir los datos que permitan conocer la capacidad de los centros de especialidades y las especialidades que ofrecen. De esta forma se podrán obtener unos resultados fieles a la realidad.

En el ámbito de la optimización, el tiempo que tarda en ejecutarse el código propuesto es crucial. Por lo tanto, una tarea prioritaria en el futuro sería mejorar su eficiencia computacional, permitiendo la obtención de soluciones en un periodo de tiempo más corto.

Por otra parte, un cambio en la forma de calcular las distancias podría facilitar el cómputo, reduciendo el tiempo de procesamiento. Una recomendación sería la

exploración de otros tipos de algoritmos que permitan el cálculo de distancias entre dos ubicaciones.

Bibliografía

- Almeida, T., & Manquinho, V. (2022). Constraint-based electoral districting using a new compactness measure: An application to Portugal. *Computers & Operations Research*, *146*, 105892. <https://doi.org/10.1016/J.COR.2022.105892>
- Camacho-Collados, M., Liberatore, F., & Angulo, J. M. (2015). A multi-criteria Police Districting Problem for the efficient and effective design of patrol sector. *European Journal of Operational Research*, *246*(2), 674-684. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2015.05.023>
- CIS. (2023). *Nota Técnica Barómetro Sanitario*. https://www.sanidad.gob.es/estadEstudios/estadisticas/BarometroSanitario/Barom_Sanit_2023/Barom_Sanit_2023_2a_oleada/NOTA_TECNICA_2a_Oleada_2023_v4.pdf
- Cobertura asistencial - Departament Salut Castelló*. (s. f.). Recuperado 28 de febrero de 2024, de <https://castellon.san.gva.es/es/cobertura>
- Curtin, K. M., Hayslett-McCall, K., & Qiu, F. (2010). Determining optimal police patrol areas with maximal covering and backup covering location models. *Networks and Spatial Economics*, *10*(1), 125-145. <https://doi.org/10.1007/S11067-007-9035-6/METRICS>
- D'Amico, S. J., Wang, S. J., Batta, R., & Rump, C. M. (2002). A simulated annealing approach to police district design. *Computers & Operations Research*, *29*(6), 667-684. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(01\)00056-9](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(01)00056-9)
- Decreto 74/2007 (2007). https://dogv.gva.es/portal/ficha_disposicion_pc.jsp?sig=6634/2007&L=1
- Diglio, A., Peiró, J., Piccolo, C., & Saldanha-da-Gama, F. (2023). Approximation schemes for districting problems with probabilistic constraints. *European Journal of Operational Research*, *307*(1), 233-248. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2022.09.005>
- Documentación de QGIS 3.28*. (s. f.). Recuperado 31 de enero de 2024, de https://docs.qgis.org/3.28/es/docs/gentle_gis_introduction/raster_data.html
- Eurostat Statistics Explained*. (2023). https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Healthcare_activities_statistics_-_consultations#Consultations_of_doctors
- Farughi, H., Tavana, M., Mostafayi, S., & Santos Arteaga, F. J. (2020). A novel optimization model for designing compact, balanced, and contiguous healthcare districts. *Journal of the Operational Research Society*, *71*(11), 1740-1759. <https://doi.org/10.1080/01605682.2019.1621217>

- Indicadores clave del Sistema Nacional de Salud.* (s. f.). Recuperado 17 de febrero de 2024, de <https://inclasns.sanidad.gob.es/main.html>
- INE. (2023). <https://www.ine.es/index.htm>
- Institut Valencià d'Estadística. (2023). *Proyecciones de población - Portal Estadístico de la Generalitat Valenciana - Generalitat Valenciana.* <https://pegv.gva.es/es/temas/demografiaypoblacion/poblacion/proyeccionesdepoblacion>
- Jia, T., Tao, H., Qin, K., Wang, Y., Liu, C., & Gao, Q. (2014). Selecting the optimal healthcare centers with a modified P-median model: A visual analytic perspective. *International Journal of Health Geographics*, 13(1), 1-15. <https://doi.org/10.1186/1476-072X-13-42/TABLES/2>
- Ley 14/1986, de 25 de abril, General de Sanidad. (1986). <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1986-10499>
- Mitchell, P. S. (1972). Optimal Selection of Police Patrol Beats. *The Journal of Criminal Law, Criminology, and Police Science*, 63(4), 577. <https://doi.org/10.2307/1141814>
- Mostafayi Darmian, S., Fattahi, M., & Keyvanshokoo, E. (2021). An optimization-based approach for the healthcare districting under uncertainty. *Computers & Operations Research*, 135, 105425. <https://doi.org/10.1016/J.COR.2021.105425>
- ONU. (2015a, septiembre). *Ciudades - Desarrollo Sostenible.* <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>
- ONU. (2015b, septiembre). *Salud - Desarrollo Sostenible.* <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/health/>
- Pérez Asensio, D. (2022). *Algoritmos para resolver un problema real de asignación de centros sanitarios.* <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/187661>
- Python. (s. f.). Recuperado 30 de noviembre de 2023, de <https://docs.python.org/3/tutorial/>
- QGIS. (s. f.). Recuperado 25 de enero de 2024, de <https://qgis.org/es/site/about/index.html>
- Ríos-Mercado, R. Z. (2020). Research trends in optimization of districting systems. *International Series in Operations Research and Management Science*, 284, 3-8. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34312-5_1/COVER
- SESCAM. (s. f.). *Centros de Especialidades.* Recuperado 9 de diciembre de 2023, de <https://sanidad.castillalamancha.es/ciudadanos/servicios-sanitarios/red-hospitalaria-y-centros-de-especialidades-diagnostico-y>
- Solver. (s. f.). Recuperado 30 de noviembre de 2023, de <https://support.microsoft.com/es-es/office/definir-y-resolver-un-problema-con-solver-5d1a388f-079d-43ac-a7eb-f63e45925040>

Spyder. (s. f.). Recuperado 30 de noviembre de 2023, de <https://www.spyder-ide.org/>

Steiner, M. T. A., Datta, D., Steiner Neto, P. J., Scarpin, C. T., & Rui Figueira, J. (2015). Multi-objective optimization in partitioning the healthcare system of Parana State in Brazil. *Omega*, 52, 53-64. <https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2014.10.005>

ANEXOS

ANEXO I: Objetivos de Desarrollo Sostenible implicados



Dada la importancia actual en alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por los líderes mundiales en septiembre de 2015, se ha considerado oportuno vincular el Trabajo Fin de Máster con algunos de los objetivos implicados.

En primer lugar, en términos de importancia, destaca el Objetivo 3 cuya misión es garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades. Específicamente se estaría contribuyendo a la meta 3.8: Lograr la cobertura sanitaria universal, en particular la protección contra los riesgos financieros, el acceso a servicios de salud esenciales de calidad y el acceso a medicamentos y vacunas seguros, eficaces, asequibles y de calidad para todos (ONU, 2015b).

Una asignación más eficiente de la población a los departamentos de salud y, por tanto, a los centros de especialidades y centros sanitarios integrados, mejoraría la calidad de estos servicios al evitar la sobrecarga asistencial. Además, se mejoraría la accesibilidad, ya que la población acudiría al centro más cercano de su lugar de residencia.

El segundo objetivo que podría tener relación con este trabajo es el Objetivo 11. Busca lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles. En concreto, se trabajaría la meta 11.b: aumentar considerablemente el número de ciudades y asentamientos humanos que adoptan e implementan 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 ante los desastres, y desarrollar y poner en práctica, en consonancia 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 (ONU, 2015a).

El uso más eficiente de los recursos se consigue como consecuencia de un reparto equitativo de la población a cada uno de los centros. Tanto los Centros de Especialidades como los Centros Sanitarios Integrados se consideran que son un recurso limitado puesto que no se contempla la construcción de nuevos centros.

ANEXO II: Código de la heurística con Python

Método constructivo:

➤ Bibliotecas

```
import numpy as np #matrices
import pandas as pd #Lectura excel
import random
import networkx as nx
```

Figura 51. Código de Python para las librerías.
Fuente: Elaboración propia.

➤ Matriz de vecinos

```
# Crear una matriz de ceros de tamaño filas x columnas
particiones = np.zeros((filas, columnas))
vecinos = np.zeros((filas * columnas, filas * columnas))

for columna in range(columnas): #Se ha cambiado la formulación. Se introducen por columnas los datos.
    for fila in range(filas):
        indice_actual = columna * filas + fila
        # Vecinos arriba y abajo
        if columna > 0:
            vecinos[indice_actual, indice_actual - filas] = 1
        if columna < columnas - 1:
            vecinos[indice_actual, indice_actual + filas] = 1
        # Vecinos izquierda y derecha
        if fila > 0:
            vecinos[indice_actual, indice_actual - 1] = 1
        if fila < filas - 1:
            vecinos[indice_actual, indice_actual + 1] = 1
```

Figura 52. Código Python para la creación de la matriz de vecinos.
Fuente: Elaboración propia.

➤ Primer paso: primeras asignaciones

```
#Las particiones que tienen centro se asignan directamente
part.loc[centros,'asignados'] = centros
resultado.loc[:, 'capacidad'] = resultado.loc[:, 'capacidad'] - part.loc[centros, 'poblacion']

directos = distancia.iloc[:,centros] #En columnas las distancias de los centros a cada una de las particiones (filas)
directos = directos[~(directos == 0).all(axis=1)] #Se eliminan las filas que son todo 0

long = len(directos)

for a in range(long):
    particion = directos.index[a] #Partición que se va a asignar
    if particion not in centros:
        valpos = directos.iloc[a, :].loc[directos.iloc[a, :] > 0] #Valores superiores a 0.
        colmin = valpos.idxmin() #centro al que se asigna
        part.loc[particion, 'asignados'] = colmin
        resultado.loc[colmin, 'capacidad'] = resultado.loc[colmin, 'capacidad'] - part.loc[particion, 'poblacion']
        distnueva = distancia.iloc[particion, colmin]
        distantes = resultado.loc[colmin, 'distmax']
        if distnueva > distantes:
            resultado.loc[colmin, 'distmax'] = distnueva
```

Figura 53. Código Python para las primeras asignaciones.
Fuente: Elaboración propia.

➤ Segundo paso: asignaciones teniendo en cuenta la distancia

```
def caminomascorto(vecinos, distancia, particion, centros):
    G = nx.Graph()
    # Agregar nodos y aristas al grafo
    for i in range(len(vecinos)):
        G.add_node(i)
        for j in range(i + 1, len(vecinos[i])):
            if vecinos[i][j] == 1:
                G.add_edge(i, j, weight=distancia[i][j])

    # Calcular el camino más corto desde particion hasta los centros
    camcorto = None
    longcamcorto = float('inf')

    for centro in centros:
        camino = nx.shortest_path(G, source=particion, target=centro, weight='weight')
        longcamino = nx.shortest_path_length(G, source=particion, target=centro, weight='weight')
        if longcamino < longcamcorto:
            camcorto = camino
            longcamcorto = longcamino

    return camcorto, longcamcorto
```

Figura 54. Código Python para la función que selecciona el camino más corto desde una partición a varias.
Fuente: Elaboración propia.

```
faltan = part.index[part['asignados'] == 0].to_numpy() #Particiones sin asignar

while len(faltan)>0:
    aleatoria = random.choice(faltan) #selección aleatoria de una partición
    camino, longitud = caminomascorto(vecinos, distancia, aleatoria, centros)
    centro = camino[-1] #Ultimo elemento de la lista es el centro

    long = len(camino)-1 #El centro no es necesario que se contemple en el bucle. Ya está asignado
    for a in range(long): #bucle para asignar todas las particiones que faltan
        particion = camino[a] # Partición utilizada
        asign = part.loc[particion, 'asignados'] # Centro al que pertenece o 0
        if asign == 0:
            part.loc[particion, 'asignados'] = centro
            resultado.loc[centro, 'capacidad'] = resultado.loc[centro, 'capacidad']-part.loc[particion, 'poblacion']
            faltan = np.delete(faltan, np.where(faltan == particion)) #Se elimina del computo
            distantes = resultado.loc[centro, 'distmax'] #Distancia máxima que se tenía para el centro
            if longitud > distantes:
                resultado.loc[centro, 'distmax'] = longitud #Si la nueva es mayor se asigna
```

Figura 55. Código Python para las asignaciones teniendo en cuenta la distancia.
Fuente: Elaboración propia.

➤ Tercer paso: formación de los departamentos

```
def caminocorto(vecinos, distancia, particion, centro):
    G = nx.Graph()

    # Agregar nodos y aristas al grafo
    for i in range(len(vecinos)):
        G.add_node(i)

        for j in range(i + 1, len(vecinos[i])):
            if vecinos[i][j] == 1:
                G.add_edge(i, j, weight=distancia[i][j])

    camino = nx.shortest_path(G, source=particion, target=centro, weight='weight')
    longcamino = nx.shortest_path_length(G, source=particion, target=centro, weight='weight')

    return camino, longcamino
```

Figura 56. Código Python para la función que selecciona el camino más corto desde una partición a otra.
Fuente: Elaboración propia.

```

long = len(incompletos)
for a in range(long):
    depincom = incompletos[a] #Tenemos el número del centro incompleto
    particionesdep = part.index[part['asignados'] == depincom] #Particiones que pertenecen al centro incompleto
    numfil = len(particionesdep) #Cantidad de particiones asignadas al centro
    numcol = len(completos)
    dist = np.zeros((numfil, numcol)) #Se crea una matriz, filas: particiones columnas: centros
    dist = pd.DataFrame(dist) #Se pasa a dataframe
    dist.columns = completos #Nombres de las columnas
    dist.index = particionesdep #Nombres de las filas
    #Bucle para completar el Dataframe con las distancias
    for col in range(numcol):
        for fil in range(numfil):
            camino, longitud = caminocorto(vecinos, distancia, particionesdep[fil], completos[col])
            dist.iloc[fil,col] = longitud

    maximos = pd.DataFrame(dist.max()) #Distancias máximas de las particiones a cada centro
    distcamilejano = maximos[0].min() #Distancia que tiene que recorrer la particion más lejana al centro de salud
    centrocercano = maximos[0].idxmin() #Centro donde la máxima distancia es mínima
    part.loc[particionesdep, 'asignados'] = centrocercano #Nueva asignación
    distantes = resultado.loc[centrocercano, 'distmax'] #Distancia máxima que tiene el departamento actualmente
    if distcamilejano > distantes:
        resultado.loc[centrocercano, 'distmax'] = distcamilejano

    resultado.loc[centrocercano, 'capacidad'] += resultado.loc[depincom, 'capacidad'] #Suma de las capacidades
    resultado = resultado.drop(depincom, axis=0) #Se elimina el departamento que tenía el centro incompleto

```

Figura 57. Código Python para la creación de los departamentos de salud.
Fuente: Elaboración propia.

Método de búsqueda local:

```

resultadobl = resultado.copy()
numiteraciones = 10
for a in range(numiteraciones): #Número de iteraciones
    d = 0
    centromin = resultado['capacidad'].idxmin() #Departamento con la capacidad mínima
    partcentromin = part.index[part['asignados'] == centromin] #Particiones que pertenecen al centro
    partcentromin = np.delete(partcentromin, np.where(partcentromin == centromin)) #La partición con el centro no se puede contemplar

    longpart = len(partcentromin) #Número de posibles particiones.
    for b in range(longpart):
        particion = random.choice(partcentromin) #selección aleatoria de una partición
        vecinospart = vecinos.loc[:,particion] #Vecinos de la partición seleccionada
        vecinoscentro = pd.DataFrame(vecinospart * part.loc[:, 'asignados'])
        vecinoscentro = vecinoscentro.loc[vecinoscentro[0] != 0] #Se quita aquellas particiones que no son vecinas
        vecinoscentro = vecinoscentro.loc[vecinoscentro[0] != centromin] #Se quita las particiones vecinas que pertenecen al mismo centro
        vecinoscentro = vecinoscentro.loc[~vecinoscentro[0].duplicated(keep='first')] #Si hay alguno repetido, solo se necesita uno.

        posiblesasig = len(vecinoscentro)
        for c in range(posiblesasig):
            posiblecentro = vecinoscentro.iloc[c,0] #Centro a los que se puede asignar esa partición.
            resultadobl.loc[centromin, 'capacidad'] = resultado.loc[centromin, 'capacidad'] + part.loc[particion, 'poblacion']
            resultadobl.loc[posiblecentro, 'capacidad'] = resultado.loc[posiblecentro, 'capacidad'] - part.loc[particion, 'poblacion']
            nuevacapacidad = resultadobl['capacidad'].min() #Nueva capacidad mínima con los cambios realizados
            capmin = resultado['capacidad'].min() #Capacidad mínima que se tiene. Negativos: capacidad < asignación
            if nuevacapacidad > capmin: #Si se cumple se actualizan todos los valores.
                part.loc[particion, 'asignados'] = posiblecentro
                resultado['capacidad'] = resultadobl['capacidad']
                print(particion)
                print(posiblecentro)
                print(resultado)
                d = 1
                break

        partcentromin = np.delete(partcentromin, np.where(partcentromin == particion)) #Se elimina del computo
    if d == 1:
        break

```

Figura 58. Código de Python para la búsqueda local.
Fuente: Elaboración propia.

