UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ

FACULTAD DE CIENCIAS SOCIALES Y JURÍDICAS DE ELCHE

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Modelos de optimización combinatoria adaptados al COVID-19

Supervisora: Mercedes Landete Ruiz

Alberto Sancho Campos

Grado en Estadística Empresarial

Curso académico 2020/2021

Convocatoria 2017/2021

Índice general

Capítulo 1

Resumen

Actualmente estamos viviendo una situación muy difícil, donde la pandemia provocada por el COVID-19 nos hace tener que mantener unas restricciones para poder asegurar que la propagación del virus se mantiene y no aumenta masivamente. Por tanto, dadas las restricciones que se han establecido y la situación actual, en este TFG hemos desarrollado modelos relacionados con la asignación y cesión de respiradores, esta cesión será de hospitales que tienen respiradores suficientes a hospitales que necesitan respiradores por falta de ellos. Otro de estos modelos trata sobre la localización de puestos de emergencias y asignación y logística de recursos, donde este modelo planificará las cantidades de varios tipos de suministros, que se coloquen previamente y se determine la ubicación de estos, se haga para que se determine el reparto de respiradores, material sanitario (mascarillas, batas, respiradores) y medicamentos a diferentes hospitales, en condiciones de incertidumbre si ocurriera otra nueva ola de COVID-19. El tercer modelo trata de como se realizaría la vacunación contra el COVID-19 si se realizase tanto en centros médicos y hospitales como farmacias, es decir, que la vacunación se realice en farmacias más centros médicos y hospitales. El cuarto modelo está relacionado con la restricción del distanciamiento social, donde se tiene en cuenta el riesgo que sufren las personas de infectarse en ciertas instalaciones, el tiempo que han pasado estas personas en esas instalaciones y el coste que tendría confinar a las personas y cerrar estas instalaciones. Para finalizar, el último modelo desarrollado es un modelo de máquinas de vectores soporte, donde a raíz de una encuesta que se le haría a personas que han pasado el COVID-19, se haría una clasificación y predicción acerca de si otras personas nuevas que realicen la encuesta una vez han pasado el COVID-19 tienen anticuerpos o no, y poder decir si esas personas serían inmunes.

Capítulo 2

Introducción

La rápida propagación del COVID-19 en todo el mundo ha sido asombrosa, y todo esto ha hecho que nuestras vidas cambien completamente. Desde que empezó la pandemia, hay que seguir una serie de restricciones para que la propagación del COVID-19 sea mínima, ya que, cuando empezó todo, el COVID-19 era nuevo y todo el mundo desconocía de él y de los problemas que acarreaba a las personas una vez que pasabas por él, lo que desembocó en una de las mayores crisis y saturaciones en el sistema sanitario. Uno de los mayores problemas en esta crisis sanitaria fue la escasez de respiradores en los hospitales cuando mayor falta hacían, todos estos problemas se juntaron e hicieron que las UCIS se saturaran y hubiera miles de muertos. Ante todos los problemas que hubo en el sistema sanitario, uno de los modelos desarrollados trata uno de esos problemas fundamentales y primordiales para mantener la vida de muchas personas, la falta de respiradores. Ante esa falta de respiradores, algunos hospitales tenían respiradores suficientes mientras que otros carecían de ellos, por lo que este modelo desarrollado trata de realizar un reparto de respiradores desde los hospitales que tienen suficientes hacia los hospitales que les faltan y necesitan de estos.

Otro de los modelos creados intenta prepararnos ante una nueva ola de este terrible virus, por tanto, este modelo intenta crear la localización de puestos de emergencias y asignación y logística de recursos, donde planificará las cantidades de varios tipos de suministros, que se coloquen previamente y se determine la ubicación de estos, se haga para que se determine el reparto de respiradores, material sanitario (mascarillas, batas, respiradores) y medicamentos a diferentes hospitales, en condiciones de incertidumbre si ocurriera otra nueva ola de COVID-19.

Y conforme fue avanzando el tiempo, se fueron creando vacunas, estas una vez se suministran a las personas crean anticuerpos ante el COVID-19 y hacen que la propagación del virus sea mucho menor y que si una persona infectada está en contacto con otra persona que ha sido vacunada, esta persona no será infectada o si es infectada tendrá menos síntomas y serán mucho más leves. Por tanto, el tercer modelo realizado simula el caso de que la vacunación se realice tanto en centros médicos y hospitales como farmacias, lo que haría que hubiese más sitios donde se realizase la vacunación y que esta fuese más rápida.

Aún existiendo las vacunas, se siguen tomando medidas y restricciones, y una de ellas es el distanciamiento social entre personas, entonces, el cuarto modelo simula la situación de cuando confinamos a personas y cerramos locales, teniendo en cuenta el tiempo que pasan estas personas en esos locales, la probabilidad de ser infectadas en esos locales y los costes que tendría una persona al estar sin confinar y una instalación sin cerrar.

Para finalizar, el último modelo realizado es un Support Vector Machine que clasifica y predice a raíz de la realización de una encuesta si una persona que ha pasado el COVID-19 tendrá anticuerpos y será inmune al COVID-19 o no. Está encuesta la realizan primero 20 personas que han pasado el COVID-19, y apartir de la realización de esas personas, para las siguientes personas encuestadas se intenta realizar una predicción de si estas tendrán anticuerpos o no.

La realización de todos estos modelos tienen como objetivo principal el desarrollo de modelos de optimización combinatoria adaptados a situaciones como la que estamos viviendo actualmente con la pandemia, ya que estos modelos pueden ayudar a la hora de tomar decisiones de si por ejemplo confinar a una persona o no, o la realización de repartos de respiradores de un hospital a otro.

Algunas de las asignaturas relacionadas con la realización y creación de modelos de optimización combinatoria son Técnicas estadísticas en análisis de mercados, Modelos de optimización, Gestión y planificación de la producción y Logística.

Para la realización de todos estos modelos se ha utilizado el software LINGO 18.0 x64.

Capítulo 3

Revisión bibliográfica

Las secciones siguientes son trabajos relacionados con la apertura y asignación de plantas donde se almacenarán productos y se transportarán a zonas donde se prevé que ocurrirá un desastre natural.

El segundo artículo trata sobre como una red de departamentos de emergencia puede cubrir a una población y como de bien la cubre.

El tercer artículo trata de como se determina la ubicación y el tamaño de los departamentos médicos en una red hospitalaria mediante la toma de decisiones de múltiples objetivos.

El cuarto artículo trata sobre la planificación de recorridos multicriterio para instalaciones sanitarias móviles en un país en desarrollo, donde para cubrir a toda la población se hará uso de instalaciones móviles sanitarias.

Por último, el quinto artículo trata sobre la creación de una red integrada de cadena de suministro humanitaria de ubicación, inventario y enrutamiento con consideraciones de gestión antes y después de que ocurra un desastre natural. El desastre natural más frecuente suele ser el terremoto, tanto los terremotos como los demás desastres naturales son muy difíciles de predecir, y los daños que causan estos son desastrosos. Por tanto, este artículo trata de crear una red humanitaria antes y después del desastre, ubicando los almacenes en lugares seguros, donde una vez que ocurra el desastre pueda abastecer de recursos a las personas. De esta manera, los productos estarán bien resguardados para poder enfrentar al desastre natural.

3.1. Pre-positioning of emergency supplies for disaster response

Ante la emergencia de los desastres naturales, el siguiente modelo determinará el reparto de recursos a las diferentes ciudades del mapa, la ubicación y las cantidades de estos suministros de emergencia que se colocarán previamente, en condiciones de incertidumbre acerca de si ocurrirá un desastre natural o dónde ocurrirá.

La idea de este es precisar qué plantas se van a abrir, y cuál va a ser el tamaño de estas. Una vez sabemos qué plantas se van a abrir, se podrá ver la cantidad de recursos y de que recursos se van a transportar de una planta a otra, teniendo en cuenta la demanda de cada una de las plantas. También se tendrá en cuenta si se les dará uso a estos productos, ya que si no se les da uso a estos quedarán almacenados y podrían caducar.

El modelo estará compuesto por los siguientes **conjuntos**:

- I: Ubicación de donde se parte.
- J: Ubicación destino.
- K: Recursos.
- L: Capacidad de la instalación.
- S: Diferente escenarios.

Las siguientes **variables**:

- $$y_{il} = \begin{cases} 1 & \text{si hay una instalación en una ubicación específica} \\ 0 & \text{En caso contrario} \end{cases}$$
- Z_{iks}: Cantidad de productos k que no se le dan uso a la ubicación i en el escenario s.
- X_{ijks}: Cantidad de productos k que transportan desde la ubicación i hacia la ubicación j en el escenario s.
- r_{ki}: Productos k preposicionados en la ubicación i.
- W_{ki}: Demanda de un producto k en la ubicación i que no se puede satisfacer.

Los **parámetros** pertenecientes a este modelo son:

- M_l: Capacidad instalación l.
- F_l: Coste de abrir un tipo de instalación l.
- b_k: Espacio que ocupa un recurso k.
- q_k: Coste de adquisición de una unidad de k.
- h_k: Coste de productos deteriorados k.
- v_{ki}: Demanda del recurso k en la ubicación i.

- c_{ijk}: Coste de transportar una unidad k desde la ubicación i a la ubicación j.
- u_{ij}: Capacidad de transporte de ubicación i a ubicación j.
- P_s: Probabilidad de ocurrencia del escenario s.

Una vez visto los parámetros y las variables, visualizaremos la **función objetivo**:

$$\text{mín} \quad \sum_{i\in I}\sum_{l\in L} F_l y_{il} + \sum_{i\in I}\sum_{k\in K} q_k r_{ki} + \sum_{s\in S} P_s + \sum_{(i,j)\in A} + \sum_{k\in K} c_{ijk}x_{ijk} + \sum_{i\in I}\sum_{k\in K}(h_k z_{kis} + p_k w_{kis})$$

Y las **restricciones** son:

$$\sum_{i\in N} x_{ijks} + p_{iks}r_{ki} - z_{kis} = \sum_{i\in N} x_{ijks} + v_{iks} - w_{iks} \quad \forall i\in N, \forall k\in K, \forall s\in S \tag{3.1}$$

$$\sum_{k\in K} b_k x_{ijks} \le u_{ijs} \quad \forall (i,j)\in A \tag{3.2}$$

$$\sum_{k\in K} b_k r_{ki} \le \sum_{l\in L} M_l y_{il} \quad \forall i\in I \tag{3.3}$$

$$\sum_{l\in L} y_{il} \le 1 \quad \forall i\in I \tag{3.4}$$

La primera restricción conserva el flujo.

La segunda restricción indica la capacidad del arco.

La tercera restricción indica las instalaciones que están abiertas y la capacidad de instalación.

Por último, la cuarta restricción indica el número de instalaciones por nodo.

Este modelo estará resuelto en el apartado Modelos de asignación, Localización puestos de emergencia. Ahí se podrá ver los resultados que daría utilizando este modelo y la comprobación de estos resultados y de la función objetivo.

Referencia: Pre-positioning of emergency supplies for disaster response. (2010, May 1). ScienceDirect. `https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0191261509001118`

3.2. An application and framework for evaluating emergency department networks using location analysis and geographic information systems

En este artículo utilizamos modelos científicos de ubicación fundamental para evaluar qué tan bien una red de departamentos de emergencia SU (sala de urgencias) cubre a una población e investigar una serie de cambios realistas.

Los departamentos de emergencia SU (sala de urgencias) son a menudo las primeras instalaciones físicas que visita un paciente en caso de una emergencia de salud, como un ataque cardíaco, un derrame cerebral o un trauma mayor. Existen como parte de una red integrada más grande de atención de emergencia que incluye servicios médicos de emergencia EMS (servicios médicos de emergencia), que consta de paramédicos, ambulancias y un centro de comunicaciones / despacho, servicios de urgencias y otros recursos de salud de atención aguda en el hospital.

Sin embargo, en áreas rurales con problemas de acceso a la atención primaria, junto con algún "tiempo de inactividad"para el personal en los de bajo volumen, esto se convierte en una opción más razonable, e incluso puede hacer que ese tipo de SU (sala de urgencias) sea más rentable. Asimismo, los sistemas de servicios de salud quieren asegurar que estas instalaciones estén ubicadas en el lugar correcto en relación con el sistema más amplio para que la atención esté disponible cuando y donde se necesite y que la red en su conjunto complemente y apoye cada nodo de una manera sostenible que no compromete los resultados importantes del paciente.

Determinar si una red de servicios de urgencias brinda una buena cobertura es un desafío y puede considerarse desde múltiples perspectivas, incluida la de un ingeniero de sistemas, un paciente (o un investigador de resultados de pacientes) y una perspectiva de equidad / ética en la salud.

La distancia que un ciudadano debe viajar hasta un centro médico es una métrica posible, pero requiere interpretación. La optimización de la ubicación de las instalaciones para lograr medidas de buena cobertura se logra típicamente con modelos de ciencia de ubicación. Un desafío en la ciencia de la ubicación es definir los parámetros del modelo (por ejemplo, distancias, instalaciones y demandas) de una manera que sea representativa del problema, dé como resultado un modelo manejable y tenga datos disponibles.

En este artículo nos enfocamos en cómo los modelos de ciencia de ubicación combinados con SIG pueden usarse para medir de manera integral las configuraciones existentes de centros médicos. La contribución de este trabajo se encuentra principalmente en la aplicación de modelos de ubicación fundamentales, cómo se pueden extraer los datos de estos modelos para representar el mundo real y cómo los resultados de estos modelos pueden informar y evaluar las redes de los establecimientos de salud.

Los problemas de MINISUM colocan las instalaciones en ubicaciones tales que la suma de la distancia entre todas las instalaciones y todos los clientes se minimiza. Hay variantes del problema MINISUM, pero lo que más nos interesa es el problema p-mediano clásico (PMP). El objetivo es ubicar las instalaciones P_{ij} en ubicaciones potenciales de instalaciones $j \in J$ para minimizar la distancia total ponderada desde las demandas $i \in I$ hasta su instalación más cercana.

El **modelo** será el siguiente:

$$\text{mín} \qquad \sum_{i\in I}\sum_{j\in J} w_i d_{ij} x_{ij}$$

Y las **restricciones** son:

$$x_{ij}y_{ij} = P \quad \forall i \in I, \forall j \in J \tag{3.5}$$

$$\sum_{j \in J} y_j = P \tag{3.6}$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \qquad \forall i \in I \tag{3.7}$$

Donde w_i es el peso del punto demandado, d_{ij} es la distancia desde la demanda i hasta j.

Las **variables** son:

- $$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la demanda i es asignada a la instalación j} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

- $$y_j = \begin{cases} 1 & \text{si la instalación es localizada en j} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

$D_i = min_j d_{ij}$ donde D_i es definida como la distancia entre el punto demandado i y la instalación, que es el centro médico.

Si utilizamos otra modelización distinta para el mismo problema, las **variables** de esta modelización son:

- $$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si al paciente del punto i se le ha asignado en el punto j} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

- $$y_j = \begin{cases} 1 & \text{si la instalación está ubicada en el punto j} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Los **parámetros** de este modelo son:

- w_i: Es el peso de la demanda en cada punto i.
- d_{ij}: Es la distancia desde el demandante i hasta el punto j.

Una vez visto los parámetros y las variables, visualizaremos la **función objetivo**:

$$\text{mín} \qquad \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} w_i d_{ij} x_{ij}$$

Y las **restricciones** son:

$$\sum_{j \in J} y_j = P \tag{3.8}$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \tag{3.9}$$

$$x_{ij} \leq y_{ij} y_{il} \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J \tag{3.10}$$

$$\sum_{l \in L} y_{il} \leq 1 \quad \forall i \in I \tag{3.11}$$

Como **conclusión** al artículo, podemos ver que este documento presenta un marco basado en la ciencia de la ubicación y SIG para medir que tan bien una red de departamentos de emergencia cubre a una población. La demanda de atención de emergencia se modeló utilizando DA de Statistics Canada. Los DA son una medida estándar y de fácil acceso que hace que el marco se pueda ampliar fácilmente en todo Canadá y sea fácil de actualizar a medida que se publican nuevos datos del censo.

Un supuesto del modelo es que la demanda es proporcional a la densidad de población. Como tal, el volumen y el tipo de servicios de emergencia requeridos pueden variar en diferentes zonas de la provincia. Tener en cuenta los datos demográficos y del estado de salud (edad, prevalencia de enfermedades, etc.) en diferentes áreas geográficas de la provincia permitirá que la red esté más ajustada a las necesidades de la comunidad. La demanda también puede variar estacionalmente cuando un área rural específica se convierte en un destino popular para los vecinos y turistas; de nuevo, algo que se puede modelar con este marco.

Una limitación de este estudio es que las variaciones en la capacidad médica y la capacidad de volumen de los ED (departamento de emergencias) no se consideran al modelar la asignación de DA a las instalaciones. Esto es razonable dado que en NS (departamento de emergencias de Nueva Escocia) se espera que todos los ED (departamento de emergencias) de servicio completo las 24 horas del día, los 7 días de la semana, cumplan con los estándares provinciales mínimos de equipo, personal y mantenimiento de competencia, y los protocolos de destino de viaje de EMS (servicios médicos de emergencia) ya tienen (de ED más pequeños con respaldo menos especializado) directrices para ataques cardíacos, accidentes cerebrovasculares y traumatismos graves. Para los pacientes de atención menos urgente y que no son de ambulancia, pueden considerar los tiempos de espera esperados al decidir a que centro ir y esto está influenciado dinámicamente por la capacidad y la demanda del ED (departamento de emergencias).

La metodología utiliza modelos científicos de ubicación fundamental con parámetros derivados de fuentes públicas y SIG.

Referencia:

An application and framework for evaluating emergency department networks using location analysis and geographic information systems. (2020b, November 1). ScienceDirect. `https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835220304800`

3.3. Determining Location and Size of Medical Departments in a Hospital Network: A Multiobjective Decision Support Approach

Las decisiones sobre la ubicación y el tamaño de los departamentos médicos en una red hospitalaria determinada son ejemplos principales de establecimiento de prioridades en la atención de la salud, que es un tema de creciente importancia política. Dado que estas decisiones se caracterizan habitualmente por objetivos múltiples y, a menudo, contradictorios en la vida real, este artículo integra los campos de la planificación hospitalaria y el apoyo a la toma de decisiones con múltiples objetivos.

El modelo busca soluciones eficientes por medio de la búsqueda multiobjetivo en la primera fase, mientras que en la segunda fase aplica la agrupación en clústeres para permitir que los tomadores de decisiones exploren interactivamente el espacio de la solución hasta que se determine la mejor configuración.

Lo que tienen en común la mayoría de los modelos de ubicación y asignación es el papel predominante que se asigna a los "*costes*" de los pacientes para llegar al hospital, ya sea en términos de distancia o tiempo de viaje. La toma de decisiones de ubicación-asignación debe basarse en enfoques de apoyo a la toma de decisiones con múltiples objetivos.

Debido a que este gran conjunto de alternativas incluye muchas que son inviables o están dominadas, nuestra primera tarea debe ser filtrar soluciones eficientes de ubicación y asignación. Tales soluciones se clasifican como eficientes (es decir, óptimas de Pareto) si no hay otra solución factible que sea al menos tan buena como la actual. Uno con respecto a todos los criterios y es estrictamente mejor porque existe al menos un objetivo. En nuestro modelo, este proceso de filtrado se produce sobre la base de los siguientes cuatro objetivos.

Para realizar las funciones objetivos, tenemos los siguientes **conjuntos**:

- J: Representa el número de departamentos diferentes.
- I: Representa el número de hospitales de la red.
- T: Representa el horizonte de planificación.

Las **variables** utilizadas son:

- x_{ij}: Mide en unidades de planificación.
- c_{ij}: Representa la unidad de planificación que consta de camas. Hay que tener en cuenta que permitir $c_{ij} \geq 1$ como incremento de planificación asegura opciones de tamaño más realistas que la suposición habitual de $c_{ij} = 1$ con x_{ij} como el número de camas.

- p_{ijt}: Es el número de pacientes que solicitan servicios de tipo j en un hospital i en un momento t. Obviamente depende del vector x, que informa si en el hospital i se encuentra o no un departamento correspondiente de este tipo j.

- g_{ijt}: Número de pacientes que tendrían que ser rechazados en el departamento j del hospital i en el momento t como consecuencia de la baja capacidad de servicio.

Una vez definidas las variables, las **funciones objetivos** serán las siguientes:

La primera función objetivo se refiere a los gastos totales de viaje de los pacientes, factor cuya importancia es ampliamente reconocida para las organizaciones de servicios en general y para los hospitales en particular.

El coste percibido de viajar no es necesariamente de naturaleza económica y puede incluir, entre otros, costes de transporte, costes de oportunidad y costes de salud asociados con no llegar a tiempo a un hospital en caso de una emergencia.

Por tanto, la primera función objetivo será la siguiente:

$$\text{mín} \qquad \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} d_{ijt}(x) p_{ijt}(x)$$

Nuestra versión básica del modelo se implementa de una manera bastante sencilla, ya que asumimos que todos los departamentos brindan la misma calidad de servicios.

Además, nuestro modelo no envía a los pacientes a otro hospital si la demanda de servicios de atención médica excede (temporalmente) la capacidad del hospital, en cambio, sanciona tal escasez de capacidad con puntos de penalización por cada cama demandada pero no disponible (sale en la tercera función objetivo), por tanto, una escasez permanente de camas resulta en un alto valor de penalización que hace que sea bastante improbable que el tomador de decisiones seleccione esta solución particular de ubicación-asignación en la fase de decisión interactiva posterior.

La segunda función objetivo aborda los costes totales asociados con un plan hospitalario de ubicación-asignación, que también juega un papel esencial. Nuestro marco asume que el número total de camas es un indicador adecuado para estos costes y, por lo tanto, busca minimizar la función f2 (x):

$$\text{mín} \qquad \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} c_{ij}(x)$$

Esta función contiene las posibles extensiones donde incluyen costes fijos, diferentes costes de camas en diferentes tipos de departamentos o incluso funciones de costes bastante complejas teniendo en cuenta la variación, la mayoría de las veces, los costes marginales decrecientes.

La tercera función objetivo f3 (x) se refiere al número de pacientes g_{ijt} (x) que tendrían que ser rechazados en el departamento j del hospital i en el momento t como consecuencia de la baja capacidad de servicio (es decir, escasez de camas). Tenga en cuenta que, en la práctica, es posible un aumento limitado de la capacidad a corto plazo. No obstante, los tomadores de decisiones buscarán prevenir estas situaciones y, en consecuencia, minimizar:

$$\text{mín} \qquad \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} g_{ij}(x)$$

Siendo g_{ijt}:

$$\text{máx} \left(\frac{p_{ijt}(x) l_{ijt}(x) r_{ij}(x_{ij}) - x_{ij} c_{ij} L}{l_{ijt}(x)}; 0 \right)$$

Donde **L** representa la duración de un período determinado (por ejemplo, L = 30 días en caso de que las demandas de los pacientes se hayan agregado mensualmente).

La función r_{ij} depende de x_{ij} porque los departamentos más grandes generalmente requieren menos capacidad de reserva proporcional que los más pequeños. Además, los distintos tipos de departamentos hospitalarios experimentarán diferentes niveles de fluctuación en la demanda (por ejemplo, los departamentos quirúrgicos tienen más admisiones planificadas que los departamentos de medicina interna).

La función objetivo final modela el número de movimientos de unidades necesarios para reestructurar la asignación actual y, por lo tanto, sirve como indicador del grado de resistencia potencial que los administradores del hospital y / o los médicos destacados podrían mostrar hacia la implementación del nuevo plan hospitalario. La función objetivo correspondiente f4 (x) toma la forma:

$$\text{mín} \qquad \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} h(x_{ij})$$

Donde h_{ij}:

$$\text{máx}\{e_{ij} - x_{ij}; 0\}$$

Y e_{ij} representa el número de unidades existentes en el plan actual. La función $h(x_{ij})$ puede modificarse para tener en cuenta el tamaño actual de los departamentos, ya que el efecto de retirar una unidad de un departamento grande será menor que hacer lo mismo con un departamento muy pequeño que ya está compuesto de solo dos unidades.

Las cuatro anteriores funciones objetivo están unidas a 4 **restricciones**, un primer grupo se refiere al espacio limitado de los hospitales, que nuestro marco básico mide en términos de camas. Por tanto, las condiciones:

$$\sum_{j \in J} x_{ij} c_{ij} \leq C_i \quad \forall i \in I$$

Donde C_i representa el número máximo de camas disponibles en el hospital i.

En el segundo grupo de restricciones refleja limitaciones C_{ij} a nivel departamental. Están modelados por las desigualdades correspondientes:

$$x_{ij} c_{ij} \leq C_{ij} \quad \forall i \in I, \forall j \in J$$

El tercer grupo de restricciones asegura que la capacidad general del servicio sea suficiente dentro de la red:

$$\sum_{i \in I} x_{ij} c_{ij} \geq \sum_{i \in I} p_{ijt}(x) l_{ijt}(x) r_{ij}(x_{ij}) \quad \forall j \in J, \forall t \in T$$

Donde el lado izquierdo de la desigualdad indica la oferta total del servicio j y el lado derecho se refiere a la demanda total para j en el tiempo t.

Por último:

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J$$

En **conclusión**, con este modelo se logra determinar la ubicación y el tamaño de los departamentos médicos dentro de una red hospitalaria, ya es de considerable relevancia en los Estados Unidos y también se está volviendo cada vez más importante para Europa. El enfoque propuesto aplica un procedimiento de búsqueda tabú multiobjetivo para identificar alternativas eficientes y luego permite a los tomadores de decisiones explorar interactivamente el espacio de solución correspondiente a través del análisis de clúster iterativo. La novedad del enfoque se puede atribuir en gran medida a esta combinación y su aplicación a la ubicación-asignación de los servicios de salud. Este trabajo puede contribuir directamente a la planificación estratégica del hospital proporcionando escenarios y análisis hipotéticos. Al hacerlo, permite evaluar las implicaciones de varias estrategias en competencia y elegir la que producirá el patrón de atención más atractivo. Esta forma de integración es de particular importancia, porque la experiencia muestra que los tomadores de decisiones que no se han involucrado adecuadamente con frecuencia no están dispuestos a aceptar las soluciones propuestas por las herramientas de optimización ordinarias debido a razones políticas".

La simplificación del problema al agregar los flujos de pacientes por mes, la alta complejidad numérica involucrada todavía limita el modelo con respecto al número de hospitales y / o al número de diferentes tipos de servicios que se pueden tener en cuenta. En consecuencia, el enfoque en su forma actual es adecuado para la planificación dentro de una red hospitalaria local, pero estará sobrecargado para regiones más grandes. En primer lugar, el modelo se puede adaptar a situaciones de problemas específicos, por lo que se incluyen varios componentes no lineales adicionales. Para dar un ejemplo: se podría modificar el modelo para reflejar el hecho de que la elección de un determinado hospital no depende únicamente de la distancia (o el tiempo) de viaje, sino también de otros factores como el tamaño, el precio por día o por grupo relacionado con el diagnóstico.

Además, las configuraciones que minimizan la suma de las distancias de viaje ponderadas pueden no ser equitativas, porque pueden obligar a algunos usuarios a viajar lejos. Además, se ha observado con frecuencia que la utilización de las instalaciones de servicio disminuye rápidamente cuando el tiempo de viaje excede algún valor crítico (esta es una situación típica con el uso de instalaciones rurales en países en desarrollo). Por lo tanto, otra extensión del modelo podría considerar la distancia máxima o las limitaciones de tiempo. Es necesario evaluar las respuestas competitivas a los nuevos servicios al formular la estrategia de la red hospitalaria. Los cambios potenciales en la demografía, el aumento de las expectativas por parte de los clientes o los desarrollos en la provisión de atención sugieren una toma de decisiones simultánea, en lugar de secuencial.

Referencia:

Stummer, C. (2004, 1 febrero). Determining Location and Size of Medical Departments in a Hospital Network: A Multiobjective Decision Support Approach. Health Care Management Science. `https://link.springer.com/article/10.1023/B:HCMS.0000005399.23600.69?error=cookies_not_supported&code=a3cb39ac-79f1-4848-8d3a-26402947fd75`

3.4. Multicriteria tour planning for mobile healthcare facilities in a developing country

Se proporciona una formulación de optimización combinatoria multiobjetivo (MOCO) para el siguiente problema de enrutamiento de ubicación en la gestión de la atención médica: para una instalación de atención médica móvil, se debe encontrar un recorrido cerrado con paradas seleccionadas de un conjunto dado de nodos de población. Los recorridos se evalúan de acuerdo con tres criterios: (1) un criterio de eficiencia económica relacionado con la duración del recorrido, (2) el criterio de distancias promedio a las paradas más cercanas del recorrido correspondientes a las formulaciones de problemas de ubicación p-mediana, y (3) un criterio de cobertura para medir el porcentaje de la población que no puede llegar a una parada del tour dentro de una distancia máxima predefinida.

Los países en desarrollo se enfrentan con frecuencia al dilema de limitaciones presupuestarias muy restrictivas para los gastos de salud y una población en crecimiento. En tal situación, la provisión de instalaciones sanitarias rentables se vuelve particularmente importante. La distancia resultó ser uno de los factores que más influyen en la utilización de las instalaciones sanitarias. En los países desarrollados y principalmente en las zonas urbanas, la distancia influye más bien en la decisión sobre qué tipo de servicios médicos (p. Ej., Un médico o un hospital) utilizan los pacientes, mientras que en las zonas rurales de los países en desarrollo, la distancia es el factor decisivo si utilizar o no los servicios médicos. Por lo tanto, en estas regiones, la provisión de instalaciones médicas cerca de las residencias de las personas se vuelve crucial para una atención médica adecuada. Algunos gobiernos también contemplan la alternativa de utilizar instalaciones médicas móviles como una posible forma de proporcionar atención médica primaria rentable bajo las limitaciones presupuestarias. Uno de los propósitos de estas unidades móviles es lograr el mismo efecto que construyendo instalaciones, de esta manera se ahorrarían los costes de construcción, aparte de que estas pequeñas unidades móviles pueden desplazarse y ofrecer servicio a personas de un amplio radio. Estas unidades móviles no pueden ofrecer los mismos servicios que un hospital (en cuanto a especialidades), pero si pueden considerarse complementarios a otros servicios médicos. El equipo médico generalmente no cumplirá con estándares muy avanzados, pero los servicios médicos básicos se pueden ofrecer con un alto nivel de calidad.

Ya en el caso de las instalaciones fijas, la cuestión de dónde se deben construir y cómo se debe dotar de personal es un problema de planificación difícil. Varios tipos de modelos de ubicación y asignación apuntan a un soporte de decisión para esta pregunta basado en datos cuantitativos. En el caso de una o más instalaciones de salud móviles, el problema de planificación se vuelve aún más complejo, ya que tanto los recorridos como las paradas en los recorridos deben seleccionarse de una manera que satisfaga diferentes criterios, siendo la rentabilidad (influenciada por las distancias de viaje) uno de ellos, y otros como la accesibilidad y la cobertura.

En el caso de nuestro problema, se deben tener en cuenta al menos los siguientes tres criterios (posiblemente incluso más): (1) Efectividad del empleo de la fuerza laboral, medida por la relación entre el tiempo de trabajo médico y el tiempo total de trabajo, incluido el tiempo de viaje. (2) Accesibilidad promedio, medida por un tiempo promedio bajo requerido por los habitantes de la región considerada para llegar a la parada turística más cercana o la instalación estacionaria más cercana. (3) Cobertura, expresada por el porcentaje de habitantes que viven dentro de una distancia máxima a pie determinada hasta una parada turística o una instalación estacionaria. En cierto sentido, esta definición de cobertura apunta al aspecto de equidad (o justicia) de la accesibilidad: en la medida de lo posible, ningún ciudadano debe ser excluido en absoluto de los servicios médicos por una distancia extraordinaria a la instalación más cercana.

Ahora pasaremos a plantear el modelo, que en este caso, será un modelo p-mediana de ubicación de cobertura máxima (MCLP).

Limitémonos al caso de una única instalación móvil (MF, mobile facility). Además, asumimos aquí que el suministro médico para la región considerada debe ser entregado exclusivamente por el MF (instalación móvil), sin el apoyo de hospitales o dispensarios fijos. Usamos la siguiente descripción del modelo formal para representar el problema:

En una instancia del problema se basa en un gráfico G=(W,E), donde los nodos $v_i \in W$ son asentamientos (centros de población de cualquier tipo, desde ciudades hasta pueblos muy pequeños) y los bordes $e_l \in E$ son enlaces de tráfico (carreteras o caminos) entre estos asentamientos. Un borde e_l se puede representar como el par (v_i, v_j) de los dos nodos incidentes. En cada asentamiento $v_i \in W$ vive una población de habitantes p_i. La suma de los valores p_i es el número total de habitantes, N.

Un subconjunto $V \subseteq W$ contiene las paradas potenciales del MF (instalación móvil). Sin pérdida de generalidad, los nodos $v_i \in W$ pueden etiquetarse de tal manera que los nodos en V obtengan los índices más bajos: $V = v_1, ..., v_{|v|}$ y $W = v_1, ..., v_{|w|}$ con $|V|$ y $|W| \geq |V|$ denotando el número de elementos en V y W, respectivamente. La distancia más corta entre dos nodos $v_i \in W$ y $v_j \in W$ es d_{ij} kilómetros, el tiempo de conducción más corto del MF entre dos nodos $v_i \in V$ y $v_j \in V$ es c_{ij} horas.

El intervalo de tiempo durante el cual el MF (instalación móvil) realiza su recorrido (cerrado) se denomina período. El número de días de un período se considera una constante determinada y fijada de antemano. Forma un aspecto de la calidad del servicio y no debe fijarse en un valor demasiado alto, de lo contrario no se garantizaría la continuidad del tratamiento médico.

La variable de decisión es el recorrido elegido (cerrado),

$\pi = (\pi(1), ..., \pi(k))$,

donde $\pi(j)$ es el índice del j-ésimo nodo visitado ($v_{\pi(j)} \in V; j = 1, ..., k$), y después de visitar el nodo $\pi(k)$ el MF vuelve al nodo de inicio $\pi(1) = 1$. A diferencia del conocido problema del vendedor ambulante (TSP) o de la mayoría de los tipos de problemas de generación de rutas de vehículos (VRP), no todos los nodos $v_i \in W$ necesita ser parte de la gira.

El número de paradas del tour es $k = k(\pi)$. Por lo tanto, el tiempo total de conducción durante el recorrido viene dado por:

$t(\pi) = \sum_{j=1}^{k-1} c_\pi(j), \pi(j+1) + c_{\pi(k)}, 1$

Los siguientes **parámetros** constantes se utilizan como datos de entrada:

- T: Tiempo total de trabajo de un miembro del personal de MF durante el período (expresado en horas).
- μ: Tiempo para la instalación del MF (instalación móvil) en una parada por miembro del personal del MF (expresado en horas).
- M: Límite superior para una distancia aceptable a pie hasta la parada más cercana (en kilómetros), según lo definido por el responsable político.

Las variables utilizadas son:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } v_j \text{ es sucesor de } v_i \text{ en el tour } \pi \\ 0 & \text{En caso contrario} \end{cases}$$

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{si } v_i \text{ se selecciona como parada del tour} \\ 0 & \text{En caso contrario} \end{cases}$$

$$z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si el nodo de población } v_i \text{ es abastecido por un tope en } v_j \\ 0 & \text{En caso contrario} \end{cases}$$

$$u_i = \begin{cases} 1 & \text{si el nodo de población } v_i \text{ está cubierto a distancia } M \\ 0 & \text{En caso contrario} \end{cases}$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } d_{ij} \leq M \\ 0 & \text{En caso contrario} \end{cases}$$

Por tanto, el modelo será el siguiente:

$$\text{mín} \qquad \sum_{v_i, v_j \in V, i \not j} c'_{ij} x_{ij}, \sum_{v_i \in W} p_i \sum_{v_j \in V} d_{ij} z_{ij}, - \sum_{v_i \in W} p_i u_i$$

Y las restricciones son:

$$\sum_{v_j \in V} x_{ij} = y_i \qquad (v_i \in V) \tag{3.12}$$

$$\sum_{v_i \in V} x_{ij} = y_j \qquad (v_j \in V) \tag{3.13}$$

$$\sum_{v_i \in S, v_j \in V/S} x_{ij} \geq y_t y_{il} \quad (S \subset V, v_1 \notin S, v_t \in S) \tag{3.14}$$

$$\sum_{v_j \in V} z_{ij} = 1 \qquad (v_i \in W) \tag{3.15}$$

$$y_j - z_{ij} \geq 0 \qquad (v_i \in W, v_j \in V) \tag{3.16}$$

$$\sum_{v_j \in V} a_{ij} y_j \geq u_i \qquad (v_i \in W) \tag{3.17}$$

El primer componente de la función objetivo Z_1, representada por medio de los costos modificados c'_{ij} introducidos después de la ecuación. El segundo componente es la función objetivo Z_2, multiplicado por N. El tercer componente se obtiene de la función objetivo Z_3 multiplicando primero Z_3 por N y luego restando la constante N del resultado.

Las condiciones (3.12) y (3.13) aseguran que cada nodo del tour tenga exactamente un sucesor y un predecesor, y que los nodos fuera del tour no tengan sucesores ni predecesores. Las condiciones (3.14) son las restricciones habituales de eliminación de subtour para el TSP (problema del vendedor ambulante), aplicadas a las paradas del tour. Las condiciones (3.15) y (3.16) juntas aseguran que cada nodo de población sea abastecido por una parada turística. La condición (3.17) establece que un nodo de población solo puede ser cubierto dentro de la distancia M por un nodo si este nodo está dentro de la distancia M y se elige como parada del recorrido, está última restricción haría referencia a la cobertura expresada por el porcentaje de habitantes que viven dentro de una distancia máxima a pie determinada hasta una parada turística o una instalación estacionaria, que en la medida de lo posible, ningún ciudadano debe ser excluido en absoluto de los servicios médicos por una distancia extraordinaria a la instalación más cercana.

Como **conclusión** a este modelo, hemos proporcionado una formulación de optimización combinatoria multiobjetivo (MOCO) para un problema de enrutamiento de ubicación en la gestión de la atención médica. Los recorridos se evalúan de acuerdo con los siguientes tres criterios: (i) un criterio de eficiencia económica que puede expresarse como un promedio ponderado del número de paradas del recorrido y la duración del recorrido, (ii) el criterio p-mediano de las distancias promedio al más cercano paradas del tour, y (iii) un criterio de cobertura que mide el porcentaje de la población que no puede llegar a una parada del tour dentro de una distancia máxima predefinida.

Se han desarrollado tres algoritmos para calcular aproximaciones al conjunto de soluciones Paretoeficientes del problema MOCO descrito. El primero utiliza la técnica P-ACO y realiza la selección de las paradas del tour y la construcción del tour simultáneamente, mientras que el segundo y el tercero utilizan las variantes VEGA y MOGA, respectivamente, de enfoques de algoritmo genético para MOCO, y realizan la selección de paradas del tour en un nivel de procedimiento superior y construcción de recorrido en un subprocedimiento de 2 opciones. A partir de la evaluación comparativa de las soluciones, nos inclinamos a sugerir una combinación de P-ACO y MOGA como una técnica prometedora para proporcionar al tomador de decisiones políticas un conjunto adecuado de buenos candidatos a la solución. Las instalaciones sanitarias fijas existentes no se han incluido en la consideración. Por esta razón, la formulación de implicaciones políticas concretas está fuera del alcance de este estudio. Sin embargo, ya se pueden sacar algunas conclusiones cautelosas. Por supuesto, estos supuestos deben discutirse, pero creemos que los resultados indican que al menos la suplementación de las estaciones médicas fijas localmente con unidades de salud móviles debe tenerse en cuenta como una medida posiblemente útil cuando se pretende ampliar el acceso al servicio médico en un país con un presupuesto sanitario bajo. Las ventajas de las unidades móviles deberán compensarse con desventajas evidentes, por ejemplo, la falta de atención continua a los pacientes por parte del personal médico. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que mediante una combinación adecuada entre la política "estacionaria" y la "móvil", el sistema puede ajustarse a las necesidades particulares de un país concreto. Puede ser preferible complementar los hospitales estacionarios o las estaciones de atención médica con unas pocas unidades móviles que brinden atención.

En primer lugar, por supuesto, debería descartarse el supuesto antes mencionado de cobertura mediante instalaciones móviles, ya que el suministro médico en el área considerada no será proporcionado exclusivamente por unidades de salud móviles. En su lugar, también deben tenerse en cuenta las instalaciones estacionarias existentes (o previstas). Por lo tanto, sería deseable incluir la oferta entregada por las instalaciones fijas explícitamente en el modelo, lo que requiere una generalización esencial (aunque bastante sencilla) de la formulación del modelo.

En segundo lugar, los resultados de los estudios sobre el efecto de la distancia entre el hogar y los establecimientos de salud deben utilizarse para perfeccionar el modelo.

En tercer lugar, un criterio de disponibilidad (influenciado por horarios de apertura, relación entre demanda y oferta, colas, tipos de enfermedades, medicamentos y médicos) debe entrar en el modelo como cuarto objetivo. En nuestro modelo en su forma actual, la duración total del recorrido se fija de antemano y la distribución de la duración de la estancia de la instalación móvil a las paradas individuales del recorrido se deja abierta. Evidentemente, la duración de la estancia tiene una influencia significativa en la calidad del servicio, pero esta pregunta se enfrenta a una compensación: las estancias prolongadas facilitan la reducción de colas y mejoran el servicio, pero por otro lado, también aumentan el tiempo total para un ciclo de el recorrido. Así, también las duraciones deben ser consideradas como variables de decisión a optimizar, preferiblemente en base a datos estadísticos sobre demandas y con la ayuda de un modelo estocástico adecuado.

Finalmente, los datos de los pacientes deben clasificarse según la gravedad de sus enfermedades. En nuestro marco básico, asumimos que no solo el recorrido elegido en sí, sino también la duración de la estancia se fijan de antemano (de lo contrario, las personas no podrían confiar en reunirse con el MF en una fecha conocida). Sin embargo, puede tener sentido admitir excepciones, incluida la posibilidad de cambiar el recorrido, dependiendo de la ocurrencia de casos de emergencia. Esto podría conducir a distancias más largas o tiempos de espera para pacientes que no son de emergencia, pero salvará la vida de varios pacientes de emergencia.

Referencia:

Multicriteria tour planning for mobile healthcare facilities in a developing country. (2007, June 16). ScienceDirect. `https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221706000774`

3.5. An integrated location-inventory-routing humanitarian supply chain network with pre- and post-disaster management considerations

La eficiencia es un factor clave de éxito en las redes complejas de la cadena de suministro. Es imperativo garantizar el flujo adecuado de bienes y servicios en las cadenas de suministro humanitarias en respuesta a un desastre. Para ello, proponemos una red logística humanitaria de escalones múltiples que considera la ubicación de los almacenes centrales, gestiona el inventario de productos perecederos en la fase previa al desastre y enruta los vehículos de socorro en la fase posterior al desastre. Se propone un método de restricción épsilon, un algoritmo genético de clasificación no dominado (NSGA-II) y un NSGA-II modificado llamado algoritmo genético de clasificación no dominado basado en puntos de referencia-II (RPBNSGA-II) para resolver este entero lineal mixto con programación (MILP).El análisis de varianza (ANOVA) se utiliza para analizar los resultados que muestran que NSGA-II funciona mejor que los otros algoritmos con problemas de tamaño pequeño, mientras que RPBNSGA-II supera a los otros algoritmos con problemas de tamaño grande.

Los desastres naturales siempre han formado parte de nuestras vidas. A pesar de los avances científicos y tecnológicos, es muy difícil prevenir estos sucesos. Los terremotos son los más frecuentes de todos los desastres naturales. Los efectos de fuertes terremotos pueden ser destructivos. Incluso si miles de estaciones de sismógrafos conectadas y en red están instaladas en todo el mundo, y los datos recopilados son analizados continuamente por computadoras potentes, todavía no podemos pronosticar la hora y ubicación exactas de los terremotos. Entonces, una de las grandes dudas es si los métodos científicos pueden prevenir estos desastres y las pérdidas y destrozos que se llevan a cabo. Es por eso que uno de los objetivos de alta prioridad de las autoridades locales y las organizaciones de ayuda es crear una red de ayuda humanitaria para preparar a la ciudad para hacer frente a los terremotos. Parte de esta preparación consiste en diseñar una red de alivio caracterizada por una estructura de dos niveles: almacenes centrales y centros de distribución local.

Los almacenes centrales, con alta capacidad de almacenamiento, deben ubicarse en lugares seguros y alejados de las áreas de fallas sísmicas. Los centros de distribución pueden estar ubicados en lugares públicos como escuelas, hospitales y mezquitas, generalmente distribuidos por toda la ciudad. Para estar siempre preparados para enfrentar un terremoto o un desastre natural, en ausencia de un número adecuado de almacenes centrales, algunos de los lugares públicos y generales existentes se pueden utilizar alternativamente como almacenes centrales. En logística humanitaria, las principales acciones deben tomarse dentro de las primeras 72 horas posteriores al terremoto. Las primeras 12 horas que siguen al desastre son cruciales. Un sistema logístico humanitario eficaz y eficiente deben minimizar las bajas humanas enviando y entregando productos de socorro, es decir, la asignación rápida de elementos cruciales y vitales es un objetivo de alta prioridad en la respuesta inicial a un evento catastrófico, así los centros de distribución locales tienen menor capacidad que los almacenes centrales. Es necesario crear un modelo capaz de brindar las mejores posiciones para los almacenes centrales entre las áreas designadas, determinar la capacidad de los almacenes centrales y, al mismo tiempo, presentar la mejor política de pedidos para reponer y restaurar los productos perecederos antes de que ocurra un evento catastrófico. Después de determinar la ubicación de los almacenes centrales y el plan de control de inventario, dependiendo de la posición de las áreas dañadas, el modelo debería poder entregar el mejor plan de distribución de socorro para minimizar el tiempo y costo relacionados con las operaciones de socorro.

El modelo propuesto en este estudio tiene en cuenta los problemas y limitaciones dictados por la necesidad de encontrar la ubicación correcta para los almacenes centrales y realizar un control de inventario de productos perecederos antes de que ocurra el desastre. Las redes de socorro y rescate humanitario están diseñadas sobre la base de un problema matemático de programación lineal de enteros mixtos (MILP). Para resolver el modelo y determinar los valores de las variables de decisión, se utilizó el método Epsilon-Constraint para resolver problemas de pequeño tamaño. Por lo tanto, el problema se codificó y resolvió ejecutando dos algoritmos metaheurísticos, el algoritmo genético de clasificación no dominado-II (NSGA-II) y el algoritmo genético de clasificación no dominado basado en puntos de referencia-II (RPBNSGA-II).

Para la realización del **modelo**, se ha considerado:

- Todos los artículos de socorro son perecederos y es necesario renovarlos siguiendo una política de pedidos.
- La capacidad de los almacenes centrales designados tiene múltiples niveles.
- El equipo de almacenamiento es vulnerable a daños.
- Las rutas de la red difieren en condiciones físicas y el tiempo de viaje relativo a cada ruta refleja la condición de tráfico correspondiente.
- La capacidad de las rutas de transporte es limitada.
- Los vehículos tienen diferentes capacidades.

El **modelo** de este problema estará formado por los siguientes conjuntos de índices, parámetros y variables. El conjunto de **índices** está formado por:

- v_0: Conjunto de almacenes candidatos.
- v_h: Conjunto de hospitales.
- v_c: Conjunto de puntos de demanda.
- K: Número total de tipos de productos.
- k: Uno de los posibles tipos de productos $k \in \{1, ..., K\}$, o, para simplificar las notaciones $k \in K$
- T: Número total de períodos de tiempo antes de que ocurra el desastre.
- t: Uno de los posibles tipos de productos $t \in \{1, ..., T\}$, o, para simplificar las notaciones $t \in T$
- R_k: Número total de períodos de vida restantes del producto k.
- r_k: Uno de los posibles períodos de vida útil restantes del tipo de producto k: $r_k \in \{1, ..., R_k\}$, o, para simplificar las notaciones, $r_k \in R_k$.

Los **parámetros** son:

- f_l: costo fijo para el establecimiento de un almacén l.
- CH_k: penalización de retención de unidad adicional del tipo de producto k.
- τ_{hk}: costo de penalización unitario de la demanda insatisfecha del tipo de producto k para el hospital h.

- CE_k: costo unitario de eliminación para el tipo de producto k.
- CP_{kr_k}: costo de compra unitario para el tipo de producto k con r_k producto de vida útil.
- CM_{kl}: costo unitario para transportar el tipo de producto k al almacén l antes de que ocurra el desastre.
- CK_{kl}: costo unitario para almacenar el tipo de producto k en el almacén l.
- IN_{kr_k}: ingresos por venta por unidad de tipo de producto k con r_k períodos de vida restantes.
- SP_k: costo de penalización unitario por escasez de producto tipo k en la fase previa al desastre.
- β_k: número total de períodos de vida útil restantes aceptables para el tipo de producto k antes de que se retire de los almacenes.
- α_k: número total de períodos de vida útil restantes aceptables para el tipo de producto k que se comprará.
- c_{ij}: costo de transporte (movimiento) entre dos nodos i, j.
- S_h: coste unitario de carga y descarga del producto tipo k en el hospital h.
- TM_{ij}: tiempo de transporte (movimiento) entre dos nodos i, j.
- TU: tiempo de carga y descarga de la unidad del tipo de producto k.
- dh_{hk}: demanda del tipo de producto k para ser utilizado en el hospital h.
- dc_{jk}: demanda del tipo de producto k que se enviará al punto de demanda (área afectada) j.
- V_k: capacidad de los vehículos del 1º nivel para el tipo de producto k.
- U_k: capacidad de los vehículos del 2º nivel para producto tipo k.
- ϕ_{hk}: proporción tolerable de escasez del tipo de producto k en el hospital h.
- m^1: número de vehículos de primer nivel.
- m^2: número de vehículos de segundo nivel.
- m_l^1: número máximo de rutas de primer nivel a partir del almacén l.
- m_h^2: número máximo de rutas de primer nivel a partir del hospital h.
- B: presupuesto disponible para el establecimiento de almacenes.
- γ_{lk}: capacidad de almacenamiento del almacén l para el tipo de producto k.

- e_k: cantidad disponible de producto tipo k para preposicionamiento.
- mq_k: cantidad mínima de producto tipo k que debe almacenarse en los almacenes.
- M: un número suficientemente grande.
- ρ_{lk}: Proporción de tipo de producto preposicionado k en el almacén l restante utilizable.

Y las **variables**:

- $$y_l = \begin{cases} 1 & \text{si el almacén } l \text{ está abierto} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$
- m_{lkt}: Cantidad de producto tipo k no utilizado en el almacén l si ocurre un terremoto en el período de tiempo t.
- w_{hkt}: escasez de producto tipo k en el hospital h si ocurre un terremoto en el período de tiempo t.
- wh_{hkt}: escasez de producto tipo k para su utilización en el hospital h si ocurre un terremoto en el período de tiempo t.
- wc_{jkt}: escasez de producto tipo k en el punto de demanda (área afectada) j si ocurre un terremoto en el período de tiempo t.
- b_{kltr_t}: cantidad de tipo de producto k, con r_k períodos de vida restantes, retirados del almacén l en el período de tiempo t.
- R_{kltr_t}: cantidad de tipo de producto k, con r_k períodos de vida restantes, comprado para el almacén l en el período de tiempo t.
- I_{kltr_t}: nivel de existencias del tipo de producto k, con r_k períodos de vida restantes, mantenidos en el almacén l en el período de tiempo t.
- q_{lk}: cantidad de tipo de producto k almacenado en el almacén l (en el primer período de tiempo).
- E_{klt}: escasez del tipo de producto k en el almacén l en el período de tiempo t.
- d_{hk}: demanda total del tipo de producto k en el hospital h.
- $$x_{ijt}^{l} = \begin{cases} 1 & \text{si el arco de primer nivel (i, j) es utilizado por la ruta de primer} \\ & \text{nivel comenzando desde el almacén } l \text{ cuando ocurre un terremoto} \\ & \text{en el período de tiempo } t \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

- $$g_{ijt}^{h} = \begin{cases} 1 & \text{si el arco de segundo nivel (i, j) es utilizado por la ruta de segundo nivel comenzando de} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

- $$Zf_{lh} = \begin{cases} 1 & \text{si el hospital } h \text{ es atendido por el almacén } l \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

- $$Z_{hj} = \begin{cases} 1 & \text{si el punto de demanda (área afectada) } j \text{ es atendido por el almacén } h \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Para este modelo, se utilizará 3 funciones objetivo y 40 restricciones. La primera función objetivo es:

$$\begin{aligned} \min \sum_{l \in V_o} f_l y_l + \sum_{k \in K} \sum_{l \in V_o} \sum_{t \in T} [\sum_{r_k=1}^{\beta_k} CE_k b_{kltr_k} + \sum_{r_k=\alpha_k}^{R_k} CP_{kr_k} R_{kltr_k} + \sum_{r_k=\alpha_k}^{R_k} CM_{kl} R_{kltr_k} \\ + \sum_{r_k=1}^{R_k} CK_{kl} I_{kltr_k} - \sum_{r_k=1}^{\beta_k} IN_{kr_k} b_{kltr_k} + SP_k E_{klt}] \end{aligned} \tag{3.18}$$

La segunda función objetivo:

$$\begin{aligned} \min \sum_{t \in T} \sum_{l \in V_o} \sum_{i,j \in V_o \cup V_h, i \neq j} c_{ij} x_{ijt}^{l} + \sum_{t \in T} \sum_{h \in V_h} \sum_{i,j \in V_h \cup V_c, i \neq j} c_{ij} g_{ijt}^{h} + \sum_{k \in K} \sum_{h \in V_h} s_h d_{hk} \\ + \sum_{t \in T} [\sum_{l \in V_o} \sum_{k \in K} CH_k m_{lkt} + \sum_{h \in V_h} \sum_{k \in k} \tau_{hk} W_{hkt}] \end{aligned} \tag{3.19}$$

Y la tercera función objetivo:

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{l \in V_o} \sum_{i,j \in V_o \cup V_h, i \neq j} TM_{ij} x_{ijt}^{l} + \sum_{t \in T} \sum_{h \in V_h} \sum_{i,j \in V_h \cup V_c, i \neq j} TM_{ij} g_{ijt}^{h} + \sum_{k \in K} \sum_{h \in V_h} TU d_{hk}$$

Una vez definidas las funciones objetivo, se mostrará las 40 restricciones:

$$b_{kltr_k} \leq I_{kltr_k} \qquad \forall k \in K, l \in V_o, t \in \{2, ..., T\}, r_k \in \{1, ..., \beta_k\} \tag{3.20}$$

$$I_{klt+1r_k-1} = I_{kltr_k} b_{kltr_k} \qquad \forall k \in K, l \in V_o, t \in \{2, ..., T\}, r_k \in \{1, ..., \beta_k\} \tag{3.21}$$

$$I_{kltr_k} = R_{kltr_k} + I_{klt-1r_k+1} \qquad \forall k \in K, l \in V_o, t \in \{2, ..., T\}, r_k \in \{\alpha_k, ..., R_k\} \tag{3.22}$$

$$I_{klt+1r_k-1} = R_{klt+1r_k} I_{kltr_k} - b_{kltr_k} \qquad \forall k \in K, l \in V_o, t \in \{2, ..., T\}, r_k \in \{2, ..., R_k\} \tag{3.23}$$

$$I_{kltr_k} = 0 \qquad \forall k \in K, l \in V_o, t \in T, r_k \in \{1, ..., \beta_k\} \tag{3.24}$$

$$\sum_{r_k=\alpha_k}^{R_k} I_{kltr_k} = \sum_{r_k=\alpha_k}^{R_k} R_{kltr_k} + \sum_{r_k=\alpha_k}^{R_k} I_{klt-1r_k} - \sum_{r_k=\alpha_k}^{R_k} b_{klt-1r_k} \qquad \forall k \in K, l \in V_o, t \in \{2, ..., T\} \tag{3.25}$$

$$\sum_{r_k=\alpha_k}^{R_k} I_{kltr_k} = q_{lk} \qquad t = 1, \forall k \in K, l \in V_o \tag{3.26}$$

$$E_{klt} = q_{lk} - \sum_{r_k=\alpha_k} I_{kltr_k} \qquad \forall k \in K, l \in V_o, t \in \{2, ..., T\}, r_k \in \{1, ..., T\} \tag{3.27}$$

$$R_{kltr_k} = I_{kltr_k}; \qquad t = 1, \forall k \in K, l \in V_o, t \in \{2, ..., T\}, r_k \in \{\alpha_k, ..., R_k\} \tag{3.28}$$

$$\sum_{l \in V_o} f_l y_l \leq B \tag{3.29}$$

$$q_{lk} \leq y_l \gamma_{lk} \qquad \forall l \in V_o, k \in K \tag{3.30}$$

$$\sum_{l \in V_o} q_{lk} \leq e_k \qquad \forall k \in K \tag{3.31}$$

$$\sum_{l \in V_o} q_{lk} \leq m q_k \qquad \forall k \in K \tag{3.32}$$

$$d_{hk} = \sum_{l \in V_o} dh_{hk} z f_{lh} + \sum_{j \in V_c} dc_{jk} z_{hj} \qquad \forall k \in K, h \in V_h \tag{3.33}$$

$$w_{hkt} = \sum_{l \in V_o} wh_{hk} z f_{lh} + \sum_{j \in V_c} wc_{jk} z_{hj} \qquad \forall k \in K, h \in V_h, t \in T \tag{3.34}$$

$$w_{hkt} + \sum_{l \in V_o} \sum_{i \in V_o \cup V_h} V_k x^l_{ijt} = d_{hk} \qquad \forall k \in K, h \in V_h, j \in V_h, t \in T \tag{3.35}$$

$$\sum_{j \in V_h} V_k x^l_{ljt} + m_{lkt} = \sum_{r_k=1}^{R_k} I_{kltr_k} \rho_{lk} \qquad \forall k \in K, l \in V_o, t \in T \tag{3.36}$$

$$w_{hkt} \leq \varphi_{hk} d_{hk} \qquad \forall h \in V_h, k \in K, t \in T \tag{3.37}$$

$$\sum_{j \in V_h} x^l_{ljt} \leq m^1_l \qquad \forall l \in V_o, t \in T \tag{3.38}$$

$$\sum_{l \in V_o} \sum_{j \in V_h} x^l_{ljt} \leq m^1 \qquad \forall t \in T \tag{3.39}$$

$$\sum_{j \in V_h} x^l_{ljt} = \sum_{j \in V_h} x^l_{jlt} \qquad \forall l \in V_o, t \in T \tag{3.40}$$

$$x^l_{hit} \leq z f_{lh} \qquad \forall i \in V_o \cup V_h, h \in V_h, l \in V_o, t \in T \tag{3.41}$$

$$x^l_{hit} \leq z f_{lh} \qquad \forall i \in V_o, h \in V_h, l \in V_o, t \in T \tag{3.42}$$

$$\sum_{i \in V_h \cup V_o} x^l_{iht} = z f_{lh} \qquad \forall h \in V_h, l \in V_o, t \in T \tag{3.43}$$

$$\sum_{i \in V_h \cup V_o} x^l_{hit} = z f_{lh} \qquad \forall h \in V_h, l \in V_o, t \in T \tag{3.44}$$

$$\sum_{i\in V_h\cup V_o}\sum_{j\in V_h\cup V_o} x^l_{iht} \leq M \sum_{h\in V_h} x^l_{lht} \qquad \forall l \in V_o, t \in T \tag{3.45}$$

$$\sum_{l\in V_o} zf_{lh} = 1 \qquad \forall h \in V_h \tag{3.46}$$

$$wc_{jkt} + \sum_{h\in V_h}\sum_{i\in V_h\cup V_c} U_k g^h_{ijt} = dc_{jk} \qquad \forall k \in K, j \in V_c, t \in T \tag{3.47}$$

$$\sum_{j\in V_c} g^h_{hjt} \leq m^2_h \qquad \forall h \in V_h, t \in T \tag{3.48}$$

$$\sum_{h\in V_h}\sum_{j\in V_c} g^h_{hjt} \leq m^2 \qquad \forall t \in T \tag{3.49}$$

$$\sum_{j\in V_c} g^h_{hjt} = \sum_{j\in V_c} g^h_{jht} \qquad \forall h \in V_h, t \in T \tag{3.50}$$

$$g^h_{ijt} \leq z_{hj} \qquad \forall i \in V_c \cup V_h, j \in V_c, h \in V_h, t \in T \tag{3.51}$$

$$g^h_{jit} \leq z_{hj} \qquad \forall i \in V_h, j \in V_c, h \in V_h, t \in T \tag{3.52}$$

$$\sum_{i\in V_h\cup V_c} g^h_{ijt} = z_{hj} \qquad \forall j \in V_c, h \in V_h, t \in T \tag{3.53}$$

$$\sum_{i\in V_h\cup V_c} g^h_{jit} = z_{hj} \qquad \forall j \in V_c, h \in V_h, t \in T \tag{3.54}$$

$$\sum_{i\in V_h\cup V_c} g^h_{ijt} \leq M \sum_{j\in V_c} g^h_{hjt} \qquad \forall h \in V_h, t \in T \textstyle\sum_{i\in V_h} z_{ij} = 1 \qquad \forall j \in V_c \tag{3.55}$$

$$\sum_{j\in V_c} z_{hj} \leq M \sum_{l\in V_o} zf_{lh} \qquad \forall h \in V_h \tag{3.56}$$

$$g^h_{hjt} \leq \sum_{l\in V_o}\sum_{i\in V_o\cup V_h} x^l_{hit} \qquad \forall j \in V_c, h \in V_h, t \in T \tag{3.57}$$

$$\sum_{i,j\in V_o\cup V_h, i\neq j}\sum_{t\in T} x^l_{ijt} \leq My_l \qquad \forall l \in V_o \tag{3.58}$$

$$y_l, x^l_{ijt}, g^h_{ijt}, z_{hj}, zf_{lh} \in \{0,1\} \qquad \forall l \in V_o, h \in V_h, (i,j) \in V_o \cup V_h \cup V_c, t \in T \tag{3.59}$$

El significado de las **funciones objetivo** son:

- 1. La **primera función objetivo** busca minimizar el costo total de adquisición y preparación antes de que ocurra el desastre. Este costo incluye los costos de creación de almacenes, almacenamiento y transporte, así como los relacionados con el control de inventarios de productos perecederos.

- 2. La **segunda función objetivo** busca minimizar el costo operativo total de socorro en la fase de acción (enfrentamiento) después de haber ocurrido el desastre.Este costo incluye los costos de transporte, carga y descarga, así como costos de deficiencia de mercadería y costos de mercadería no utilizada.

- 3. La **tercera función objetivo** busca minimizar el tiempo total de socorro operativo en la fase de acción después de ocurrido el desastre. Este tiempo incluye el tiempo de transporte, carga y descarga.

Y las restricciones:

- 1. La restricción (3.20) asegura que la cantidad de productos retirados de un almacén no exceda a la existente en el mismo almacén.
- 2. La restricción (3.21) asegura que la diferencia entre la cantidad de un determinado producto existente en un almacén y el que se retira del mismo almacén en un período se equilibra con su inventario para el siguiente período.
- 3. La restricción (3.22) requiere que la diferencia entre la cantidad existente de un determinado producto y la cantidad comprada del mismo producto en un período sea equilibrada por su inventario en el período anterior.
- 4. La restricción (3.23) equilibra la diferencia entre la cantidad existente de un determinado producto y la cantidad comprada en un período con la diferencia entre la cantidad existente del mismo producto y la cantidad eliminada en el período anterior.
- 5. La restricción (3.24) requiere el inventario de la cantidad de producto tipo k con la vida útil restante menor o igual que β_k es 0.
- 6. La restricción (3.25) equilibra la cantidad total de productos existentes y comprados que tienen una vida útil restante mayor o igual a α_k en un período con la cantidad total de productos existentes y retirados con una vida útil restante mayor o igual a α_k en el período anterior.
- 7. La restricción (3.26) asegura que el inventario de todos los productos con vida útil restante al menos α_k en el primer período sea igual a la cantidad predeterminada que debe almacenarse en el primer período.
- 8. La restricción (3.27) asegura el equilibrio entre el inventario de todos los productos con vida restante de al menos α_k en el segundo período y la escasez de productos en relación con la cantidad predeterminada que se mantendrá en el primer período.
- 9. La restricción (3.28) asegura la igualdad entre la cantidad de productos comprados y la existente en la tienda en el primer período.
- 10. La restricción (3.29) asegura que el costo de crear almacenes centrales no exceda el presupuesto predeterminado.
- 11. La restricción (3.30) asegura que la cantidad predeterminada de un determinado producto que se mantendrá en un almacén en el primer período no excede la capacidad de almacenamiento del almacén para ese producto.

- 12. La restricción (3.31) asegura que la cantidad total predeterminada de un determinado producto que se mantendrá en los diferentes almacenes en el primer período no excede la cantidad disponible de ese producto en el mercado.
- 13. La restricción (3.32) requiere que la cantidad total predeterminada de un determinado producto que se mantenga en los diferentes almacenes en el primer período sea mayor o igual a la menor cantidad de ese producto en los almacenes.
- 14. La restricción (3.33) determina la demanda total de cada hospital por cada producto que se utilizará en el propio hospital y se enviará a los puntos dañados atendidos por el hospital.
- 15. La restricción (3.34) determina la escasez total de cada hospital por cada producto que se utilizará en el propio hospital y se enviará a los puntos dañados atendidos por el hospital.
- 16. La restricción (3.35) indica que la demanda total de cada hospital para cada producto debe ser igual a la cantidad de productos enviados a ese hospital para compensar la escasez total de ese producto en ese hospital.
- 17. La restricción (3.36) indica que el número de productos despachados por cada almacén, así como el número de productos no utilizados en ese almacén, debe ser igual a la proporción total utilizable de ese producto en ese almacén.
- 18. La restricción (3.37) asegura que la escasez de un determinado producto no exceda la escasez tolerable de ese producto para satisfacer la demanda.
- 19. La restricción (3.38) asegura que el número de rutas de trabajo partiendo del almacén l no exceda el número máximo de rutas en el nivel 1 partiendo del almacén l.
- 20. La restricción (3.39) asegura que el número total de rutas de trabajo en el nivel 1 no exceda la capacidad del vehículo del nivel 1.
- 21. La restricción (3.40) requiere que todas las rutas partiendo del almacén l vuelvan al almacén l.
- 22 y 23. La restricción (3.41) y (3.42) aseguran que las rutas que llegan y salen del hospital h son parte de las rutas que parten del almacén l si la demanda del hospital h se abastece a través del almacén l.
- 24. La restricción (3.43) asegura que el número total de rutas que ingresan al hospital h que han comenzado desde el almacén l es igual a 1 si la demanda del hospital h se abastece a través del almacén l.
- 25. La restricción (3.44) asegura que el número total de rutas que salen del hospital h que han comenzado desde el almacén l es igual a 1 si la demanda del hospital h se abastece a través del almacén l.

- 26. La restricción (3.45) requiere que todas las rutas existentes desde el almacén l en el nivel 1 estén funcionando si la ruta desde el almacén l hasta el primer hospital está funcionando.

- 27. La restricción (3.46) requiere que cada demanda de cada hospital sea abastecida por un solo almacén.

- 28. La restricción (3.47) requiere que la demanda de cada punto dañado para cada producto sea igual al número de productos enviados a ese punto para compensar la escasez de ese producto en ese punto.

- 29. La restricción (3.48) asegura que el número de rutas de trabajo partiendo del hospital h no exceda el número máximo de rutas en el nivel 2 partiendo del hospital h.

- 30. La restricción (3.49) asegura que el número total de rutas de trabajo en el nivel 2 partiendo del hospital h no exceda la capacidad del vehículo del nivel 2.

- 31. La restricción (3.50) requiere todas las rutas desde el hospital h para regresar al hospital h.

- 32 y 33. La restricción (3.51) y (3.52) Aseguran que las rutas que llegan y salen del punto j dañado son parte de las rutas que salen del hospital h si la demanda del punto j es abastecida por el hospital h.

- 34. La restricción (3.53) asegura que el número total de rutas que ingresan al punto j dañado que partieron del hospital h es igual a 1 si la demanda del punto j es abastecida por el hospital h.

- 35. La restricción (3.54) asegura que el número total de rutas que salen del punto j dañado que partieron del hospital h es igual a 1 si la demanda del punto j es abastecida por el hospital h.

- 36. La restricción (3.55) requiere que todas las rutas existentes desde el hospital h en el nivel 2 estén funcionando si la ruta desde el hospital h hasta el primer punto averiado está funcionando.

- 37. La restricción (3.55) asegura que cada demanda de cada punto dañado sea abastecida por un solo hospital.

- 38 y 39. La restricción (3.56) y (3.57) garantizan que la demanda de un punto averiado sea abastecida por un hospital solo si ese hospital ya ha sido abastecido por un almacén.

- 40. La restricción (3.58) garantiza que la demanda de un hospital es abastecida por un almacén solo si ese almacén ya ha sido creado.

La **conclusión** a este problema es que a pesar de los recientes logros científicos y tecnológicos, los seres humanos aún no somos capaces de predecir estos eventos dramáticos. Tras examinar los estudios previos, los modelos correspondientes y las sugerencias para futuras investigaciones, hemos identificado un vacío existente en los intentos de obtener simultáneamente un óptimo posicionamiento previo de los almacenes y minimizar los costos de almacenaje y transporte de productos de socorro.

Este estudio ha presentado un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) para diseñar una nueva red logística humanitaria. El objetivo de esta investigación ha sido proponer una nueva red logística de varios escalones con localización de almacenes centrales, planificación y control de inventario en la fase previa al desastre, así como enrutamiento de vehículos de transporte de socorro para proporcionar a las áreas dañadas los productos necesarios en la fase posterior al desastre. La red propuesta se ha modelado a través de las tres funciones objetivo anteriormente explicadas.

En particular, se han considerado tres etapas de transporte: de proveedores a almacenes centrales, de almacenes centrales a hospitales y de hospitales a áreas dañadas.

El inventario óptimo de productos de socorro se ha planificado y controlado a través de las ubicaciones óptimas de los almacenes centrales. Finalmente, todos los productos de socorro en el modelo se han asumido como perecederos. Así, el modelo también ha tenido en cuenta la necesidad de restaurarlos después de la fecha de vencimiento.

Sobre la base de los resultados obtenidos, hemos concluido que NSGAII funciona mejor que RPBNSGA-II en problemas de tamaño pequeño. Al mismo tiempo, RPBNSGA-II supera a NSGA-II en problemas de gran tamaño.

Finalmente, se podría concluir presentando algunas sugerencias para un mayor desarrollo de este estudio. Las extensiones del modelo propuesto podrían centrarse en los siguientes puntos:

- 1. Priorizar los productos de socorro y considerar estas prioridades al planificar el transporte de los productos a hospitales y áreas dañadas.
- 2. Considerando el traslado de los heridos desde las zonas dañadas hasta los hospitales y centros de asistencia.
- 3. Considerando otros modelos de transporte como el transporte aéreo (helicóptero y avión) para ayudar a los heridos.
- 4. Considerando incertidumbres relativas a la demanda y rutas disponibles.

Referencia:

An integrated location-inventory-routing humanitarian supply chain network with pre- and post-disaster management considerations. (2018b, December 1). ScienceDirect.
`https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003801211730263X`

Capítulo 4

Modelos de asignaciones

Ante la situación que estamos viviendo actualmente, la necesidad de los respiradores en los hospitales están al orden del día, ya que, con el COVID-19, estos respiradores han doblado su demanda, y la importancia de estos es muy grande a la hora de mantener estables a las personas y ayudar a que puedan combatir el virus.

Por tanto, en esta sección desarrollaremos diferentes modelos donde se cedan respiradores de unos hospitales a otros y donde se intente crear la localización de puestos de emergencias y asignación y logística de recursos. Este modelo planificará las cantidades de varios tipos de suministros, que se coloquen previamente y se determine la ubicación de estos, se haga para que se determine el reparto de respiradores, material sanitario (mascarillas, batas y respiradores) y medicamentos a diferentes hospitales, en condiciones de incertidumbre si ocurriera otra nueva ola de COVID-19.

4.1. Modelo de transporte de respiradores

Resumen

En la actualidad muchos hospitales piden ayuda por la escasez de respiradores, ya que, ante una nueva ola, las UCIS se colapsan y el uso de estos es primordial para mantener la vida de las personas. Por ejemplo, el 26 de marzo de 2020, cuando empezó la pandemia, la comunidad de Madrid pidió ayuda ya que necesitaba respiradores para sus hospitales, entonces comunidades autónomas como Murcia, Andalucía, Extremadura o Galicia estaban dispuestos a ceder respiradores de sus hospitales. Por tanto, en esta sección se intentará simular una situación parecida a la comentada anteriormente con Madrid, se solucionará un problema donde se ha puesto como ejemplo varios hospitales de toda España. Estarán los hospitales que tienen respiradores suficientes y pueden dejar prestado respiradores a otros hospitales, y los hospitales que necesitan respiradores y tomarán estos como prestados. En este caso los hospitales que les sobra respiradores son:

- -Hospital General Universitario Morales Meseguer

- -Hospital Virxe da Xunqueira
- -Hospital San Juan de Dios
- -Hospital Universitario Virgen de la Victoria
- -Hospital General de Valdepeñas
- -Hospital Universitario de Guadalajara
- -Hospital Universitario de Basurto
- -Hospital Osakidetza Eibar
- -Valdecilla Sur, Consultas Externas
- -Hospital Universitario de Cáceres
- -Hospital de Mérida

Y los hospitales que necesitan respiradores son:

- -Hospital Universitario La Paz
- -Hospital Universitario de Getafe
- -Hospital de La Princesa
- -Hospital Universitario Ramón Y Cajal
- -Hospital Clínic de Barcelona
- -Hospital Universitario Valle de Hebrón
- -Hospital de Sant Joan Despí
- -Hospital General Universitario de Elche
- -Hospital General Universitario de Alicante
- -Vithas Hospital Valencia 9 de Octubre
- -Hospital Universitario Doctor Peset
- -Hospital Universitario Río Hortega
- -Complejo Hospitalario Universitario de Albacete
- -Hospital Universitario Juan Ramón Jiménez
- -Hospital Universitario de Torrevieja

- -Hospital General Universitario Santa María del Rosell
- -Hospital HLA Mediterráneo

La solución de este modelo permitirá ver que hospitales ceden respiradores a hospitales con necesidad de estos, y el coste de realizar estas prestaciones, que será los kilómetros de un hospital a otro (información obtenida de Google Maps). También podremos ver el coste de penalización por no dejar respiradores en el momento que los demandan.

Modelo

La formulación del modelo será de siguiente manera, donde tendremos los siguientes **conjuntos**:

- I: Conjunto de hospitales que mandan respiradores.
- J: Conjunto de hospitales que necesitan respiradores.
- T: Periodos en los que queda dividido un año (12 meses).

Las **variables** utilizadas son:

$$x_{ijt} = \begin{cases} 1 & \text{si el hospital } i \text{ cede respiradores al hospital } j \text{ en el periodo } t \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Los **parámetros** utilizados son:

- C_{ij}: Coste de transportar el respirador desde el hospital i hasta el hospital j.
- $$r_{jt} = \begin{cases} 1 & \text{si el hospital } j \text{ necesita respiradores en el periodo t} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$
- n_j: Número máximo de hospitales que sirven al hospital j.
- S_i: Cantidad o capacidad de respiradores que dispone para enviar el hospital i.
- B_{jt}: Cantidad de respiradores que demanda el hospital j en el período t.
- P_{jt}: Coste de penalización por no dar respiradores al hospital j en un periodo t.

Una vez definidos los conjuntos, variables y parámetros, queda por definir la función objetivo y las restricciones:

Función objetivo:

Está función objetivo tratará de minimizar los costes de transportar los respiradores:

$$\text{mín} \qquad \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij} B_{jt} x_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} P_j r_{jt} (1 - \sum_{i \in I} X_{ijt})$$

Y las **restricciones** son:

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in I} x_{ijt} \leq n_j \qquad \forall j \in J \tag{4.1}$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in I} x_{ij|T|} \geq 1 \qquad \forall j \in J \tag{4.2}$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in T} B_{jt} X_{ijt} \leq S_i \qquad \forall i \in I \tag{4.3}$$

$$\sum_{i \in I} x_{ijt} \leq r_{jt} \quad \forall j \in J, t \in T \tag{4.4}$$

La primera restricción hace que el número máximo de hospitales j puedan ser servidos por un hospital i en un periodo t.

La segunda restricción indica que todos los hospitales j deben tener servicio al final del horizonte.

La tercera restricción hará que se respete las capacidades y demanda de los hospitales.

Por último, la cuarta restricción hace que no se preste respiradores cuando no los necesitan.

Solución

Una vez resuelto el modelo, para comprender bien la solución, primero nos fijaremos en la variable x_{ijt}, esta nos dirá si el hospital i cede respiradores al hospital j en el periodo t.

Variable	Value	Reduced Cost
X(H1, R5, T1)	1.000000	5740.000
X(H1, R13, T2)	1.000000	42.00000
X(H1, R15, T1)	1.000000	-58.10000
X(H1, R15, T10)	1.000000	-56.20000
X(H1, R16, T5)	1.000000	-85.30000
X(H3, R6, T6)	1.000000	5160.000
X(H3, R8, T1)	1.000000	-96.60000
X(H3, R9, T5)	1.000000	-129.0000
X(H3, R10, T1)	1.000000	69.00000
X(H3, R11, T5)	1.000000	368.0000
X(H4, R17, T12)	1.000000	112.0000
X(H6, R1, T7)	1.000000	-200.0000
X(H6, R2, T1)	1.000000	-27.90000
X(H6, R3, T10)	1.000000	88.50000
X(H6, R4, T5)	1.000000	171.5000
X(H6, R7, T1)	1.000000	450.0000
X(H9, R12, T1)	1.000000	150.0000
X(H11, R14, T1)	1.000000	170.0000

En la anterior imagen, podemos interpretar el siguiente resultado:

El Hospital general universitario Morales Messeguer envía respiradores a:

- Hospital Clínic de Barcelona en el período 1
- Complejo hospitalario Universitario de Albacete en el período 2
- Hospital universitario de Torrevieja en los períodos 1 y 10
- Hospital general universitario Santa María del Rosell período 5

El Hospital San Juan de Dios envía respiradores a:

- Hospital universitario Valle de Hebrón en el período 6
- Hospital general universitario de Elche en el período 1
- Hospital general universitario de Alicante en el período 5
- Vithas hospital Valencia 9 de Octubre en el período 1
- Hospital universitario Doctor Peset en el período 5

El Hospital universitario Virgen de la Victoria envía respiradores a:

- Hospital HLA Mediterráneo en el período 12

El Hospital universitario de Guadalajara envía respiradores a:

- Hospital universitario la Paz en el período 7
- Hospital general universitario de Getafe en el período 1
- Hospital de La Princesa en el período 10
- Hospital universitario Ramón y Cajal en el período 5
- Hospital de Sant Joan Despí en el período 1

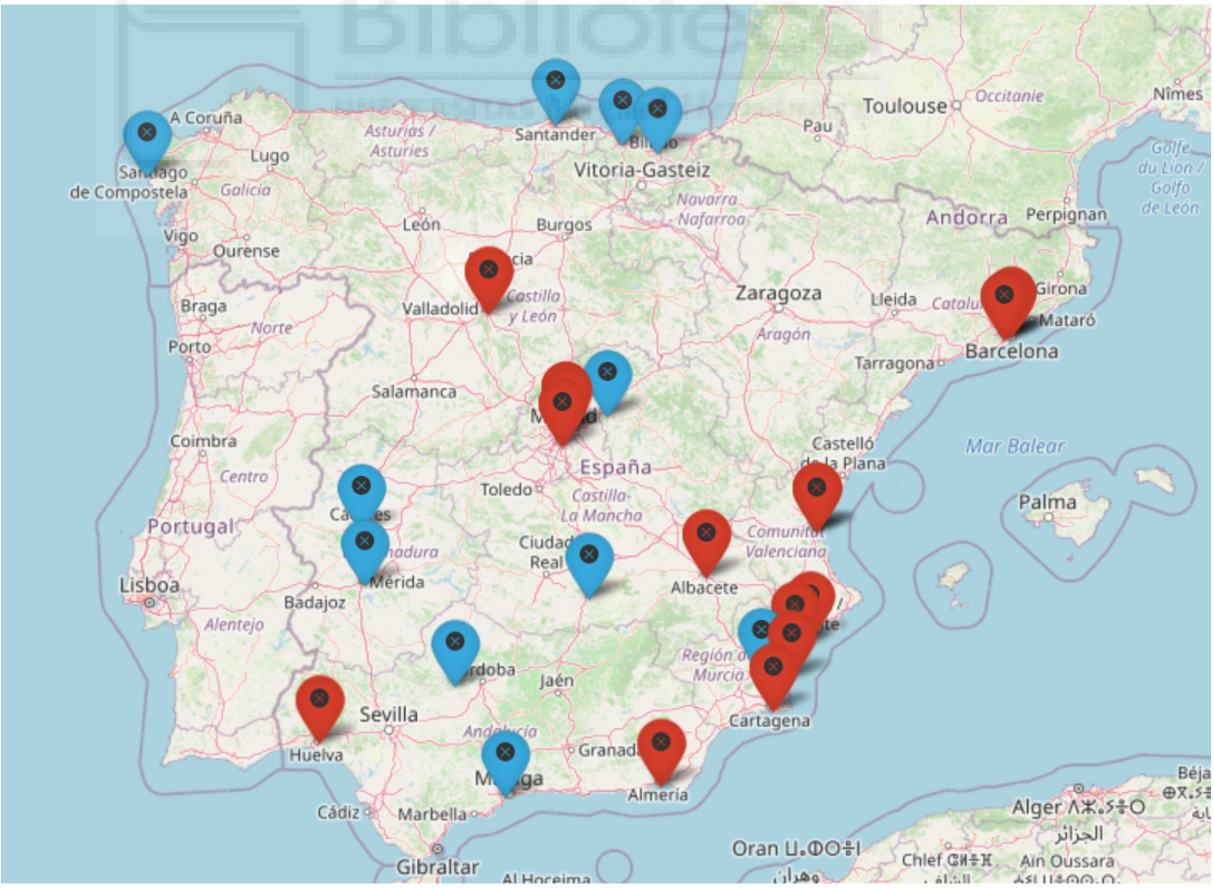
Valdecilla Sur, Consultas externas envía respiradores a:

- Hospital universitario Río Hortega en el período 1

El Hospital de Mérida envía respiradores a:

- Hospital universitario Juan Ramón Jiménez en el período 1

Estos hospitales están ubicados en los siguientes puntos del mapa, donde los puntos rojos son los hospitales que piden y reciben respiradores, y los puntos azules son los hospitales que envían sus respiradores sobrantes:



En este modelo, como se ha comentado al principio, existe un coste de transporte y otro de penalización por no ceder respiradores en el período que lo necesitan.

En primer lugar comentaré como se han obtenido los costes de transporte o asignación, donde la fórmula como se han obtenido es la siguiente:

$$\sum_{i\in I}\sum_{j\in J} C_{ij}B_{jt}x_{ij}$$

Los costes C_{ij} son los kilómetros de un hospital a otro (extraído de Google maps):

	Cij																
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17
H1	405	394	396	403	584	586	587	60,3	84,5	230	226	589	142	621	71,9	54,7	219
H2	681	692	681	681	1171	1174	1164	1102	1108	1036	1038	541	943	940	1148	1135	1224
H3	429	419	421	428	524	526	526	28,4	2	169	166	614	166	694	54,8	123	292
H4	544	524	535	542	978	981	981	455	479	624	621	719	461	307	454	410	212
H5	214	194	205	212	668	671	671	356	361	327	329	390	197	422	402	389	346
H6	60	72,1	54,5	58,3	557	560	550	451	457	330	332	247	292	670	497	484	595
H7	393	412	395	389	606	608	599	803	809	622	629	286	645	945	849	836	939
H8	401	420	403	397	612	615	605	811	817	613	619	294	653	953	857	844	947
H9	447	446	449	443	700	702	693	856	862	716	723	250	697	908	902	889	978
H10	303	286	303	310	908	911	901	664	670	623	625	330	505	352	710	697	677
H11	354	337	353	361	958	961	951	627	633	598	600	399	468	270	673	660	594

B_{jt} es la cantidad de respiradores que demanda el hospital j en el período t:

	Bjt											
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
R1	0	3	0	0	0	4	5	0	0	0	0	0
R2	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R3	10	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0
R4	0	0	0	0	5	15	0	0	0	0	0	0
R5	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13
R6	0	11	0	0	0	10	12	0	0	0	0	0
R7	1	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0
R9	0	0	0	0	3	6	0	0	0	0	0	0
R10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
R11	0	0	0	0	3	4	0	0	0	0	0	0
R12	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
R13	0	1	0	0	0	2	4	0	0	0	0	0
R14	1	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
R15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0
R16	0	0	0	0	1	8	0	0	0	0	0	0
R17	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Una vez visto que es cada cosa, pondré un ejemplo de como se ha calculado el **coste de asignación**:

- **H6 R1 T7**, el coste de asignación es $60 * 5 * 1$ (el 60 es el parámetro C_{ij}, el 5 es el parámetro B_{jt} y el 1 es la variable X_{ijt}).
- **H1 R5 T1**, el coste de asignación es $584 * 10 * 1$ (el 584 es el parámetro C_{ij}, el 10 es el parámetro B_{jt} y el 1 es la variable X_{ijt}).
- **H3 R8 T1**, el coste de asignación es $28,4 * 1 * 1$ (el 28,4 es el parámetro C_{ij}, el 1 es el parámetro B_{jt} y el 1 es la variable X_{ijt}).

En cuanto al otro coste que existe de **penalización**, la fórmula de cálculo es:

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in T} P_j r_{jt} (1 - \sum_{i \in I} X_{ijt})$$

Donde P_j es la penalización, r_{jt} es la necesidad de cada uno de los hospitales j en el período t. Entonces, si X_{ijt} es 0, y existe necesidad r_{jt} (en este caso no es 0), se hará $P_j * r_{jt} * 1$, (es 1 ya que X_{ijt} es 0). Para entenderlo mejor, realizaré un ejemplo de los **costes de penalización** que hay:

- **R1**, el coste de penalización es $(300*1)+(45*1)$ (300 y 45 son el parámetro P_{jt} y los 1 son el parámetro r_{jt} donde nos señala cuando el hospital j necesita respiradores en el momento t).
- **R2**, el coste de penalización es $55*1$ (55 es el parámetro P_{jt} y 1 es el parámetro r_{jt} donde nos señala cuando el hospital j necesita respiradores en el momento t).
- **R3**, el coste de penalización es $110*1$ (110 es el parámetro P_{jt} y 1 es el parámetro r_{jt} donde nos señala cuando el hospital j necesita respiradores en el momento t).

Todos estos resultados han utilizado los parámetros B_{jt} y P_{jt}, pero si utilizamos B_j y P_j sin el índice t nos sale el siguiente resultado, ya que de esta manera será en cualquier momento t y no en un período en concreto:

Entonces la variable X_{ijt} que nos indica que hospital cede respiradores a que hospital y en que período nos da el siguiente resultado:

Variable	Value	Reduced Cost
X(H1, R8, T1)	1.000000	2162.000
X(H1, R16, T5)	1.000000	775.2000
X(H3, R5, T1)	1.000000	2370.000
X(H3, R6, T7)	1.000000	7740.000
X(H3, R9, T6)	1.000000	-145.0000
X(H3, R10, T1)	1.000000	4065.000
X(H3, R11, T5)	1.000000	3900.000
X(H3, R15, T1)	1.000000	602.2000
X(H4, R17, T12)	1.000000	5686.000
X(H5, R1, T2)	1.000000	756.0000
X(H5, R2, T1)	1.000000	-6.000000
X(H5, R3, T1)	1.000000	3025.000
X(H5, R13, T2)	1.000000	2019.000
X(H6, R2, T2)	1.000000	-127.9000
X(H6, R4, T5)	1.000000	224.7000
X(H7, R7, T1)	1.000000	11680.00
X(H9, R12, T1)	1.000000	3125.000
X(H11, R14, T2)	1.000000	5975.000

Donde el **Hospital General Universitario Morales Meseguer** envía respiradores a:

- Hospital General Universitario de Elche en el período 1
- Hospital General Universitario Santa María del Rosell en el período 5

El **Hospital San Juan de Dios** envía respiradores a:

- Hospital Clínic de Barcelona en el período 1
- Hospital Universitario Valle de Hebrón en el período 7
- Hospital General Universitario de Alicante en el período 6
- Vithas Hospital Valencia 9 de Octubre en el período 1
- Hospital Universitario Doctor Peset en el período 5
- Hospital Universitario de Torrevieja en el período 1

El **Hospital Universitario Virgen de la Victoria** envía respiradores a:

- Hospital HLA Mediterráneo en el período 12

El **Hospital General de Valdepeñas** envía respiradores a:

- Hospital Universitario La Paz en el período 2
- Hospital Universitario de Getafe en el período 1
- Hospital de La Princesa en el período 1
- Complejo Hospitalario Universitario de Albacete en el período 2

El **Hospital Universitario de Guadalajara** envía respiradores a:

- Hospital Universitario de Getafe en el período 2
- Hospital Universitario Ramón Y Cajal en el período 5

El **Hospital Universitario de Basurto** envía respiradores a:

- Hospital de Sant Joan Despí en el período 1

El **Valdecilla Sur, Consultas Externas** envía respiradores a:

- Hospital Universitario Río Hortega en el período 1

Por último, el **Hospital de Mérida** envía respiradores a:

- Hospital Universitario Juan Ramón Jiménez en el período 2

El **coste de asignaciones** se calcularía de la misma manera que con los parámetros B_{jt} y P_{jt}, es decir, con la misma fórmula, pero obviando los 12 períodos que componían el índice t, ya que sólo habría una necesidad B_j que será global para todos los períodos:

Bj																
R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17
4	1	15	9	5	15	20	40	15	25	25	13	12	23	14	16	28

Y el resultado del coste de asignación es el siguiente:

```
          Variable            Value        Reduced Cost
COSTE_ASIGNACIONES         57431.20            0.000000
```

Igual pasaría para el coste de penalización, que la fórmula es la misma que antes, pero obviando el índice t, y sólo habría costes P_j por hospitales que necesitan respiradores y no añadiéndole cada período:

Pj																
R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17
100	200	50	300	250	150	300	250	175	160	250	125	345	235	165	100	250

Y el resultado de este coste de penalización es:

```
          Variable            Value        Reduced Cost
COSTE_PENALIZACION         3800.000            0.000000
```

Como podemos comprobar en los resultados vistos anteriormente, hay una columna que pone coste reducido, en Lingo el coste reducido indica cuánto tendría que mejorar cada uno de los coeficientes de la función objetivo antes de que la correspondiente variable de decisión pueda tomar valor positivo en la solución óptima.

Por último, veremos como sería la implementación en Lingo de estos problemas. En primer lugar implementaré los scripts en el caso de tener B_{jt} y P_{jt}:

En la sección SETS se define los parámetros, conjuntos y variables del problema:

```
MODEL:
SETS:
!Conjuntos Primitivos;
HOSPITALES_ENV /H1..H11/:S;
HOSPITALES_REC /R1..R17/:n;
PERIODOS/T1..T12/;

HOSPITALESENV_HOSPITALESREC(HOSPITALES_ENV, HOSPITALES_REC):c;
HOSPITALESREC_PERIODOS(HOSPITALES_REC, PERIODOS):r,B,p;
HOSPITALESENV_HOSPITALESREC_PERIODOS(HOSPITALES_ENV, HOSPITALES_REC, PERIODOS):X;

ENDSETS
```

Una vez definido parámetros, conjuntos y variables, introduciremos los datos en la sección

DATA:

```
DATA:
c=405,394,396,403,584,586,587,60.3,84.5,230,226,589,142,621,71.9,54.7,219,
  681,692,681,681,1171,1174,1164,1102,1108,1036,1038,541,943,940,1148,1135,1224,
  429,419,421,428,524,526,526,28.4,2,169,166,614,166,694,54.8,123,292,
  544,524,535,542,978,981,981,455,479,624,621,719,461,307,454,410,212,
  214,194,205,212,668,671,671,356,361,327,329,390,197,422,402,389,346,
  60,72.1,54.5,58.3,557,560,550,451,457,330,332,247,292,670,497,484,595,
  393,412,395,389,606,608,599,803,809,622,629,286,645,945,849,836,939,
  401,420,403,397,612,615,605,811,817,613,619,294,653,953,857,844,947,
  447,446,449,443,700,702,693,856,862,716,723,250,697,908,902,889,978,
  303,286,303,310,908,911,901,664,670,623,625,330,505,352,710,697,677,
  354,337,353,361,958,961,951,627,633,598,600,399,468,270,673,660,594;

n=2, 2, 1, 2, 2, 3, 2, 4, 2, 1, 3, 2, 1, 4, 1, 3, 2;

r=0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,
  1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
  1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,
  0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,
  1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,
  0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,
 r=0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,
  1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
  1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,
  0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,
  1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,
  0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,
  1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
  1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,
  0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,
  1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,
  0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,
  1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,
  0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,
  1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
  1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,
  0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,
  1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1;

 S=25, 10, 18, 15, 20, 15, 5, 4, 20, 17, 24;

 B=0,3,0,0,0,4,5,0,0,0,0,0,
  1,2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
```

```
B=0,3,0,0,0,4,5,0,0,0,0,0,
  1,2,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
  10,0,0,0,0,0,0,0,0,3,0,0,
  0,0,0,0,5,15,0,0,0,0,0,0,
  10,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,13,
  0,11,0,0,0,10,12,0,0,0,0,0,
  1,5,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
  1,0,0,0,0,0,0,0,0,4,0,0,
  0,0,0,0,3,6,0,0,0,0,0,0,
  1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,2,
  0,0,0,0,3,4,0,0,0,0,0,0,
  1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,5,
  0,1,0,0,0,2,4,0,0,0,0,0,
  1,6,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
  1,0,0,0,0,0,0,0,0,2,0,0,
  0,0,0,0,1,8,0,0,0,0,0,0,
  5,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1;

p=0,300,0,0,0,45,500,0,0,0,0,0,
  100,55,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
  110,0,0,0,0,0,0,0,0,75,0,0,
  0,0,0,0,120,150,0,0,0,0,0,0,
p=0,300,0,0,0,45,500,0,0,0,0,0,
  100,55,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
  110,0,0,0,0,0,0,0,0,75,0,0,
  0,0,0,0,120,150,0,0,0,0,0,0,
  100,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,130,
  0,110,0,0,0,100,120,0,0,0,0,0,
  100,85,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
  125,0,0,0,0,0,0,0,0,145,0,0,
  0,0,0,0,135,60,0,0,0,0,0,0,
  100,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,200,
  0,0,0,0,130,140,0,0,0,0,0,0,
  100,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,59,
  0,100,0,0,0,200,140,0,0,0,0,0,
  100,65,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
  130,0,0,0,0,0,0,0,0,200,0,0,
  0,0,0,0,140,185,0,0,0,0,0,0,
  75,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,100;

ENDDATA

!Asi hacemos las variables x binaria;
@FOR(HOSPITALESENV_HOSPITALESREC_PERIODOS(I, J, T):@BIN(X(I,J,T)));
```


Aquí se definirán las restricciones del problema:

```
!Asi hacemos las variables x binaria;
@FOR(HOSPITALESENV_HOSPITALESREC_PERIODOS(I, J, T):@BIN(X(I,J,T)));

coste_asignaciones=@SUM(HOSPITALESENV_HOSPITALESREC_PERIODOS(I,J,T):c(I,J)*B(J,T)*X(I,J,T));

coste_penalizacion=@SUM(HOSPITALESREC_PERIODOS(J,T):p(J,T)*r(J,T)*(1-@SUM(HOSPITALESENV_HOSPITALESREC_PERIODOS(I,J,T):X(I,J,T))));

!Función objetivo;
[OBJ] MIN=coste_asignaciones+coste_penalizacion;

!Restricciones;

!Número máximo de hospitales j que pueden ser servidos por un hospital i en un periodo t;
@FOR(HOSPITALESREC_PERIODOS(J,T):@SUM(HOSPITALES_ENV(I):X(I,J,T))<=n(J));

!Todos los hospitales j deben tener servicio al final del horizonte;
@FOR(HOSPITALES_REC(J):@SUM(HOSPITALES_ENV(I):@SUM(PERIODOS(T):X(I,J,T)))>=1);

!@FOR(HOSPITALES_REC(J):@SUM(HOSPITALES_ENV(I):@SUM(PERIODOS(T):X(I,J,T)))=1);

!Restricción de capacidades y demanda de los hospitales;
@FOR(HOSPITALES_ENV(I):@SUM(HOSPITALESREC_PERIODOS(J,T):B(J,T)*X(I,J,T))<=S(I));
```


```
!Función objetivo;
[OBJ] MIN=coste_asignaciones+coste_penalizacion;

!Restricciones;

!Número máximo de hospitales j que pueden ser servidos por un hospital i en un periodo t;
@FOR(HOSPITALESREC_PERIODOS(J,T):@SUM(HOSPITALES_ENV(I):X(I,J,T))<=n(J));

!Todos los hospitales j deben tener servicio al final del horizonte;
@FOR(HOSPITALES_REC(J):@SUM(HOSPITALES_ENV(I):@SUM(PERIODOS(T):X(I,J,T)))>=1);

!@FOR(HOSPITALES_REC(J):@SUM(HOSPITALES_ENV(I):@SUM(PERIODOS(T):X(I,J,T)))=1);

!Restricción de capacidades y demanda de los hospitales;
@FOR(HOSPITALES_ENV(I):@SUM(HOSPITALESREC_PERIODOS(J,T):B(J,T)*X(I,J,T))<=S(I));
```


```
!Restricción que hace que no se de respiradores cuando no necesitan;
@FOR(HOSPITALES_REC(J):@FOR(PERIODOS(T):@SUM(HOSPITALES_ENV(I):X(I,J,T))<=R(J,T)));


END
```

Para terminar, implementaremos los scripts en el caso de tener los parámetros B_j y P_j, donde B_j y P_j significan que las capacidades y las demandas coinciden en todos los momentos temporales:

En la sección SETS definimos los parámetros, conjuntos y variables del problema:

```
MODEL:
SETS:
!Conjuntos Primitivos;
HOSPITALES_ENV /H1..H11/:S;
HOSPITALES_REC /R1..R17/:B,p,n;
PERIODOS/T1..T12/;

HOSPITALESENV_HOSPITALESREC(HOSPITALES_ENV, HOSPITALES_REC):c;
HOSPITALESREC_PERIODOS(HOSPITALES_REC, PERIODOS):r;
HOSPITALESENV_HOSPITALESREC_PERIODOS(HOSPITALES_ENV, HOSPITALES_REC, PERIODOS):X;

ENDSETS

DATA:
c=405,394,396,403,584,586,587,60.3,84.5,230,226,589,142,621,71.9,54.7,219,
  681,692,681,681,1171,1174,1164,1102,1108,1036,1038,541,943,940,1148,1135,1224,
  429,419,421,428,524,526,526,28.4,2,169,166,614,166,694,54.8,123,292,
  544,524,535,542,978,981,981,455,479,624,621,719,461,307,454,410,212,
  214,194,205,212,668,671,671,356,361,327,329,390,197,422,402,389,346,
  60,72.1,54.5,58.3,557,560,550,451,457,330,332,247,292,670,497,484,595,
  393,412,395,389,606,608,599,803,809,622,629,286,645,945,849,836,939,
  401,420,403,397,612,615,605,811,817,613,619,294,653,953,857,844,947,
```

Una vez definido parámetros, conjuntos y variables, introduciremos los datos en la sección DATA:

```
r=0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,
  1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
  1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,
  0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,
  1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,
  0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,
  1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
  1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,
  0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,
  1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,
  0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,
  1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,
  0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,
  1,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,
  1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,
  0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,
  1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1;


S=60, 50, 100, 200, 50, 10, 250, 100, 20, 50, 100;

B=4, 1, 15, 9, 5, 15, 20, 40, 15, 25, 25, 13, 12, 23, 14, 16, 28;
```

```
p=100,200,50,300,250,150,300,250,175,160,250,125,345,235,165,100,250;

ENDDATA

!Asi hacemos las variables x binaria;
@FOR(HOSPITALESENV_HOSPITALESREC_PERIODOS(I, J, T):@BIN(X(I,J,T)));

coste_asignaciones=@SUM(HOSPITALESENV_HOSPITALESREC_PERIODOS(I,J,T):c(I,J)*B(J)*X(I,J,T));

coste_penalizacion=@SUM(HOSPITALESREC_PERIODOS(J,T):p(J)*r(J,T)*(1-@SUM(HOSPITALESENV_HOSPITALESREC_PERIODOS(I,J,T):X(I,J,T))));

!Función objetivo;
[OBJ] MIN=coste_asignaciones+coste_penalizacion;

!Restricciones;

!Número máximo de hospitales j que pueden ser servidos por un hospital i en un periodo t;
@FOR(HOSPITALESREC_PERIODOS(J,T):@SUM(HOSPITALES_ENV(I):X(I,J,T))<=n(J));

!Todos los hospitales j deben tener servicio al final del horizonte;
@FOR(HOSPITALES_REC(J):@SUM(HOSPITALES_ENV(I):@SUM(PERIODOS(T):X(I,J,T)))>=1);
```

Aquí se definirán las restricciones del problema:

```
!Función objetivo;
[OBJ] MIN=coste_asignaciones+coste_penalizacion;

!Restricciones;

!Número máximo de hospitales j que pueden ser servidos por un hospital i en un periodo t;
@FOR(HOSPITALESREC_PERIODOS(J,T):@SUM(HOSPITALES_ENV(I):X(I,J,T))<=n(J));

!Todos los hospitales j deben tener servicio al final del horizonte;
@FOR(HOSPITALES_REC(J):@SUM(HOSPITALES_ENV(I):@SUM(PERIODOS(T):X(I,J,T)))>=1);

!@FOR(HOSPITALES_REC(J):@SUM(HOSPITALES_ENV(I):@SUM(PERIODOS(T):X(I,J,T)))=1);

!Restricción de capacidades y demanda de los hospitales;
@FOR(HOSPITALES_ENV(I):@SUM(HOSPITALESREC_PERIODOS(J,T):B(J)*X(I,J,T))<=S(I));

!Restricción que hace que no se de respiradores cuando no necesitan;
@FOR(HOSPITALES_REC(J):@FOR(PERIODOS(T):@SUM(HOSPITALES_ENV(I):X(I,J,T))<=R(J,T)));


END
```

4.2. Localización puestos de emergencia, asignación y logística de recursos

Resumen

Este modelo es el utilizado en la sección Resumenes: "Pre-positioning of emergency supplies for disaster response". En este caso, el modelo ha sido adaptado para que en vez de que planifique las cantidades de varios tipos de suministros y que se coloquen previamente y se determine la ubicación de estos, se haga para que se determiné el reparto de respiradores, material sanitario (mascarillas, batas y respiradores) y medicamentos a diferentes hospitales, en condiciones de incertidumbre si ocurriera otra nueva ola de COVID-19.

La idea de este modelo es precisar que plantas se van a abrir y cual va a ser el tamaño de estas. Una vez sabemos que plantas se van a abrir, se podrá ver la cantidad de recursos y de que recursos se van a transportar de una planta a otra, teniendo en cuenta la demanda de cada uno de ellos. También, se tendrá en cuenta si se les dará uso a estos recursos, ya que si no se les da uso a estos recursos quedarán almacenados y habrá un coste de mantenimiento de estos.

Modelo

El modelo estará compuesto por los siguientes **conjuntos**:

- I: Ubicación de donde se parte.
- J: Ubicación de destino.
- K: Recursos.
- L: Capacidad de la instalación.

Las siguientes **variables**:

- $$y_{il} = \begin{cases} 1 & \text{si hay una instalación en una ubicación específica} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$
- Z_{ik}: Cantidad de recursos k que no se le dan uso a la ubicación i.
- X_{ijk}: Cantidad de productos k que transportan desde la ubicación i hacia la ubicación j.
- r_{ki}: Productos k preposicionados en la ubicación i.
- W_{ki}: Demanda de un producto k en la ubicación i que no se puede satisfacer.

Los **parámetros** pertenecientes a este modelo son:

- M_l: Capacidad instalación l.
- F_l: Coste de abrir un tipo de instalación l.
- b_k: Espacio que ocupa un recurso k.
- q_k: Coste de adquisición de una unidad de k.

- h_k: Coste de productos deteriorados k.
- v_{ki}: Demanda del recurso k en la ubicación i.
- c_{ijk}: Coste de transportar una unidad k desde la ubicación i a la ubicación j.
- u_{ij}: Capacidad de transporte de i a j.
- p_k: Coste de no satisfacer el recurso k.

Una vez visto los parámetros y las variables, la **función objetivo** es:

$$\text{mín} \qquad \sum_{i\in I}\sum_{l\in L} F_l y_{il} + \sum_{i\in I}\sum_{k\in K} q_k r_{ki} + \sum_{(i,j)\in A} + \sum_{k\in K} c_{ijk}x_{ijk} + \sum_{i\in I}\sum_{k\in K}(h_k z_{ki} + p_k w_{ki})$$

Y las **restricciones** son:

$$\sum_{i\in N} x_{ijk} + p_{ik}r_{ki} - z_{ki} = \sum_{i\in N} x_{ijk} + v_{ik} - w_{ik} \quad \forall i \in N, \forall k \in K \tag{4.5}$$

$$\sum_{k\in K} b_k x_{ijk} \leq u_{ij} \qquad \forall (i,j) \in A \tag{4.6}$$

$$\sum_{k\in K} b_k r_{ki} \leq \sum_{l\in L} M_l y_{il} \qquad \forall i \in I \tag{4.7}$$

$$\sum_{l\in L} y_{il} \leq 1 \qquad \forall i \in I \tag{4.8}$$

La primera restricción se referirá a la conservación de flujo.

La segunda restricción indica la capacidad del arco.

La tercera restricción indica las instalaciones que están abiertas y la capacidad de instalación.

Por último, la cuarta restricción indica el número de instalaciones por nodo.

Solución

En este problema, nos sale la siguiente solución en cuanto a la variable X_{ijk}, que es la cantidad de productos k que transportan desde la ubicación i hacia la ubicación j.

Variable	Value	Reduced Cost
X(P1, P2, MATERIAL)	27.00000	400.0000
X(P1, P2, MEDICAMENTOS)	3.000000	425.0000
X(P1, P3, MATERIAL)	29.00000	542.0000
X(P1, P3, MEDICAMENTOS)	1.000000	475.0000
X(P2, P3, MATERIAL)	6.000000	549.0000
X(P4, P5, MATERIAL)	17.00000	657.0000
X(P4, P5, MEDICAMENTOS)	84.00000	369.0000
X(P4, P10, MATERIAL)	110.0000	644.0000
X(P6, P7, MATERIAL)	41.00000	392.0000
X(P8, P9, MATERIAL)	82.00000	337.0000
X(P8, P12, MATERIAL)	44.00000	357.0000
X(P9, P11, RESPIRADORES)	17.00000	377.0000
X(P9, P11, MATERIAL)	88.00000	661.0000
X(P10, P11, MATERIAL)	17.00000	305.0000
X(P11, P13, MATERIAL)	40.00000	360.0000
X(P11, P13, MEDICAMENTOS)	2.000000	610.0000
X(P12, P13, RESPIRADORES)	3.000000	410.0000
X(P12, P13, MATERIAL)	19.00000	385.0000

También podemos ver la variable W_{ki} que es la demanda de un producto k en la ubicación i que no se puede satisfacer.

Variable	Value	Reduced Cost
W(P2, RESPIRADORES)	1.000000	1400.000
W(P3, RESPIRADORES)	13.00000	1400.000

La variable y_{il} nos dirá en que puntos o ubicaciones se sitúan las instalaciones y que tamaños tendrán estas:

Variable	Value	Reduced Cost
Y(P1, M)	1.000000	188400.0
Y(P2, P)	1.000000	19600.00
Y(P3, P)	1.000000	19600.00
Y(P4, M)	1.000000	188400.0
Y(P5, P)	1.000000	19600.00
Y(P6, M)	1.000000	188400.0
Y(P7, P)	1.000000	19600.00
Y(P8, M)	1.000000	188400.0
Y(P9, P)	1.000000	19600.00
Y(P10, P)	1.000000	19600.00
Y(P11, P)	1.000000	19600.00
Y(P12, P)	1.000000	19600.00
Y(P13, P)	1.000000	19600.00

La variable r_{ki} señala que productos k son preposicionados en la ubicación i, en este caso, Lingo nos dará el siguiente resultado:

Variable	Value	Reduced Cost
R(P1, RESPIRADORES)	30.00000	500.0000
R(P1, MATERIAL)	106.0000	300.0000
R(P1, MEDICAMENTOS)	83.00000	1000.000
R(P2, RESPIRADORES)	89.00000	500.0000
R(P2, MEDICAMENTOS)	62.00000	1000.000
R(P3, RESPIRADORES)	69.00000	500.0000
R(P3, MATERIAL)	20.00000	300.0000
R(P3, MEDICAMENTOS)	42.00000	1000.000
R(P4, RESPIRADORES)	21.00000	500.0000
R(P4, MATERIAL)	159.0000	300.0000
R(P4, MEDICAMENTOS)	165.0000	1000.000
R(P5, RESPIRADORES)	74.00000	500.0000
R(P5, MATERIAL)	42.00000	300.0000
R(P5, MEDICAMENTOS)	2.000000	1000.000
R(P6, RESPIRADORES)	90.00000	500.0000
R(P6, MATERIAL)	118.0000	300.0000
R(P6, MEDICAMENTOS)	47.00000	1000.000
R(P7, RESPIRADORES)	68.00000	500.0000
R(P7, MATERIAL)	33.00000	300.0000
R(P7, MEDICAMENTOS)	21.00000	1000.000
R(P8, RESPIRADORES)	78.00000	500.0000
R(P8, MATERIAL)	213.0000	300.0000
R(P8, MEDICAMENTOS)	93.00000	1000.000
R(P9, RESPIRADORES)	75.00000	500.0000
R(P9, MATERIAL)	17.00000	300.0000
R(P9, MEDICAMENTOS)	43.00000	1000.000
R(P10, RESPIRADORES)	79.00000	500.0000
R(P10, MATERIAL)	4.000000	300.0000
R(P10, MEDICAMENTOS)	62.00000	1000.000
R(P11, RESPIRADORES)	32.00000	500.0000
R(P11, MEDICAMENTOS)	100.0000	1000.000
R(P12, RESPIRADORES)	70.00000	500.0000
R(P12, MATERIAL)	9.000000	300.0000
R(P12, MEDICAMENTOS)	59.00000	1000.000
R(P13, RESPIRADORES)	86.00000	500.0000
R(P13, MEDICAMENTOS)	64.00000	1000.000

Por último, la variable Z_{ki} que es la cantidad de recursos k que no se le dan uso en la ubicación i son 0, lo que nos señala que se le da uso a todos los recursos y no se queda ninguno almacenado.

Como podemos comprobar, hay una columna que pone coste reducido, en Lingo el coste reducido indica cuánto tendría que mejorar cada uno de los coeficientes de la función objetivo antes de que la correspondiente variable de decisión pueda tomar valor positivo en la solución óptima.

Una vez visto los resultados, veremos la comprobación de la función objetivo y como se ha calculado esta con los datos que tenemos. Dentro de la función objetivo tenemos 5 costes:

- Coste de apertura.
- Coste de adquisición.
- Coste de transporte.
- Coste de almacén y mantenimiento.
- Coste de penalización.

En primer lugar veremos como se calcula el **coste de apertura**, la función de este coste es:

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} F_l y_{il}$$

F_l es el coste de abrir un tipo de instalación l:

Coste de apertura
19600
188400
300000

Y la variable y_{il} es una variable binaria, donde, si es 1, indica si hay una instalación i en una ubicación específica l:

```
 Variable           Value        Reduced Cost
 Y( P1, M)        1.000000          188400.0
 Y( P2, P)        1.000000          19600.00
 Y( P3, P)        1.000000          19600.00
 Y( P4, M)        1.000000          188400.0
 Y( P5, P)        1.000000          19600.00
 Y( P6, M)        1.000000          188400.0
 Y( P7, P)        1.000000          19600.00
 Y( P8, M)        1.000000          188400.0
 Y( P9, P)        1.000000          19600.00
Y( P10, P)        1.000000          19600.00
Y( P11, P)        1.000000          19600.00
Y( P12, P)        1.000000          19600.00
Y( P13, P)        1.000000          19600.00
```


Por tanto, el cálculo del **coste de apertura** queda de la siguiente manera:

Coste apertura	
P1	188400
P2	19600
P3	19600
P4	188400
P5	19600
P6	188400
P7	19600
P8	188400
P9	19600
P10	19600
P11	19600
P12	19600
P13	19600
TOTAL	**930000**

La explicación de este resultado es la siguiente, por ejemplo, en **P1** se abre una instalación y está es de tamaño mediano (todo esto se puede ver en el resultado de la variable y_{il}), por tanto, será 1 (de la variable y_{il}) por 188400 euros que es el coste de abrir una instalación mediana. Igual pasaría para **P2**, 1 (es la variable y_{il}) por 19600 euros que es el coste de apertura de una instalación de tamaño pequeña.

Para el **coste de adquisición** utilizamos la siguiente fórmula:

$$\sum_{k \in K} q_k r_{ki}$$

El parámetro q_k es el coste de adquisición de una unidad de k:

Recursos	Coste almacenamiento/ud
Respiradores	500
Material sanitario	300
Medicamentos	1000

Y la variable r_{ki} son los productos k preposicionados en la ubicación i:

Variable	Value	Reduced Cost
R(P1, RESPIRADORES)	30.00000	500.0000
R(P1, MATERIAL)	106.0000	300.0000
R(P1, MEDICAMENTOS)	83.00000	1000.000
R(P2, RESPIRADORES)	89.00000	500.0000
R(P2, MEDICAMENTOS)	62.00000	1000.000
R(P3, RESPIRADORES)	69.00000	500.0000
R(P3, MATERIAL)	20.00000	300.0000
R(P3, MEDICAMENTOS)	42.00000	1000.000
R(P4, RESPIRADORES)	21.00000	500.0000
R(P4, MATERIAL)	159.0000	300.0000
R(P4, MEDICAMENTOS)	165.0000	1000.000
R(P5, RESPIRADORES)	74.00000	500.0000
R(P5, MATERIAL)	42.00000	300.0000
R(P5, MEDICAMENTOS)	2.000000	1000.000
R(P6, RESPIRADORES)	90.00000	500.0000
R(P6, MATERIAL)	118.0000	300.0000
R(P6, MEDICAMENTOS)	47.00000	1000.000
R(P7, RESPIRADORES)	68.00000	500.0000
R(P7, MATERIAL)	33.00000	300.0000
R(P7, MEDICAMENTOS)	21.00000	1000.000
R(P8, RESPIRADORES)	78.00000	500.0000
R(P8, MATERIAL)	213.0000	300.0000
R(P8, MEDICAMENTOS)	93.00000	1000.000
R(P9, RESPIRADORES)	75.00000	500.0000
R(P9, MATERIAL)	17.00000	300.0000
R(P9, MEDICAMENTOS)	43.00000	1000.000
R(P10, RESPIRADORES)	79.00000	500.0000
R(P10, MATERIAL)	4.000000	300.0000
R(P10, MEDICAMENTOS)	62.00000	1000.000
R(P11, RESPIRADORES)	32.00000	500.0000
R(P11, MEDICAMENTOS)	100.0000	1000.000
R(P12, RESPIRADORES)	70.00000	500.0000
R(P12, MATERIAL)	9.000000	300.0000
R(P12, MEDICAMENTOS)	59.00000	1000.000
R(P13, RESPIRADORES)	86.00000	500.0000
R(P13, MEDICAMENTOS)	64.00000	1000.000

Por tanto, el cálculo del **coste de adquisición** será:

Coste de adquisición	
P1	129800
P2	106500
P3	82500
P4	223200
P5	51600
P6	127400
P7	64900
P8	195900
P9	85600
P10	102700
P11	116000
P12	96700
P13	107000
TOTAL	**1489800**

Este coste se calcularía así, por ejemplo, en **P1** el cálculo sería (106*300) + (83*1000) + (30*500). Las cifras 500, 300 y 100 son la variable q_k y 106, 83 y 30 son la variable r_{ki}.

El **coste de transporte** utiliza esta fórmula:

$$\sum_{(i,j)\in A} + \sum_{k\in K} c_{ijk}x_{ijk}$$

Donde c_{ijk} es el coste de transportar una unidad k desde la ubicación i a la ubicación j y la variable X_{ijk} es la cantidad de productos k que transportan desde la ubicación i hacia la ubicación j.

El cálculo del **coste de transporte** quedaría así:

Coste transporte					
Arco	**Ciudad i**	**Ciudad j**	**Coste transporte respiradores**	**Coste transporte material**	**Coste medicamentos**
1	**1**	**2**	0	10800	1275
2	**1**	**3**	0	15718	475
3	**2**	**3**	0	3294	0
4	**2**	**4**	0	0	0
5	**3**	**4**	0	0	0
6	**3**	**5**	0	0	0
7	**4**	**5**	0	11169	30996
8	**4**	**6**	0	0	0
9	**4**	**9**	0	0	0
10	**4**	**10**	0	70840	0
11	**5**	**10**	0	0	0
12	**6**	**7**	0	16072	0
13	**6**	**9**	0	0	0
14	**7**	**8**	0	0	0
15	**8**	**9**	0	27634	0
16	**8**	**12**	0	15708	0
17	**9**	**10**	0	0	0
18	**9**	**11**	6409	58168	0
19	**10**	**11**	0	5185	0
20	**11**	**12**	0	0	0
21	**11**	**13**	0	14400	1220
22	**12**	**13**	1230	7315	0
TOTAL			**297908**		

Para ver mejor como se ha calculado, pondré el ejemplo del arco 1, donde los 10800 euros de coste de transporte de material vienen calculados de 27 (es la variable X_{ijk}) * 400 (es la variable C_{ijk}), lo mismo pasaría para el coste de medicamentos del arco 1, que será 3 (es la variable X_{ijk}) * 425 (es la variable C_{ijk}). Y así sucesivamente para todos los arcos, donde la suma de todos los costes será 297908 euros de coste de transporte.

El **coste de penalización** es calculado por esta fórmula:

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} p_k w_{ki}$$

Donde p_k es el coste de no satisfacer el recurso k:

Recursos	Coste no satisfacer/ud
Respiradores	1400
Material sanitario	7000
Medicamentos	4000

Y la variable W_{ki} es la demanda de un producto k en la ubicación i que no se puede satisfacer:

```
              Variable           Value        Reduced Cost
   W( P2, RESPIRADORES)       1.000000            1400.000
   W( P3, RESPIRADORES)       13.00000            1400.000
```

Por tanto, el cálculo del **coste de penalización** quedaría de la siguiente manera:

Coste penalización	
P2, RESPIRADORES	1400
P3, RESPIRADORES	18200
TOTAL	**19600**

El cálculo del primer coste de penalización es 1 (es la variable w_{ki}) * 1400 (es la variable p_k). El segundo coste es 13 (es la variable w_{ki}) * 1400 (es la variable p_k).

El último **coste de almacén y mantenimiento** es 0, ya que la variable Z_{ki} que es la cantidad de recursos k que no se le dan uso en la ubicación i son 0, lo que nos señala que se le da uso a todos los recursos y no se queda ninguno almacenado.

Una vez calculados todos los costes, la función objetivo da 2.737.308, que será el total de todos los costes anteriormente mencionados.

La implementación en Lingo de este modelo queda de la siguiente manera. En primer lugar definimos el SETS:

```
MODEL:

SETS:
!Conjuntos primitivos;
RECURSOS/RESPIRADORES,MATERIAL,MEDICAMENTOS/:b,q,h,p;
UBICACIONES/P1..P13/;
TAMANOS_CENTROS/P,M,G/:M,F;
ARCOS(UBICACIONES,UBICACIONES)/P1 P2, P1 P3, P2 P3, P2 P5, P3 P4, P3 P5,P4 P5,P4 P6,
                              P4 P9, P4 P10, P5 P10, P6 P7, P6 P9, P7 P8, P8 P9,
                              P8 P12, P9 P10, P9 P11, P10 P11, P11 P12, P11 P13,
                              P12 P13/:u;

UBICACIONES_RECURSOS(UBICACIONES, RECURSOS):r,W,v,Z;
UBICACIONES_TAMANOS(UBICACIONES, TAMANOS_CENTROS):Y;
ARCOS_RECURSOS(ARCOS, RECURSOS):X, c;

ENDSETS
```

En segundo lugar definimos el DATA:

```
DATA:

q=500, 300, 1000;

v=30, 50, 79,
  90, 21, 65,
  82, 55, 43,
  21, 32, 81,
  74, 59, 86,
  90, 77, 47,
  68, 74, 21,
  78, 87, 93,
  58, 11, 43,
  79, 97, 62,
  49, 65, 98,
  67, 34, 59,
  89, 59, 66;

b=200, 500, 300;

h=4000, 2500, 1500;
```

```
p=1400, 7000, 4000;

M=36400, 408200, 780000;

F=19600, 188400, 300000;

u=14563,
14970,
30320,
64531,
34890,
56131,
44664,
11483,
28662,
60694,
16267,
58936,
71111,
53390,
43450,
```

```
43450,
65718,
22649,
79703,
8708,
56553,
24332,
10160;

c=530,      400,      425,
621,        542,      475,
522,        549,      520,
670,        608,      565,
695,        636,      412,
563,        493,      645,
499,        657,      369,
327,        592,      627,
367,        526,      566,
700,        644,      668,
306,        445,      512,
462,        392,      613,
```

```
403,          490,          352,
480,          479,          425,
414,          337,          698,
627,          357,          441,
401,          435,          624,
377,          661,          669,
583,          305,          545,
417,          603,          425,
665,          360,          610,
410,          385,          700;
```

Una vez definido el DATA, definimos las restricciones y ya estaría el modelo terminado:

```
@FOR(UBICACIONES_TAMANOS(I,L):@BIN(Y(I,L)));

!Función objetivo;
!Definimos los diferentes costes y los juntamos después;
costeapertura=@SUM(UBICACIONES_TAMANOS(I,L):F(L)*Y(I,L));

costeadq=@SUM(UBICACIONES_RECURSOS(I,K):q(K)*r(I,K));

costetrans=@SUM(ARCOS_RECURSOS(I,J,K):C(I,J,K)*X(I,J,K));

coste_almacen_mant=@SUM(UBICACIONES_RECURSOS(I,K):h(K)*Z(I,K));

coste_penalizacion=@SUM(UBICACIONES_RECURSOS(I,K):p(K)*W(I,K));

!Función objetivo con lo anterior junto;
[OBJ]MIN=costeapertura + costeadq + costetrans + (coste_almacen_mant + coste_penalizacion);


!Restricciones;

!1. Conservación de flujo;
@FOR(UBICACIONES_RECURSOS(I,K):@SUM(ARCOS_RECURSOS(J,I,K):X(J,I,K))+r(I,K)-Z(I,K)=@SUM(ARCOS_RECURSOS(I,J,K):X(I,J,K)) + v(I,K) - w(I,K));

!2. Capacidad de arco;
@FOR(ARCOS(I,J):@SUM(RECURSOS(K):b(k)*X(I,J,K))<=U(I,J));

!3. Instalaciones abiertas y capacidad instalación;
@FOR(UBICACIONES(I):@SUM(RECURSOS(K):b(K)*r(I,K))<=@SUM(TAMANOS_CENTROS(L):M(L)*Y(I,L)));

!4. Número de instalaciones por nodo;
@FOR(UBICACIONES(I):@SUM(TAMANOS_CENTROS(L):Y(I,L))<=1);

!5. Restricciones no negatividad;
@FOR(UBICACIONES_RECURSOS(I,K):r(I,K)>=0);
@FOR(ARCOS_RECURSOS(I,J,K):X(I,J,K)>=0);
@FOR(UBICACIONES_RECURSOS(I,K):Z(I,K)>=0);
@FOR(UBICACIONES_RECURSOS(I,K):W(I,K)>=0);

@FOR(UBICACIONES_RECURSOS(I,K):@GIN(r(I,K)));
@FOR(ARCOS_RECURSOS(I,J,K):@GIN(X(I,J,K)));
@FOR(UBICACIONES_RECURSOS(I,K):@GIN(Z(I,K)));
@FOR(UBICACIONES_RECURSOS(I,K):@GIN(W(I,K)));

END
```

Capítulo 5

Modelo de Localización mediana

5.1. Modelo vacunación centro médicos y farmacias

Resumen

Con las vacunas creadas ante el COVID-19, se pretende vacunar a la población para evitar nuevas olas y poco a poco poder llegar a la nueva "normalidad", llegando a un porcentaje alto de inmunidad (más del 70 % de la población). Por eso, en esta sección, se formulará un modelo donde aparte de realizar la vacunación en centros médicos y hospitales, se simulará el caso de realizar la vacunación también en farmacias. De este modo, se podría agilizar el proceso y vacunar lo antes posible a la población.

Para este modo de vacunación, por ejemplo en España, se empezó con un orden de preferencia formado por 3 etapas, donde la 1º etapa tendrá preferencia a vacunarse sobre la 2º y 3º:

- **Primera etapa**: Suministro inicial y muy limitado de dosis de vacunas.
- **Segunda etapa**: Incremento progresivo del número de vacunas que permitirá ir aumentando el número de personas a vacunar.
- **Tercera etapa**: Aumento en el número de dosis y de vacunas disponibles para cubrir a todos los grupos prioritarios.

Está 1º etapa que tendrá prioridad sobre las demás, está formada por las siguientes personas:

- Residentes y personal sanitario y sociosanitario en residencias de personas mayores y con discapacidad.
- Personal sanitario de primera línea.
- Otro personal sanitario y sociosanitario.

- Personas con discapacidad que requieren intensas medidas de apoyo para desarrollar su vida (grandes dependientes no institucionalizados).

Ante todo, es muy importante que se siga este orden de preferencia, ya que si se altera el modelo será totalmente erróneo y se alterará el sistema de vacunación.

A día de hoy, la primera etapa comentada anteriormente ya ha sido vacunada, y en casi toda España la media de edad sobre la que se está realizando la vacunación es desde los 51 a 59 años aproximadamente. Para mayor aclaración, está es la cobertura de vacunación actual por edad:

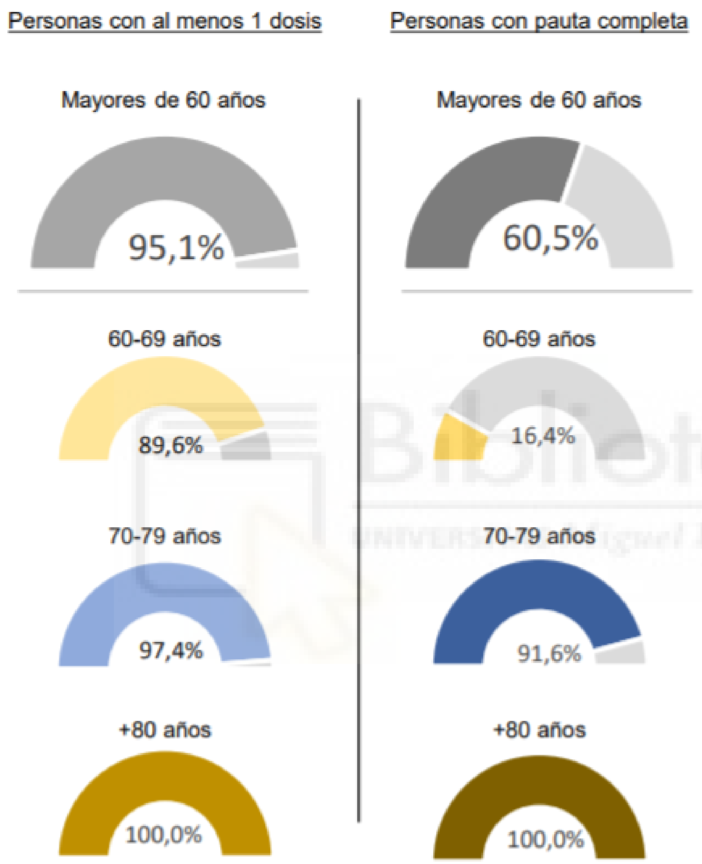


Figura 5.1: Fuente: Ministerio de Sanidad

Está planeado que las personas de 40 a 49 años sean vacunadas de su primera dosis en el mes de junio, las personas de 30 a 39 en el mes de julio, las personas de 20 a 29 años en agosto y las personas de 16 a 19 años en septiembre. En cuanto a las personas menores de 16 años, de momento, no recibirán ninguna vacuna, puesto que los fármacos del catálogo actual no han realizado estudios en esa franja de edad. No obstante, si los avances lo permiten y se mantiene el orden de edad que se está manteniendo hasta ahora, se empezaría a administrar la primera dosis en octubre. También cabe destacar que realizando la vacunacion a las personas mayores de 30 años se conseguiría la ansiada inmunidad de grupo, que es el 70 % de la población.

La vacunación se está realizando con 4 tipos diferentes de vacunas, estás son:

	Dosis entregadas Pfizer(1)	Dosis entregadas Moderna (1)	Dosis entregadas AstraZeneca (1)	Dosis entregadas Janssen (1)	Dosis entregadas Total (1)	Dosis administradas Total (2)	% sobre entregadas (3)	Nº Personas con al menos 1 dosis	Nº Personas con pauta completa	Fecha de la última vacuna registrada(2)
Andalucía	3.312.360	502.000	1.054.200	167.500	**5.036.060**	**4.711.142**	93,5%	3.159.245	1.606.909	31/05/2021
Aragón	629.775	93.100	165.600	26.200	**914.675**	**832.942**	91,1%	547.545	296.645	31/05/2021
Asturias	568.355	80.200	127.000	20.200	**795.755**	**767.489**	96,4%	493.717	283.390	31/05/2021
Baleares	418.050	62.400	145.800	23.200	**649.450**	**539.146**	83,0%	384.742	162.491	31/05/2021
Canarias	835.350	104.800	271.000	43.000	**1.254.150**	**1.062.442**	84,7%	760.830	330.436	31/05/2021
Cantabria	279.195	40.700	72.500	11.450	**403.845**	**364.918**	90,4%	242.511	127.614	31/05/2021
Castilla y León	1.326.495	195.800	298.300	47.450	**1.868.045**	**1.670.624**	89,4%	1.037.313	658.566	31/05/2021
Castilla - La Mancha	893.745	134.400	253.800	40.475	**1.322.420**	**1.206.939**	91,3%	816.585	416.783	31/05/2021
Cataluña	3.214.610	487.700	969.100	153.950	**4.825.360**	**4.240.669**	87,9%	2.861.596	1.423.308	31/05/2021
C. Valenciana	2.018.440	305.500	629.800	100.100	**3.053.840**	**2.679.175**	87,7%	1.821.055	913.453	31/05/2021
Extremadura	509.615	73.600	132.400	21.000	**736.615**	**678.475**	92,1%	446.172	244.753	31/05/2021
Galicia	1.406.455	200.200	336.600	53.600	**1.996.855**	**1.874.422**	93,9%	1.224.586	690.840	31/05/2021
La Rioja	148.655	21.600	39.600	6.300	**216.155**	**196.016**	90,7%	127.088	72.600	31/05/2021
Madrid	2.672.205	408.200	844.700	134.100	**4.059.205**	**3.601.104**	88,7%	2.444.639	1.227.286	31/05/2021
Murcia	575.195	87.100	188.100	29.900	**880.295**	**754.586**	85,7%	490.041	277.687	31/05/2021
Navarra	286.215	43.100	82.300	13.150	**424.765**	**400.144**	94,2%	264.869	146.778	31/05/2021
País Vasco	1.028.250	150.600	276.500	43.950	**1.499.300**	**1.380.112**	92,1%	928.366	491.940	31/05/2021
Ceuta	28.890	3.800	11.000	1.650	**45.340**	**39.424**	87,0%	29.894	10.552	31/05/2021
Melilla	28.890	3.700	11.000	1.650	**45.240**	**38.634**	85,4%	28.251	11.443	28/05/2021
Fuerzas Armadas	26.520	7.700	66.100	0	**100.320**	**81.330**	81,1%	69.559	11.771	31/05/2021
Totales	**20.207.265**	**3.006.200**	**5.975.400**	**938.825**	**30.127.690**	**27.119.733**	**90,0%**	**18.178.604**	**9.405.245**	

Figura 5.2: Fuente: Ministerio de Sanidad

La diferencia entre las diferentes vacunas son que las vacunas de Moderna y Pfizer están basadas en ARN mensajero, esto es, introducen en el cuerpo las instrucciones genéticas y así generan la inmunidad. En cambio, la vacuna de Oxford/AstraZeneca está basada en una tecnología más tradicional, de vector vírico, a partir de la proteína S del virus del resfriado común de los chimpancés (adenovirus) para así generar los anticuerpos. La de Janssen tampoco se basa en ARN mensajero, sino que utiliza como vector vírico un adenovirus humano modificado genéticamente para expresar la proteína S del coronavirus SARS-CoV-2 y estimular así la respuesta inmune frente a él. Esta técnica es muy similar a la empleada por la vacuna de AstraZeneca, que emplea un adenovirus de chimpancé.

El intervalo de tiempo una vez recibes la dosis recomendada es de 21 días en Pfizer/BioNTech, de 28 días en la vacuna de Moderna y entre 10 y 12 semanas en la vacuna de AstraZeneca. No obstante, la Comisión de Salud Pública decidió aumentar de 12 a 16 semanas el intervalo entre la primera y la segunda dosis de esta última vacuna mientras decidía si a las personas menores de 60 años que recibieron ya un pinchazo de AstraZeneca se les debía inocular una segunda inyección del mismo fármaco o de otro.

Una de las dudas frecuentes es que tipo de vacuna se va a recibir, actualmente, se inocula las vacunas desarrolladas por Pfizer/BioNTech y Moderna al personal de hospital y atención primaria, profesionales de odontología, higiene dental, junto al resto de personal sanitario, salud pública e instituciones penitenciarias, aparte de grandes dependientes y sus cuidadores profesionales, personas con patologías del alto riesgo de COVID grave, personas entre los 79 y 70 años y entre los 59 y 50 años.

Con AstraZeneca se vacuna a la población de entre 60 y 69 años, por su posible vinculación con casos raros de trombosis en población más joven tras la primera dosis. Pero en un principio se suministró a trabajadores esenciales y de especial riesgo de contagio hasta los 65 años. El cambio de criterio dejó en el limbo a millones de personas que recibieron una primera inyección y esperaban la segunda dosis para completar la inmunización. Ahora, la Comisión de Salud Pública ha acordado suministrarles una segunda dosis de Pfizer, aunque les permite elegir también AstraZeneca tras la firma de un consentimiento informado.

Por último, la vacuna Janssen se suministra a personas entre 70 y 79 años, junto a las vacunas de Pfizer y Moderna, basadas en ARNm. Asimismo, esta vacuna solo requiere una dosis, por lo que se quiere suministrar a personas que sean "difíciles de captar y vacunar".

Una vez visto toda la información anterior, empezaré con el modelo desarrollado. Las farmacias utilizadas para la realización del modelo son farmacias ubicadas en Elche:

- Farmacia Elena Soler Vicente
- Farmacia Universidad - Elche
- Farmacia Vázquez Albentosa Encarnación
- Farmacia Astor - Elche
- Farmacia Lopez Delicado
- Avinguda dels Llauradors, 26, 03204 Elx, Alicante

Los centros médicos y hospitales utilizados son también pertenecientes a Elche, estos son:

- Centro de salud Altabix
- Centro Salud Elx Carrús Este
- Hospital General Universitario de Elche
- Centro de salud El Toscar
- Hospital del Vinalopó
- Centro de Salud el Raval

Y las ubicaciones de las personas que se vacunarían son:

- Carrer Miguel de Unamuno, 10-20
- Calle Patricio Ruiz Gómez, 120-142
- Carrer del Capità Antoni Mena, 31
- Calle Ilicitano Ausente, 12
- Carrer Forn Fondo, 10-42

- Calle Zurbarán, 3
- Carrer del Capità Baltasar Tristany, 28
- Carrer José Grau Niñoles, 50
- Carrer dels Arbres, 44, 03201 Elx, Alacant
- Calle Pintor Benedicto, 19
- Carrer del Filet de Fora, 97
- Calle la Torre, 93
- Calle Antonio Soria Gabaldón, 3
- Calle Ntra. Sra. del Remedio, 7
- Calle Mariano Benlliure, 64
- Calle Francisco Soler, 1, 03208 Elche, Alicante
- Calle Orihuela, 18
- Avinguda de Candalix, 4
- Calle Amílcar Barca, 6
- Calle Dr. Caro, 28

Modelo

El modelo estará formado por los siguientes **conjuntos**:

- **I**: Personas pendientes de vacunarse.
- **J**: Centro médico donde se vacunaría a las personas.
- **K**: Farmacias donde se vacunarían a las personas.
- **T**: Períodos a lo largo de 1 año (12 meses).

Las **variables** utilizadas son:

$$x_{ijt} = \begin{cases} 1 & \text{si la persona } i \text{ es asignada al centro médico } j \text{ en el período } t \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

$$z_{ikt} = \begin{cases} 1 & \text{si la persona } i \text{ es asignada a la farmacia } k \text{ en el período } t \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

$$y_j = \begin{cases} 1 & \text{si el centro médico } j \text{ suministra vacunas} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

$$w_k = \begin{cases} 1 & \text{si la farmacia } k \text{ suministra vacunas} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Los **parámetros** de este modelo son:

- C_{ij}: Coste de asignación de la persona i al centro médico j.
- S_{ik}: Coste de asignación de la persona i a la farmacia k.
- n: Número de personas totales que recibirán la vacuna perteneciente a la primera etapa.
- θ_i: es A si la persona tiene máxima prioridad de vacunarse y B si se vacuna después de los A
- P: Número de centros médicos que suministrarán vacunas.
- R: Número de farmacias que suministrarán vacunas.
- M_j: Capacidad de los centros médicos j.
- F_k: Capacidad de las farmacias k.

La **función objetivo** es:

$$\text{mín} \qquad \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} C_{ij} x_{ijt} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} S_{ik} z_{ikt}$$

Y las **restricciones** son:

$$\sum_{t\in T}\sum_{j\in J} x_{ijt} + \sum_{t\in T}\sum_{k\in K} z_{ikt} = 1 \qquad \forall i \in I \tag{5.1}$$

$$\sum_{i\in I} x_{ijt} \leq \sum_{i\in I} x_{ijt-1} \qquad \forall j \in J, t \in T \tag{5.2}$$

$$\sum_{i\in I} z_{ikt} \leq \sum_{i\in I} z_{ikt-1} \qquad \forall k \in K, t \in T \tag{5.3}$$

$$\sum_{j\in J} x_{i_1jt} + \sum_{k\in K} z_{i_1kt} \leq \sum_{s=1}^{t}(\sum_{j\in J} x_{i_2jt} + \sum_{k\in K} z_{i_2kt}) \qquad \forall i_1, i_2 \in I : \theta_{i_1} = B, \theta_{i_2} = A, t \in T \tag{5.4}$$

$$\sum_{j\in J} y_j = P \qquad \forall i \in I, j \in J \tag{5.5}$$

$$\sum_{k\in K} w_k = R \qquad \forall i \in I, k \in K \tag{5.6}$$

$$x_{ijt} \leq y_j \qquad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall t \in T, \tag{5.7}$$

$$z_{ikt} \leq w_k \qquad \forall i \in I, \forall k \in K, \forall t \in T, \tag{5.8}$$

$$\sum_{i\in I} x_{ijt} \leq M_j y_j \qquad \forall j \in J, t \in T \tag{5.9}$$

$$\sum_{i\in I} z_{ikt} \leq F_k w_k \qquad \forall k \in K, t \in T \tag{5.10}$$

La restricción 1 hace que todas las personas sean asignadas a centros médicos o farmacias.

La restricción 2 hace que no se asignen personas a centros médicos en un periodo superior si no se ha asignado antes en un periodo previo.

La restricción 3 hace que no se asignen personas a farmacias en un periodo superior si no se ha asignado antes en un periodo previo.

La restricción 4 hace que las personas de prioridad 1 sean vacunadas antes que las personas de prioridad 2, es decir, que se cumpla la prioridad.

Las restricciones 5 y 6 hacen que P (número de centros médicos que suministrarán vacunas) centros médicos vacunen y R (número de farmacias que suministrarán vacunas) farmacias suministren vacunas.

La restricción 7 relaciona las variables x_{ijt} con y_j y la restricción 8 relaciona las variables z_{ikt} con w_k.

Las restricciones 9 y 10 hacen que se cumplan las capacidades de los centros médicos y de las farmacias que suministren vacunas.

Solución

Los costes utilizados como C_{ij} y S_{ik} son la distancia de las ubicaciones de cada persona a los centros médicos y farmacias (estas distancias están en metros, y han sido extraídas de Google maps).

Los costes C_{ij} de cada persona a los centros médicos son los siguientes:

	Cij					
	C1	**C2**	**C3**	**C4**	**C5**	**C6**
P1	1400	2400	1400	2300	3300	1100
P2	2700	850	3000	950	2800	2200
P3	2800	1700	2600	900	1900	1600
P4	850	3500	2500	4100	5300	3300
P5	2400	2700	1600	2200	2500	250
P6	850	3400	2700	4100	5300	3300
P7	2700	1500	2700	850	2000	1700
P8	3500	1500	3400	140	1400	2500
P9	2400	1700	2200	1500	2500	1300
P10	1200	4000	1200	4000	4600	2400
P11	2400	2900	1600	2400	2400	67
P12	3300	2100	2800	1200	1400	1500
P13	2600	3200	1400	2800	2300	450
P14	2000	2500	1600	2100	2700	500
P15	3000	1800	2500	1200	1700	1500
P16	2500	5400	2400	5400	5900	3700
P17	850	3700	1500	3800	4800	2600
P18	1400	2000	1900	2400	3500	1300
P19	3500	3100	2600	2600	1700	1400
P20	2100	1700	2200	2600	2600	1300

Y los costes S_{ik} de cada persona i a las farmacias k son los siguientes:

	Sik					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
P1	900	1900	950	2000	2300	2300
P2	2200	2900	2100	600	650	2300
P3	2300	3200	1500	900	1500	1300
P4	1400	270	3100	3700	3800	4400
P5	1900	2900	120	2200	2400	1400
P6	1500	300	3100	3700	3900	4500
P7	2400	3100	1600	700	1300	1500
P8	3100	3800	2400	300	1000	2200
P9	1900	1800	1100	1200	1500	1500
P10	1500	1500	2400	3800	4100	3500
P11	1900	2900	100	2400	2700	1400
P12	2800	3700	1400	1200	1900	1100
P13	2300	3200	500	2800	3000	1300
P14	1500	2600	350	2000	2300	1700
P15	2500	3400	1300	1200	1600	1100
P16	2900	2500	3600	5200	5400	4800
P17	1300	1100	2500	3600	3800	3800
P18	1000	1800	1100	2000	2100	2500
P19	3000	4000	1400	2600	2900	350
P20	1600	2500	1100	1300	1600	1700

Para analizar la solución, nos fijaremos en las variables x_{ijt}, que nos señala las personas que se vacunan en los centros médicos y en que período, y la variable z_{ikt}, que nos señalará en que farmacias se vacunan estas personas y períodos.

```
          Variable           Value        Reduced Cost
   X( P3, C4, T1)         1.000000         900.0000
   X( P5, C6, T1)         1.000000         250.0000
   X( P8, C4, T1)         1.000000         140.0000
  X( P11, C6, T1)         1.000000         67.00000
  X( P12, C5, T1)         1.000000         1400.000
  X( P13, C6, T1)         1.000000         450.0000
  X( P15, C5, T1)         1.000000         1700.000
  X( P19, C5, T1)         1.000000         1700.000
   Z( P1, F1, T1)         1.000000         900.0000
   Z( P2, F4, T1)         1.000000         600.0000
   Z( P4, F2, T1)         1.000000         270.0000
   Z( P6, F2, T1)         1.000000         300.0000
   Z( P7, F4, T1)         1.000000         700.0000
   Z( P9, F4, T1)         1.000000         1200.000
  Z( P10, F2, T1)         1.000000         1500.000
  Z( P14, F1, T1)         1.000000         1500.000
  Z( P16, F2, T1)         1.000000         2500.000
  Z( P17, F2, T1)         1.000000         1100.000
  Z( P18, F1, T1)         1.000000         1000.000
  Z( P20, F1, T1)         1.000000         1600.000
```

La variable y_j nos indicará que centros médicos suministran vacunas, igual pasaría con la variable w_k, que nos indicará que farmacias suministran vacunas:

```
Variable           Value        Reduced Cost
  Y( C4)        1.000000            0.000000
  Y( C5)        1.000000            0.000000
  Y( C6)        1.000000            0.000000
  W( F1)        1.000000            0.000000
  W( F2)        1.000000            0.000000
  W( F4)        1.000000            0.000000
```

Si comprobamos si la solución cumple con las capacidades establecidas en el modelo, nos saldrá que sí (aún haciéndose todo en T1), las capacidades de los centros médicos son (las celdas resaltadas son los centros médicos que suministran vacunas) :

C1	C2	C3	C4	C5	C6
4	3	4	2	3	3

Las capacidades de las farmacias son las siguientes (las celdas resaltadas son las farmacias que suministran vacunas):

F1	F2	F3	F4	F5	F6
4	5	2	3	2	1

Por tanto, viendo las soluciones x_{ijt} y z_{ikt}, vemos que se cumplen las capacidades anteriormente mencionadas:

F1	4
F2	5
F4	3
C4	2
C5	3
C6	3

Y si comprobamos la **función objetivo**:

$$\text{mín} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} C_{ij} x_{ijt} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} S_{ik} z_{ikt}$$

Vemos como quedaría:

	Coste
X(P3, C4, T1)	900
X(P5, C6, T1)	250
X(P8, C4, T1)	140
X(P11, C6, T1)	67
X(P12, C5, T1)	1400
X(P13, C6, T1)	450
X(P15, C5, T1)	1700
X(P19, C5, T1)	1700
Z(P1, F1, T1)	900
Z(P2, F4, T1)	600
Z(P4, F2, T1)	270
Z(P6, F2, T1)	300
Z(P7, F4, T1)	700
Z(P9, F4, T1)	1200
Z(P10, F2, T1)	1500
Z(P14, F1, T1)	1500
Z(P16, F2, T1)	2500
Z(P17, F2, T1)	1100
Z(P18, F1, T1)	1000
Z(P20, F1, T1)	1600
TOTAL	19777

Donde por ejemplo, en X(P3, C4, T1) sería $900 * 1$ (el 900 son los costes C_{ij}, que es la distancia en metros de las personas i a los centros médicos j).

En el caso de Z(P1, F1, T1) sería $900 * 1$, (el 900 son los costes S_{ik}, que es la distancia en metros de las personas i a las farmacias k).

En las imágenes de los resultados de las variables vistas anteriormente hay una columna llamada coste reducido, en Lingo el coste reducido indica cuánto tendría que mejorar cada uno de los coeficientes de la función objetivo antes de que la correspondiente variable de decisión pueda tomar valor positivo en la solución óptima.

La implementación de este modelo en Lingo es el siguiente, donde en primer lugar, definiremos el SETS del modelo:

```
MODEL:

SETS:
PERSONAS/P1..P20/:Q;
CENTROS/C1..C6/:Y,M;
FARMACIAS/F1..F6/:W,F;
PERIODOS/T1..T12/;

PERSONAS_CENTROS_PERIODOS(PERSONAS,CENTROS,PERIODOS):X;
PERSONAS_CENTROS(PERSONAS,CENTROS):C;
PERSONAS_FARMACIAS(PERSONAS,FARMACIAS):S;
PERSONAS_FARMACIAS_PERIODOS(PERSONAS,FARMACIAS,PERIODOS):Z;

A(PERSONAS)/P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8,P9,P10,P11,P12,P13,P14,P15/;

B(PERSONAS)/P16,P17,P18,P19,P20/;


ENDSETS
```

Los datos estarán en el apartado DATA:

```
DATA:

P=3;

R=3;

n=20;

C=1400,2400,1400,2300,3300,1100,
  2700,850,3000,950,2800,2200,
  2800,1700,2600,900,1900,1600,
  850,3500,2500,4100,5300,3300,
  2400,2700,1600,2200,2500,250,
  850,3400,2700,4100,5300,3300,
  2700,1500,2700,850,2000,1700,
  3500,1500,3400,140,1400,2500,
  2400,1700,2200,1500,2500,1300,
  1200,4000,1200,4000,4600,2400,
  2400,2900,1600,2400,2400,67,
  3300,2100,2800,1200,1400,1500,
  2600,3200,1400,2800,2300,450,
  2000,2500,1600,2100,2700,500,
  3000,1800,2500,1200,1700,1500,
  2500,5400,2400,5400,5900,3700,
  850,3700,1500,3800,4800,2600,
  1400,2000,1900,2400,3500,1300,
  3500,3100,2600,2600,1700,1400,
  2100,1700,2200,1600,2600,1300;
```

```
S=900,1900,950,2000,2300,2300,
  2200,2900,2100,600,650,2300,
  2300,3200,1500,900,1500,1300,
  1400,270,3100,3700,3800,4400,
  1900,2900,120,2200,2400,1400,
  1500,300,3100,3700,3900,4500,
  2400,3100,1600,700,1300,1500,
  3100,3800,2400,300,1000,2200,
  1900,2800,1100,1200,1500,1500,
  1500,1500,2400,3800,4100,3500,
  1900,2900,100,2400,2700,1400,
  2800,3700,1400,1200,1900,1100,
  2300,3200,500,2800,3000,1300,
  1500,2600,350,2000,2300,1700,
  2500,3400,1300,1200,1600,1100,
  2900,2500,3600,5200,5400,4800,
  1300,1100,2500,3600,3800,3800,
  1000,1800,1100,2000,2100,2500,
  3000,4000,1400,2600,2900,350,
  1600,2500,1100,1300,1600,1700;

F=4,5,2,3,2,1;

M=4,3,4,2,3,3;

ENDDATA
```

Una vez definido SETS y DATA, pasaremos a crear la función objetivo, restricciones y las funciones que queremos que sean binarias:

```
@FOR(PERSONAS_CENTROS_PERIODOS(I,J,T):@BIN(X(I,J,T)));
@FOR(PERSONAS_FARMACIAS_PERIODOS(I,K,T):@BIN(Z(I,K,T)));
@FOR(PERSONAS(I):@BIN(Q(I)));
@FOR(CENTROS(J):@BIN(Y(J)));
@FOR(FARMACIAS(K):@BIN(W(K)));


!Función objetivo;
[OBJ]MIN=@SUM(PERSONAS_CENTROS_PERIODOS(I,J,T):C(I,J)*X(I,J,T))+@SUM(PERSONAS_FARMACIAS_PERIODOS(I,K,T):S(I,K)*Z(I,K,T));


!Restricciones;

!Restricción 1;

@FOR(PERSONAS(I):@SUM(CENTROS(J):@SUM(PERIODOS(T):X(I,J,T)))+@SUM(FARMACIAS(K):@SUM(PERIODOS(T):Z(I,K,T)))=1);

!Restricción 2;

@FOR(CENTROS(J):@FOR(PERIODOS(T)|T #GT# 1:@SUM(PERSONAS(I):X(I,J,T))<=@SUM(PERSONAS(I):X(I,J,T-1))));

!Restricción 3;

@FOR(FARMACIAS(K):@FOR(PERIODOS(T)|T #GT# 1:@SUM(PERSONAS(I):Z(I,K,T))<=@SUM(PERSONAS(I):Z(I,K,T-1))));

!Restricción 4;

@FOR(A(I2):@FOR(B(I1):@FOR(PERIODOS(T):@SUM(CENTROS(J):X(I2,J,T))+@SUM(FARMACIAS(K):Z(I2,K,T))<=@SUM(PERIODOS(H)|H #LE# T:(@SUM(CENTROS(J):X(I1,J,T))
```

+

```
@SUM(FARMACIAS(K):Z(I1,K,T)))))));
```

```
!Restricción 5;

@FOR(PERSONAS(I):@FOR(PERIODOS(T):@SUM(CENTROS(J):Y(J))=P));

!Restricción 6;

@FOR(PERSONAS(I):@FOR(PERIODOS(T):@SUM(FARMACIAS(K):W(K))=R));

!Restricción 7;

@FOR(PERSONAS_CENTROS_PERIODOS(I,J,T):X(I,J,T)<=Y(J));

!Restricción 8;

@FOR(PERSONAS_FARMACIAS_PERIODOS(I,K,T):Z(I,K,T)<=W(K));

!Restricción 9;

@FOR(CENTROS(J):@FOR(PERIODOS(T):@SUM(PERSONAS(I):X(I,J,T))<=M(J)*Y(J)));

!Restricción 10;

@FOR(FARMACIAS(K):@FOR(PERIODOS(T):@SUM(PERSONAS(I):Z(I,K,T))<=F(K)*W(K)));

END
```

Capítulo 6

Modelo de Localización centro

6.1. Modelo distanciamiento social

Resumen

El COVID-19 se propaga fácilmente a través del contacto físico entre personas, por lo que una de las grandes medidas que se ha impuesto para poder evitar una mayor propagación del COVID-19 es el distanciamiento social de al menos 2 metros (6 pies), ya que, es una de las medidas más efectivas junto al uso de mascarilla o la actual vacunación. Las decisiones de distanciamiento social todavía las toman los gobiernos de manera empírica, es decir, las autoridades no cuentan con una herramienta automatizada para recomendar qué decisiones hacer con el fin de maximizar el distanciamiento social y minimizar el impacto para la economía. Por tanto, en este modelo se intentará minimizar el riesgo que sufren las personas al estar en instalaciones, teniendo en cuenta el porcentaje de tiempo que pasan en esas instalaciones y el riesgo de infectarse.

Modelo

Los **conjuntos** utilizados en el modelo son:

- U: Personas.
- V: Instalaciones.

Las **variables** utilizadas son:

$$x_u = \begin{cases} 1 & \text{si la persona } u \text{ no está aislada} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

$$y_v = \begin{cases} 1 & \text{si la instalación } v \text{ está abierta} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Los **parámetros** del modelo son:

- p_{uv}: Representa el porcentaje de tiempo que pasa la persona **u** en la instalación o lugar **v**, por ejemplo, si el porcentaje es 0.25, p_{uv} será 0.25 * 24 = 6 horas.
- f_u: Será la probabilidad de que estas personas puedan ser infectadas.
- c_v: coste que mantiene una instalación estando abierta.
- q_u: coste que mantiene una persona mientras no está confinada.
- R_v: el riesgo de una instalación es informalmente la suma ponderada (usando el riesgo como el peso) del tiempo que pasan las personas en esa instalación. Se calcularía de la siguiente manera:

$$\sum_{u \in U:(u,v)\in E} f_u p_{uv} \tag{6.1}$$

- t_u: El riesgo de una persona t se define como la suma ponderada del tiempo que ha pasado visitando esa instalación. Se calcula de la siguiente manera:

$$\sum_{v \in V:(u,v)\in E} R_v p_{uv} \tag{6.2}$$

Por tanto, la **función objetivo** será la siguiente:

$$\text{mín} \qquad \sum_{u \in U} t_u x_u \tag{6.3}$$

Y está estará sujeta a las siguientes **restricciones**:

$$\sum_{u \in U} q_u x_u + \sum_{v \in V} c_v y_v \leq B \tag{6.4}$$

$$\sum_{(u,v)\in E} f_u p_{uv} x_u = R_v \qquad \forall v \in V \tag{6.5}$$

$$\sum_{(u,v)\in E} p_{uv} R_v y_v = t_u \qquad \forall u \in U \tag{6.6}$$

$$x_u, y_v \in 0,1 \quad \forall u \in U, \forall v \in V \tag{6.7}$$

La función objetivo hace que se minimice el riesgo que corren las personas al ir a una instalación y pasar tiempo ahí.

La primera restricción hace que se mantenga los costes que tendría una persona al estar sin confinar y una instalación sin cerrar.

La segunda restricción lo que intenta es que se mantenga el riesgo de una instalación, es decir, el riesgo de la instalación en este caso es informalmente la suma ponderada (usando el riesgo como la ponderación) del tiempo que pasan las personas en esa instalación.

La tercera restricción pasaría algo parecido a la anterior restricción, intenta que se mantenga el riesgo de las personas al pasar un porcentaje p_{uv} de tiempo en una o varias instalaciones.

Por último, la última restricción indica que las variables x_u e y_v son binarias.

Solución

Una vez resolvemos el modelo en Lingo, nos saldrá la siguiente solución, donde la variable x_u nos indica si las personas son confinadas o no:

Variable	Value	Reduced Cost
X(P1)	0.000000	0.000000
X(P2)	1.000000	0.000000
X(P3)	1.000000	0.000000
X(P4)	0.000000	0.000000
X(P5)	0.000000	0.000000
X(P6)	1.000000	0.000000
X(P7)	0.000000	0.000000
X(P8)	0.000000	0.000000
X(P9)	1.000000	0.000000
X(P10)	1.000000	0.000000

En este caso, las personas 1, 4, 5, 7 y 8 estarán confinadas, mientras que el resto no tendrán que estar confinadas, ya que su riesgo de contagiarse no es peligroso.

En cuanto a las instalaciones, podremos comprobar si las instalaciones tienen que cerrar o no con la variable y_v:

Variable	Value	Reduced Cost
Y(B1)	1.000000	0.000000
Y(B2)	0.000000	0.6800000E-01
Y(B3)	0.000000	0.9009000E-01
Y(B4)	1.000000	0.000000
Y(B5)	0.000000	0.000000

Las instalaciones 1 y 4 se mantendrán abiertas, mientras que las instalaciones 2, 3 y 5 estarán cerradas.

La implementación del modelo en Lingo será el siguiente, donde en primer lugar definiremos el SETS:

```
MODEL:

SETS:

!Conjuntos primitivos;
PERSONAS/P1..P10/:X,f,q,t;
INSTALACIONES/B1..B5/:Y,c,R;

PERSONAS_INSTALACIONES(PERSONAS,INSTALACIONES)/P1 B1, P1 B3,
                                    P2 B5,
                                    P3 B2, P3 B3,
                                    P4 B1, P4 B2,
                                    P5 B1, P5 B2, P5 B3,
                                    P6 B2,
                                    P7 B1, P7 B3,
                                    P8 B4,
                                    P9 B3,
                                    P10 B2/:p;

ENDSETS
```

Después definiremos el apartado DATA:

```
DATA:
p=0.2, 0.1,
  0.4,
  0.4, 0.15,
  0.25, 0.15,
  0.1, 0.3, 0.35,
  0.45,
  0.15, 0.28,
  0.38,
  0.24,
  0.85;

f= 0.2, 0, 0.1, 0.7, 0.9, 0, 0.15, 0.26, 0.9, 0.1;

q= 1500, 1700, 2300, 1150, 1200, 800, 1300, 950, 1150, 1475;

c=3000, 20000, 17500, 15325, 7500;

B=100000;

ENDDATA
```

Por último definiremos la función objetivo y restricciones para finalizar la implementación del modelo en Lingo:

```
!Pasaremos a variables binarias la X e Y;
@FOR(PERSONAS(U):@BIN(X(U)));
@FOR(INSTALACIONES(V):@BIN(Y(V)));


!Función objetivo;

[OBJ]MIN=@SUM(PERSONAS(U):t(U)*X(U));


!Restricciones;

!Restricción 1;
@SUM(PERSONAS(U):q(U)*X(U))+ @SUM(INSTALACIONES(V):c(V)*Y(V))<=B;

!Restricción 2;

@FOR(INSTALACIONES(V):@SUM(PERSONAS_INSTALACIONES(U,V):f(U)*p(U,V)*X(U))=R(V));


!Restricción 3;
@FOR(PERSONAS(U):@SUM(PERSONAS_INSTALACIONES(U,V):p(U,V)*R(V)*Y(V))=t(U));



END
```

Capítulo 7

Support Vector Machine

7.1. Cuestionario sobre inmunidad COVID

Resumen

Consideramos un conjunto de entrenamiento Ω dividido en 2 clases, donde cada objeto $i \in \Omega$ es representado con un par $(x_i,y_i) \in x$ (1,1), donde n es el número de características analizadas sobre cada elemento Ω, x_i contiene el número de características e y_i indica a que grupo pertenecerán, pudiendo ser 1 o -1, asociado a las 2 clases de Ω.

El SVM determina el hiperplano f(x)=w^T x + b que es el que separa a los 2 grupos mencionados anteriormente. En el caso de datos separables linealmente, este hiperplano maximiza el margen entre las dos clases de datos, es decir, maximiza las distancias entre dos hiperplanos paralelos que soportan algunos elementos de las dos clases. Incluso si los datos de entrenamiento no son separables linealmente, el hiperplano construido también minimiza los errores de clasificación. Así, el modelo clásico de SVM minimiza una función objetivo que es un compromiso entre el riesgo estructural, dado por el inverso del margen, $||w||$, y el riesgo empírico, dado por la desviación de objetos mal clasificados.

En este caso, para desarrollar una clasificación y predicción con el método SVM, hemos desarrollado un cuestionario de 17 preguntas relacionadas con el COVID, o para saber si una persona, una vez que pasa el COVID, será inmune y creará anticuerpos. Estas preguntas son, por ejemplo, la edad de la persona, peso, si esta persona fuma y cuantos cigarrillos al día fuma, si hace ejercicio y cuantas horas de ejercicio al día hace, nº días con fiebre, fiebre máxima.etc

Modelo

La **función objetivo** de este modelo es la siguiente:

$$\text{mín} \quad \frac{1}{2}(w_1^2 + w_2^2 + w_3^2 + w_4^2 + w_5^2 + w_6^2 + w_7^2 + w_8^2 + w_9^2 + w_{10}^2 + w_{11}^2 + w_{12}^2 + w_{13}^2 + w_{14}^2 + w_{15}^2 + w_{16}^2 + w_{17}^2) \tag{7.1}$$

Y las restricciones utilizando los puntos anteriormente mencionados:

$$-1*(26w_1+3w_2+w_3+10w_4+w_6+2w_7+6w_8+11w_9+8w_{10}+w_{11}+3w_{12}+39,02w_{13} +2w_{14}+110w_{15}+27,50w_{16}+3w_{17}+b)\geq 1$$

$$(26w_1+3w_2+5w_3+5w_4+6w_6+w_7+6w_8+7w_9+8w_{10}+2w_{11}+3w_{12}+39,17w_{13} +1,72w_{14}+52w_{15}+17,58w_{16}+9w_{17}+b)\geq 1$$

$$(39w_1+w_2+6w_4+7w_6+9w_7+5w_8+9w_9+2w_{10}+5w_{11}+4w_{12}+38,55w_{13} +1,69w_{14}+70w_{15}+24,53w_{16}+7w_{17}+b)\geq 1$$

$$(51w_1+2w_2+2w_3+3w_4+2w_5+5w_6+w_7+8w_8+5w_{10}+7w_{11}+3w_{12}+38,53w_{13} +1,61w_{14}+63w_{15}+24,17w_{16}+6w_{17}+b)\geq 1$$

$$(46w_1+2w_2+w_5+5w_6+w_7+8w_8+3w_{10}+9w_{11}+w_{12}+38,68w_{13} +1,85w_{14}+73w_{15}+21,33w_{16}+8w_{17}+b)\geq 1$$

$$-1*(46w_1+2w_2+4w_4+2w_5+7w_6+7w_7+9w_8+w_9+6w_{10}+4w_{11}+2w_{12}+38,79w_{13} +1,77w_{14}+85w_{15}+27,13w_{16}+4w_{17}+b)\geq 1$$

$$-1*(44w_1+3w_2+5w_3+4w_4+w_5+6w_6+4w_7+9w_8+3w_9+3w_{10}+w_{11}+3w_{12}+38,25w_{13} +1,68w_{14}+53w_{15}+18,78w_{16}+5w_{17}+b)\geq 1$$

$$-1*(16w_1+7w_4+2w_5+6w_6+8w_7+5w_8+12w_9+6w_{10}+2w_{11}+w_{12}+38,10w_{13} +1,74w_{14}+94w_{15}+31,16w_{16}+5w_{17}+b)\geq 1$$

$$(47w_1+2w_2+4w_3+3w_4+w_5+3w_6+4w_7+8w_8+10w_9+12w_{10}+6w_{11}+3w_{12}+39,22w_{13} +1,81w_{14}+73w_{15}+22,28w_{16}+9w_{17}+b)\geq 1$$

$$(42w_1+3w_2+w_3+5w_4+w_5+2w_6+7w_7+5w_8+10w_{10}+3w_{11}+2w_{12}+39,52w_{13} +1,77w_{14}+90w_{15}+22,73w_{16}+7w_{17}+b)\geq 1$$

$$-1*(21w_1+2w_2+3w_3+3w_5+2w_6+2w_7+9w_8+15w_9+7w_{10}+1w_{11}+39,50w_{13} +1,69w_{14}+51w_{15}+17,86w_{16}+4w_{17}+b)\geq 1$$

$$-1*(53w_1+3w_2+w_3+2w_4+w_5+4w_6+2w_7+9w_8+11w_{10}+8w_{11}+38,84w_{13} +1,85w_{14}+99w_{15}+28,93w_{16}+3w_{17}+b)\geq 1$$

$$-1*(16w_1+2w_2+w_3+1w_6+6w_7+4w_8+14w_9+11w_{10}+2w_{11}+3w_{12}+39,47w_{13} +2w_{14}+101w_{15}+25,29w_{16}+4w_{17}+b)\geq 1$$

$$(29w_1+4w_3+10w_4+3w_5+7w_6+6w_7+9w_8+11w_9+3w_{10}+9w_{11}+w_{12}+38,57w_{13} +1,65w_{14}+66w_{15}+24,24w_{16}+6w_{17}+b)\geq 1$$

$$(26w_1+3w_2+w_3+6w_4+2w_6+9w_7+8w_8+8w_9+7w_{10}+12w_{11}+3w_{12}+38,99w_{13} +1,54w_{14}+67w_{15}+28,12w_{16}+6w_{17}+b)\geq 1$$

$$(18w_1+3w_2+4w_3+6w_4+2w_5+2w_6+2w_7+4w_8+13w_9+7w_{10}+8w_{11}+2w_{12}+38,69w_{13} +1,75w_{14}+60w_{15}+19,59w_{16}+7w_{17}+b)\geq 1$$

$$-1*(46w_1+3w_2+4w_3+4w_4+2w_5+5w_6+3w_7+5w_8+11w_9+12w_{10}+2w_{11}+38,15w_{13} +1,77w_{14}+73w_{15}+23,25w_{16}+2w_{17}+b)\geq 1$$

$$-1*(49w_1+4w_3+6w_4+w_5+7w_6+5w_7+8w_8+9w_{10}+10w_{11}+39,15w_{13} +1,82w_{14}+91w_{15}+27,44w_{16}+w_{17}+b)\geq 1$$

$$(30w_1+2w_2+2w_3+4w_4+w_5+6w_6+9w_7+8w_8+w_{10}+6w_{11}+39,77w_{13} +1,65w_{14}+77w_{15}+28,28w_{16}+6w_{17}+b)\geq 1$$

$$-1*(35w_1+2w_2+2w_3+6w_4+2w_5+6w_6+5w_7+7w_8+5w_{10}+2w_{11}+39,62w_{13} +1,83w_{14}+59w_{15}+17,69w_{16}+4w_{17}+b)\geq 1$$

Para entender bien las restricciones y los significados de cada w explicaré la restricción 1. Esta restricción es negativa a función de la b, que indica si esta persona no tuvo anticuerpos una vez pasó el COVID. Si la b es positiva, hace que la restricción sea positiva, y quiere decir que esta persona cuando pasó el COVID sí creó anticuerpos y tuvo inmunidad. Por tanto, los coeficientes desde w_1 hasta w_{17} son los siguientes: 26 es la edad de la persona (26 años), 3 es que hace 3 horas de deporte al día, 1 es el número de personas con las que convive (en este caso 1), 10 es el número de personas con las que ha estado más de 15 minutos y a menos de 2 metros de distancia en los últimos 7 días, el coeficiente de w_5 es 0, ya que esta persona no dedicó tiempo a actividades físicas intensas durante el COVID, 1 es el número de horas que ha realizado actividades físicas INTENSAS tales como levantar pesos pesados, subir escaleras, nadar o pedalear rápido, correr, deportes como fútbol, tenis individual, circuito de ejercicios HIIT, zumba y similares en los últimos 7 días (en este caso ha realizado 1 hora), 2 es la valoración después de pasar el covid de su conducta para realizar ejercicio físico (valoración del 1 al 10), 6 es el número de horas que duerme cada noche, 11 es la media de cigarrillos que fuma al día (9 cigarrillos), 8 es que esta persona pasa 8 horas observando alguna pantalla por motivos de trabajo/estudio, 1 es el número de horas que observa una pantalla por actividades de ocio (1 hora), 3 es el número de días que ha tenido fiebre durante el COVID (3 días), $39,02$ es la temperatura máxima de fiebre que ha tenido durante el COVID (39,02), 2 es la altura en metros de esta persona (2 metros), 110 es el peso en kg de la persona encuestada (110 kg), $27,50$ es el índice de masa corporal IMC(Kg/m) (en este caso 27,50 kg/m), por último, 3 es la valoración de cómo cree que es la salud de esta persona actualmente (valoración del 1 al 10, en este caso la persona ha elegido un 3).

Solución

Una vez realizado el modelo, nos saldrá la siguiente solución en Lingo:

Variable	Value	Reduced Cost
W1	-0.9649007E-02	0.000000
W2	0.3816022E-01	0.000000
W3	-0.3709470E-01	0.000000
W4	0.7746579E-01	0.000000
W6	-0.1508912	0.000000
W7	0.5394619E-01	0.000000
W8	-0.8410276E-01	0.000000
W9	-0.4692180E-01	0.000000
W10	0.3657506E-01	0.000000
W11	0.2392902	0.000000
W12	0.2851241E-01	0.000000
W13	0.6210254E-01	0.000000
W14	-0.5723121E-02	0.000000
W15	-0.6433417E-01	0.000000
W16	0.1447036	0.000000
W17	0.3341966	0.000000
B	-2.866703	0.000000
W5	-0.1395227	0.000000

Entonces, si cogemos una base de datos nueva con 10 nuevos pacientes y hacemos el cálculo de cada valor de la encuesta por su respectiva solución de w (foto anterior) + b (foto anterior), si el valor nos da mayor o igual que 1, diremos que esa persona sí tendrá anticuerpos y será inmune, y si el valor es menor o igual que -1, diremos que esa persona no tendrá anticuerpos y no será inmune. También cabe la posibilidad de que salga mal clasificado, si no cumple los requisitos mencionados anteriormente.

En nuestro caso, la clasificación quedará de la siguiente manera:

Personas		Clasificación
1	1,988237701	Si
2	-0,234865745	Mal clasificado
3	1,027213983	Si
4	0,393736564	Mal clasificado
5	1,482290553	Si
6	1,565846246	Si
7	0,313406481	Mal clasificado
8	0,349047127	Mal clasificado
9	-1,545390194	No
10	-1,422736507	No

Donde las personas 1, 3, 5 y 6 tendrán anticuerpos después de pasar el COVID y por tanto serán inmunes.

Las personas 9 y 10 no tendrán anticuerpos después de pasar el COVID.

Y las personas restantes tendrán una mala clasificación, donde no se podrá asegurar un buen resultado.

Capítulo 8

Conclusiones

Como se ha podido observar a lo largo de este proyecto, los problemas modelados con optimización combinatoria pueden ser útiles a la hora de tomar decisiones con respecto al COVID-19. Los modelos planteados en este trabajo han sido realizados con el software Lingo, donde cabe destacar que este programa ha sido capaz de procesar y resolver todos los modelos sin problemas.

En primer lugar, al obtener los resultados de los problemas planteados, vemos como estos modelos podrían ser implantados perfectamente en la vida real, donde ayudarían a la hora de tomar decisiones con criterio. En todos los modelos realizados se han tomado datos reales, como por ejemplo en el modelo de asignación de respiradores, donde se han utilizado los kilómetros reales que hay de una ciudad a otra o de un hospital a otro. Lo mismo pasaría en el modelo de vacunación, los datos de distancias utilizados son los metros reales de los puntos seleccionados hasta los centro médicos y farmacias. Por lo tanto, se podrían aplicar a la vida real para transportar respiradores desde hospitales con menor necesidad a hospitales con mayor necesidad, o para los casos de vacunación, que aunque sólo se esté realizando en hospitales y centros médicos, se podría aplicar el modelo desarrollado para asignar los vecinos a estos puntos.

En segundo lugar, actualmente algunas medidas y restricciones que se están tomando para evitar la propagación del virus no se basan en nada con criterio para explicar porque se ha tomado esa medida. Por ejemplo, el caso de cerrar locales e instalaciones y confinar a personas. Por eso, el modelo planteado de distanciamiento social podría ayudar a la hora de decidir qué personas tendrían que estar confinadas y cuales no, pero teniendo en cuenta sus gastos, el tiempo que ha pasado en ese lugar y la probabilidad de infectarse. Lo mismo pasaría con los locales e instalaciones, se tendría en cuenta el tiempo que ha estado esa persona ahí, la probabilidad de infectarse o estar infectado y los gastos que tienen, y no estar cerrando locales y confinando a personas sin criterio, ya que de esta manera perjudicamos a la economía, a las personas que confinamos y a los locales, ya que si se confinan o cierran pasarían a no tener ingresos durante ese periodo.

Otra de las ventajas de la realización de modelos de optimización combinatoria es la reducción de costes y la minimización de estos, de esta manera obtendremos las mejores rutas para asignar respiradores o para asignar a las personas en farmacias y consultorios.

También podemos destacar el uso de encuestas para predecir si crearemos anticuerpos o no después de haber pasado por el COVID-19. El uso de este predictor podría ahorrar dinero en cuanto al uso de serologías, que es el estudio de los anticuerpos en el suero sanguíneo, aunque siempre el medio más fiable para ver si obtenemos anticuerpos será esta última.

Para finalizar, podemos concluir que si utilizamos modelos de optimización combinatoria para resolver casos contra el COVID-19, tendremos unos resultados razonables donde podremos minimizar costes y ahorrar dinero, anticiparnos a nuevas olas o situaciones imprevistas de este virus, agilizaremos procesos a la hora de realizar asignaciones o transportes y nos basaremos en un criterio con sentido para poder tomar decisiones.

Capítulo 9

Bibliografía

- ConSalud, R. (2020, 19 octubre). Las CC.AA. cuentan con un parque de 13.557 respiradores, más de 7.770 de Sanidad. Consalud. https://www.consalud.es/autonomias/ccaa-cuentan-parque-13557-respiradores-7770-sanidad_86806_102.html

- Healthcare Workers. (2020, 11 febrero). Centers for Disease Control and Prevention. https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/hcp/ppe-strategy/face-masks.html

- Fava, P. A. I. (2020b, marzo 25). El escándalo de los respiradores en España: cómo distribuirlos si no se sabe los que ya hay. El Español. https://www.elespanol.com/ciencia/salud\/20200325\/escandalo-respiradores-espana-distribuirlos-no-sabe/477202839_0.html

- Salinas, N. (2020, 21 octubre). Cataluña y Andalucía, las más beneficiadas en el reparto de respiradores del Ministerio de Sanidad. Vozpópuli. https://www.vozpopuli.com/sanidad\/respiradores-sanidad-gobierno_0_1402360897.html

- López, C. (2021, 12 febrero). Sanidad quiere poner a personal de farmacias y mutuas a vacunar. La Vanguardia. https://www.lavanguardia.com/vida/20210212/6241722/vacunacion-plan-sanidad-estrategia-espana-covid-pandemia.html

- Vacunación COVID-19 Gobierno de España. (s/f). Recuperado el 2 de junio de 2021, de Gob.es website: https://www.vacunacovid.gob.es/

- R. (2020, 2 abril). Covid-19 en la hostelería: pérdidas de 3.000 millones en el primer mes. Profesional Horeca. https://www.profesionalhoreca.com/2020/04/02/el-impacto-del-covid-19-el-primer-mes-preve-unas-perdidas-en-la-hosteleria-de-3

- D. (2021, 2 junio). Ocupación de camas por COVID-19 en hospitales españoles. RTVE.es. https://www.rtve.es/noticias/20210601/ocupacion-camas-covid-19-hospitales-esp/2042349.shtml

- Social Distancing as p-Dispersion Problem. (2020). IEEE Journals & Magazine — IEEE Xplore. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9167199

- Martiarena, A. (2020, 26 marzo). Andalucía, Galicia, Extremadura y Murcia ofrecen respiradores a Madrid. La Vanguardia. https://www.lavanguardia.com/local/madrid\/20200326\/48100970799/ayuso-agradece-andalucia-galicia-respiradores-r html

- García, S. B. (2020, 24 marzo). El Gobierno pide a la Junta respiradores por si hacen falta en otras provincias. Ideal. https://www.ideal.es/granada/ministerio-requisa-res -20200325191641-nt.html?ref=https:%2F%2Fwww.google.com%2F

- Leaflet for R - Markers. (s/f). Recuperado el 2 de junio de 2021, de Github.io website: http://rstudio.github.io/leaflet/markers.html

- RPubs - Mapas Tematicos con R. (s/f). Recuperado el 2 de junio de 2021, de Rpubs.com website: https://rpubs.com/jmourglia/495290

- Covid19 Impact Survey. (s/f). Recuperado el 2 de junio de 2021, de Covid19impactsurvey.org website: https://covid19impactsurvey.org/

- Seguimiento Covid-19. (s/f). Recuperado el 2 de junio de 2021, de Ehu.es website: https://covid19-seguimiento.ehu.es/

- I., R. (2020, 5 mayo). Cada persona curada de Covid-19 produce diferentes tipos de anticuerpos. abc. https://www.abc.es/salud/enfermedades/abci-cada-persona-curada noticia.html

- Vacunas por grupos de edad - Vacunación - Conselleria de Sanidad Universal y Salud Pública. (s/f). Recuperado el 2 de junio de 2021, de Gva.es website: http://coronavirus.san.gva.es/es/web/vacunacion/vacunas-por-grupos-de-edad

- Cano, L. (2021, 21 mayo). Cuándo te pondrán la vacuna del coronavirus según tu edad. abc. https://www.abc.es/sociedad/abci-cuando-pondran-vacuna-coronavirus-s noticia.html

- RTVE.es. (2021, 2 junio). Coronavirus: ¿Cuándo me toca vacunarme? https://www.rtve.es/noticias/20210602/coronavirus-vacuna-guia-espana/2074690.shtml

- El distanciamiento social: continúe guardando distancia. (s/f). Recuperado el 2 de junio de 2021, de Healthychildren.org website: https://www.healthychildren.org/Spanish/health-issues/conditions/COVID-19/Paginas/Social-Distancing-Why-I aspx

- Notas de Prensa. (s/f). Recuperado el 2 de junio de 2021, de Gob.es website: https://www.mscbs.gob.es/fr/gabinete/notasPrensa.do?id=5083

- Ministerio de Sanidad, Consumo y Bienestar Social - Profesionales - Estrategia de vacunación COVID-19 en España. (s/f). Recuperado el 2 de junio de 2021, de Gob.es website: https://www.mscbs.gob.es/profesionales/saludPublica/ccayes/alertasActual/nCov/vacunaCovid19.html