

# Asignaciones Justas y Eficientes ante una Contingencia Sanitaria como el COVID-19: Estado de Puebla como Sujeto de Aplicación

Dr. Damián-Emilio Gibaja-Romero<sup>1</sup>, Dra. Rosa-María Cantón-Croda<sup>2</sup>

**Resumen:** La contingencia sanitaria del COVID-19 es un choque de demanda de servicios sanitarios que motiva la implementación de triajes. En el caso de Puebla, la falta de coordinación entre órganos de gobierno puede generar asignaciones injustas de recursos prioritarios. Por medio de la Teoría de Juegos, el presente artículo modela el sector salud poblano como un emparejamiento de tres lados (instituciones, hospitales y recursos), con lo cual se proponen dos mecanismos de asignación socialmente justos, en línea con la Guía Bioética. Nuestros resultados principales señalan que el primer mecanismo mejora la coordinación entre las instituciones de gobierno y los hospitales mediante una aceptación diferida anidada. El segundo mecanismo estandariza la priorización de los pacientes para recibir un bien prioritario mediante la introducción de una función de gravedad Cobb-Douglas, basada en las características de los agentes, la cual se propone para medir el costo social. Esto último contribuye a una asignación socialmente justa.

**Palabras clave:** Sistema de Salud de Puebla, Asignación, Aceptación Diferida, Contingencia COVID-19

## Introducción

Aunque los mecanismos de mercado tienden a ser eficientes, una contingencia sanitaria consigue incrementar el precio de algunos bienes y servicios sanitarios, lo que se puede traducir en una asignación injusta, ya que la salud se restringe a quien puede pagarla y no a quien la necesita (Parmar, 2019). Así mismo, en una crisis sanitaria las transacciones monetarias se vuelven repugnantes y pueden llegar a impedir el acceso a la salud, esencial para las actividades sociales (Roth, 2015; Kline y Moretti, 2014). En este sentido, la Teoría del Diseño de Mercados sugiere implementar mecanismos que no se basen en transacciones monetarias para asignar bienes y servicios de salud, sino que utilicen las preferencias y prioridades de los agentes involucrados, y las características de los bienes por asignar (Massó, 2015). Por lo anterior, es importante notar que en el sector salud mexicano, demandantes y oferentes de salud interactúan con tres niveles de gobierno (federal, estatal y municipal), lo que genera problemas de coordinación al asignar los recursos prioritarios en una pandemia, agravando más el problema el hecho de que alrededor del 48% de la población mexicana no tiene acceso a la seguridad social (Reyes et al., 2020).

En México, la asignación de recursos prioritarios involucra a agentes con diferentes objetivos por lo que la contingencia sanitaria ha mostrado que la calidad de los servicios de salud mexicanos es muy inferior a la de países líderes, como Francia y España (Barrientos-Gutiérrez, 2020). Tampoco es claro si los municipios vecinos pueden ayudar a complementar los recursos sanitarios para generar asignaciones justas y eficientes (Medina-Gómez, et al., 2019).

El objetivo de este artículo es proponer mecanismos de asignación de recursos prioritarios en la contingencia del COVID-19 que consideran las interacciones de los agentes que intervienen en el Sector Salud del Estado de Puebla, caracterizado por una elevada desigualdad en salud. Nos enfocamos en: i) la distribución de recursos prioritarios entre proveedores de salud y las instituciones de gobierno, y ii) la asignación directa de los recursos de salud entre los pacientes con COVID-19. Además de mostrar los resultados teóricos del problema de asignación, mostramos el funcionamiento de los mecanismos de asignación con datos del Estado de Puebla.

## Antecedentes

Los desequilibrios del sector salud generan asignaciones injustas e ineficientes de recursos sanitarios en el mundo, pues la salud es indispensable e insustituible para el desarrollo humano (Liaropoulos, 2015). Además, los oferentes de salud enfrentan una demanda incierta que incrementa costos de producción (Setty et al., 2019). Esto se acentúa en una contingencia sanitaria, pues la demanda de bienes y servicios de salud se incrementa abruptamente.

En el caso del COVID-19, los más demandados son las camas de hospital y los respiradores, que además son indivisibles al sólo consumirse en cantidades discretas (Roth, 2015). Al ser prioritarios para el tratamiento del COVID-19, estos bienes son recursos económicos comunes (Pichierri, 2016), ya que no deben de ser exclusivos de un sector poblacional, pero la población rivaliza para utilizarlos (Apesteguia y Maier-Rigaud, 2006).

<sup>1</sup> El Dr. Damián-Emilio Gibaja-Romero es Profesor del Área de Matemáticas de la UPAEP-Universidad, Puebla, Puebla, México, [damiianemilio.gibaja@upaep.mx](mailto:damianemilio.gibaja@upaep.mx) (autor corresponsal)

<sup>2</sup> La Dra. Rosa-María Cantón-Croda es Decana de Ingenierías en UPAEP-Universidad, Puebla, Puebla, México, [rosamaría.canton@upaep.mx](mailto:rosamaría.canton@upaep.mx)

La asignación de recursos prioritarios de salud resume una interacción (juego) entre dos o más agentes cuyas decisiones impactan en el beneficio propio y el de otros (Osborne, 1994). Así, una asignación óptima deja de ser un problema de decisión tradicional. Entonces, la solución de un juego pues ser una alternativa independiente de la decisión de otros (dominancia), o una situación en la que nadie cambia su comportamiento (equilibrio). Así, los juegos tienen múltiples soluciones con diferentes propiedades (Roth, 2015).

El diseño de mercados, o mecanismos, genera soluciones deseables que satisfagan propiedades como la justicia y la eficiencia. Por ejemplo, en el mercado del matrimonio una solución deseable debe ser estable para evitar parejas que prefieran romper el matrimonio que obtuvieron. Para generar emparejamientos estables, Gale y Shapley (1962) proponen el algoritmo de Aceptación Diferida (AD) donde se generan matrimonios tentativos en cada paso, los cuales pueden romperse cuando llega una mejor propuesta. El algoritmo termina cuando todos han sido emparejados o rechazados. Por sus propiedades, la AD se ha implementado para obtener asignaciones justas en problemas de vivienda subsidiada (Bloch et al., 2020), e intercambio de riñones (Massó, 2015); entre otros, donde los bienes son indivisibles y no se requiere dinero para su transacción.

### *Contexto Sanitario en Puebla ante el COVID-19*

En esta sección, explicamos la estructura sanitaria en México para describir el sistema de salud en el estado de Puebla en el contexto de la pandemia del COVID-19.

El artículo 4to de la Constitución Política de México considera el acceso a la salud como un derecho fundamental pues su ausencia compromete el desarrollo socioeconómico. Sin embargo, como en otros países, este derecho no se ha logrado universalizar debido a la complejidad, variedad e incertidumbre en torno a la oferta y demanda de salud (Gibaja-Romero y Cantón-Croda, 2019). Al ser un recurso común, los sistemas de salud requieren financiamiento para su funcionamiento (Liaropoulos y Goranitis, 2015). De acuerdo con Parmar y Banerjee (2019), los esquemas básicos de financiamiento son:

1. Modelo Beveridge. El Estado se encarga de la provisión y generación de bienes y servicios sanitarios por medio del pago de impuestos.
2. Modelo Bismarck. Las contribuciones de las personas van a un fondo que les permite solicitar los servicios de salud tanto en instituciones públicas como en privadas.

El Sistema de Salud Mexicano (SSM) mezcla los modelos anteriores. Por un lado, los trabajadores formales acceden a instituciones de salud por medio de aportaciones que hacen con su sueldo. Por otra parte, el gobierno mexicano proporciona servicios de salud a personas con empleo y sin empleo usando recursos provenientes de los impuestos (Wondelberg y Dolci, 2012). Así, las actividades sanitarias se han descentralizado por medio del Fondo de Aportaciones para los Servicios de Salud (FASSA), que proporciona recursos a los gobiernos locales para atender fenómenos sanitarios prioritarios (SHCP, 2010; Medina-Gómez, et al., 2019). Estos recursos representan entre el 40% y el 50% del gasto sanitario local (Morales-Cisneros, 2020). Aunque la Ley de Coordinación Fiscal establece las áreas estratégicas a atender por el FASSA (inventario de infraestructura médica, provisión de servicios), la asignación de recursos es discrecional (Medina-Gómez, et al., 2019), y sólo entre el 20% y el 40% se gastan de manera eficiente (Reyes et al., 2020).

En general, el SMM se caracteriza por asignaciones ineficientes e injustas que no contribuyen a alcanzar equidad en la provisión de salud (Morales-Cisneros, 2020; Barrientos-Gutiérrez et al., 2020). Respecto a Puebla, el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2019) señala la desigualdad en acceso a la salud de los municipios poblanos considerando el índice de Desarrollo Humano (IDH), pues San Andrés Cholula tiene un IDH similar al de países desarrollados, mientras que Eloxochitlán se asemeja a Madagascar. Además, las unidades médicas de primer nivel se encuentran en 194 de los 217 municipios poblanos (DGIS, 2020). Entonces, se sugiere implementar mecanismos de coordinación intermunicipales. Esto es necesario para el COVID-19 pues el incremento en la demanda y la escasez de recursos ha motivado la implementación de triajes.

Entonces, el sector salud debe priorizar a los individuos en la asignación de bienes prioritarios (Gomez, 2010). Esto genera un problema ético que motiva la introducción de una Guía Bioética para tomar decisiones médicas cuando el sistema de salud es sobrepasado por el incremento de pacientes (CSG, 2020). La Guía Bioética de México (GBM) se divide en dos secciones. La primera justifica el establecimiento del triaje, y la segunda explica los criterios de la priorización y la asignación. Para la pandemia del COVID-19, las camas de hospital, respiradores mecánicos, personal médico e infraestructura hospitalaria son bienes prioritarios, que además son indivisibles.

Dada la indivisibilidad de los bienes, la GBM considera dos criterios de asignación: (1) El orden de llegada que prioriza a quienes llegan primero al hospital, y (2) la necesidad médica para quienes se encuentren graves, pero puedan mejorar con el recurso. Entonces, personas con comorbilidades obtienen una menor prioridad para recibir un bien prioritario. Estos criterios se pueden mezclar, pero debe prevalecer la justicia social “todas las personas tienen el

mismo valor y los mismos derechos” (GBM, 2021), por lo que es importante considerar la dignidad humana, solidaridad y equidad. Sin embargo, el orden de llegada va en contra de la justicia social pues pone en desventaja a quienes viven en comunidades alejada. Por su parte, la medición de la necesidad médica genera controversia al no estar estandarizada. Esto puede generar descoordinación y asignaciones que no son justas o eficientes durante una contingencia sanitaria (Costa, 2009; Akin y Strumpf, 2005).

### Metodología

La investigación sigue el método deductivo por medio del cual se identifican las leyes generales que rigen a los problemas de asignación. Al identificar las propiedades del SSM (proveedores de salud descentralizados y órganos de gobierno de diferentes niveles), se propone un modelo matemático basado en lo propuesto por Bloch, Cantala y Gibaja (2020). El modelo anterior señala la necesidad de establecer el costo social de una asignación, para lo cual proponemos una medición de la gravedad de los pacientes. Por medio del software R se ejemplifica la asignación de recursos de salud prioritarios considerando la infraestructura básica del sector salud en Puebla. Nuestra metodología de estudio se basa en el modelo matemático anterior cuya resolución proporciona un mecanismo de asignación justo.

### Modelo

Sea  $I = \{i_1, i_2, \dots, i_N\}$  el conjunto de instituciones gubernamentales de salud en Puebla. Por ejemplo, las secretarías de salud federal y estatal, y la Dirección de Protección de Riesgos Sanitarios. Usamos  $i$  para una institución genérica. Los proveedores de salud son  $H = \{h_1, h_2, \dots, h_H\}$ , donde  $h$  es un elemento genérico referido como hospital. El conjunto de los recursos prioritarios para la contingencia sanitaria es  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_R\}$ .

Consideramos la función  $\alpha: R \rightarrow I$  para etiquetar a cada recurso con la institución que lo posee;  $R_i$  es el conjunto de recursos que puede asignar  $i$ , cuya cardinalidad es  $m_i$ . Puesto que los hospitales pueden ser federales o estatales, cada hospital está “controlado” por una institución, lo cual capturamos con  $\tau: H \rightarrow I$ . El conjunto de hospitales que controla  $i$  es  $H_i$ , con cardinalidad  $n_i$ . Dada la contingencia sanitaria, asumimos que hay más hospitales que recursos ( $n_i \geq m_i$ ).

Cada hospital  $h$  tiene una lista de preferencias estricta  $P_h$  sobre  $R$  y no asignar nada ( $\emptyset$ ). El perfil de preferencias de los hospitales es  $\wp = (P_{h_1}, \dots, P_{h_H})$ . Puesto que cada hospital atiende a diferentes poblaciones, puede no necesitar algún recurso. Un recurso  $r$  es necesario para  $h$  si  $r \in P_h \setminus \emptyset$ .

Las instituciones tienen preferencias estrictas  $>_i$  sobre conjuntos parejas de pares  $(r, h) \in R \times H_i$  debido a la cobertura del hospital y la reconversión hospitalaria. Para simplificar las preferencias de los hospitales, asumimos que  $>_i$  es responsiva, es decir, para todo  $U \in 2^{R \times H_i}$  y todos los pares  $(r_s, h_s), (r_t, h_t) \in R \times H_i \setminus U$  tenemos que

1.  $U \cup \{(r_s, h_s)\} >_i U \cup \{(r_t, h_t)\}$  si y sólo si  $\{(r_s, h_s)\} >_i \{(r_t, h_t)\}$ , y
2.  $U \cup \{(r_s, h_s)\} >_i U$  si y sólo si  $\{(r_t, h_t)\} >_i \emptyset$ .

La responsividad permite representar las preferencias de las instituciones como listas de parejas ordenadas  $(r, h)$ . Así,  $(r, h) >_i \emptyset$  representa una pareja aceptable para  $i$ . El perfil de las preferencias de los hospitales es  $\succ = (\succ_{i_1}, \dots, \succ_{i_N})$ .

Puesto que los recursos prioritarios son públicos, estos pueden ser asignados por cualquier otra institución. Sin embargo, no todas las instituciones pueden distribuirlos. Por ello, consideramos que cada recurso  $r$  tiene una lista de prioridades  $\pi_r$  definida sobre las instituciones. Si el recurso  $r$  pertenece a  $i$ , esta tiene la mayor prioridad para obtener y asignar el recurso. El perfil de prioridades de los recursos es  $\pi = (\pi_r)_{r \in R}$ .

Decimos que  $E = \langle I, R, H, \alpha, \tau, \succ, \pi \rangle$  es un mercado de emparejamiento de recursos sanitarios con intermediarios. A diferencia del mercado del matrimonio, los emparejamientos en  $E$  son triadas  $(i, r, h)$ . Entonces, una asignación comprende (i) una correspondencia de varios a uno entre recursos e instituciones, y (ii) una correspondencia de uno a uno entre hospitales y recursos.

Formalmente, una asignación es un par  $\mu = (\theta, \varphi)$  tal que:

1.  $\theta: A \cup I \rightarrow 2^R \cup I \cup \{\emptyset\}$  donde
  - a.  $\theta(r) \in I \cup \{\emptyset\}$ ,
  - b.  $\theta(i) \in 2^R$ ,
  - c.  $r \in \theta(i)$  si y sólo si  $\theta(r) = i$ ;
2.  $\varphi: R \cup H \rightarrow R \cup H \cup \{\emptyset\}$ , donde
  - a.  $\varphi(r) \in H \cup \{\emptyset\}$ ,
  - b.  $\varphi(h) \in R \cup \{\emptyset\}$ ,
  - c.  $\varphi(h) = (r)$  si y sólo si  $\varphi(r) = h$ .
3.  $\theta(r) = \tau(\varphi(r))$  para todos los  $r \in R$ .

Entonces,  $\varphi(h)$  es el recurso asignado al hospital  $h$ . Por su parte,  $\mu(i) = \{(r, h) | r \in \theta(i), h \in H_i\}$  son las asignaciones recurso-hospital en las que la institución  $i$  interviene.

### Propiedades deseables de la asignación

La justicia social es una característica deseable que una asignación debe cumplir en un mercado  $E$ , pero existen numerosos debates sobre su conceptualización pues se involucran la filosofía, la economía, la sociología, entre otras disciplinas (Torrecilla y Castilla, 2011). La definición clásica, “cada uno recibe lo suyo,” se le atribuye a Aristóteles por Santo Tomás de Aquino (Belavi, 2016), mientras que Taparelli señala que la justicia social iguala a los miembros de una sociedad con respecto a sus derechos (Perez, 2019). A pesar de su claridad, su implementación no lo es, razón por la cual surge una visión utilitarista de la justicia social con los trabajos de David Hume, Adam Smith y John Stuart Mill (Torrecilla y Castilla, 2011). En este enfoque, la justicia social son acciones que maximizan la felicidad de un conjunto de personas, por lo que hay una utilidad social  $U$  que transforma alternativas sociales en un valor. Dicha utilidad puede ser la suma de utilidades individuales o la de un solo individuo.

El Diseño de Mercados propone evitar la envidia justificada para generar justicia social (Lotz, 2015) pues ningún individuo prefiere un recurso diferente al asignado en que tenga mayor prioridad. Para formalizar lo anterior, introducimos lo siguiente. Cada institución  $i$  tiene una función de elección para seleccionar el conjunto de parejas que maximicen su preferencia. Es decir, para todo  $U \in R \times H_i$ , la elección es

$$Ch_i(U) = \max_{>_i} \{u \subset U \mid u >_i \emptyset, |u| \leq q_i, \text{ pares } (h, r) \text{ no repiten elementos}\}.$$

Una asignación  $\mu$  es individualmente racional cuando los agentes reciben algo aceptable o necesario, i.e.,  $\mu(i) >_i \emptyset$  y  $\mu(h) P_h \emptyset$  para todo  $i \in I$  y  $h \in H$ . Decimos que  $\mu$  es factible si los recursos asignados no superan los existentes ( $\sum_{i \in I} |\mu_i| \leq |R|$ ). Además,  $\mu$  no desperdicia cuando no hay hospitales que reclamen recursos no asignados, i.e. no existe  $(h, r)$  tal que  $\mu(r) = \emptyset$ ,  $r P_h \mu(h)$  y  $|\mu(i)| < q_i$ , donde  $i = \tau(h)$ .

Sean  $h, h' \in H$  tales que  $\mu(h) = r$ ,  $\mu(h') = r'$ ,  $\tau(h) = i$  y  $\tau(h') = i'$ , el hospital  $h$  tiene envidia justificada sobre  $h'$  cuando

1.  $r' P_h r$ ,
2.  $(h, r') \in Ch_i(\mu(i) \cup \{(h, r')\})$  y
3.  $i \pi_r i'$ .

Así, una asignación  $\mu$  es justa si es individualmente racional, no desperdicia recursos y no hay envidia justificada. Por su parte,  $\mu$  es Pareto eficiente cuando ningún agente puede mejorar sin perjudicar a los otros.

Un mecanismo de asignación es una función  $\Delta: \mathcal{E} \rightarrow \mathcal{M}$ , donde  $\mathcal{E}$  es el conjunto de todos los mercados y  $\mathcal{M}$  el de todas las asignaciones posibles. Además,  $\Delta$  no es manipulable por los hospitales cuando estos no pueden mejorar su asignación final al modificar sus preferencias verdaderas.

## Resultados

En la presente sección describimos los mecanismos que proponemos para 1) resolver la falta de coordinación entre instituciones de gobierno y hospitales, y 2) asignar recursos prioritarios entre pacientes.

### 1. Primer mecanismo: resolver la falta de coordinación entre instituciones de gobierno y hospitales

Modificamos el algoritmo AD (Gale y Shapley, 1962) para entrelazar las decisiones de hospitales e instituciones en Puebla. Proponemos una Aceptación Diferida Anidada (ADA), que procede como sigue:

**Fase  $A^t$ . Inicia ciclo externo.** Cada hospital  $h$ , sin recursos tentativamente asignado, solicita su recurso preferido entre los que no lo han rechazado; sea  $D^t(h)$  la demanda. Las instituciones observan las demandas que hacen hospitales en  $H_i$ , y pueden generar parejas  $(r, h)$  en  $M_i^t = \cup D_h \times H_i$ .

**Fase  $B^t$ . Construcción de  $\theta$  (ciclo interno).** Las instituciones compiten por obtener recursos en una AD tradicional contra los recursos. Es decir, las instituciones requieren  $Ch_i(M_i^t)$  y los recursos son tentativamente asignados a la institución con mayor prioridad en  $\pi_r$ . Esta AD termina cuando las instituciones han sido rechazadas de todos los recursos aceptables o tienen la cantidad total que les corresponde.

**Fase  $C^t$ . Termina ciclo interno (construcción de  $\varphi$ ).** Se regresa al ciclo externo y los recursos obtenidos se asignan tentativamente a aquellos hospitales que formen una pareja que maximice las preferencias de la institución. Si cada hospital tiene un recurso o ha sido rechazado por todos los que necesita el recurso, la ADA se detiene.

Notemos que el ciclo interno permite a las instituciones intercambiar recursos, pues aquellos con los que se inician no son necesariamente los que sus hospitales necesitan.

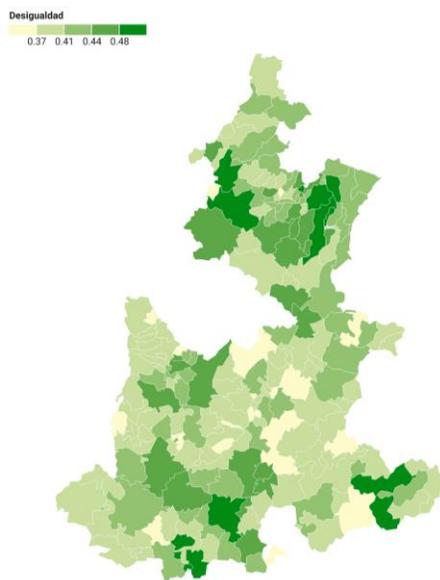
**Teorema 1.** La aceptación diferida anidada genera una asignación justa, que no es manipulable por los hospitales.

*Demostración.*

La demostración se sigue del razonamiento de Bloch, Cantala y Gibaja (2020).

2. *Segundo mecanismo: Asignando recursos a pacientes*

La ADA distribuye recursos prioritarios para el COVID-19 de manera justa y no manipulable entre instituciones y proveedores de salud del Estado de Puebla. Dicho mecanismo garantiza que cada hospital obtiene lo que necesita y merece. Sin embargo, hace falta asignar dichos recursos entre cada paciente  $a \in A = \{a_1, \dots, a_A\}$ . Entonces, es necesario valorar asignaciones  $(a, r)$  para preservar la justicia social debido a la desigual distribución del gasto en salud de los municipios poblanos (Figura 1).



**Figura 1.** Desigualdad en los municipios poblanos. Elaboración propia con información de INEGI (2020).

El valor social es una función  $v: A \times R \rightarrow \mathbb{R}$ , donde  $v(a, r)$  es el costo de que  $a$  reciba  $r$ . Para construir esta función, identificamos al paciente  $a$  con un vector  $t_a = (e_a, p_a, m_a)$  que indica edad ( $e_a \in [10, 90]$ ), peso ( $p_a \in [10, 150]$ ) y número de comorbilidades ( $m_a \in \{1, 2, \dots, 20\}$ ) (Ordoñez-Espinosa, et al., 2020; Treviño, 2020). El conjunto de todos los tipos de  $a$  es  $T_a$ . Así, la gravedad del paciente con respecto al COVID-19 depende de su tipo, i.e., es una función  $\Gamma: T_a \rightarrow \mathbb{R}$ . La evidencia empírica nos indica que:

1. La gravedad se incrementa dependiendo de la edad, el peso y el número de comorbilidades (Juárez-Hernández et al., 2020).
2. Diferentes tipos pueden generar el mismo nivel de gravedad por lo que existe una tasa marginal de sustitución entre edad, pesos y comorbilidades (Treviño, 2020).

Entonces, la gravedad es similar a una función de utilidad.

A pesar de las características anteriores, no hay consenso sobre la población que puede resultar más afectada, pues las complicaciones no son exclusivas de ningún grupo de personas (Sánchez-Hernández, et al., 2020). Entonces, consideramos un factor de ajuste aleatorio  $\gamma$  que refleja la probabilidad de morir.

**Supuesto 1.**  $\gamma$  es una variable aleatoria exponencial con parámetro  $1/\lambda$  que es la inversa de la tasa de mortalidad del COVID-19. Para México,  $\lambda = 0.1$ .

**Supuesto 2.** La gravedad es una función Cobb-Douglas de la forma

$$\Gamma'(a) = \gamma e_a^\alpha p_a^\beta m_a^\theta,$$

Donde  $\alpha, \beta$  y  $\theta$  son elasticidades de la gravedad respecto a cada variable.

Supuestos 1 y 2 nos permiten ordenar los recursos que cada paciente puede recibir mediante una función  $P_r(t_a) \in \{1, 2, \dots, |R|\}$ . Si  $P_r(t_a) = 1$ , este recurso es el menos prioritario para asignarse al paciente  $a$ , mientras que  $P_r(t_a) = |R|$  indica lo contrario. Sea  $P(t_a)$  la prioridad del paciente  $a$  sobre los recursos  $R$ .

Notemos que la gravedad puede no compararse en magnitud con  $P(t_a)$ . Entonces, hacemos la siguiente transformación

$$\Gamma(t_a) = \frac{|R| - 1}{\max_{a \in A} \{\Gamma'(a)\}} \Gamma'(t_a).$$

Un buen emparejamiento  $(a, r)$  es aquel donde  $\Gamma(a) - P_r(t_a) = 0$ . Si  $\Gamma(t_a) > P_r(t_a)$ , el recurso no es adecuado para el paciente, y  $\Gamma(t_a) < P_r(t_a)$  indica que el recurso se desperdicia ante una gravedad baja. Entonces, el costo social de  $(a, r)$  es

$$v(a, r) = |\Gamma(t_a) - P_r(t_a)|.$$

Por lo anterior, la asignación de recursos entre pacientes procede como un problema de transporte que minimice el costo social de asignar recursos, como se describe a continuación

$$\min \sum_{a \in A} \sum_{r \in R} v(a, r) x_{ar}$$

Y esté restringido a:

1. Que cada paciente reciba solo un bien  $\sum_{r \in R} x_{ar} \leq 1$ , para todo  $a \in A$ .
2. Que los recursos sean asignados a un solo paciente  $\sum_{a \in A} x_{ar} \leq 1$ , para todo  $r \in R$ .

**Teorema 2.** La asignación anterior es justa y eficiente.

*Demostración*

**Eficiencia.** En caso de que no lo fuera, podríamos encontrar una asignación con un costo social menor. Esto contradice el hecho de que el problema de transporte genera la asignación de menor costo social.

**Justicia Social.** Si la asignación no es justa, entonces un paciente no recibe el recurso que le corresponde. Es decir, podríamos encontrar un recurso que genere un menor costo social. En otras palabras, la asignación original no minimiza el costo social, lo cual es una contradicción.

Por lo anterior, concluimos que a asignación que genera el problema de transporte es justa y eficiente.

*Implementación computacional de la asignación del segundo mecanismo*

Por medio del software R, mostramos la implementación de la asignación de recursos a pacientes con COVID, que se basa en una función objetivo utilitaria que incorpora la gravedad de los pacientes y su idoneidad para recibir cierto tipo de bien. La simulación del algoritmo se hace con datos del inventario del sistema de salud de Puebla (Tabla 1).

Recursos Prioritarios	Total	Destinados a Contingencia
Infraestructura	593	12
Ambulancias	174	3
Consultorios	2188	45
Camas	3039	63
Médicos	4855	101
Enfermeras	25000	519
Técnicos	940	19

Tabla 1. Recursos prioritarios disponibles en Puebla para el COVID-19. Fuente: Secretaría de Salud de Puebla.

Con respecto a la tercera columna de la Tabla 1, consideramos que la contingencia representa el 2% de todas las actividades del sector salud poblano. Sin embargo, este porcentaje depende de la saturación de los hospitales, la cual se desconoce. Con la Tabla 1 y la función de gravedad, procedemos a construir una base de datos que incluya

1. Los pacientes con su vector de características  $t_a$ ,
2. La gravedad de cada paciente,
3. La prioridad de algún recurso,
4. Los costos sociales como el valor absoluto de la diferencia entre 2) y 3).

Puesto que  $t_a$  son características personales, simulamos la información de 765 pacientes por medio del código siguiente:

```
#Total de pacientes
a=765
#Recursos destinados el COVID-19
#INFRAESTRUCTURA
I = (593 * 0.02078)
#AMBULANCIAS
A = (174 * 0.02078)
#CONSULTORIOS
Co = (2188 * 0.02078)
#CAMAS
Ca = (3039 * 0.02078)
#MEDICOS
Me = (4866 * 0.02078)
#ENFERMEROS
En = (24999 * 0.02078)
#TECNICOS
Te = (940 * 0.02078)
#TOTAL DE RECURSOS
TR = as.integer(I + A + Co + Ca + Me + En + Te + 1)
#Vectores aleatorios de características
p=sample(10:150, a, replace= T)
e=sample(10:90, a, replace= T)
m =sample(0:20, a, replace = T)
CGama=rexp(a, rate = 0.1)

#Coeficiente de gravedad y su escalamiento
for(i in 1:a){
  CG[i] = p[i]*e[i]*m [i]*CGama[i]
}
maxCG = CG[which.max(CG)]
for(i in 1:a) {
  CGe[i] = (((a - 1)/(maxCG - 1))*(CG[i] - 1)) + 1
}

#Costo social de cada paciente
for(i in 1:a){
  Pr = sample(1:765, a, replace= F)
  for(j in 1:a){
    costo[i,j] = abs(Pr[j] - CGe[i])
  }
}

# Realizar la asignacion de un recurso a cada paciente
lp.assign(costo)
```

Por motivos de espacio, sólo incluimos el costo mínimo de la simulación anterior, que es 497,539, el cual refleja el mínimo costo social que se alcanza con la asignación óptima de recursos prioritarios y personas atendidas por el sector salud en la contingencia del COVID-19. El código establece con detalle qué recurso recibe cada paciente. Notemos que la simulación se hizo considerando que la demanda es igual a la oferta. Cuando la demanda excede a la oferta, se pueden incluir “recursos ficticios” que proporcionan una lista de espera. Sin embargo, la función de costo social, y su cálculo, son esenciales para generar una asignación socialmente justa. Es decir, nuestra contribución radica en proponer la función de gravedad para alcanzar los objetivos de la GBM.

### Conclusiones

La contingencia sanitaria del COVID-19 representa un choque en la demanda del sector salud, pues se incrementa el número de pacientes que requieren recursos sanitarios específicos. Ante la saturación de los proveedores de salud, es necesario implementar triajes para reasignar los bienes prioritarios. En el caso del Estado de Puebla, la asignación de recursos depende de la interacción de instituciones perteneciente al gobierno federal, estatal y municipal pues el SSM financia sus actividades ya sea con aportaciones privadas o recursos públicos. Por consiguiente, la falta de coordinación entre instituciones y proveedores de salud genera asignaciones que no son justas y donde los recursos suelen desperdiciarse.

El presente artículo analiza la interacción entre los diferentes agentes involucrados y propone mecanismos de asignación socialmente justos. Para lo anterior, modelamos el sistema de salud poblano como un mercado de emparejamiento a través de instituciones donde los recursos de estas últimas se redistribuyen para que los hospitales obtengan aquello que necesitan. Esto permite introducir la Aceptación Diferida Anidada, que entrelaza la solicitud de recursos de los hospitales con la competencia entre instituciones por recursos de salud prioritaria; es decir, internaliza la interacción de las instituciones de gobierno con lo que se evitan etapas separadas, que afectan la comunicación y la coordinación. Este mecanismo genera una reasignación de recursos socialmente justa en la que no hay desperdicio y se respetan capacidades de atención, lo cual contribuye a nivelar a los municipios poblanos, caracterizados por una profunda desigualdad social. También, dicho mecanismo no desperdicia recursos y no es manipulable, lo cual garantiza transparencia e impulsa la cooperación intermunicipal e interinstitucional.

Aunado a la relación entre instituciones de gobierno y proveedores de salud, también analizamos la asignación posterior de los recursos entre los pacientes pues el criterio de llegada, sugerido por la GBM, perjudica a quienes viven en zonas con una marginación elevada, como lo son los municipios de Eloxochitlán, Teopantlán e Ixtepec. Aunque

también se resalta la necesidad médica en el caso del COVID, la valoración de los pacientes no está estandarizada para distribuir los recursos obtenido con la ADA. Por esto, proponemos una función de costo social, que es la diferencia entre la gravedad y qué tan adecuado es un recurso para atender a un paciente. Así, la asignación de bienes prioritarios es un problema de transporte cuyo objetivo es minimizar el costo social restringido a que cada agente debe recibir uno y solo un recurso prioritario.

Al momento de tratar de implementar ambos mecanismos, notamos que el sector salud en Puebla carece de un repositorio de datos completo. Por consiguiente, para mostrar el funcionamiento de los algoritmos de asignación usamos datos simulados que incluyen las características personales de los agentes (que construyen su índice de gravedad) y la priorización de los recursos considerando el tipo de cada paciente. En la simulación anterior, se especifica el tipo de información que se necesita para poder mejorar la asignación de recursos de medicina prioritaria en el sector salud de Puebla. Y, aunque no se especifica el porcentaje de recursos que destinan a una contingencia, es un parámetro que puede variarse en el modelo sin generar impacto computacional.

Finalmente, es importante resaltar la posible aplicación de los mecanismos propuestos en otras regiones. Por ejemplo, al lidiar con la falta de coordinación entre niveles de gobierno, el algoritmo ADA se puede implementar en sistemas de salud descentralizados como el de Estados Unidos y el de otras entidades mexicanas. Con respecto a la priorización de recursos entre pacientes, el segundo mecanismo resume aquellos datos que se necesitan recabar durante una contingencia sanitaria; es decir, cualquier proveedor de salud puede utilizar este mecanismo siempre que se mida la gravedad de las personas y se establezca el costo social de una mala asignación de recursos.

### Referencias

- Akin, J., Hutchinson, P., and Strumpf, K. (2005). Decentralisation and government provision of public goods: The public health sector in Uganda. *The Journal of Development Studies*, 41(8):1417-1443.
- Apestequia, J. and Maier-Rigaud, F. P. (2006). The role of rivalry: public goods versus common-pool resources. *Journal of Conflict Resolution*, 50(5):646-663.
- Barrientos-Gutiérrez, T., Alpuche-Aranda, C., Lazcano-Ponce, E., Pérez-Ferrer, C., and Rivera-Dommarco, J. (2020). La salud pública en la primera ola: una agenda para la cooperación ante covid-19. *Salud Pública de México*, 62(5):598-606.
- Belavi, G. and Murillo Torrecilla, F. J. (2016). Educación, democracia y justicia social. *Revista Internacional de Educación para la Justicia Social (RIEJS)*. 13-34.
- Bloch, F., Cantala, D., and Gibaja, D. (2020). Matching through institutions. *Games and Economic Behavior*. 121, 204-231.
- Costa-Font, J. and Moscone, F. (2009). The impact of decentralization and inter-territorial interactions on Spanish health expenditure. *Spatial econometrics*, 167-184. Springer.
- CSG, Consejo de Salubridad General, (2020). Guía bioética para asignación de recursos limitados de medicina crítica en situación de emergencia. Ciudad de México: CSG, 2020. *Technical report*, Gobierno de México.
- DGIS (2020). Sistema de información de la Secretaría de Salud.
- Gale, D. and Shapley, L. (1962). College admission and the stability of marriage. *American Mathematical Monthly*, 69(1):9-15.
- Gibaja-Romero, D.-E. and Cantón-Croda, R.-M. (2019). International cooperation and coordination for improving health systems. In *2019 Sixth International Conference on Social Networks Analysis, Management and Security (SNAMS)*, pages 405-412. IEEE.
- Kline, P. and Moretti, E. (2014). People, places, and public policy: Some simple welfare economics of local economic development programs. *Annual Review of Economics*. 6(1), 629-662
- Liaropoulos, L. and Goranitis, I. (2015). Health care financing and the sustainability of health systems. *International Journal for Equity in Health*, 14(1):1-4.
- Lotz, S. (2015). Engineering fairness? market design as a resource for social justice research. *Social Justice Research*, 28(3):391-399.
- Mas-Colell, A., Whinston, M. D., Green, J. R., et al. (1995). Microeconomic theory, volume 1. *Oxford University Press* New York.
- Massó, J. (2015). The theory of stable allocations and the practice of market design. the nobel prize in economics 2012 for Alvin e. Roth and Lloyd S. Shapley. *Contributions to Science*, 11, 103-112.
- Medina-Gómez, O. S., Espinosa-Félix, J., and Ramos-Orenday, K. S. (2019). El análisis de las desigualdades en salud: comentarios a Julio Pisanty-Alatorre. *Salud Pública de México*, 60:495-495.
- Morales Cisneros, G. (2020). Evolución de los recursos federales destinados al sector salud 2004-2020. Technical report, Instituto Belisario Domínguez.

- Ordoñez-Espinosa, G., Gallardo-Hernández, A. G., Hernández-Pérez, A. L., Revilla-Monsalve, C., Bermúdez-Ochoa, M. G., Mejía-Velázquez, N. E., López-Islas, I., Hernández-Hernández, N. A., Guevara-García, A. N., Reveles-Zavala, L., et al. (2020). Manejo integral del paciente con COVID-19 en la unidad de terapia intensiva en un hospital de segundo nivel de atención. *Medicina Interna de México*, 36(4):596-606.
- Osborne, M. J. and Rubinstein, A. (1994). *A course in game theory*. MIT press.
- Parmar, D. and Banerjee, A. (2019). How do supply-and demand-side interventions influence equity in healthcare utilisation? evidence from maternal healthcare in Senegal. *Social Science & Medicine*, 241:112582.
- Juárez-Hernández, F., García-Benítez, M. P., Hurtado-Duarte, A. M., Rojas-Varela, R., Farías-Contreras, J. P., Piedra, L. E. P., ... & Penagos, J. C. G. (2020). CT findings in COVID-19 lung disease, initial experience at *Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias Ismael Cosío Villegas, Ciudad de México*. *NCT Neumología y Cirugía de Tórax*, 79(2), 71-77.
- Pichierri, A. (2016). Private/public{common: Economic goods and social orders. *European Journal of Social Theory*, 19(2):264-282.
- PNUD (2019). Informe de desarrollo humano municipal 2010-2015: Transformando México desde lo local.
- Reyes-Morales, H., Dreser-Mansilla, A., Arredondo-López, A., Bautista-Arredondo, S., and Ávila-Burgos, L. (2020). Análisis y reflexiones sobre la iniciativa de Reforma a la Ley General de Salud de México 2019. *Salud Pública de México*, 61, 685-691.
- Roth, A. E. (2015). *Who gets what and why: The new economics of matchmaking and market design*. Houghton Mifflin Harcourt.
- Sánchez-Hernández, E., Cardona Gordo, O., Ferrer Castro, J. E., Pérez Fouces, F., and Despaigne Bicet, A. (2020). Variabilidad de los resultados de la pcr evolutiva en pacientes con la covid-19. *MEDISAN*, 24(4):565-577.
- Setty, K., Loret, J.-F., Courtois, S., Hammer, C. C., Hartemann, P., Laorgue, M., Litrico, X., Manas, T., Medema, G., Shaheen, M., et al. (2019). Faster and safer: Research priorities in water and health. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 222(4):593-606.
- Torrecilla, F. J. M. and Castilla, R. H. (2011). Hacia un concepto de justicia social. REICE. *Revista Iberoamericana sobre Calidad, Eficacia y Cambio en Educación*, 9(4):7-23.
- Treviño, J. A. (2020). Demografía, comorbilidad y condiciones médicas de los pacientes hospitalizados por covid-19 en México. *Middle Atlantic Review of Latin American Studies*, 4(1).
- Woldenberg, S. C. and Dolci, G. F. (2012). El sistema de salud mexicano: ¿requiere una transformación? *Gaceta Médica de México*, 148(6):502-508.