

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Administración y Economía

¿Cuál proceso de vacunación nos puede llevar a la inmunidad de rebaño en el menor tiempo posible?

**Karen Malena Boada de la Torre
Beeker David Escudero Escudero
Luis Felipe Puga Serrano
Jorge Luis Tello Barrionuevo**

Economía

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito

para la obtención del título de

Economista

Quito, 20 de mayo del 2021

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Administración y Economía

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

¿Cuál proceso de vacunación nos puede llevar a la inmunidad de rebaño en el menor tiempo posible?

**Karen Malena Boada de la Torre
Beeker David Escudero Escudero
Luis Felipe Puga Serrano
Jorge Luis Tello Barrionuevo**

Calificación

Nombre del profesor, Título académico

Carlos Uribe Terán, Ph.D

Firma del Profesor:

Quito, 20 de mayo del 2021

DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Nombres y apellidos: Karen Malena Boada de la Torre
Código: 00200156
Cédula de identidad: 1721440095

Nombres y apellidos: Beeker David Escudero Escudero
Código: 00203051
Cédula de identidad: 1727027748

Nombres y apellidos: Luis Felipe Puga Serrano
Código: 00139382
Cédula de identidad: 1719471904

Nombres y apellidos: Jorge Luis Tello Barrionuevo
Código: 00202832
Cédula de identidad: 1719047431

Lugar y fecha: Quito, 20 de mayo del 2021

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser nuestro guía durante estos cuatro años de carrera. A nuestros padres y hermanos por su apoyo incondicional. A Santiago José Gangotena, Carlos Uribe y Juan Esteban Díaz Leiva por su ayuda en este trabajo de titulación. Y a todas las personas que nos acompañaron en este proceso.

RESUMEN

Analizando simulaciones de la pandemia del COVID-19, buscamos encontrar un protocolo que logre llevar a la población a una inmunidad de rebaño en el menor tiempo posible. Mediante el uso de un modelo epidemiológico SEIRD, aplicado a modelización de agentes, logramos crear distintos escenarios de vacunación con los que se responde nuestra pregunta de interés. Con el protocolo enfocado a la población más expuesta se logra inmunizar al 75% de la población en 46 periodos, frente al menos efectivo que inocular a la población por fases de mayor a menor y que inmunizó a 21,09% en el mismo tiempo.

Palabras clave: *vacunación, coronavirus, pandemia, protocolos, inmunidad de rebaño, expuestos, infectados.*

ABSTRACT

Analyzing simulations of the COVID-19 pandemic, we seek to find a protocol that manages to bring the population to herd immunity in the shortest time possible. Through the use of a SEIRD epidemiological model, applied to agent modeling, we were able to create different vaccination scenarios with which our question of interest is answered. With the protocol focused on the most exposed population, it is possible to immunize 75% of the population in 46 periods, against the less effective one that inoculates the population in phases from higher to lower and that immunized 21.09% in the same time.

Keywords: *vaccination, coronavirus, pandemic, protocols, herd immunity, exposed, infected.*

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	11
Metodología.....	13
Modelo epidemiológico compartimental SEIRD.....	13
Protocolos.....	14
Modelo de Agentes: Árbol de probabilidades.....	15
Datos.....	18
Resultados.....	18
Función de densidad acumulada.....	19
Vacunados.....	20
Infectados.....	21
Muertos.....	22
Control de Sensibilidad	22
Conclusiones.....	23
Referencias bibliográficas.....	26
ANEXO A: Tablas Estadísticas Descriptivas.....	29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Términos del modelo.....	16
-----------------------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Crecimiento del PIB Mundial.....	11
Figura 2: Ecuaciones Modelo SEIRD.....	14
Figura 3: Árbol de probabilidades.....	17
Figura 4: CDF-Función de densidad acumulada	19
Figura 5: Población de vacunados para vacunas esterilizada y efectivas.....	20
Figura 6: Población de infectados para vacunas esterilizada y efectivas.....	21
Figura 7: Población de muertos para vacunas esterilizada y efectiva.....	22

INTRODUCCIÓN

¿Cuál es el protocolo de vacunación que nos puede llevar a la inmunización de rebaño en el menor tiempo posible? Hace más de un año, el COVID-19 se ha venido esparciendo de manera amplia en todo el mundo dejando más de 146 millones de personas contagiadas y aproximadamente 3 millones de fallecidos (WHO Coronavirus Dashboard, 2021). En Ecuador, miles de personas perdieron a familiares y amigos durante los primeros meses de la pandemia.

El Fondo Monetario Internacional (2021) indicó que entre el 2019 y 2020 el crecimiento del PIB mundial cayó drásticamente de 2.8% a -3.3% (*Figura 1*) causado por las medidas de confinamiento que se adoptaron para poder contener el virus. Esta desaceleración se produjo debido a que miles de empresas quebraron debido a pérdidas insostenibles, y se originaron despidos masivos y recortes de salarios, resultando en que más de 100 millones de personas caigan a nivel de pobreza durante el 2020 (Naciones Unidas, 2021).



Figura 2: Crecimiento del PIB Mundial, IMF (2021)

Las restricciones impuestas por los gobiernos causaron la deserción de 7.9 millones de estudiantes que no se inscribieron al año escolar 2019-2020 (UNESCO, 2021). A finales del 2020, se empezó el proceso de vacunación en distintos países, actualmente existen dos tipos de vacunas producidas por diferentes laboratorios en todo el mundo: *Efectivas* y *Esterilizadas*.

Tomando los procesos de vacunación como una herramienta para la posible erradicación del virus, contribuiremos con los efectos que se pueden tener, en una forma abstracta, de la implementación de distintos protocolos de vacunación, además de cuál protocolo es el más eficiente para llegar a la inmunidad de rebaño. Empleando un modelo epidemiológico adaptado a la modelización de agentes y planteando diferentes protocolos de vacunación a nuestras simulaciones, buscamos identificar cuál de ellos es el más eficiente y que responda a nuestra pregunta de interés.

El estudio del COVID-19 es importante para generar soluciones a través de las evidencias que se recaudan día a día (Organización Panamericana de la Salud, 2020). Díaz (2020) afirma que en las últimas décadas se ha visto la aparición de otros virus como el SARS Co en el 2003, pero que ninguno de estos ha alcanzado la tasa de contagio que presenta el COVID-19. El número reproductivo (R_0) del SARS Co es de 2 mientras que el del COVID-19 llega a 3.5, esto explica la rapidez con la que logra esparcirse en la población y como ha afectado a la gran mayoría de la población, por lo que es catalogado una pandemia (Díaz-Castrillón & Toro-Montoya, 2020).

Bubar (2021) concluye que el éxito de una estrategia de vacunación va a depender de la eficacia de cada vacuna sobre los diversos grupos de edades. Otras investigaciones como la de la SAGE (2020), ahonda en la importancia de tomar en cuenta otros factores como la existencia de comorbilidades para predecir la gravedad de la enfermedad al contraer el virus. Recalcando el continuo cambio de la información existente sobre el COVID-19, la constante investigación y actualización de datos genera nuevas alternativas sobre estrategias de vacunación y de las vacunas en sí (Bubar et al., 2021).

Actualmente en la literatura disponible no suelen fijar factores humanos para sus investigaciones, por lo que sus escenarios se vuelven genéricos y poco realistas. El aporte que se brinda a través de este documento arroja resultados más cercanos a la incidencia actual. Se agregó variables como tiempos de inmunización de rebaño, capas de vacunación, hospitalización, cuidados intensivos (UCI), reinfección y una movilización heterogénea entre los agentes de nuestro modelo que son los principales temas de interés para los tomadores de decisión.

Este trabajo de investigación está organizado de la siguiente manera. En la Sección 1 presentamos la motivación para el estudio de este tema, así como también la literatura relacionada con nuestra investigación. La Sección 2 detalla la metodología usada para responder nuestra pregunta de interés. En la Sección 3 describimos los datos empleados. La Sección 4 expone los resultados obtenidos. La Sección 5 presenta las conclusiones.

METODOLOGÍA

Nuestras simulaciones están sustentadas por un modelo epidemiológico *SEIRD*, el cual se adapta a un modelo basado en agentes “*Agent Based Model*”. Utilizamos dos tipos de vacunas y cuatro protocolos enfocados a dos parámetros poblacionales: grupos de edad y movilidad.

Modelo epidemiológico compartimental SEIRD

Definiendo las siglas de este modelo, los susceptibles (S) son toda la población en el tiempo $t = 0$. Los expuestos (E) son aquellos susceptibles que tuvieron contacto con un individuo infectado (I), determinados por una tasa de transmisión (β), es decir, están infectados pero aún no son contagiosos. Posterior a un periodo de incubación, los expuestos pasan a ser infectados con una probabilidad (σ) y ahora son transmisores del virus. Los infectados tendrán dos caminos, estar recuperados (R) o muertos (D), que es determinado por la probabilidad (γ) y por una tasa de

mortalidad (δ). El parámetro (β) es poco observable en la realidad, por lo que se toma la tasa con la que se reproduce la enfermedad (R_0) con las siguientes ecuaciones en diferencia:

$$\begin{aligned}
 R_0 &= \frac{\beta}{\gamma} \\
 S_{t+1} &= S_t - R_0 \gamma \frac{I_t}{N} S_t \\
 E_{t+1} &= (1 - \sigma)E_t + R_0 \gamma \frac{I_t}{N} S_t \\
 I_{t+1} &= (1 - \gamma)I_t + \sigma E_t \\
 R_{t+1} &= R_t + (1 - \delta)\gamma I_t \\
 D_{t+1} &= D_t + \delta\gamma I_t
 \end{aligned}$$

Figura 2: Ecuaciones Modelo SEIRD

Cada ecuación representa algebraicamente los distintos estados de la enfermedad, es decir, mediante las ecuaciones controlamos la transición de los individuos por cada etapa mediante probabilidades de paso entre estados. Agregando los filtros de edad y movilización, mediante la metodología “Agent Based Model”, se agrega realismo a las simulaciones.

Protocolos

Desarrollamos cuatro protocolos de vacunación implementados con dos tipos de vacunas: *Esterilizada*, la cual solo tiene una dosis y asumimos una tasa de eficacia del 100% , y la vacuna *Efectiva*, la cual tiene dos dosis con un periodo de tiempo de 21 días entre ellos y una tasa de efectividad del 67% en la primera dosis y 90% con la segunda (Bubar, 2021).

El primer protocolo *Esterilizada / Efectiva* contempla una lotería poblacional en la que cualquier persona puede ser vacunada sin ser discriminada por su edad. El segundo protocolo (Vulnerables) vacuna en primer lugar a las personas mayores de 65 años y menores de 15 años, posterior a un margen de tiempo, se realiza una lotería poblacional en donde se vacuna

aleatoriamente sin sesgo de edad. El tercer protocolo (Expuestos) vacuna primero a las personas con mayor movilidad (población económicamente activa), es decir, las que tengan entre 15 y 65 años y después se emplea la lotería poblacional sin discriminar edades. Para el último protocolo (Descendiente), se vacuna a la población por fases, comenzando por aquellas mayores a 65 años hasta las de 15 años, manteniendo un margen de tiempo de 15 periodos entre grupos. Es necesaria esta ventana de 15 semanas para poder llegar a las personas objetivo, minimizando los costos hundidos del tiempo en términos de logística y asistencia, que podría limitar la eficiencia del programa de vacunación.

Modelo de Agentes: Árbol de probabilidades

Un sistema de ecuaciones en diferencias nos resulta restrictivo para responder nuestra pregunta debido a que sus variables quedan completamente dependientes a parámetros exógenos que, en escenarios similares, no son observables y restringe la adición de otros factores endógenos del modelo que se ajustan al comportamiento heterogéneo de los agentes, como la interacción por redes a nivel familiar y social, movilidad por grupos etarios, hospitalizaciones, tipos de vacuna, entre otras. Al adaptar el modelo SEIRD a una simulación de agentes se obtiene más libertad para incluir variables como las mencionadas anteriormente, permite simular escenarios más realistas y se logra que el modelo siga evolucionando basado en probabilidades y conservando una línea intertemporal.

Para el entendimiento del árbol de probabilidades (representación gráfica de la adaptación del modelo SEIRD), necesitamos definir las variables de estado como constantes a través del tiempo y los parámetros modificables como aquellos que varían entre periodos (*Tabla 1*)

Tabla 1: Términos del Modelo

Términos del Modelo	Definición
Variables de Estado:	
S (1 - 2)	Susceptibles 1 y Susceptibles 2
E (1 - 2)	Expuestos 1 y Expuestos 2
I (1- 2)	Infectados 1 e Infectados 2
R	Recuperados
H	Hospitalizados
U	UCI
M	Muertos
V	Vacunados
Parámetros:	
<i>I.P.</i>	Probabilidad de Infección
<i>P.R.</i>	Probabilidad de Recuperación
<i>I.T.</i>	Tiempo de Incubación del Virus
<i>T.V.</i>	Tiempo de Vacunación
<i>V.R.</i>	Índice de Vacunación
<i>Z_i</i>	Factor de Movilidad en Función a la Edad sin Vacuna
<i>Z_j</i>	Factor de Movilidad en Función a la Edad con Vacuna

El modelo parte de susceptibles S (1), donde el agente no ha sido infectado ni tampoco vacunado. A partir de la primera posición existen tres condiciones que van a diferenciar la dirección de los agentes. La primera condición es un parámetro de movilidad, el cual captura el desplazamiento de estos dentro de la sociedad y en base a esto se aplica un grado de exposición (entre mayor movilidad mayor riesgo de contagio y viceversa). La segunda condición hace referencia a la aplicación de la vacuna. Si unimos estas dos, tenemos Z_i , donde si $i = 0$ no se ha

aplicado la vacuna y si $i = 1$ sí se ha aplicado la vacuna. Por último, la tercera condición es el tipo de vacuna: *Esterilizada* o *Efectiva*.

Aplicando la segunda condición, quienes no se han vacunado tienen una probabilidad de infección ($I.P.$) que, como el índice de vacunación ($V.R.$), será el mismo para las dos vacunas. El parámetro $V.R.$ desemboca directamente en un estado de vacunado (V), diferenciando entre los agentes que tienen la vacuna esterilizada y la vacuna efectiva, vemos que aquellos con dos dosis, adquieren el riesgo de ser infectados (en menor probabilidad) después de la primera dosis y pasan a ser susceptibles $S(2)$; caso contrario, pasan a estar vacunados con un tiempo de vacunación ($T.V.$). Si no se ha aplicado ninguna vacuna, se visualiza estados donde el agente puede pasar a estar hospitalizado o en cuidados intensivos y posteriormente recuperado o muerto con un cierto grado de probabilidad. Por ejemplo: para pasar de hospitalizado a muerto es el 10% de infectados en la sección de hospitalizados en un periodo de tiempo i multiplicado por el 15% de las personas que mueren en el tiempo $i + 1$. Nuestro modelo toma en cuenta también un cierto margen de error (5%) en la eficacia de la vacuna *Esterilizada* y la reinfección de los agentes.

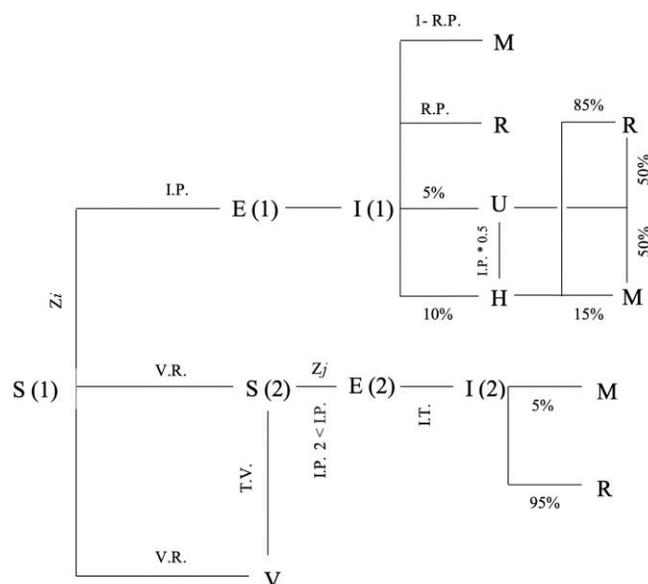


Figura 3: Árbol de probabilidades

DATOS

Usando datos extraídos de la Encuesta Nacional de Empleo, Desempleo y Subempleo (ENEMDU) del 2017, se configura la simulación mediante estratificación por edades de nuestra población y la distribución de la cantidad de miembros que conforman cada hogar, contingente a las edades. Las tasas de infección, recuperación y muerte fueron obtenidas a partir de los datos expuestos por la OMS; así mismo, la tasa de movilidad fue extraída de una media geométrica entorno a los datos de Google (2021) para Ecuador. Los límites de recuperación, tiempo de inmunización y la tasa de contagio fueron obtenidos de artículos publicados por The New York Times (2020), Instituto Nacional de Salud (2020) y de la Organización Mundial de la Salud (2020).

El tiempo en que se aplica la vacuna fue colocado de acuerdo con el comportamiento de los escenarios sin vacunas, es decir, el proceso normal de una pandemia. La tasa de recuperación para las personas infectadas (posterior a recibir la primera dosis de la vacuna en caso de la *Efectiva*), se rige por el supuesto que aquellos individuos que han recibido la primera dosis de la vacuna, deberían poder recuperarse más rápido que lo observado en condiciones normales.

Como menciona Randolph et al (2020), la inmunidad de rebaño para el COVID-19 se puede alcanzar con el 67% de la población vacunada, esto refuerza el caso de Israel, que es el primer país en lograr vacunar al 62% de la población general (OurWorldInData, 2021). Esto ha permitido que este país vuelva a la normalidad y sea líder en el proceso de vacunación. Por lo tanto, tomaremos este parámetro como guía para definir la inmunidad de rebaño dentro de nuestras simulaciones.

RESULTADOS

Dentro de los escenarios, la población utilizada fue en promedio de 2578 personas que fueron divididas en hogares y las simulaciones fueron procesadas 100 veces para cada protocolo.

Función de densidad acumulada

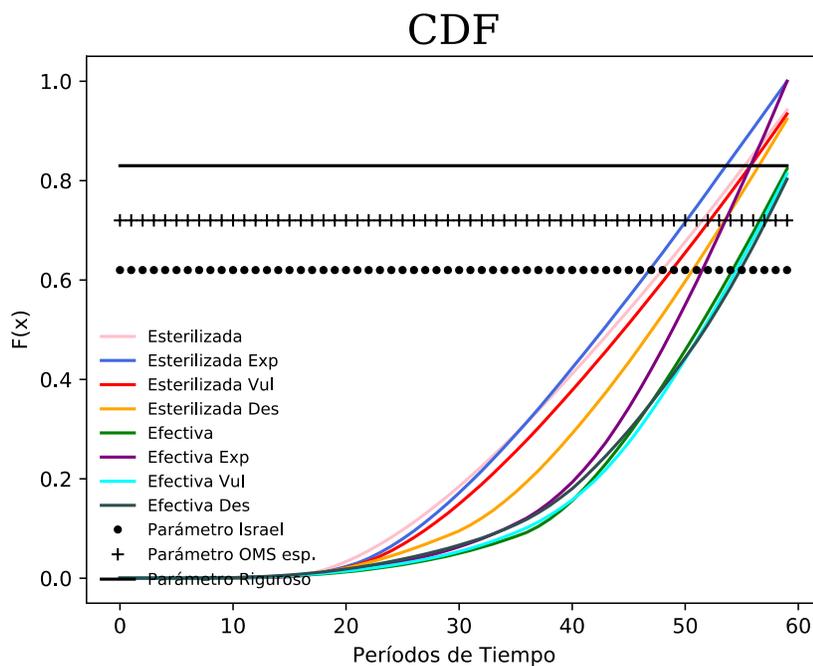


Figura 4: CDF-Función de densidad acumulada

A través de la dominancia estocástica, determinamos cuáles son los mejores protocolos de vacunación para cada vacuna, la curva que está por encima de las otras alternativas y primera en el cuadrante izquierdo del gráfico (Figura 4) va a ser el protocolo que llega a la inmunidad de rebaño más rápido.

Identificamos el mejor protocolo para cada tipo de vacuna. Dado que la disponibilidad de estas varía de acuerdo con el país, se podrá elegir el protocolo dependiendo del tipo de vacuna que se disponga. En el *Figura 4* observamos que los protocolos basados en la vacuna *Esterilizada* tienden a ser más efectivos, dada la rapidez con la que actúan y que hacen que se llegue a una inmunidad de rebaño mucho más rápido. Específicamente, muestra que el protocolo *Expuestos* domina estocásticamente al resto porque logra vacunar una proporción más grande de la población en menos tiempo.

La dominancia de este protocolo es evidente para ambas vacunas. Este minimiza los costos económicos dentro de la población, ya que al vacunar a este grupo de personas se interrumpe en el menor margen posible las transacciones económicas del país, además de reducir el riesgo de contagio entre las personas dada la alta tasa de infección que tienen debido a su nivel de movilidad. Estos resultados discrepan de lo que actualmente se implementa en la mayoría de los países, en donde se aplica protocolos *Descendientes*.

Vacunados

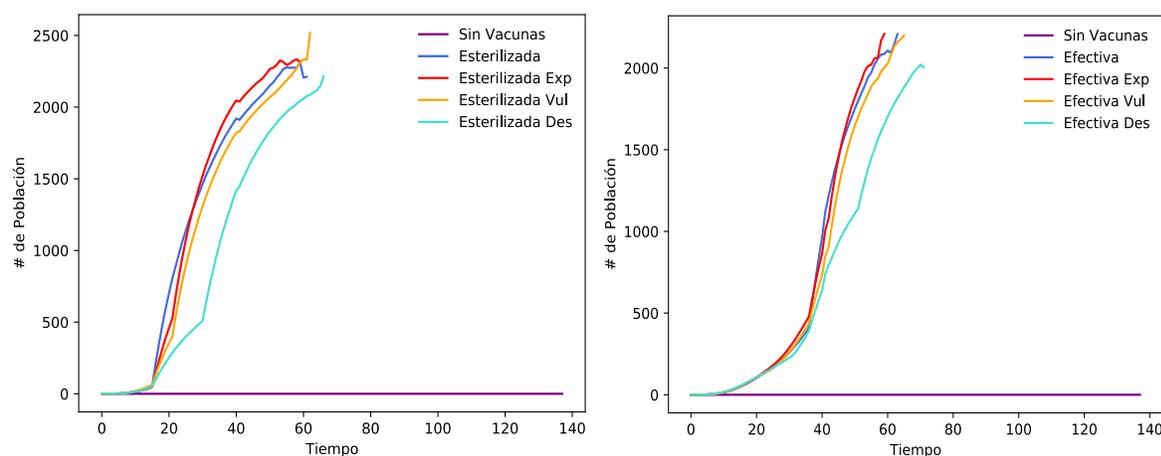


Figura 5: Población de vacunados para vacunas esterilizada (izquierda) y efectivas (derecha)

Usando el referente actual de la inmunidad de rebaño al 62% de vacunados (Israel), los resultados muestran que el protocolo que nos permite llegar a en el menor tiempo posible a la inmunidad de rebaño es el protocolo de *Expuestos* tanto para la vacuna *Esterilizada* como *Efectiva*. El número de personas vacunadas es proporcional al número de personas infectadas. El protocolo *Vulnerables* con la vacuna *Esterilizada* es el que inmuniza a una mayor cantidad de personas, debido a que en este protocolo existe una mayor cantidad de infectados.

Infectados

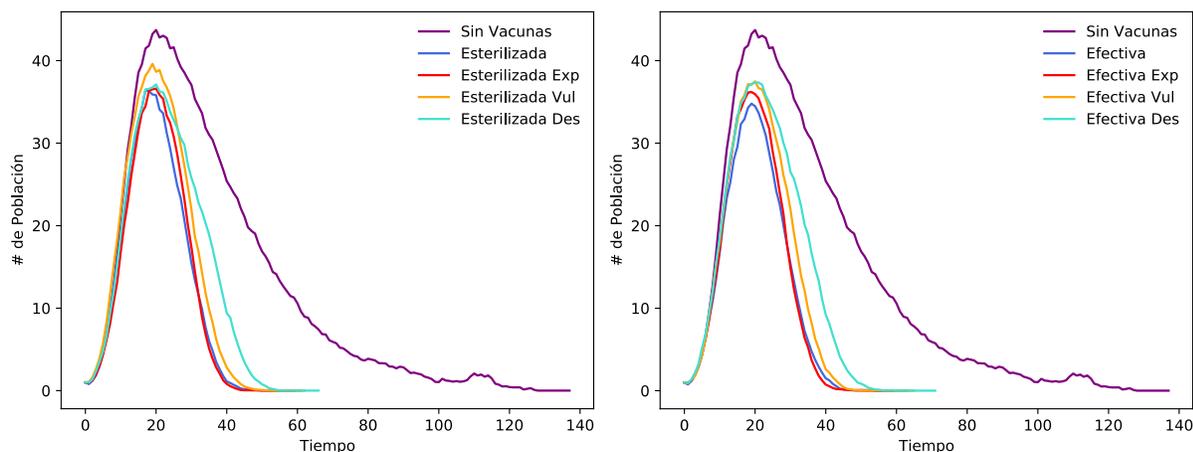


Figura 6: Población de infectados para vacunas esterilizada (izquierda) y efectivas (derecha)

El protocolo *Expuestos* logra llegar a cero infectados en el tiempo más corto, esto se debe a la velocidad de inmunización que se adquiere por el tipo de vacuna. Sin embargo, este protocolo no necesariamente va a minimizar la cantidad de infectados o reportar un menor nivel con respecto a otras alternativas. En el caso de hospitalizados y UCI, se demuestra que los protocolos no tienen una incidencia significativa con respecto a su trayectoria.

Dentro de nuestras simulaciones generalizamos una tasa de mortalidad para las diversas cepas, dado que en la realidad éstas no son observables y puede existir un traslape entre grupos etarios. A través de esto podemos tener una probabilidad uniforme de estar hospitalizado y con ello pasar al UCI, y explicar porque el comportamiento es similar entre protocolos. Estos estados son similares con los resultados obtenidos en el estado de infectados. Entre menos infectados, menos cantidad de personas en hospitalización y UCI.

Muertos

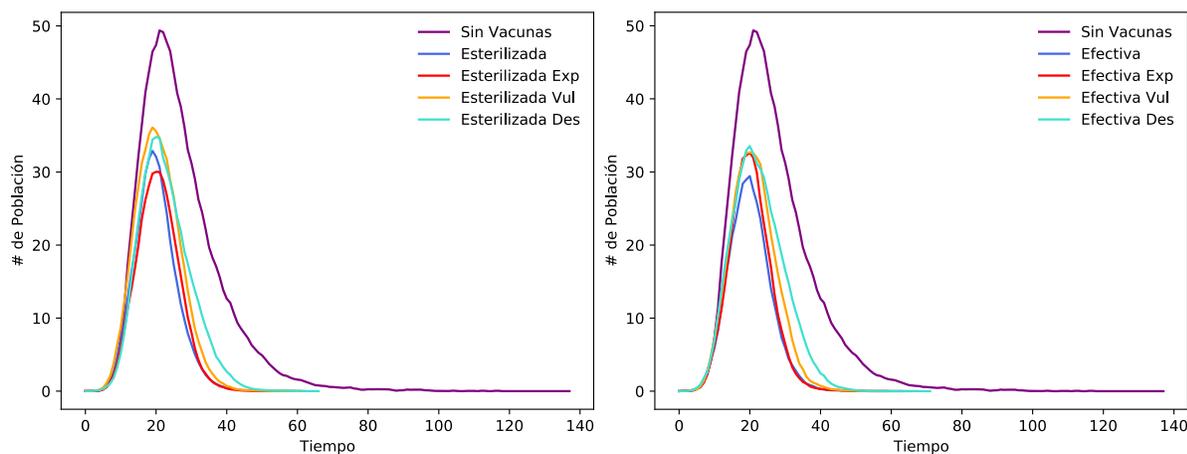


Figura 7: Población de muertos para vacunas esterilizada (izquierda) y efectivas (derecha)

Para la vacuna *Esterilizada* existen menos muertes, esto se debe a que el tiempo juega un factor crucial. Como se explicó anteriormente, para esta vacuna no existe periodo de tiempo entre dosis ya que esta se aplica en un solo dosis, a diferencia de la *Efectiva* que se aplica en dos dosis con un tiempo de espera entre ellas. Esto aumenta la probabilidad en relación al comportamiento exhibido con la vacuna *Esterilizada*, dado que en el lapso entre dosis se pueden presentar con sintomatologías graves (inusuales), que consecuentemente, deriven a la muerte.

Control de Sensibilidad

En el Anexo A se encuentran las tablas de estadística descriptiva que nos muestran el control de sensibilidad para los estados más relevantes de la pandemia: infectados, hospitalizados, UCI, muertos y vacunados para varios periodos, estos demuestran la diferencia entre los distintos protocolos. Las tablas se enfocan en mostrar los cuartiles poblacionales y sus tiempos de llegada, cumplen el objetivo de verificar que los protocolos *Expuestos*, en ambas vacunas, generan en el menor tiempo posible la inmunidad de rebaño (T).

Planteamos tres periodos distintos, estos son: $t=15$, $t=20$ y $t=25$. Mediante este proceso se verifica la relevancia del tiempo dentro del proceso de vacunación. El tiempo $t=15$ representa la

entrada masiva de la vacunación cuando hay una tasa creciente de infectados, el tiempo $t=20$ representa la entrada en el punto de inflexión y $t=25$ es la entrada con una tasa decreciente de infectados. Los tiempos de finalización varían dependiendo de cuando entró el plan de vacunación intensivo, cuanto más se postergue los protocolos, más van a tender los resultados a asemejarse al escenario sin vacunas. Al correr la simulación en tiempos diferentes los protocolos enfocados en la población más expuesta presenta un mayor índice en reducir el impacto de la pandemia independientemente del tiempo en el que se aplicó la vacuna.

Las tablas descriptivas nos permiten ratificar que el protocolo *Expuestos*, es eficaz para poder llegar a la inmunidad de rebaño. Esto no implica necesariamente que se va a minimizar la cantidad de personas que pasan por los estados de la enfermedad, a la vez que no hay ningún protocolo que sea el más óptimo en términos absolutos. Dependiendo del objetivo se definirá el protocolo más adecuado; nuestro objetivo es minimizar el tiempo para llegar a la inmunidad de rebaño desligado del impacto que tiene en los otros campos.

CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se buscaba encontrar el mejor protocolo de vacunación para COVID-19, que logre llevar a la población a una inmunidad de rebaño en el menor tiempo posible. Para esto, se utilizó un modelo epidemiológico SEIRD adaptado para incluir vacunación, hospitalización y reinfección; este modelo fue ajustado a modelización de agentes para simular la pandemia. Desarrollamos cinco protocolos de vacunación enfocados en grupos de edad y movilidad de estos; utilizamos una población de 2578 agentes agrupados en hogares y procesamos estas simulaciones 100 veces por protocolo. Por último, dividimos a las vacunas en *Efectivas* y *Esterilizadas* para diferenciarlas entre las que tienen una y dos dosis.

Mediante una función de densidad acumulada (CDF) se logra determinar, a través de dominancia estocástica, que el protocolo más eficiente es el *Expuesto* para ambas vacunas. Esto lo confirmamos mediante el control de sensibilidad, en el cual sin importar el tiempo en donde se aplique la vacuna, se cumple con los parámetros referenciales de inmunidad de rebaño: Israel con el 62% de la población vacunada, así como el nivel bajo de la OMS para el coronavirus estimado del 70% para alcanzar inmunización y también con el nivel riguroso de la OMS para virus letales alrededor del 80% - 83%.

Se puede observar que este protocolo también es el que vacuna a la mayor cantidad de gente y el que llega a cero más rápido en el conteo diario de muertos, especialmente si se usa la vacuna *Esterilizada*. Además, se determina que existe un comportamiento similar entre protocolos en lo que se refiere a hospitalizados y UCI debido a la generalización de la tasa de mortalidad para todas las cepas, la cuál fue asumida por la dificultad del cuerpo médico en identificar con certidumbre que cepas están afectando en el espacio geográfico de los infectados, que edades son las más afectadas y sus respectivos traslapes entre grupos etarios.

Entre más se postergue la entrada de la vacuna, más va a converger el comportamiento de los estados de la enfermedad al escenario sin vacunas, que es consistente dado el efecto decreciente en el tiempo de la vacuna frente a una población creciente de recuperados. Para futuras investigaciones recomendamos incluir dentro de la simulación más variables relevantes que integren nuevos descubrimientos del comportamiento del virus y consecuentemente, un fortalecimiento del sistema inmunológico con la existencia de una tercera inoculación, con el objetivo de analizar el comportamiento a largo plazo ajustado a las estimaciones que se tiene de la duración de la pandemia.

Dentro de nuestro modelo hay ciertas limitaciones: el tiempo de duración de la pandemia es inferior al exhibido en la realidad, los mecanismos de contagio, como la modelización de ciertos aspectos del comportamiento de las personas también fueron limitados por nuestra metodología, a pesar de que presentan avances y mejoras frente a otras alternativas. Para la implementación de política pública es crucial enfocar la cantidad limitada de vacunas y la capacidad hospitalaria, acorde al protocolo que sea más eficiente y cumpla con los objetivos que se tiene como hacedores de política, teniendo en mente los costos de oportunidad que presentan los mismos y las limitaciones de nuestra investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agent Based Modeling using NetLogo: Simulation of Covid 19 Contagion Dynamics. (2020, 28 marzo). [Video]. YouTube. <https://youtube.com/watch?v=VaGFCEi46Fk>
- A rapid survey on occupational groups: COVID 19 Impact on Vulnerable Groups. (2020). *Bangladesh Physiotherapy Journal*, 10(1). <https://doi.org/10.46945/bpj.10.1.04.08>
- Bubar, K., Reinholt, K., Kissler, S., Lipsitch, M., Cobey, S., Grad, Y., & Larremore, D. (2021). Model-informed COVID-19 vaccine prioritization strategies by age and serostatus. *Science*, 371(6532), 916-921. doi: 10.1126/science.abe6959
- Chen, Y., Lu, P., Chang, C., & Liu, T. (2020). A Time-Dependent SIR Model for COVID-19 With Undetectable Infected Persons. *IEEE Transactions On Network Science And Engineering*, 7(4), 3279-3294. doi: 10.1109/tnse.2020.3024723
- Dal-Ré, R., & Camps, V. (2021). Who should be vaccinated against COVID-19 first? *Medicina Clínica (English Edition)*, 156(4), 177–179. <https://doi.org/10.1016/j.medcle.2020.11.005>
- Davidsson, P. (2002). Paul Davidsson : Agent Based Social Simulation. JASSS. <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/1/7.html>
- Díaz Castrillón, F., & Toro Montoya, A. (2020). SARS-CoV-2/COVID-19: The virus, the disease and the pandemic. *Editora Médica Colombiana S.A*, 24. Recuperado de <https://docs.bvsalud.org/biblioref/2020/05/1096519/covid-19.pdf>
- Dignum, F. (2020, 15 junio). Analysing the Combined Health, Social and Economic Impacts of the Corovanvirus Pandemic Using Agent-Based Social Simulation. *Minds and Machines*. https://link.springer.com/article/10.1007/s11023-020-09527-6?error=cookies_not_supported&code=c48b59c1-88d3-4ddb-b208-22337745b978

- Freeman, D., Loe, B. S., Yu, L. M., Freeman, J., Chadwick, A., Vaccari, C., Shanyinde, M., Harris, V., Waite, F., Rosebrock, L., Petit, A., Vanderslott, S., Lewandowsky, S., Larkin, M., Innocenti, S., Pollard, A. J., McShane, H., & Lambe, S. (2021). Effects of different types of written vaccination information on COVID-19 vaccine hesitancy in the UK (OCEANS-III): a single-blind, parallel-group, randomised controlled trial. *The Lancet Public Health*. Published. [https://doi.org/10.1016/s2468-2667\(21\)00096-7](https://doi.org/10.1016/s2468-2667(21)00096-7)
- Ghisolfi, S., Almás, I., Sandefur, J. C., von Carnap, T., Heitner, J., & Bold, T. (2020). Predicted COVID-19 fatality rates based on age, sex, comorbidities and health system capacity. *BMJ Global Health*, 5(9), e003094. <https://doi.org/10.1136/bmjgh-2020-003094>
- Haas, E., Angulo, F., McLaughlin, J., Anis, E., Singer, S., & Khan, F. et al. (2021). Impact and effectiveness of mRNA BNT162b2 vaccine against SARS-CoV-2 infections and COVID-19 cases, hospitalisations, and deaths following a nationwide vaccination campaign in Israel: an observational study using national surveillance data. *The Lancet*, 397(10287), 1819-1829. doi: 10.1016/s0140-6736(21)00947-8
- IMF. (2021). International Monetary Fund. Recuperado de https://www.imf.org/external/datamapper/NGDP_RPCH@WEO/WEOWORLD
- Israel may have achieved herd immunity against Covid-19. (2021, 7 abril). ISRAEL21c. <https://www.israel21c.org/israel-may-have-achieved-herd-immunity-against-covid-19/>
- Lipsitch, M., & Kahn, R. (2021). Interpreting vaccine efficacy trial results for infection and transmission. *medRxiv*.
- Liu, Y., Gayle, A. A., Wilder-Smith, A., & Rocklöv, J. (2020). The reproductive number of COVID-19 is higher compared to SARS coronavirus. *Journal of Travel Medicine*, 27(2). <https://doi.org/10.1093/jtm/taaa021>
- Mortality Risk of COVID-19 - Statistics and Research. (2021). Our World in Data. <https://ourworldindata.org/mortality-risk-covid>

- Nicho, J. (2010). The SIR Epidemiology Model in Predicting Herd Immunity. Undergraduate Journal of Mathematical Modeling: One+ Two, 2(2), 8.
- OPS. (2021). COVID-19 Y LA IMPORTANCIA DE FORTALECER LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN. *Organización Panamericana De La Salud*. Recuperado de https://iris.paho.org/bitstream/handle/10665.2/52128/COVID19FactsheetIS4H_spa.pdf?sequence=14
- Randolph, H. E., & Barreiro, L. B. (2020, 19 mayo). Herd Immunity: Understanding COVID-19. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1074761320301709>
- Reuters. (2021). Tracking the spread of the novel coronavirus Recuperado de <https://graphics.reuters.com/CHINA-HEALTH-MAP/0100B59S39E/index.html>
- Rizvi, F. (2016). Mathematical Modeling of Two-Dose Vaccines (Doctoral dissertation, The Ohio State University).
- Sadarangani, M., Abu Raya, B., Conway, J. M., Iyaniwura, S. A., Falcao, R. C., Colijn, C., Coombs, D., & Gantt, S. (2021). Importance of COVID-19 vaccine efficacy in older age groups. *Vaccine*, 39(15), 2020–2023. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2021.03.020>
- UNESCO. (2020). UN Secretary-General warns of education catastrophe, pointing to UNESCO estimate of 24 million learners at risk of dropping out. Recuperado de <https://en.unesco.org/news/secretary-general-warns-education-catastrophe-pointing-unesco-estimate-24-million-learners-risk>
- World Health Organization. (2020). Background paper on Covid-19 disease and vaccines on immunization working group on COVID-19 vaccines. *The Strategic Advisory Group Of Experts (SAGE)*. Recuperado de <https://apps.who.int/iris/handle/10665/338095>

ANEXO A: TABLAS DE ESTADÍSTICAS DESCRIPTIVAS (CONTROL DE SENSIBILIDAD)

TABLA 1: T=15 INFECTADOS

INFECTADOS										
Cuartiles	Tiempo de llegada al cuartil	Sin Vacunas	Esterilizada	Esterilizada Exp	Esterilizada Vul	Esterilizada Des	Efectiva Efectiva	Efectiva Exp	Efectiva Vul	Efectiva Des
1	t = 19	406	357	338	399	360	329	350	357	360
2	t = 30	855	651	658	756	717	616	654	701	726
3	t = 45	1276	716	717	860	921	681	708	805	930
4	T	1698	716	717	861	930	682	708	805	940
	<i>Tiempo de finalización (T)</i>	127	51	49	52	56	53	49	55	61

TABLA 2: T=15 HOSPITALIZADOS

HOSPITALIZADOS										
Cuartiles	Tiempo de llegada al cuartil	Sin Vacunas	Esterilizada	Esterilizada Exp	Esterilizada Vul	Esterilizada Des	Efectiva Efectiva	Efectiva Exp	Efectiva Vul	Efectiva Des
1	t = 19	106	83	77	97	82	77	83	84	85
2	t = 25	204	142	144	169	154	134	147	155	155
3	t = 33	298	166	178	211	206	158	173	197	211
4	T	393	167	179	215	225	160	175	201	227
	<i>Tiempo de finalización (T)</i>	117	42	41	45	56	42	41	43	51

TABLA 3: T=15 UCI

UCI										
Cuartiles	Tiempo de llegada al cuartil	Sin Vacunas	Esterilizada	Esterilizada Exp	Esterilizada Vul	Esterilizada Des	Efectiva	Efectiva Exp	Efectiva Vul	Efectiva Des
1	t = 19	60	45	42	55	44	44	45	46	43
2	t = 24	111	77	76	92	81	74	77	81	78
3	t = 32	170	93	98	120	113	90	95	108	112
4	T	224	94	100	123	125	92	96	111	123
<i>Tiempo de finalización (T)</i>		108	41	42	45	50	41	42	42	52

TABLA 4: T=15 MUERTOS

MUERTOS										
Cuartiles	Tiempo de llegada al cuartil	Sin Vacunas	Esterilizada	Esterilizada Exp	Esterilizada Vul	Esterilizada Des	Efectiva	Efectiva Exp	Efectiva Vul	Efectiva Des
1	t = 18	249	185	162	223	178	168	178	189	189
2	t = 24	535	353	332	424	373	324	354	378	378
3	t = 32	814	430	429	550	523	398	437	500	536
4	T	1079	442	441	572	580	408	447	520	593
<i>Tiempo de finalización (T)</i>		117	50	49	43	60	51	52	55	58

TABLA 5: T=15 VACUNADOS

VACUNADOS									
Cuartiles	Tiempo de llegada al cuartil	Esterilizada	Esterilizada Exp	Esterilizada Vul	Esterilizada Des	Efectiva	Efectiva Exp	Efectiva Vul	Efectiva Des
1	t = 19	1857	1281	1155	855	515	523	544	559
2	t = 30	14145	12599	10580	5162	2438	2575	2434	2385
3	t = 45	41335	41497	36227	23515	14058	13963	12322	10642
4	T	76530	73333	73253	64757	48532	40724	49465	51330
<i>Tiempo de finalización (T)</i>		<i>61</i>	<i>59</i>	<i>62</i>	<i>66</i>	<i>63</i>	<i>59</i>	<i>65</i>	<i>71</i>

TABLA 6: T=20 INFECTADOS

INFECTADOS										
Cuartiles	Tiempo de llegada al cuartil	Sin Vacunas	Esterilizada	Esterilizada Exp	Esterilizada Vul	Esterilizada Des	Efectiva	Efectiva Exp	Efectiva Vul	Efectiva Des
1	t = 19	409	382	378	374	379	371	341	369	375
2	t = 30	829	753	737	743	773	727	674	739	765
3	t = 46	1239	880	820	856	1010	845	748	857	990
4	T	1646	882	821	857	1022	847	749	858	1000
<i>Tiempo de finalización (T)</i>		<i>136</i>	<i>53</i>	<i>51</i>	<i>49</i>	<i>57</i>	<i>54</i>	<i>50</i>	<i>57</i>	<i>57</i>

TABLA 7: T=20 HOSPITALIZADOS

HOSPITALIZADOS										
Cuartiles	Tiempo de llegada al cuartil	Sin Vacunas	Esterilizada	Esterilizada Exp	Esterilizada Vul	Esterilizada Des	Efectiva	Efectiva Exp	Efectiva Vul	Efectiva Des
1	t = 18	95	80	80	74	76	76	67	76	71
2	t = 24	191	158	156	152	154	153	141	152	149
3	t = 32	281	215	207	209	225	207	189	209	219
4	T	371	224	212	216	251	214	193	217	244
	<i>Tiempo de finalización (T)</i>	108	44	44	43	54	44	41	48	54

TABLA 8: T=20 UCI

UCI										
Cuartiles	Tiempo de llegada al cuartil	Sin Vacunas	Esterilizada	Esterilizada Exp	Esterilizada Vul	Esterilizada Des	Efectiva	Efectiva Exp	Efectiva Vul	Efectiva Des
1	t = 18	54	43	43	42	43	41	37	41	40
2	t = 24	113	89	89	88	88	84	81	86	84
3	t = 31	160	121	120	120	127	114	107	115	119
4	T	214	127	124	125	145	120	110	121	135
	<i>Tiempo de finalización (T)</i>	99	45	46	42	48	45	40	47	48

TABLA 9: T=20 MUERTOS

MUERTOS										
Cuartiles	Tiempo de llegada al cuartil	Sin Vacunas	Esterilizada	Esterilizada Exp	Esterilizada Vul	Esterilizada Des	Efectiva	Efectiva Exp	Efectiva Vul	Efectiva Des
1	t = 18	262	200	202	199	196	192	177	198	188
2	t = 24	539	400	410	403	399	393	377	401	395
3	t = 31	771	533	541	538	568	519	496	541	564
4	T	1017	570	567	571	653	551	519	577	646
	<i>Tiempo de finalización (T)</i>	124	55	50	53	57	57	54	54	57

TABLA 10: T=20 VACUNADOS

VACUNADOS										
Cuartiles	Tiempo de llegada al cuartil	Esterilizada	Esterilizada Exp	Esterilizada Vul	Esterilizada Des	Efectiva	Efectiva Exp	Efectiva Vul	Efectiva Des	
1	t = 19	606	588	562	592	555	518	563	554	
2	t = 30	7886	9235	8381	3740	2464	2416	2537	2364	
3	t = 46	32907	38434	35297	22938	12283	13285	12769	10808	
4	T	68489	71098	62491	64042	43015	39496	51971	41821	
	<i>Tiempo de finalización (T)</i>	63	61	59	57	67	64	67	67	

TABLA 11: T=25 INFECTADOS

INFECTADOS										
Cuartiles	Tiempo de llegada al cuartil	Sin Vacunas	Esterilizada	Esterilizada Exp	Esterilizada Vul	Esterilizada Des	Efectiva	Efectiva Exp	Efectiva Vul	Efectiva Des
1	t = 19	399	382	391	364	364	391	378	385	365
2	t = 30	813	759	796	748	727	788	763	759	752
3	t = 45	1205	952	959	932	966	982	914	920	994
4	T	1603	959	960	936	978	988	915	922	1005
	<i>Tiempo de finalización (T)</i>	131	59	50	59	57	57	51	53	60

TABLA 12: T=25 HOSPITALIZADOS

HOSPITALIZADOS										
Cuartiles	Tiempo de llegada al cuartil	Sin Vacunas	Esterilizada	Esterilizada Exp	Esterilizada Vul	Esterilizada Des	Efectiva	Efectiva Exp	Efectiva Vul	Efectiva Des
1	t = 18	92	81	79	75	75	81	76	80	71
2	t = 24	184	159	161	154	146	162	153	158	147
3	t = 32	276	227	234	223	211	232	224	221	219
4	T	371	246	249	241	241	251	237	237	249
	<i>Tiempo de finalización (T)</i>	115	49	45	56	49	51	43	46	53

TABLA 13: T=25 UCI

UCI										
Cuartiles	Tiempo de llegada al cuartil	Sin Vacunas	Esterilizada	Esterilizada Exp	Esterilizada Vul	Esterilizada Des	Efectiva	Efectiva Exp	Efectiva Vul	Efectiva Des
1	t = 18	51	42	43	41	43	45	41	43	40
2	t = 23	98	78	83	80	78	86	80	82	78
3	t = 32	159	123	134	128	123	133	125	126	127
4	T	209	133	142	138	138	144	132	135	143
	<i>Tiempo de finalización (T)</i>	107	49	45	45	51	47	43	48	49

TABLA 14: T=25 MUERTOS

MUERTOS										
Cuartiles	Tiempo de llegada al cuartil	Sin Vacunas	Esterilizada	Esterilizada Exp	Esterilizada Vul	Esterilizada Des	Efectiva	Efectiva Exp	Efectiva Vul	Efectiva Des
1	t = 18	245	207	208	196	198	206	200	210	184
2	t = 23	472	380	394	366	355	384	375	388	348
3	t = 31	743	580	618	577	554	601	579	585	574
4	T	997	630	660	624	630	657	618	627	647
	<i>Tiempo de finalización (T)</i>	111	57	58	54	59	62	56	60	60

TABLA 15: T=25 VACUNADOS

VACUNADOS									
Cuartiles	Tiempo de llegada al cuartil	Esterilizada	Esterilizada Exp	Esterilizada Vul	Esterilizada Des	Efectiva	Efectiva Exp	Efectiva Vul	Efectiva Des
1	t = 19	589	583	549	561	595	570	590	562
2	t = 30	3980	4704	4394	2623	2481	2417	2461	2292
3	t = 45	23315	28062	26016	19419	10199	11077	10500	9436
4	T	70344	59315	74644	61783	43078	36700	38238	46066
	<i>Tiempo de finalización (T)</i>	<i>69</i>	<i>60</i>	<i>69</i>	<i>67</i>	<i>67</i>	<i>61</i>	<i>63</i>	<i>70</i>