

Modelo estadístico para defunciones y casos positivos de COVID-19 en México

Statistical model for deaths and positive cases of COVID-19 in Mexico

Gustavo Ramírez-Valverde
Benito Ramírez-Valverde

Resumen

Objetivo: Utilizar un modelo estadístico de las defunciones y casos positivos de COVID-19 en México, para estudiar el comportamiento de la pandemia y contribuir a definir alternativas y políticas públicas que puedan mitigar el daño de la enfermedad en la sociedad.

Metodología: Se empleó la información oficial de la Secretaría de Salud respecto del número de casos positivos de COVID-19 y del número de defunciones causadas por esta enfermedad en México.

Limitaciones: Las limitaciones del estudio son el reducido número de datos y la posibilidad de fallas en la contabilidad de contagios y defunciones.

Originalidad: Estima un modelo basado en los datos de la pandemia en México y su aplicación.

Resultados: El modelo seleccionado fue el de Gompertz con cuatro parámetros.

Conclusiones: El modelo muestra un adecuado ajuste y su utilidad en la aplicación en niveles regionales y futuros rebrotes de la enfermedad, para tomar medidas y elaborar políticas públicas que permitan aminorar el daño causado por la pandemia.

Palabras clave: Modelo de Gompertz, salud pública, mínimos cuadrados no lineales.

Clasificación JEL: C10, I31, I38.

Abstract

Objective: To apply a statistical model of the number of deaths and positive cases of COVID-19 in Mexico, to study the behavior of the pandemic in order to look for alternatives and public policies that can mitigate the impact of the damage of the disease in the society.

Methodology: The official information provided by the Ministry of Health was used according to the number of positive cases of COVID-19, and the number of deaths caused by this disease in Mexico.

Limitations: The limitations for this research are the reduced number of data and the possibility of failures in accounting for infections and deaths.

Originality: It estimates a statistical model based on the data of the pandemic in Mexico and its application.

Results: The Gompertz with four parameters model was selected.

Conclusion: The model shows an adequate adjustment and its usefulness in its application at regional levels and for future outbreaks of the disease, in order to take measures and develop public policies that allow reducing the damage caused by the pandemic.

Keywords: Gompertz Model, public health, nonlinear least squares.

JEL Classification: C10, I31, I38.

Gustavo Ramírez-Valverde. Colegio de Postgraduados, campus Montecillo. Correo electrónico: gramirez@colpos.mx. ORCID <http://orcid.org/0000-0003-3466-991X>

Benito Ramírez-Valverde. Autor de correspondencia. Colegio de Postgraduados campus Puebla. Correo electrónico: bramirez@colpos.mx. ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2482-5667>

Introducción

El covid-19 es una nueva enfermedad que se inició en diciembre del año 2019 en la ciudad de Wuhan, China y rápidamente se propagó, tanto en su país de origen como en diversas naciones del mundo, sin que hasta el momento exista cura (Vargas, Ochoa y Galindo, 2020). El covid-19 fue declarado pandemia el 11 de marzo de 2020 por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2020). El ataque de la enfermedad ha sido devastador para algunos países; hasta el 17 octubre, el Coronavirus Resource Center de la Universidad Johns Hopkins (2020) reportaba que existían 39 461 816 personas contagiadas en el nivel mundial y por país se manifiesta el más alto número en Estados Unidos con 8 076 103 seguido por la India con 7 432 680, Brasil con 5 200 300, Rusia con 1 376 020 y Argentina con 965 609 habitantes contagiados. Por otra parte, para esa misma fecha, el número de defunciones en el nivel global era de 1 106 519 personas, siendo Estados Unidos el país con mayor número de muertos por la enfermedad alcanzando la cifra de 218 812; en Brasil el número de muertos fue de 152 214 y en la India 112 998. El covid-19 continúa expandiéndose por todo el planeta y la pandemia está impactando de tal forma a la humanidad que Laufer (2020) considera que posiblemente será una de las peores pestes de la historia.

En el caso de nuestro país, desde la llegada de la enfermedad el número de contagiados y su consecuente número de fallecidos ha ido creciendo y el Coronavirus Resource Center de la Universidad Johns Hopkins (2020) contabilizó 841 671 contagios y 85 704 muertos por causa de la pandemia (hasta la fecha de corte: 17 de octubre de 2020). El gobierno federal se ha encargado de dar seguimiento a la enfermedad y tomar medidas para aminorar el impacto del coronavirus en la sociedad.

Una vez detectada la enfermedad en México, se estudió el comportamiento de los contagios; en las primeras etapas y cuando la infestación era

reducida no se tomaron medidas de confinamiento. Posteriormente el gobierno se decide por la intervención a partir de 23 marzo, cuando la Secretaría de Salud declara la Jornada Nacional de Sana Distancia y el inicio, a partir del 24 de marzo, de la fase 2 (Muñiz y Corduneanu, 2020) mediante la solicitud a la población de quedarse en sus hogares y la decisión de aplicar una serie de medidas como la suspensión de actividades escolares presenciales, parar actividades laborales no esenciales, realizar el trabajo desde casa en los casos de que fuera posible, promover actividades sanitarias y de distanciamiento social, entre otras.

Estas medidas implican cambios profundos en la actividad laboral, con su consecuente impacto en la economía, por lo que la toma de la decisión sobre el momento de la intervención está en función de la salud de la población y la actividad económica. En un país como México, con altos niveles de pobreza, es necesario meditar perfectamente el punto en que se envía a la población a confinamiento, debido a que gran parte de los habitantes del país no tiene ingresos fijos, se encuentran en pobreza y tienen que salir día a día a buscar el sustento de la familia. Al respecto Boltvinik (2020) menciona que 73% de la población en México viven en pobreza, sin condiciones materiales y económicas para mantener el aislamiento domiciliario. Esto es marcado por Laufer (2020), quien menciona que la política juega un papel importante, ya que puede limitar o expandir el alcance de la enfermedad y los daños que producen a la población.

De aquí la importancia de conocer el comportamiento de la enfermedad y buscar el mejor momento para balancear la toma de decisión entre salud y economía. En ese sentido los modelos estadísticos juegan un papel importante.

Con el fin de mejorar la capacidad para comprender y predecir el desarrollo de una epidemia se han utilizado curvas de crecimiento, originalmente propuestos para modelar crecimiento de individuos o poblaciones. Este tipo de modelos

de ajuste de crecimiento poblacional logísticos y exponenciales han dado buenos resultados para describir la dinámica de las poblaciones, por lo que han sido utilizados ampliamente para describir el comportamiento de enfermedades en humanos (Medina, Cortés y Cortés, 2020). Adquieren especial importancia en las epidemias y pandemias como el covid-19 que está azotando a la humanidad.

El Modelo de Crecimiento Exponencial o Malthusiano es el primer modelo de este tipo y fue propuesto en 1798 por el economista Thomas Malthus (May-Cen, 2016). Este modelo planteaba que mientras la población humana crecía en forma exponencial, la producción de alimentos lo hacía en razón aritmética. El modelo funciona muy bien en poblaciones muy grandes en donde aún no era necesario competir por recursos, especialmente los alimentos. Cuando el tamaño de la población crece demasiado rápido, se presentan factores que de alguna u otra manera empiezan a limitar o frenar la tasa de crecimiento. Ante esta situación, el matemático Belga Pierre-François Verhulst propone en el año 1845 un modelo más realista que se le conoce como Modelo Logístico (Martínez, 2008). Este modelo trata de incluir el efecto de la competencia en los individuos por la supervivencia generando un modelo que altera las tasas de mortalidad y natalidad; el modelo generado es un modelo sigmoidal simétrico alrededor de un punto de inflexión donde se presenta la máxima tasa de incremento en la población.

Bauckhage (2020a) utilizó ambos modelos para representar los datos de la pandemia COVID-19 en la etapa temprana en Alemania y muestran cómo los dos modelos ajustan bien el crecimiento de la enfermedad en esta fase de la epidemia, dando resultados muy similares, explicando que esto se debe a la forma en que se plantea el sistema de ecuaciones diferenciales que dan origen a los modelos; sin embargo, cuando el tamaño de la enfermedad alcanza una masa crítica los dos modelos difieren grandemente, mien-

tras que el exponencial crece indefinidamente, el Modelo Logístico plantea que la aceleración eventualmente es disminuida y al final se detendrá, mencionando que el Modelo Logístico sin duda es una mejor elección en etapas tempranas de las epidemias.

El Modelo Logístico y otro modelo semejante basado en la función de error gaussiano fueron utilizados con buenos resultados para modelar el crecimiento de la epidemia del covid-19 con datos de la evolución de la pandemia en Italia y en China (Ciufolini y Paolozzi, 2020); por su parte Bauckhage (2020b) presenta una explicación detallada de cómo estimar el Modelo Logístico mediante el uso de mínimos cuadrados no lineales.

Existen modelos alternativos basados en una expresión generalizada del modelo logístico (Tsoularis y Wallace, 2002) para representar curvas de crecimiento de individuos o de dinámica de poblaciones, entre los que podemos destacar el Modelo de Von Bertalanfy, el de Richards y el de Gompertz.

El Modelo de Gompertz es un modelo sigmoidal asimétrico donde la tasa de crecimiento decrece exponencialmente con el tiempo después de alcanzar el punto de inflexión. Este modelo ha sido utilizado ampliamente en estudios sobre poblaciones y crecimiento animal (Casas, Rodríguez y Afanador, 2010). De acuerdo con Achicanoy (2000), este modelo es apropiado para describir epidemias en las cuales la tasa máxima de enfermedad ocurre más temprano que la tasa logística. Bauckhage (2020c) utiliza la curva de crecimiento de Gompertz para modelar los datos de la etapa temprana de la pandemia covid-19 en Alemania y encontró que el Modelo de Gompertz ajustaba mejor a los datos que el Modelo Logístico. En Cuba, Medina et al. (2020) analizó los datos del covid-19 y encontró que el Modelo Gompertz con cuatro parámetros tenía buen ajuste.

Este estudio es importante porque con los datos de la pandemia en México se estima un modelo que permita analizar el comportamiento de

la pandemia. La aplicación este modelo puede detectar las diferencias regionales del impacto de la enfermedad, lo que podría traducirse en acciones concretas y políticas públicas diferenciadas. También hace posible analizar el impacto de la estrategia seguida para el combate de la pandemia. El uso del modelo permite hacer comparaciones con futuros estudios tanto en el nivel nacional como internacional.

Ante la grave situación mundial y de nuestro país respecto de la pandemia, el objetivo de este escrito es utilizar un modelo estadístico de las defunciones y casos positivos de COVID-19 en México, para estudiar el comportamiento de la pandemia y contribuir a definir alternativas y políticas públicas que puedan mitigar el daño de la enfermedad en la sociedad.

Metodología

El modelo y los datos

Los datos utilizados en esta investigación provienen de las estadísticas oficiales que ofrece la Secretaría de Salud tanto de casos positivos confirmados de COVID-19 (Serendipia, 2020), como el número de defunciones en México causadas por la enfermedad (Gobierno de México, 2020).

Los datos utilizados fueron obtenidos en los reportes de la Secretaría de Salud hasta el día 9 de octubre de 2020. La información contiene cada uno de los casos confirmados de COVID-19 en México y la fecha en que declararon el inicio de sus síntomas, pero solo se consideran los casos que proporciona la Secretaría de Salud. Para el análisis se ordenaron los casos en forma ascendente, de acuerdo con la fecha en que los enfermos reportaron el inicio de sus síntomas, no la fecha de admisión al hospital, y se calculó el número de casos acumulados presentes en cada fecha.

El número de defunciones en México se esperaría estuviera en correspondencia con el número de casos positivos. La estimación del modelo se hizo utilizando la información oficial reportada

por la Secretaría de Salud hasta el 14 de agosto de 2020.

El desarrollo de la pandemia en México presenta dos situaciones:

1. El primer periodo se considera desde el momento en que se detectan los síntomas de la enfermedad en los primeros individuos contagiados, hasta el momento de la intervención en que se exhorta a la población a recluirse. Se consideró como valor del tiempo “0” el día 13 de enero de 2020, que fue la fecha en la que se declararon los primeros síntomas del primer contagio de COVID-19 en México; es decir, la primera evidencia de la enfermedad en nuestro país.
2. El segundo periodo, es la llamada fase 2 de la contingencia por coronavirus COVID-19 decretada por la Secretaría de Salud y corresponde al tiempo posterior a la intervención y se caracteriza por el llamado a la población a mantenerse aislados en sus hogares; consideramos esta fecha el 23 de marzo de 2020. Además del confinamiento se tomaron decisiones como la suspensión de clases presenciales en todos los niveles educativos, el cierre temporal de empresas no indispensables y medidas de prevención, como el mantenimiento de distancia entre las personas y uso de medidas de protección, entre otras.

En la decisión de la intervención el aspecto económico es un factor fundamental. Para tomar esta decisión, el gobierno tuvo que hacer un balance entre la economía y la salud de la población.

Ante estas dos situaciones, con diferente riesgo de contagio en cada periodo, la representación de la evolución de la pandemia debería ser realizada por un modelo que contemple el efecto de la intervención en las tasas de contagio, mostrando una tasa antes de la intervención y una diferente después de la intervención, este evento se presentó el 23 de marzo de 2020. Para evitar problemas

de estimación se utilizó un modelo que contemple esta diferencia, pero que estime solamente la tasa de contagio después de la intervención; en la elaboración del modelo se consideraron únicamente los datos a partir del 23 de marzo de 2020 y hasta el 18 de septiembre, aunque correspondan al reporte del 9 de octubre–, ya que los últimos reportes presentan casos pendientes de confirmación debido al retraso en el procesamiento de la información, puesto que el sistema que alimenta la base de datos se hace en forma independiente a través de los estados de la república, lo cual genera atrasos en la captura y registro que podrían afectar los parámetros del modelo.

Después de ajustar varios modelos se decidió utilizar el propuesto por Gompertz con cuatro parámetros para caracterizar la epidemia COVID-19 en México. Los datos empleados en el ajuste del modelo fueron obtenidos en el sistema oficial de salud y presenta la limitación de ser escasos para un problema que no se había presentado anteriormente.

El Modelo de Crecimiento Gompertz

El Modelo Gompertz (Modelo de Gompertz de cuatro parámetros) puede verse como un caso particular del Modelo Logístico Generalizado propuesto por Richards (1959). La forma diferencial del Modelo Gompertz está dada por:

$$(1) \quad dI(t)/dt = rI(t)\ln\left[\frac{N}{I(t)}\right]$$

Esta ecuación describe la dinámica de la epidemia con el cambio en infección, donde $I(t)$ es el número de infecciones en el tiempo t , $r > 0$ es una tasa de crecimiento y N es una constante que determina la “capacidad de carga” que es el máximo global del número de infecciones. Entonces, de la ecuación 1 se desprende que el incremento en el número de infecciones en el tiempo t es proporcional a una tasa de crecimiento r , regulada por la función $d(t)$, donde:

$$(2) \quad d(t) = \ln\left[\frac{N}{I(t)}\right]$$

La solución a la ecuación diferencial resulta en lo que se conoce como el Modelo de Gompertz:

$$(3) \quad I(t) = N \exp[-\exp[-r(t - T_0)]]$$

Con T_0 el tiempo en el punto de inflexión. Esto puede reescribirse como:

$$(4) \quad I(t) = N \exp[-b \exp[-rt]]$$

con $b = \exp[rT_0]$

donde N representa el valor máximo global que alcanza el número de infecciones $I(t)$, r es la tasa de crecimiento y b es una constante que determina el desplazamiento sobre el eje x .

Algunas propiedades del modelo se pueden resumir como:

1. $\lim_{t \rightarrow \infty} I(t) = N$ es la capacidad de carga de la población, el máximo global de infecciones.
2. $\frac{d^2 I(t)}{dt^2} = 0$ el valor de t que cumple con esta condición es $T_0 = (\frac{\ln(b)}{r})$, que representa el punto de inflexión y es el punto donde ocurre el crecimiento diario máximo.
3. El aumento en T_0 es $Np = \frac{Nr}{e}$, donde e es el número de Euler ($e = 2.71828\dots$) y representa el número de infecciones en el pico de la epidemia.

En modelos no lineales la prueba estándar para verificar bondad de ajuste requiere repeticiones para poderlos comparar con un Modelo de ANOVA. Neill (1988) propone una prueba que no requiere repeticiones, en este trabajo se realiza la prueba de Neill basando la agrupación en quintiles y con la función neill.test del paquete *drc* de *R*.

El modelo propuesto

Para representar el caso de la pandemia en México se requeriría un modelo que contemple las dos

situaciones: antes y después de la intervención, esto requeriría varios parámetros y no se tienen demasiados datos, por lo que se decidió solo modelar con los datos después de la intervención. Para compensar lo sucedido antes de la intervención se utilizó el Modelo de Gompertz haciendo una modificación que incluye un parámetro más al modelo (Modelo de Gompertz de cuatro parámetros).

Entonces, el Modelo de Gompertz Modificado queda de la siguiente manera:

$$(5) \quad I(t) = N \exp[-b \exp[-rt]] + A$$

Esta modificación mantiene la misma curva, pero la desplaza en una cantidad "A", que consideramos que es el número de infecciones presentes hasta el momento de la intervención (23 marzo); es decir, el modelo contempla lo ocurrido antes de la intervención con el parámetro A sin necesidad de estimar otro modelo para este periodo, y con los datos del periodo del 23 marzo al 18 de septiembre se estima el comportamiento en esta etapa. Una descripción detallada de este modelo puede verse en Tjørve y Tjørve (2017); esta modificación afecta el cálculo de la capacidad de carga de la población (asíntota superior) que ahora es $N' = A + N$.

Cabe aclarar que la estimación con este modelo se puede realizar con datos desde etapas tempranas de la epidemia, al ir evolucionando la enfermedad, se pueden ir mejorando las estimaciones y las predicciones resultantes; sin embargo, la incertidumbre de las predicciones es mayor al aumentar el tiempo a predecir, esto provoca que la mejor utilidad del modelo sea en el corto plazo, debiendo ajustarse las estimaciones periódicamente al ir acumulando mayor información sobre los contagios. Esto se ve agravado por el hecho de que el modelo estima bajo el supuesto de que la población mantendrá el mismo comportamiento ante la epidemia, lo cual a su vez estará influido por la gestión de la misma, lo que obliga a

tomar con cuidado las predicciones globales y en el largo plazo.

Resultados y discusión

Modelo del número de casos positivos confirmados en México

Con los datos oficiales que proporciona la Secretaría de Salud se procedió a estimar el Modelo de Gompertz Modificado establecido en la ecuación 5. El modelo se estimó usando mínimos cuadrados no lineales con el método de optimización Gauss-Newton, mediante el software MINITAB. El modelo estimado es:

$$(6) \quad \begin{aligned} I(t) = & 1029195.4 * \\ & \exp(-21.5321 * \exp(-0.0169723 * \text{día})) \\ & + 2543.64 \end{aligned}$$

Para la verificación del ajuste del modelo a los datos observados se utilizó la prueba de bondad de ajuste de Neill (1988). La hipótesis nula planteadas en esta prueba es que el modelo ajusta bien a los datos observados, por lo que se espera no se rechace la hipótesis nula; es decir, que el valor de p asociado a la prueba sea mayor a 0.05. Algunas de las características de la estimación se presentan en la **Tabla 1** y **Tabla 2**.

La **Tabla 2** muestra el valor de los estimados obtenidos por MINITAB (versión 19) y su error estándar; en esta información se puede destacar que los valores de sus errores estándar son pequeños en relación con la magnitud de los parámetros.

Entonces, el punto de inflexión estimado que representa el inicio de la fase de decrecimiento de la tasa de contagios es:

$$(7) \quad \begin{aligned} T_0 &= \ln(b)/r = \ln(21.5321)/0.0169723 \\ &= 180.85 \end{aligned}$$

$T_0=180.85$ corresponde a la fecha 12 de julio, esto es, antes de esta fecha se presentaría un cre-

cimiento exponencial y posteriormente se iniciaría en el descenso de la tasa de crecimiento; obviamente el cambio en las condiciones y actitudes de la población puede alterar el modelo.

La capacidad de carga de la población estimada es $N' = N+A = 1029195.4 + 2543.6 = 1\,031\,739$.

Cabe mencionar que el número de casos son los reportados por el Modelo Centinela conducido por el gobierno mexicano para el control de la pandemia, el cual representa solo una muestra de la población de México, por lo que una estimación de esta cantidad en todo el país tendría que ser ajustada por los factores de expansión de muestreo empleado; sin embargo, la tasa de contagios (r) y el parámetro de desplazamiento (b) se esperarían semejantes a los estimados por la muestra y entonces el valor de T_0 estimado para todo el país sería semejante al que se tiene con la muestra, esto es, se esperaría tener la máxima tasa de crecimiento aproximadamente al mismo tiempo que la estimada por la muestra.

La **Figura 1** presenta el modelo estimado y los valores observados en que se basó la predicción. Puede notarse que el modelo propuesto ajusta muy bien a los valores observados ($R^2= 0.99$) y en la prueba de bondad de ajuste de Neill tiene un valor $p= .054$, lo que implica un buen ajuste del modelo. Además se señalan las fechas claves obtenidas del modelo (capacidad de carga y punto de inflexión) e incluye un intervalo de 95% de confianza para los predichos, estos intervalos nos dan una medida de la precisión de las estimaciones, que como puede esperarse la precisión será menor a medida que nos alejamos de los valores observados.

Otro valor importante que se puede derivar del modelo estimado es el valor estimado del máximo incremento diario y está dado por:

$$(8) \quad N_0 = \frac{Nr}{e} = \frac{(1\,029\,195.4)(0.0169723)}{2.71828} = 6\,426.05$$

Por lo que se esperaría aproximadamente un valor cercano a 6 426 como el valor del máximo incremento diario.

Con los valores de los casos predichos confirmados por el modelo, se estimaron los incrementos diarios predichos con la diferencia obtenida por la predicción de dos días consecutivos. La **Figura 2** muestra los incrementos diarios observados y estimados. La estimación del modelo se hizo con los datos reportados del 23 de marzo al 28 de septiembre, además que los datos de las últimas semanas no están completos por la forma de procesamiento de la información. En esta figura puede destacarse que las predicciones son cercanas a los valores observados para las fechas antes de la "nueva normalidad"; a partir de junio se nota una tendencia a que el modelo subestime los contagios en este periodo. Sin embargo, no es demasiada esta diferencia, a pesar del relajamiento provocado por la nueva normalidad están muy cercanos a los incrementos observados y presentan magnitudes semejantes a las estimaciones obtenidas por el gobierno federal, pero con una clara asimetría alrededor del punto de inflexión, lo que significaría que si bien los incrementos están disminuyendo, estos lo harán de forma más lenta que la forma en que crecieron, aumentando el periodo para el regreso a lo que el gobierno federal ha llamado la nueva normalidad. Cabe aclarar que el no tomar en cuenta las recomendaciones del gobierno federal puede resultar en un cambio en estas tendencias.

Con los mismos datos se ajustaron también los modelos logísticos con tres y cuatro parámetros. La **Tabla 3** muestra medidas para comparar modelos; se puede observar que el Modelo Gompertz de cuatro parámetros es preferible.

Modelo del número de defunciones en México

El número de defunciones en México presenta correspondencia con el número de casos positivos, por lo que también pueden ser modelados con un Modelo Gompertz.

En la modelación número de defunciones en México se utilizaron los datos hasta el día 4 de octubre de 2020, en este caso se consideró como el día “0” el 1 de enero, ya que el primer fallecimiento reportado es el día 2 de enero. Igual que en la modelación de los casos positivos confirmados, se utilizaron solo los datos que incluían la intervención sobre la pandemia en México (después del 22 de marzo) y hasta el 17 de septiembre de 2020; los últimos datos no se incluyeron porque se consideró que podrían estar subestimados por deficiencias en su registro. Se utilizó el modelo descrito por la ecuación 4 por ser el modelo preferible de acuerdo con los criterios utilizados (véase **Tabla 6**). La **Tabla 4** presenta algunas de las características de la estimación de este modelo obtenido por MINITAB.

La **Tabla 5** muestra el valor de los estimados obtenidos por MINITAB (versión 19), su error estándar, y un intervalo de confianza de 95%, se puede destacar que los valores de los errores estándar son pequeños en relación con la magnitud de los parámetros.

Entonces, el modelo estimado para predecir el número de defunciones acumuladas es:

$$(9) \quad I(t) = 95573.4 * \exp(-27.1 * \exp(-0.0209 * \text{día})) - 296.344$$

El punto de inflexión que representa el inicio de la fase de decrecimiento es:

$$(10) \quad T_0 = \ln(b)/r = \ln(27.1)/0.0209 = 157.87$$

$T_0 = 157.87$, si aproximamos este dato a 158, este valor corresponde a la fecha 18 de junio; esto es, antes del 18 de junio se presentaría un crecimiento exponencial y a partir de esta fecha se esperaría un inicio en el descenso de la tasa de crecimiento. La **Figura 3** presenta el modelo estimado y sus intervalos de 95% de confianza, señalando las fechas mencionadas, además de que

el punto de inflexión estimado en las dos curvas es semejante (18 de junio y 12 de julio), lo cual es indicador de que son congruentes con lo observado.

La capacidad de carga de la población estimada es $N' = N+A = 95573.4-296.344 = 95\ 277.056$. En este caso, el número de defunciones reportadas no es un muestreo, sino que es el total de defunciones a la fecha, por lo que esta cantidad es una estimación del número de defunciones total.

El valor estimado del incremento diario máximo está dado por:

$$(11) \quad N_0 = \frac{Nr}{e} = \frac{(95573.4)(0.0209)}{2.71828} = 734.84$$

Por lo que se esperaría un valor cercano a 735 como el valor máximo del número de defunciones diarias.

La **Figura 4** muestra los incrementos diarios observados y estimados. Se puede notar que presentan buen ajuste y que a partir del 5 de agosto los valores estimados son menores a los observados, y que estos valores están incompletos y pendientes de confirmar. Estos datos no participaron en la estimación del modelo.

Con los mismos datos se ajustaron también los modelos logísticos con tres y cuatro parámetros, la **Tabla 6** muestra medidas para comparar el ajuste del modelo; se puede observar que el modelo Gompertz de cuatro parámetros es preferible.

Importancia del modelo

En el combate a la pandemia se han utilizado en diferentes países, incluso en México, una serie de modelos que permitan caracterizar la enfermedad. En la medida en que se logre un buen modelo de acuerdo con las particularidades del lugar donde se aplica, se estará en posibilidad de proporcionar elementos para su abatimiento.

El combate a la pandemia presenta características propias en cada país. Por ejemplo, el gobierno español implantó el confinamiento obligatorio

para la población, que implica aspectos como aislamiento en el propio domicilio, restricciones serias a la libertad de circulación y suspensión de actividades comerciales (Sandín, Valiente, García-Escalera y Chorot, 2020), y la población solamente podría salir brevemente a la compra de alimentos y otros artículos y continuar aislados en sus hogares (Pérez-Rodrigo et al., 2020). Es claro que, en países con mejores condiciones económicas es posible que la población pueda quedarse recluido en sus hogares, pero en países con menor desarrollo, incluyendo nuestro país, no es posible esta situación, ya que una gran proporción de la población tiene que salir a buscar el sustento día tras día. En ese sentido, una decisión importante para el gobierno mexicano es establecer el punto en que se solicita el confinamiento de la población.

El empleo es uno de los aspectos importantes para analizar el impacto de la pandemia en la sociedad. Con la información que proporciona el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020a) para el primer trimestre de 2020 y considerando la informalidad laboral como indicador, en el país 56.1% se encuentra en esa condición y se pueden conformar dos grupos con las entidades federativas: en función de si están por encima o por debajo de esa cantidad. El primer grupo quedó compuesto por 15 estados con mayor porcentaje de informalidad laboral y son: Oaxaca (79), Guerrero (77.6), Hidalgo (74.1), Chiapas (73.1), Tlaxcala (72.7), Puebla (71), Michoacán (67.9), Veracruz (67.6), Morelos (66), Tabasco (63.1), Campeche (62), Nayarit (61.9), Zacatecas (61), Yucatán (60.6), y el Estado de México (57.8). El grupo dos, compuesto por 17 entidades con menor informalidad laboral, serían los siguientes: San Luis Potosí (55.8), Guanajuato (54.2), Durango (51.5), Sinaloa (51.1), Colima (50.9), Jalisco (48.9), Ciudad de México (47.2), Quintana Roo (47.1), Tamaulipas (46.1), Sonora (45.6), Querétaro (41.8), Aguascalientes (40.9), Baja California Sur (38.9), Baja California (38.3),

Nuevo León (36.5), Chihuahua (36.2) y Coahuila (34.6). Si se revisa el porcentaje de informalidad laboral, se observa gran variación, entonces las medidas que se toman para contrarrestar la propagación del virus deberán ser diferentes en cada estado y en cada uno de los grupos. Para el segundo trimestre de 2020 el impacto de la enfermedad se presentó en la suspensión temporal del trabajo sin recibir pago de 5.6 millones de personas (INEGI, 2020b). El impacto de la enfermedad es terrible tanto en la salud como en economía.

Con el uso de variables indicadoras, se modeló el número de contagios en cada una de las regiones descritas y se encontró que el comportamiento de las dos regiones es muy diferente; el modelo que incluye las variables indicadoras es:

$$(12) \quad I(t)_i = (N + N_1 I_{oi}) \\ \exp[-(b + b_1 I_{oi}) \exp[-(rt + I_{oi}t)]] \\ + (A + A_1 I_{oi})$$

Donde $I(t)_i$ es la observación i del número de infecciones confirmadas en el tiempo i ; N , b , r , y A son los parámetros en la región con más baja tasa de trabajo informal; $N+N_1$, $b+b_1$, $r+r_1$, y $A+A_1$ son los parámetros en la región con más alta tasa de trabajo informal; I_{oi} es una función indicadora que vale uno cuando la observación i pertenece a la región con más alta tasa de trabajo informal y vale cero cuando la observación i pertenece a la región con más baja tasa de trabajo informal.

La **Tabla 7** muestra los parámetros estimados y todos los parámetros con excepción de A_1 resultan significativos con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ (se desprende de los intervalos de confianza), con lo que podemos concluir que el comportamiento de las dos regiones es diferente, por lo que las políticas y acciones que se propongan a uno y otro deberían ser diferentes.

La **Tabla 8** muestra las principales características de los modelos estimados para cada una de las regiones, es de notarse que la región con mayor tasa de ocupación informal presenta una

tasa más alta de contagios, aunque la capacidad de carga y el incremento diario máximo de contagios es menor debido las diferencias en el tamaño de la población entre las dos regiones.

Asimismo, los modelos estimados pueden dar idea de lo que puede ocurrir bajo diferentes escenarios. Por ejemplo, si se desea analizar en forma retrospectiva qué hubiera pasado si se hubiera restringido en cada una de las zonas la movilidad de personas, de tal manera que se redujera la tasa de contagios en 10% de la tasa que se ha presentado en el país, el efecto en cada una de las zonas sería diferente como se muestra en la **Figura 5**. En la **Tabla 9** se observan los valores de las características de los dos grupos, ante el supuesto de disminución de 10% de la tasa de contagio, y puede notarse que el día que presenta el mayor número de contagios diarios (incremento diario máximo) disminuiría de 3 982 a 3,584 en la zona de menor informalidad laboral y de 2 505 a 2 254 en la región de mayor informalidad laboral, así mismo se hubiera desplazado la fecha del pico máximo en 19 días para la región de baja informalidad y en 24 días en la región de alta informalidad.

También en forma prospectiva se puede ensayar otros escenarios con diferentes grados de confinamiento de tal manera que se tengan diferentes disminuciones en la tasa de contagio, si pensamos que la política de menor confinamiento pudiera reducir la tasa de contagio en 10%, se puede usar el modelo estimado para medir el impacto en las próximas dos semanas; si a la fecha actual se tiene un numero acumulado estimado de contagios de 437 117 y 265 307 para la región de menor y mayor informalidad laboral respectivamente, siguiendo la tendencia actual la predicción para las siguientes dos semanas sería un incremento en contagios de 42 030 y de 17 928 en la región de menor y mayor informalidad laboral respectivamente; si se aplica la política de confinamiento que reduzca en 10% la tasa de contagio, la predicción de contagios sería de 38 064 y de 16 300 en la región de menor y mayor informali-

dad laboral respectivamente. Si se considera que este cambio no es suficiente, se deberá ensayar con una política de mayor confinamiento y este manejo de escenarios se puede realizar en forma diferencial en cada una de las regiones.

Las líneas sólidas en la **Figura 5** representan el comportamiento de los casos confirmados de contagio, donde claramente se aprecian diferencias entre los dos grupos. Si se hace supuesto de una reducción de 10% exclusivamente en la tasa de contagio, el resultado al aplicar el modelo muestra que se mantiene la capacidad de carga (número total de contagios estimados con la información disponible) y se reducen los incrementos diarios de contagio, de tal forma que el incremento máximo es de 3 584 el grupo de informalidad baja y de 2 254 en el de alta, y esto implica que la fecha del pico máximo también se desploma.

En ese sentido, la propuesta analiza: el comportamiento de la pandemia a partir del momento en que se inicia la fase (confinamiento), hasta el momento en que cambien las condiciones y que impliquen un cambio en la velocidad de contagio.

El modelo propuesto tiene un buen ajuste y consideramos que es adecuado para México en condiciones de confinamiento. Este modelo presenta cierta concordancia con el seguido por el gobierno federal y da pauta para la programación de instalaciones y actividades médicas, así como el diseño de políticas públicas.

Un aspecto importante es el establecer el punto de intervención, ya que lleva involucrados, además del grave problema de salud, aspectos económicos y sociales. La presencia del COVID-19 lleva aparejado una crisis social al ahondar la diferencia entre los débiles y los poderosos (Laufer, 2020). Una parte fundamental de la intervención realizada por el gobierno mexicano fue el llamamiento a la población para mantenerse en sus hogares; sin embargo, De Sousa (2020) menciona que el confinamiento siempre es discriminatorio y representa más dificultades para algunos gru-

pos sociales que otros y entre sus grupos en los que el aislamiento es especialmente complicado se encuentran: las mujeres, los trabajadores informales, los vendedores ambulantes, las personas que viven en la calle, las personas pobres, los discapacitados y los ancianos entre otros.

Uno de los aspectos críticos en elaboración del modelo es la información oportuna, adecuada y suficiente. Este aspecto ha sido bastante cuestionado y surgen cuestionamientos hacia quienes manejan el control de la pandemia en México. La crítica permanente de diversos grupos dentro del país e incluso el surgimiento de notas en medios internacionales sobre la subestimación de los datos. En ese sentido queremos mencionar que obtener los datos es un aspecto sumamente complicado. En la medición de personas infectadas se presentan dificultades, por el costo de la aplicación de cada prueba y el cambio que puede existir en el resultado de una prueba en el corto plazo (Martínez-Anaya, Ramos-Cervantes y Vidaltamayo, 2020). Por esta razón y para obtener mejores resultados en la búsqueda de modelos epidemiológicos, es necesario que toda la información generada sea sistematizada y puesta a disposición de los investigadores y público en general.

Suárez et al. (2020) mencionan que toda la población del país es sensible a la pandemia, sin embargo, encuentran diferencias regionales en niveles de vulnerabilidad de la población, tomando en cuenta aspectos demográficos, de salud, sociales y económicos. Este resultado muestra la enfermedad que se presenta bajo diferentes condiciones en niveles regionales, por lo que este modelo puede probarse, y las líneas sobre el combate de la pandemia en esas condiciones específicas.

Definitivamente, con la presencia de la enfermedad muchas cosas han cambiado, nuestro estilo de vida ahora es diferente y continuará cambiando (Sarabia, 2020), la amenaza de la enfermedad continúa presente hasta la obtención de una cura o vacuna que permita su control. Mediante la aplicación del modelo es posible diseñar

estrategias para el control de los rebrotos que se presentarán de la pandemia.

Finalmente, el modelo permite discutir la eficiencia de las actividades realizadas para el control de la pandemia y definir los puntos de intervención. Este aspecto es fundamental para un país donde una alta proporción de la población se encuentra en condiciones de pobreza.

El impacto de la pandemia en México será muy alto. La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2020) considera un incremento considerable en el número de pobres en América Latina, donde México será de los más afectados, pasando de una estimación de 41.9% de pobres a 47.8% en un escenario medio de afectación por el COVID-19 y en el escenario alto alcanza 48.9% de la población en condiciones de pobreza. Una situación similar es descrita por el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval, 2020), donde percibe un incremento en la pobreza por ingresos entre 7.2% y 7.9% como consecuencia de la pandemia, lo que significa que entre 6.1 y 10.7 millones de personas se incorporarán a la pobreza por ingresos en nuestro país.

Conclusiones

El COVID-19 está impactando fuertemente a nuestro país, tanto por el grave problema de salud como en aspectos sociales y económicos. Es necesario la búsqueda en todos los campos del conocimiento de medidas que ayuden aminorar el daño de la enfermedad. Un aspecto importante es conocer el comportamiento de la pandemia para tomar medidas que permitan apoyar su control. El objetivo de este trabajo fue proponer un modelo que pudiera modelar este comportamiento y el objetivo se logró con la propuesta del Modelo Gompertz Modificado que presentó buen ajuste, lo que permite predecir el punto crítico en el número de contagios y defunciones, así como estimar el número total de fallecimientos y predicción del número total de casos positivos de co-

VID-19. Esta situación es bajo la condición de que se mantenga el contexto actual.

El modelo propuesto se basa en dos períodos, el primero es aquel que se realiza sin intervención, el segundo es a partir de la intervención, donde se toman medidas para controlar la enfermedad. Por las condiciones de pobreza del país y las actividades económicas que se requieren, es muy importante la definición del primer período y la cuestión central es cuál es el mejor punto para iniciar el control de ciertas actividades económicas y sociales de la población; es decir, cuál es el mejor balance entre salud y economía.

Finalmente consideramos que el modelo puede apoyar en las estrategias para el control de la pandemia en el nivel regional y los posibles rebotes. Una adecuada planeación y desarrollo de políticas públicas pueden ayudar a abatir la pandemia con un menor impacto sobre la población y disminuir el número de mexicanos que ingresan a la pobreza como consecuencia del COVID-19.

Bibliografía

- Achicanoy H. L. (2000). Descripción cuantitativa de las epidemias de las plantas. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 53 (1), 941-968.
- Bauckhage, C. (2020a). The math of epidemic outbreaks and spread (Part 1) Exponential growth versus logistic growth. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Christian_Bauckhage/publication/340234467_The_Math_of_Epidemic_Outbreaks_and_Spread_Part_1_Exponential_Growth_versus_Logistic_Growth/links/5e830d20299bf130796a9e52/The-Math-of-Epidemic-Outbreaks-and-Spread-Part-1-Exponential-Growth-versus-Logistic-Growth.pdf
- Bauckhage, C. (2020b). The math of epidemic outbreaks and spread (Part 2) Least squares parameter estimation for logistic models. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Christian_Bauckhage/publication/340389204_The_Math_of_Epidemic_Outbreaks_and_Spread_Part_2_Least_Squares_Parameter_Estimation_for_Logistic_Models/links/5e8636b1299bf13079745db8/The-Math-of-Epidemic-Outbreaks-and-Spread-Part-2-Least-Squares-Parameter-Estimation-for-Logistic-Models.pdf
- Bauckhage, C. (2020c). The math of epidemic outbreaks and spread (Part 3). Least squares fitting of Gompertz growth models. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Christian_Bauckhage/publication/340594164_The_Math_of_Epidemic_Outbreaks_and_Spread_Part_3_Least_Squares_Fitting_of_Gompertz_Growth_Models/links/5e934c074585150839d95188/The-Math-of-Epidemic-Outbreaks-and-Spread-Part-3-Least-Squares-Fitting-of-Gompertz-Growth-Models.pdf
- Boltvinik, J. (2020, junio/julio). La pandemia reforzó la necesidad del Ingreso Ciudadano Universal (ICU) Un mensaje de esperanza. *Revista IBERO*, XII (68), 36-45.
- Casas, G. A., D. Rodríguez, D. y Afanador, T. G. (2010). Propiedades matemáticas del modelo de Gompertz y su aplicación al crecimiento de los cerdos. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 23 (3), 349-358.
- Ciufolini, I. y Paolozzi, A. (2020). Mathematical prediction of the time evolution of the COVID-19 pandemic in Italy by a Gauss error function and Monte Carlo simulations. *The European Physical Journal Plus* (135), art. 355. DOI: <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00383-y>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe-CEPAL. (2020). *El desafío social en tiempos del covid-19*. Disponible en <https://www.cepal.org/es/publicaciones/45527-desafio-social-tiempos-covid-19>
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de

- Desarrollo Social-Coneval. (2020). *La política social en el contexto de la pandemia por el virus SARS-CoV-2 (COVID-19) en México*. Recuperado de https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/IEPSM/Documents/Politica_Social_COVID-19.pdf
- Coronavirus Resource Center de la Universidad Johns Hopkins. (2020). *COVID-19*. Recuperado de <https://hub.jhu.edu/map.html>
- De Sousa Santos, B. (2020). *La cruel pedagogía del virus*. Buenos Aires: Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales.
- Gobierno de México. (2020). *Covid-19 México*. Recuperado de <https://coronavirus.gob.mx/datos/#DownZCSV>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía-INEGI. (2020a). Resultados de la Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo. Cifras durante el primer trimestre de 2020. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2020/enoe_ie/enoe_ie2020_05.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía-INEGI. (2020b). Encuesta Telefónica de Ocupación y Empleo (ETOE). Resultados de junio 2020. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/contenidos/investigacion/etoe/doc/etoe_presentacion_resultados_junio_2020.pdf
- Laufer, M. (2020). Ciencia y la pandemia COVID-19. *Interciencia*, 45 (3), 121-123.
- Martínez, E. (2008). Logit Model como modelo de elección discreta: origen y evolución. *Anuario Jurídico y Económico Escurialense* (41), 469-484.
- Martínez-Anaya, C., Ramos-Cervantes, P. y Vidal-tamayo, R. (2020). Coronavirus, diagnóstico y estrategias epidemiológicas contra covid-19 en México. *Educación Química*, 31 (2), 12-19.
- May-Cen, I. D. J. (2016). Modelos de dinámica poblacional en ecología. *Revista del Centro de Graduados e Investigación*, 32 (60), 50-55.
- Medina Mendieta, J. F., Cortés Cortés M. E. y Cortés Iglesias, M. (2020). Ajuste de curvas de crecimiento poblacional aplicadas a la COVID-19 en Cuba. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 19 (suplemento), 1-15. Recuperado de <http://www.revhabanera.sld.cu/index.php/rhab/article/view/3353>
- Muñiz, C. y Corduneanu, V. I. (2020). Percepción de riesgo y consumo mediático durante el inicio de la pandemia de COVID-19 en México. *Más Poder Local*, (41), 44-47.
- Neill, J. W. (1988). Testing for lack of fit in non-linear regression. *Annals of Statistics*, 16 (2), 733-740.
- Organización Mundial de la Salud-OMS. (2020). COVID-19: cronología de la actuación de la OMS. Recuperado de <https://www.who.int/es/news-room/detail/27-04-2020-who-time-line---covid-19>
- Pérez-Rodrigo C., Gianzo M., Hervás G., Fátima Ruiz F., Casis L., Aranceta-Bartrina J. y Grupo Colaborativo de la Sociedad Española de Nutrición Comunitaria-SENC. (2020). Cambios en los hábitos alimentarios durante el periodo de confinamiento por la pandemia COVID-19 en España. *Revista Española de Nutrición Comunitaria*, 26 (2), 1-17.
- Richards, F. (1959). A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany*, 10 (2), 290-301. Recuperado de <https://doi.org/10.1093/jxb/10.2.290>
- Sandín, B., Valiente, R. M., García-Escalera, J., & Chorot, P. (2020). Impacto psicológico de la pandemia de COVID-19: efectos negativos y positivos en población española asociados al periodo de confinamiento nacional. *Revista de Psicopatología y Psicología Clínica*, 25 (1), 1-22.
- Sarabia, S. (2020). La salud mental en los tiempos del coronavirus. *Revista de Neuro-Psiquiatría*, 83 (1), 3-4.
- Serendipia. (2020). Datos abiertos sobre casos de Coronavirus COVID-19 en México. Recuperado de <https://serendipia.digital/2020/03/datos-abiertos-sobre-casos-de-coronavirus-covid-19-en-mexico/>
- Suárez M., Valdés, C., Galindo, M., Salvador, L.,

- Ruiz, N., Alcántara-Ayala, I., López, M., Rosales, A., Lee, W., Benítez, H., Bringas, O., Oropeza, O., Peralta A. y Garnica-Peña, R. (2020). Índice de vulnerabilidad ante el covid-19 en México. *Investigaciones Geográficas*. DOI: <http://dx.doi.org/10.14350/rig.60140>
- Tjørve, K. M. C. y Tjørve, E. (2017). The use of Gompertz models in growth analyses, and new Gompertz-model approach: An addition to the Unified-Richards family. *PLOS ONE*, 12 (6): e0178691.
- Tsouilaris, A. y Wallace, J. (2002). Analysis of logistic growth models. *Mathematical Biosciences*, 179 (1), 21-55.
- Vargas, A. T., Ochoa, E. y Galindo, A. (2020). Coronavirus, hacia la siguiente pandemia del siglo xxi. *Ciencia*, 71 (2), 84-89.

Tabla 1

Resumen con las características de la estimación del
Modelo de Gompertz Modificado para estimar el número de
casos positivos confirmados en México

Número de iteraciones	8
Suma de cuadrados del error final	1309318828
Grados de libertad del error	176
Cuadrado medio del error	7439312
R cuadrado	0.99
Error estándar	2727.51

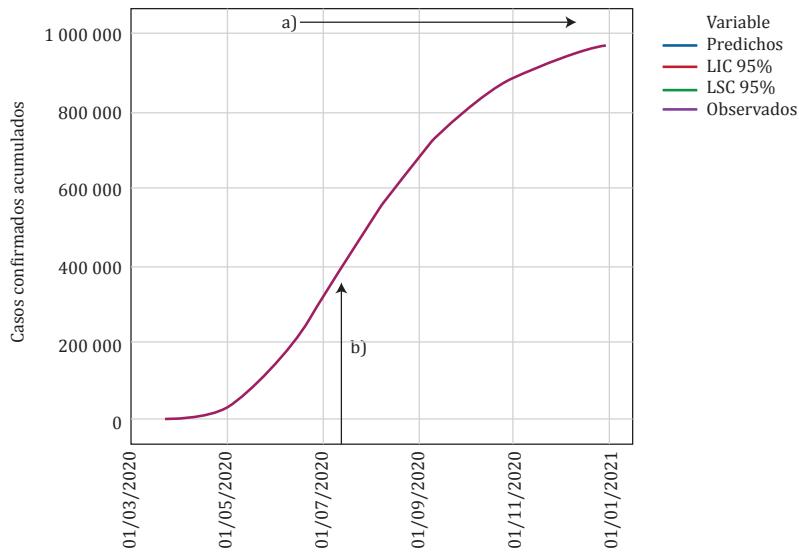
Tabla 2

Parámetros estimados y sus errores estándar del Modelo de Gompertz Modificado
para estimar el número de casos positivos confirmados en México

Parámetro	Estimador	EE del estimador	IC de 95%
N	1029195.4	4749.5	(1019921.3, 1038731.8)
b	21.5	0.301	(20.9, 22.1)
r	0.017	0.000	(0.018, 0.017)
A	2543.6	613.5	(1314.6, 3757.5)

Figura 1

Modelo estimado para la predicción de los casos positivos de COVID-19 confirmados en México y sus intervalos de confianza de 95% con el Modelo Gompertz Modificado



Nota: En la gráfica: a) corresponde al valor estimado de la capacidad de carga de la población (1 031 739), y b) representa la fecha estimada en que se presenta el punto de inflexión (12 de julio).

Figura 2

Incrementos diarios observados y estimados de los casos confirmados de COVID-19 en México utilizando el Modelo Gompertz Modificado

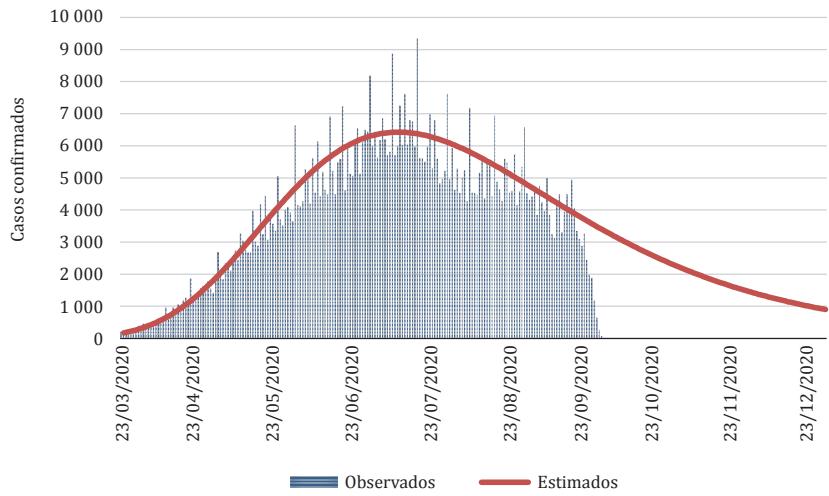


Tabla 3

Prueba de bondad de ajuste de Neill para comparar los modelos Logístico y de Gompertz con tres y cuatro parámetros para casos positivos de COVID-19 confirmados

Modelo	*AIC	BIC	Log-verosimilitud	Prueba de Neill Valor <i>p</i>
Gompertz 4 parámetros	3364.78	3380.75	-1677.39	0.0547 (<i>F</i> = 3.742)
Logístico 4 parámetros	3545.19	3561.15	-1767.59	<0.001 (<i>F</i> = 150.75)
Gompertz 3 parámetros	3378.88	3391.65	-1685.44	0.0019 (<i>F</i> = 6.483)
Logístico 3 parámetros	3827.17	3839.94	-1909.58	<0.001 (<i>F</i> = 283.02)

Nota: *AIC y BIC menores implica mejor modelo, menor valor absoluto de log-verosimilitud implica que el modelo es preferible y se espera en la prueba de Neill un valor de *p* mayor a 0.05 para tener un buen ajuste.

Tabla 4

Resumen del proceso de estimación del Modelo de Gompertz para predecir el número de defunciones por COVID-19

Número de iteraciones	5
Suma de cuadrados del error final	2195001
Grados de libertad del error	175
Cuadrado medio del error	12542.9
R cuadrado	0.99
Error estándar	111.995

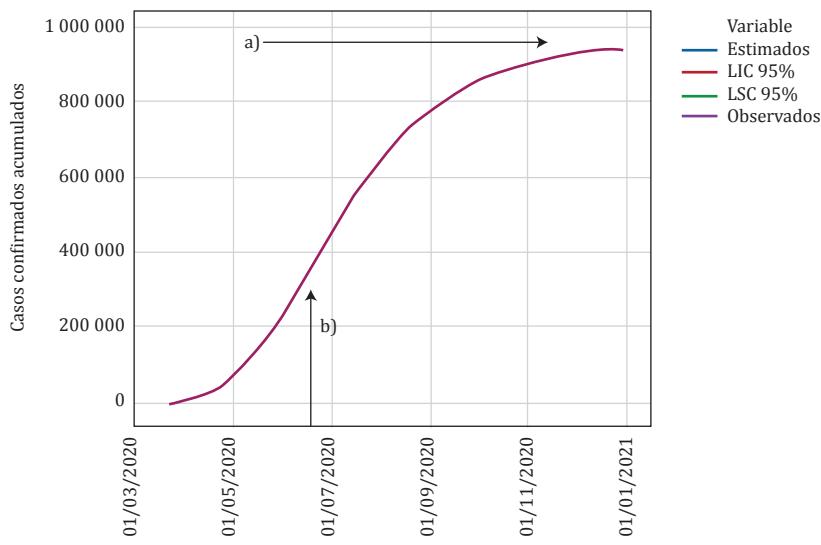
Tabla 5

Parámetros estimados y su error estándar del Modelo de Gompertz para predecir el número de defunciones por COVID-19

Parámetro	Estimador	EE del estimador	IC de 95%
<i>N</i>	95573.4	99.09	(95378.4, 95769.7)
<i>b</i>	27.1	0.1395	(26.9, 27.4)
<i>r</i>	0.0209	0.00003	(0.0208, 0.0209)
<i>A</i>	-296.344	27.3425	(-350.4, -242.5)

Figura 3

Modelo estimado para la predicción de las defunciones por COVID-19 en México y sus intervalos de 95% de confianza con el Modelo Gompertz Modificado



Nota: En la gráfica: a) corresponde al valor estimado de la capacidad de carga de la población (95 277), y b) representa la fecha estimada en que se presenta el punto de inflexión (18 de junio).

Figura 4

Incrementos diarios observados y estimados de las defunciones por COVID-19 en México utilizando el Modelo Gompertz Modificado

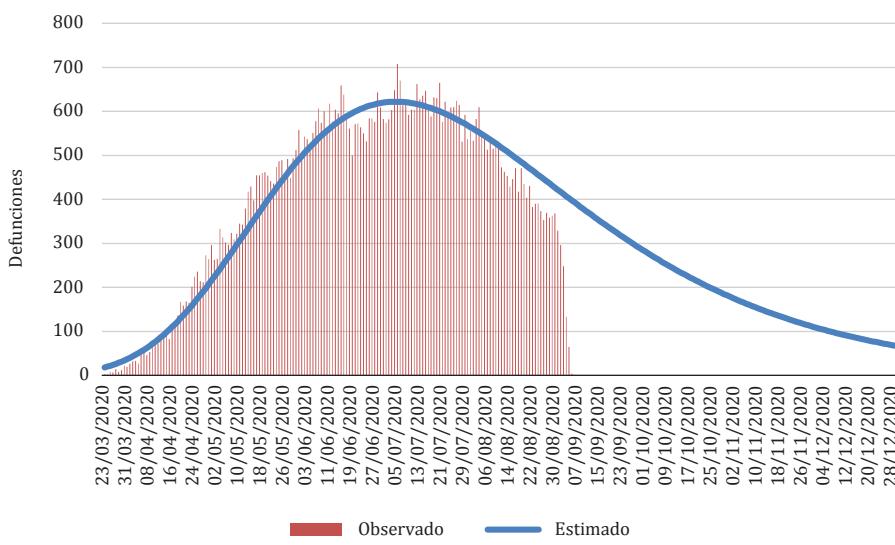


Tabla 6

Prueba de bondad de ajuste de Neill para comparar los modelos Logístico y de Gompertz con tres y cuatro parámetros para defunciones por COVID-19 en México

Modelo	*AIC	BIC	Log-verosimilitud	Prueba de Neill Valor.p
Gompertz 4 parámetros	2203.13	2219.08	-1096.57	<0.001 (F=57.13)
Logístico 4 parámetros	2852.15	2868.08	-1421.07	<0.001 (F=335.34)
Gompertz 3 parámetros	2294.79	2307.54	-1143.4	<0.001 (F=71.40)
Logístico 3 parámetros	3138.30	3151.04	-1565.15	<0.001 (F=83.356)

Nota: *AIC y BIC menores implican mejor modelo, menor valor absoluto de log-verosimilitud implica que el modelo es preferible y se espera en la prueba de Neill un valor de p mayor a 0.05 para tener un buen ajuste

Tabla 7

Parámetros estimados y su error estándar del Modelo de Gompertz para predecir el número de defunciones por COVID-19 en las regiones definidas por la tasa de ocupación informal

Parámetro	Estimador	EE del estimador	IC de 95%
N	698395.5	3752.17	(691104.9, 705917)
b	18.6045	0.2464	(18.1, 19.1)
r	0.0155	0.0001	(0.0153, 0.0157)
A	1630.45	383.29	(862.6, 2387.7)
N_1	-350972.7	4190.15	(-359323.6, -342782.3)
b_1	9.8633	0.6815	(8.5, 11.2)
r_1	0.0041	0.0002	(0.0037, 0.0044)
A_1	-609.6076	508.9	(-1618.7, 401.4)

Tabla 8

Principales características de los modelos estimados para cada una de las regiones definidas por la tasa de ocupación informal

Región de informalidad laboral	Capacidad de carga	Tasa de contagio	Fecha del pico máximo	Incremento diario máximo
Menor	700 025.95	0.0155	22 de agosto	3 982.3
Mayor	348 443.6	0.0196	4 de agosto	2 505.07

Tabla 9

Principales características de los modelos estimados para cada una de las regiones definidas por la tasa de ocupación informal bajo el escenario de disminución en 10% la tasa de contagio

Región de informalidad laboral	Capacidad de carga	Tasa de contagio	Fecha del pico máximo	Incremento diario máximo
Menor	700 025.95	0.01395	10 de septiembre	3 584.1
Mayor	348 443.6	0.01764	23 de agosto	2 254.5

Figura 5

Comportamiento de las dos regiones de informalidad laboral con la tasa de contagio observada y bajo el supuesto de una reducción en su tasa de contagio en 10%

