

Proyecciones de la epidemia de COVID-19 para Guanajuato

Nana Cabo Bizet, Jonathan Hidalgo Nuñez, Gil Estefano Rodríguez Rivera.

*Laboratorio de Datos, Departamento de Física,
División de Ciencias e Ingenierías,
Universidad de Guanajuato.*

24 de Mayo de 2021

En el presente reporte se analizan datos de infectados, recuperados y fallecidos del estado de Guanajuato empleando un modelo SIR (Suceptibles, Infectados y Recuperados). Se considera una tasa de contagio variable (β) y se ajusta con datos al **24.05.21**. Se evalúa la tasa de recuperación local (γ). Se realizan estimados de infectados activos, acumulados, recuperados y fallecidos a una y tres semanas incluyendo rangos de error.

Hagamos algunas acotaciones:

- El 4 de abril del 2020 es el día 1 a partir del que comienza el conteo que aparece en las **gráficas de la 1 a la 6 y la 8**.
 - El **número de infectados activos** en un día dado se calcula a partir de los datos reportados en el mismo día como el número de infectados acumulados menos los recuperados acumulados y los difuntos acumulados.
 - La **incertidumbre superior** de cada valor predicho (infectados activos, recuperados acumulados y los difuntos acumulados) es la cota superior para ese valor menos el valor predicho.
 - La **incertidumbre inferior** es el valor predicho menos la cota inferior.
 - El **número de infectados acumulados predichos** se calcula como los infectados activos predichos más los recuperados acumulados predichos y los difuntos acumulados predichos.
 - La **cota superior de la predicción de infectados acumulados** se calcula como los infectados acumulados más la suma de las incertidumbres superiores de infectados activos, recuperados acumulados y difuntos acumulados.
 - La **cota inferior de la predicción de infectados acumulados** son los infectados acumulados menos la suma de las incertidumbres inferiores de infectados activos, recuperados acumulados y difuntos acumulados.
 - Se referirá el número de difuntos acumulados más recuperados acumulados como los **inmunes** y esa cifra se denotará como \bar{R} .
 - El número de recuperados fue ajustado linealmente en función de los inmunes (tanto en la proyección a 7 y a 21 días).
 - El número de difuntos fue ajustado linealmente en función de los inmunes (tanto en la proyección a 7 y a 21 días).
- En la **sección I** se reportan las proyecciones a 7 días. En la **sección II** se reportan las proyecciones a 21 días. En la **sección III** se reporta la tasa de recuperación γ , la tasa de contagio β , así como el ajuste de fallecidos contra recuperados.

I. PREDICCIONES PARA 7 DÍAS.

Tanto en esta sección como en la siguiente, la **línea punteada de color verde** indica el día a partir del cual se predicen valores, en este caso, el 24 de mayo del 2021. Así mismo, la **curva azul** es la curva que siguen los valores predichos mientras que la **región sombreada de azul** es la zona donde se pueden encontrar los valores reportados en los días que se predicen. Además, la **región lila** en las gráficas de los recuperados acumulados y los difuntos acumulados son las posibles curvas de predicción, esto se debe a que la predicción de cualquiera de esas dos cifras se hace a partir de suponer que es una función lineal de los inmunes, ese ajuste conlleva errores, mismos que llevan a que la curva azul no necesariamente se siga directamente del último punto rojo.

El número de **infectados activos** predichos para dentro de 7 días, al 31.05.21, es de **370** (con una *cota superior* de 523 y una *cota inferior* de 281).

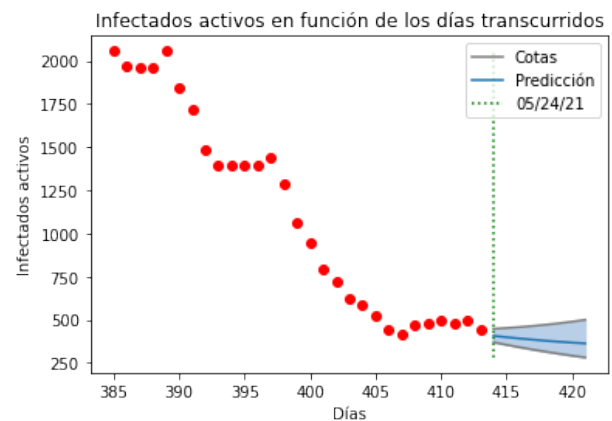


Figura 1. En los puntos rojos se muestran los casos infectados activos calculados, día a día, desde el 25 de abril del 2021 hasta el 24 de mayo del 2021. En la región azul se encuentran los valores predichos en los siguientes siete días.

Para el número de **recuperados acumulados**, dentro de 7 días, al 31.05.21, se tiene una predicción de **121,713** (con una *cota superior* de 121,852 y una *cota inferior* de 121,590).

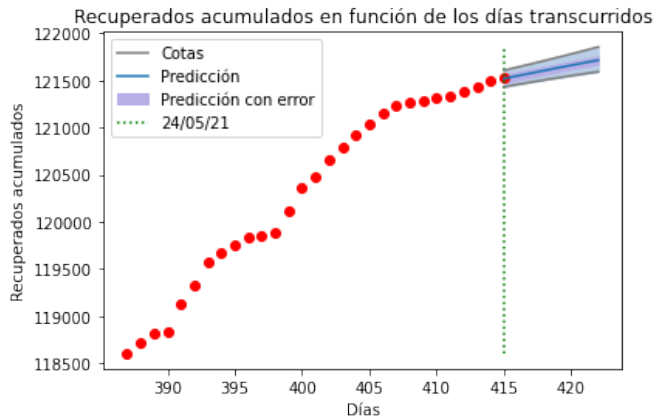


Figura 2. En los puntos rojos se muestran los casos recuperados acumulados reportados desde el 25 de abril del 2021 hasta el 24 de mayo del 2021. En la región azul se encuentran los valores predichos para los siguientes siete días.

Para el número de **difuntos acumulados**, se tiene una predicción al 31.05.21 de **11,060** (con una *cota superior* de 11,111 y una *cota inferior* de 11,012).

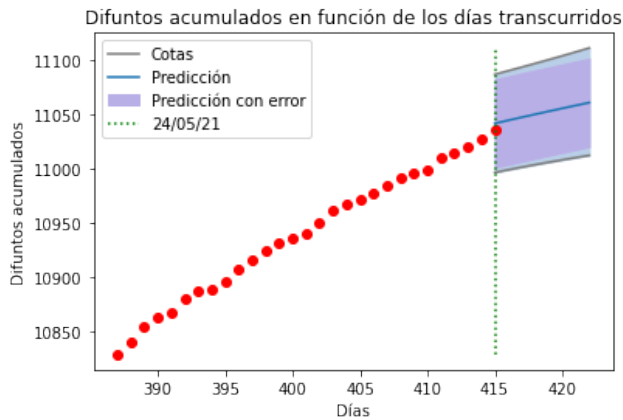


Figura 3. En los puntos rojos se muestran el número de difuntos acumulados reportados desde el 25 de abril del 2021 hasta el 24 de mayo del 2021. En la región azul se encuentran los valores predichos para los siguientes siete días.

Para el número de **infectados acumulados**, se tiene una predicción al 31.05.21 de **133,143** (con una *cota superior* de 133,487 y una *cota inferior* de 132,884).

II. PREDICCIONES PARA 21 DÍAS.

La predicción del número de **infectados activos** para dentro de 21 días, al 14.06.21, es de **398** (con una *cota superior* de 1049 y una *cota inferior* de 198).

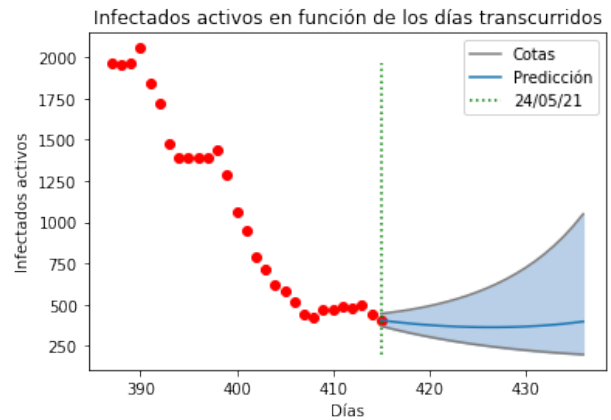


Figura 4. En los puntos rojos se muestran los casos infectados activos calculados, día a día, desde el 25 de abril del 2021 hasta el 24 de mayo del 2021. En la región azul se encuentran los valores predichos para los siguientes veintiún días.

Para los **recuperados acumulados**, para dentro de 21 días, al 14.06.21, se tiene una predicción de **122,091** (con una *cota superior* de 122,569 y una *cota inferior* de 121,825).

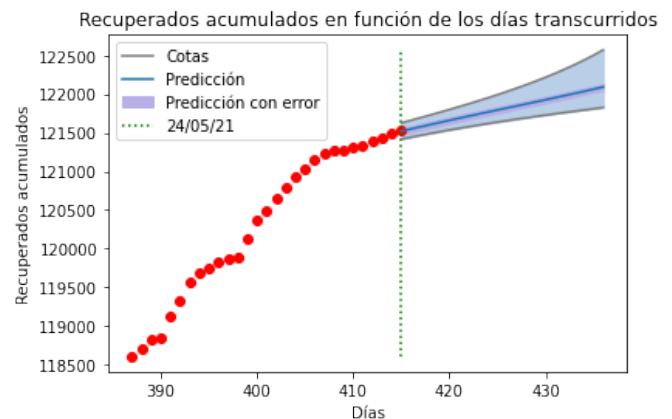


Figura 5. En los puntos rojos se muestran los casos recuperados acumulados reportados desde el 25 de abril del 2021 hasta el 24 de mayo del 2021. En la región azul se encuentran los valores predichos para los siguientes veintiún días.

Para los **difuntos acumulados**, se tiene una predicción a 21 días, al 14.06.21, de **11,097** (con una *cota superior* de 11,181 y una *cota inferior* de 11,035).

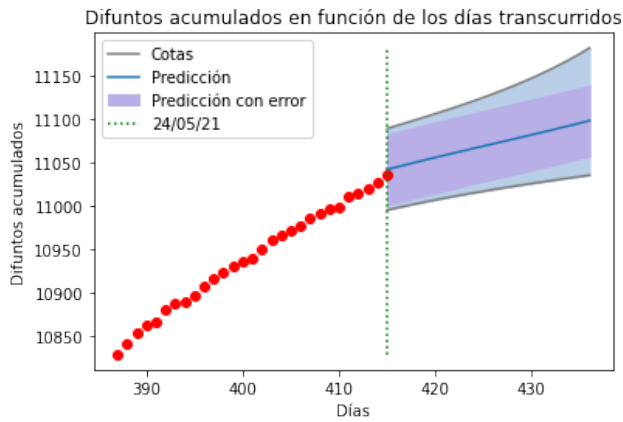


Figura 6. En los puntos rojos se muestran el número de difuntos acumulados reportados desde el 25 de abril del 2021 hasta el 24 de mayo del 2021. En la región azul se encuentran los valores predichos para los siguientes veintidós días.

Para el número de **infectados acumulados**, se tiene una predicción al 14.06.21 de **133, 587** (con una *cota superior* de 134, 800 y una *cota inferior* de 133, 059).

III. LA TASA DE TRANSMISIÓN EFECTIVA (β_S), LA TASA DE RECUPERACIÓN (γ) Y EL AJUSTE DE LOS DIFUNTOS.

En las tres gráficas siguientes, los **puntos azules** son los datos usados, la **recta roja** es el ajuste de interés en cada caso, la **región azul** sombreada es el intervalo de confianza del 95 % del modelo y las **curvas grises** en torno al modelo y el intervalo de confianza contienen al intervalo de predicción del 95 %.

La **tasa de recuperación efectiva** dada en unidades de $[\gamma_{eff}] = 1/\text{días}$, se estima para los últimos 150 días mediante un ajuste lineal como se muestra en la **figura 7**. Esta tasa es la pendiente de la recta, $\gamma_{eff} = (8.0 \pm 0.3) \times 10^{-2}$.

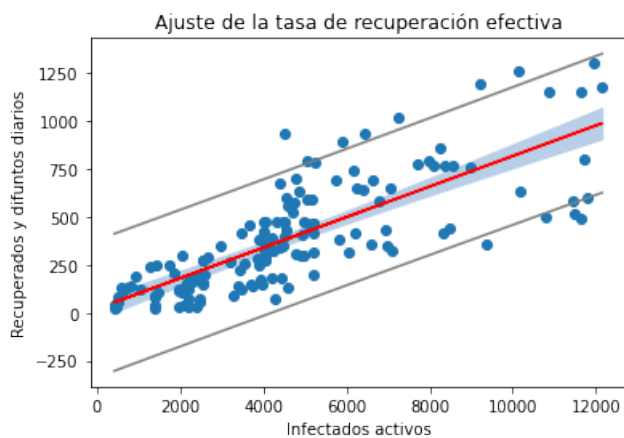


Figura 7. El ajuste lineal entre los infectados activos al día contra los nuevos casos inmunes. La pendiente de este ajuste es la tasa de recuperación (calculada con la información de los últimos 150 días).

La **tasa de transmisión efectiva** dada en unidades de $[\beta_S] = 1/(\text{días} \times \text{personas})$, se estima de los últimos 30 días se ajusta a una exponencial con los siguientes parámetros:

$$\beta_S = e^{(0,0232 \pm 0,0005)t - 12,1 \pm 0,2}.$$

Su ajuste en función del día se muestra en la **figura 8**. Note que esta tasa se construye, día por día, como la suma de γ_{eff} con el cociente la cantidad de infecciones nuevas entre las infecciones activas ese día. En el ajuste del logaritmo de β_S se omiten los puntos que no están bien definidos (por ser valores tan cercanos a cero que, al sacar su logaritmo natural, se indeterminan).

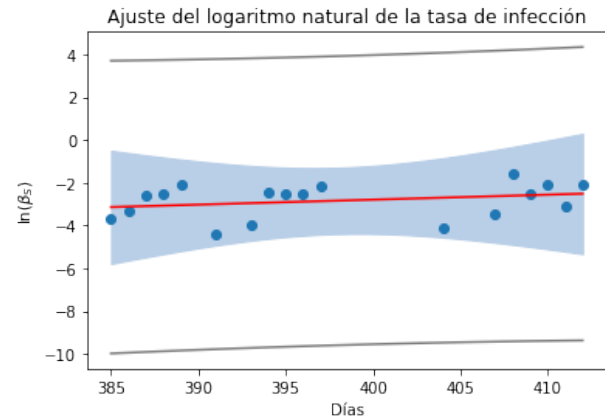


Figura 8. El ajuste lineal entre el valor del logaritmo de la tasa de transmisión efectiva contra el día en el que se obtiene tal valor. El exponencial de este ajuste es la expresión que se busca de la tasa de transmisión como función del tiempo.

El **ajuste de los recuperados en función de los inmunes** de los últimos 289 días se muestra en la **figura 10**. Los parámetros se presentan a continuación.

$$R = (0,9108 \pm 0,0002)\tilde{R} + 780 \pm 20.$$

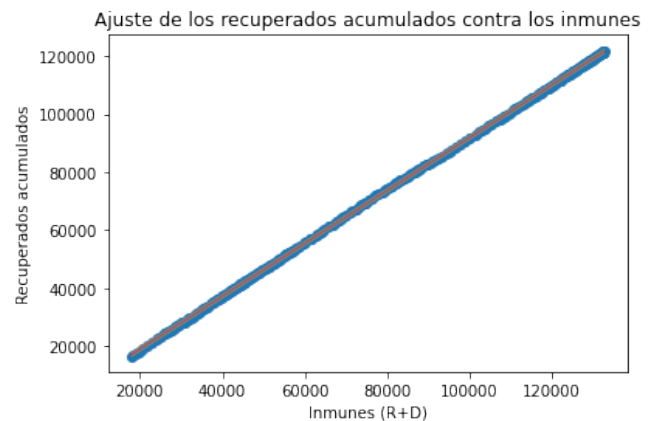


Figura 9. El ajuste lineal entre el número de recuperados acumulados y los inmunes (calculado con la información de los últimos 289 días).

El **ajuste de los difuntos en función de los inmunes** de los últimos 288 días se muestra en la **figura 10**. Los parámetros se presentan a continuación.

$$D = (0,0892 \pm 0,0002)\tilde{R} - 780 \pm 20.$$

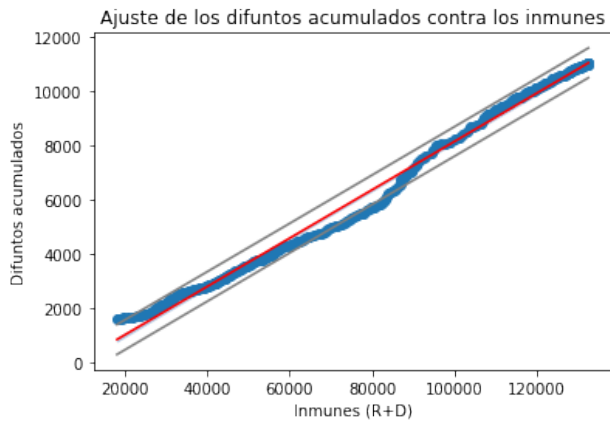


Figura 10. El ajuste lineal entre el número de difuntos acumulados y los inmunes (calculado con la información de los últimos 289 días).

IV. CONCLUSIONES

Los datos actualizados de la epidemia en el estado de Guanajuato, analizados con la suposición de un modelo SIR muestran una tendencia a la disminución de casos activos, sin embargo se proyecta que seguirán en el orden de los cientos en las próximas semanas. Esperamos que estas estimaciones sirvan como guía para el análisis de la situación actual. Este reporte es un estudio matemático, y sus proyecciones son responsabilidad única de los autores.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Programa de Servicio Social de la Universidad de Guanajuato, que nos permitió realizar el proyecto "Modelación matemática de la epidemia del COVID-19" del cual este reporte es parte, agradecemos a Gabriel Amézquita, Oscar Esaul Cervantes, Juan Carlos Godínez e Iván Yebra por su colaboración en dicho proyecto. Agradecemos a los investigadores: Argelia Bernal, Juan Barranco, Alejandro Cabo, Alma González, Damián Mayorga, Gustavo Niz y Luis Ureña por útiles discusiones en esta temática. Agradecemos al Laboratorio de Datos de la DCI, UG, el apoyo de la CIIC DAIP 2021, UG, y al proyecto CONACyT A1-S-37752.

VI. APÉNDICE: PREDICCIONES CON EL MODELO SIR QUE CONSIDERA LA VACUNACIÓN

El análisis de las secciones pasadas considera implícitamente el proceso de vacunación -o al menos su efectos-, por medio de la tasa de transmisión efectiva β_S . Sin embargo, también se puede realizar un análisis análogo si se realiza una modificación en el modelo SIR original para que considere las personas **vacunadas** V , una **velocidad de vacunación** estimada que varía linealmente con el tiempo $\tilde{\beta}(t)$ y una tasa de transmisión aproximada β_{approx} . En ese caso, se producen los siguientes resultados.

Se reportan sólo las gráficas de las predicciones de los infectados activos (gráficas 11 y 12), pues es donde se puede apreciar una diferencia notable entre las predicciones realizadas con el modelo que considera los vacunados y el modelo que no los toma en cuenta.

VI-A. Predicciones para 7 días

El número de **infectados activos** predichos para dentro de 7 días, al 31.05.21, es de **348** (con una *cota superior* de 471 y una *cota inferior* de 274).

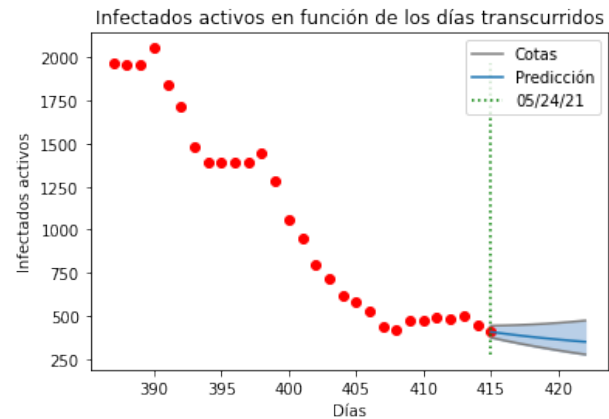


Figura 11. En los puntos rojos se muestran los casos infectados activos calculados, día a día, desde el 25 de abril del 2021 hasta el 24 de mayo del 2021. En la región azul se encuentran los valores predichos en los siguientes siete días usando un modelo que toma en cuenta la vacunación.

Para el número de **recuperados acumulados**, dentro de 7 días, al 31.05.21, se tiene una predicción de **121,707** (con una *cota superior* de 121,834 y una *cota inferior* de 121,593).

Para el número de **difuntos acumulados**, se tiene una predicción al 31.05.21 de **11,060** (con una *cota superior* de 11,109 y una *cota inferior* de 11,012).

Para el número de **infectados acumulados**, se tiene una predicción al 31.05.21 de **133,116** (con una *cota superior* de 133,416 y una *cota inferior* de 132,880).

VI-B. Predicciones para 21 días.

La predicción del número de **infectados activos** para dentro de 21 días, al 14.06.21, es de **319** (con una *cota superior* de 760 y una *cota inferior* de 172).

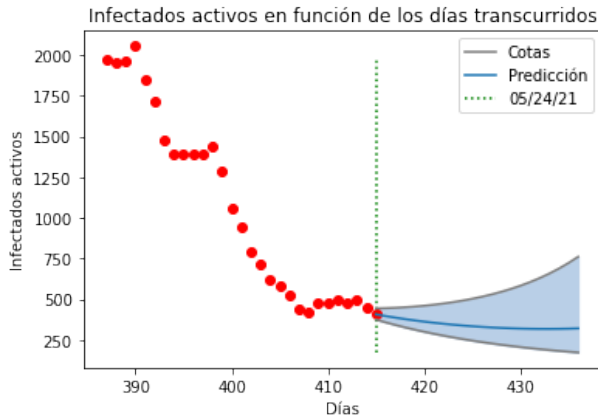


Figura 12. En los puntos rojos se muestran los casos infectados activos calculados, día a día, desde el 25 de abril hasta el 24 de mayo del 2021. En la región azul se encuentran los valores predichos para los siguientes veintidós días usando un modelo que toma en cuenta la vacunación.

Para los **recuperados acumulados**, para dentro de 21 días, al 14.06.21, se tiene una predicción de **122,037** (con una *cota superior* de 122,416 y una *cota inferior* de 121,809).

Para los **difuntos acumulados**, se tiene una predicción a 21 días, al 14.06.21, de **11,092** (con una *cota superior* de 11,166 y una *cota inferior* de 11,033).

Para el número de **infectados acumulados**, se tiene una predicción al 14.06.21 de **133,450** (con una *cota superior* de 134,343 y una *cota inferior* de 133,014).

VI-C. La velocidad de vacunación ($\tilde{\beta}$)

En la página de la Secretaría de Salud del Estado de Guanajuato se reportan las vacunas aplicadas. Por la ambigüedad que se encontró en esa definición, se optó por suponer que el número de personas vacunadas es el número de vacunas aplicadas entre dos.

Dado que hay días en los que el número de personas vacunadas no cambia, para los siguientes cálculos sólo se usaron los datos de los días en los que hubo un cambio en el número (los datos que en la figura 13 aparecen en color naranja).

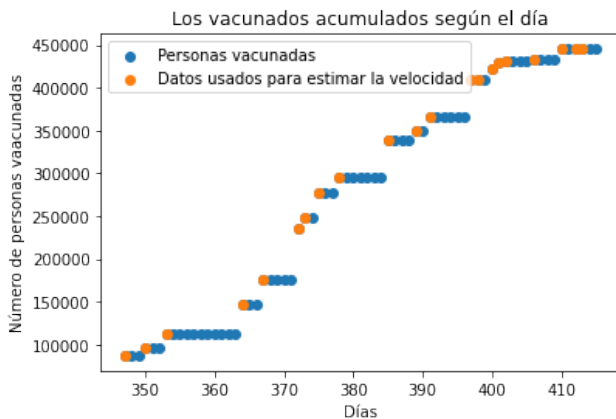


Figura 13. El número de vacunados acumulados desde el 17 de marzo del 2021 (el día en el que se empezó a reportar el número de vacunas) hasta el 24 de mayo del 2021. Los puntos naranjas son aquellos que se usan para calcular la velocidad de vacunación

La **velocidad de vacunación** dada en unidades de $[\tilde{\beta}] = \text{personas/días}$, se estima con los datos desde el 17 de marzo del 2021 y se ajusta a una función lineal:

$$\tilde{\beta} = (-91 \pm 2)t + 40,300 \pm 900$$

Su ajuste en función del día se muestra en la **figura 14**. Note que esta tasa se construye como el cociente de la cantidad de nuevas personas vacunadas entre el número de días que hay entre cada dato usado (las diferencias en el eje horizontal entre cada punto naranja consecutivo en la figura 13).

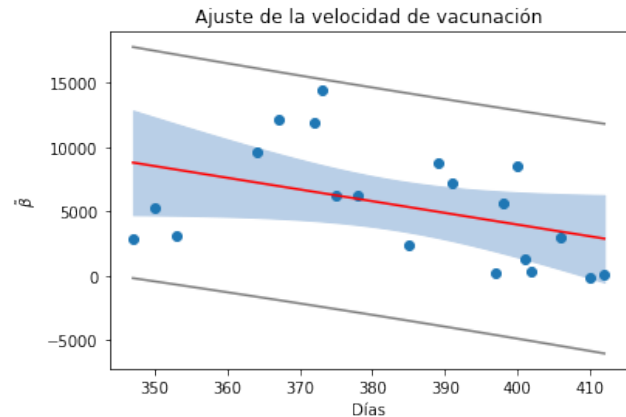


Figura 14. El ajuste lineal entre el valor de la velocidad de vacunación contra el día en el que se obtiene tal valor.

VI-D. La tasa de transmisión aproximada (β_{approx})

La **tasa de transmisión aproximada** es numéricamente idéntica a la tasa de transmisión efectiva pero es diferente en el contexto en el que se utiliza en cuanto al modelo. La tasa aproximada tiene sentido en el modelo SIR modificado, mientras que la β_S funciona en un modelo semejante pero diferente. Las siguientes ecuaciones muestran las ecuaciones en las que existe cada tasa. Para β_{approx} :

$$\frac{dI}{dt} = \beta_{approx}SI - \gamma_{eff}I \quad (1)$$

Donde S , la población susceptible al virus, evoluciona como

$$\frac{dS}{dt} = -\beta_{approx}SI - \tilde{\beta}$$

Para β_S :

$$\frac{dI}{dt} = \beta_S I - \gamma_{eff}I \quad (2)$$

Sin necesidad de una ecuación auxiliar.

En otras palabras, β_S es un ajuste del producto de la tasa de transmisión real y la población susceptible, de modo que es así como captura efectos como el proceso de vacunación sin necesidad de considerarlos explícitamente.