

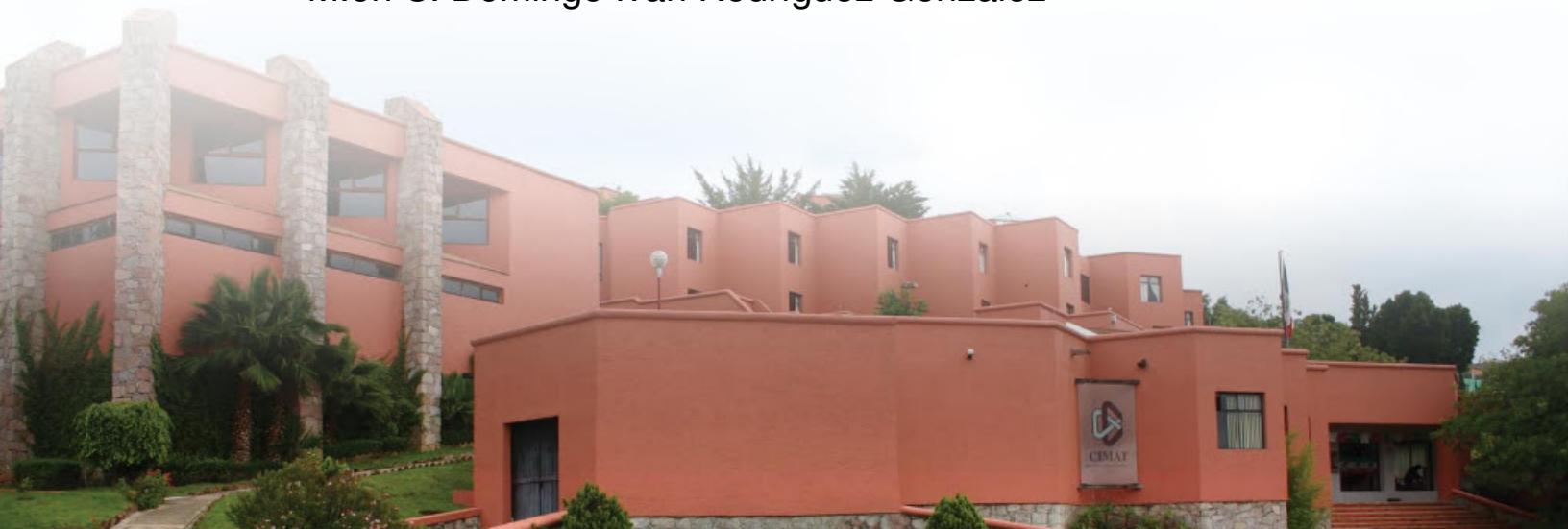
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología  
Centro de Investigación en Matemáticas, A.C.

## Estimaciones de la Tasa de Reproducción Efectiva $R_t$ de COVID-19 para los Estados y Zonas Metropolitanas de México

15 de Septiembre de 2021

Reporte realizado por:

- Dra. Graciela González Farías
- M.en C. Domingo Iván Rodríguez González



CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATEMÁTICAS, A.C.

*15 de Septiembre de 2021*

# Tabla de Contenidos

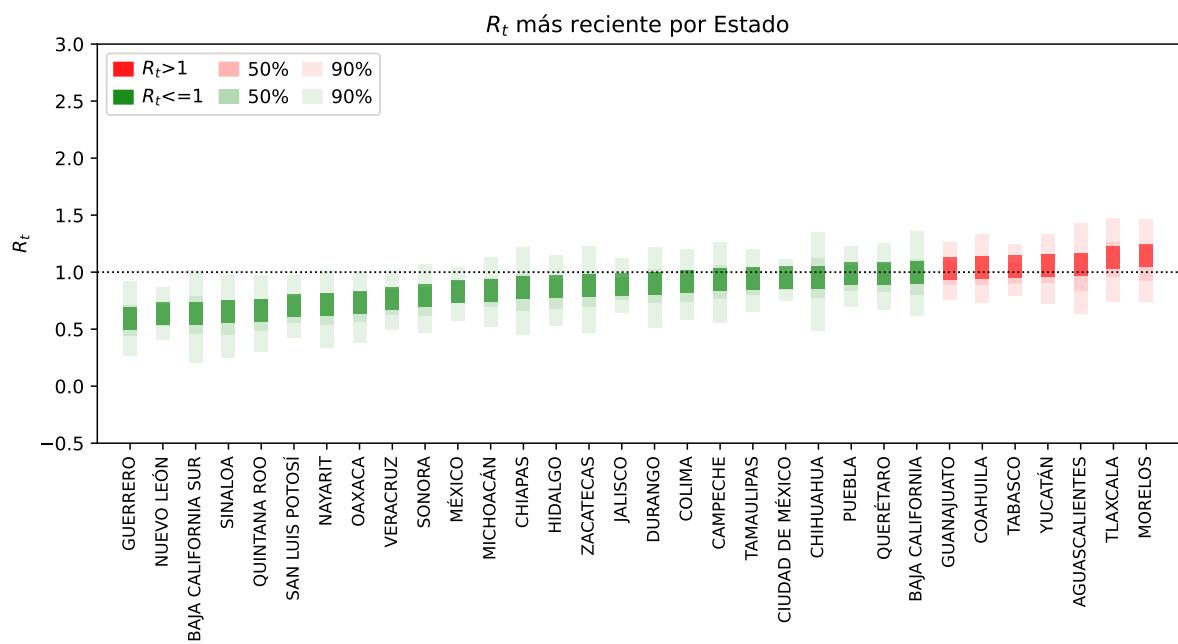
<b>1</b>	<b>Estimaciones de <math>R_t</math> en Orden Ascendente .....</b>	<b>4</b>
1.1	Estimaciones de $R_t$ por Estado en Orden Ascendente	5
1.2	Estimaciones de $R_t$ por Zona Metropolitana en Orden Ascendente	6
<b>2</b>	<b>Estimaciones de <math>R_t</math> por Estado .....</b>	<b>7</b>
2.1	Tasa de Crecimiento ( $R_t * I$ ) por Estado	19
<b>3</b>	<b>Estimaciones de <math>R_t</math> por Zona Metropolitana .....</b>	<b>20</b>
3.1	Tasa de Crecimiento ( $R_t * I$ ) por Zona Metropolitana	30
<b>4</b>	<b>Metodología de Estimación de <math>R_t</math> .....</b>	<b>31</b>
4.1	Metodología para la Estimación del $R_t$ .	32
4.1.1	Datos de entrada para la estimación .....	32
4.1.2	Estimación de la tasa de reproducción efectiva $R_t$ .....	32

## **1. Estimaciones de $R_t$ en Orden Ascendente**

## 1.1 Estimaciones de $R_t$ por Estado en Orden Ascendente

**Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 15 de Septiembre de 2021**

La figura 1.1 muestra las estimaciones del  $R_t$  para los 32 estados de México, ordenados de manera ascendente. Se tomaron los datos de nuevos casos hasta el día 03 de Septiembre de 2021. En verde se muestran los estados para los que el  $R_t$  estimado es menor a 1. Se incluyen los intervalos de máxima densidad del 50 % y 90 %.

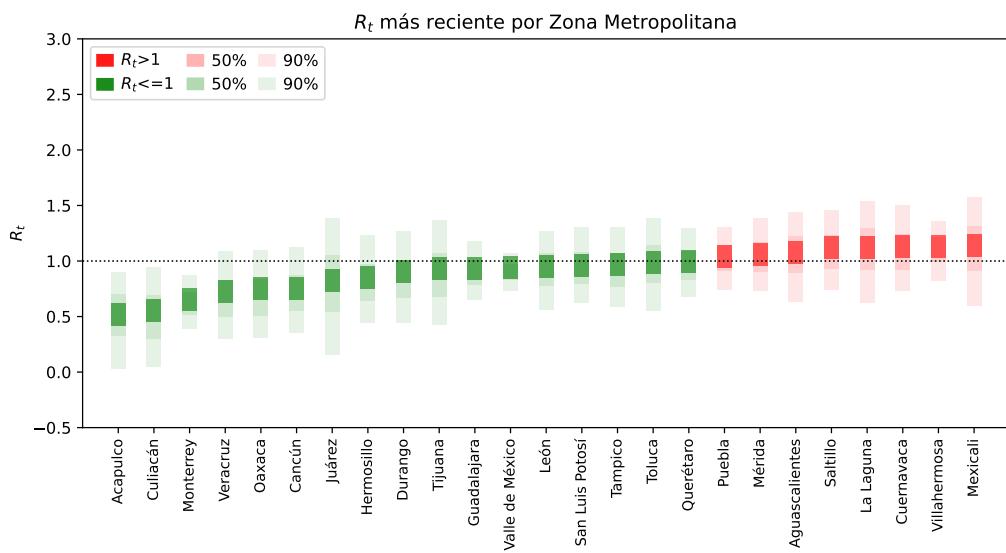


**Fig. 1.1:** Valor de  $R_t$  más reciente para los 32 estados de México.

## 1.2 Estimaciones de $R_t$ por Zona Metropolitana en Orden Ascendente

**Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 15 de Septiembre de 2021**

La figura 1.2 muestra las estimaciones del  $R_t$  para las 25 Zonas Metropolitanas con mayor número de casos confirmados de COVID-19, ordenadas de manera ascendente. Se tomaron los datos de nuevos casos hasta el día 03 de Septiembre de 2021. En verde se muestran las zonas metropolitanas para las que el  $R_t$  estimado es menor a 1. Se incluyen los intervalos de máxima densidad del 50 % y 90 %.

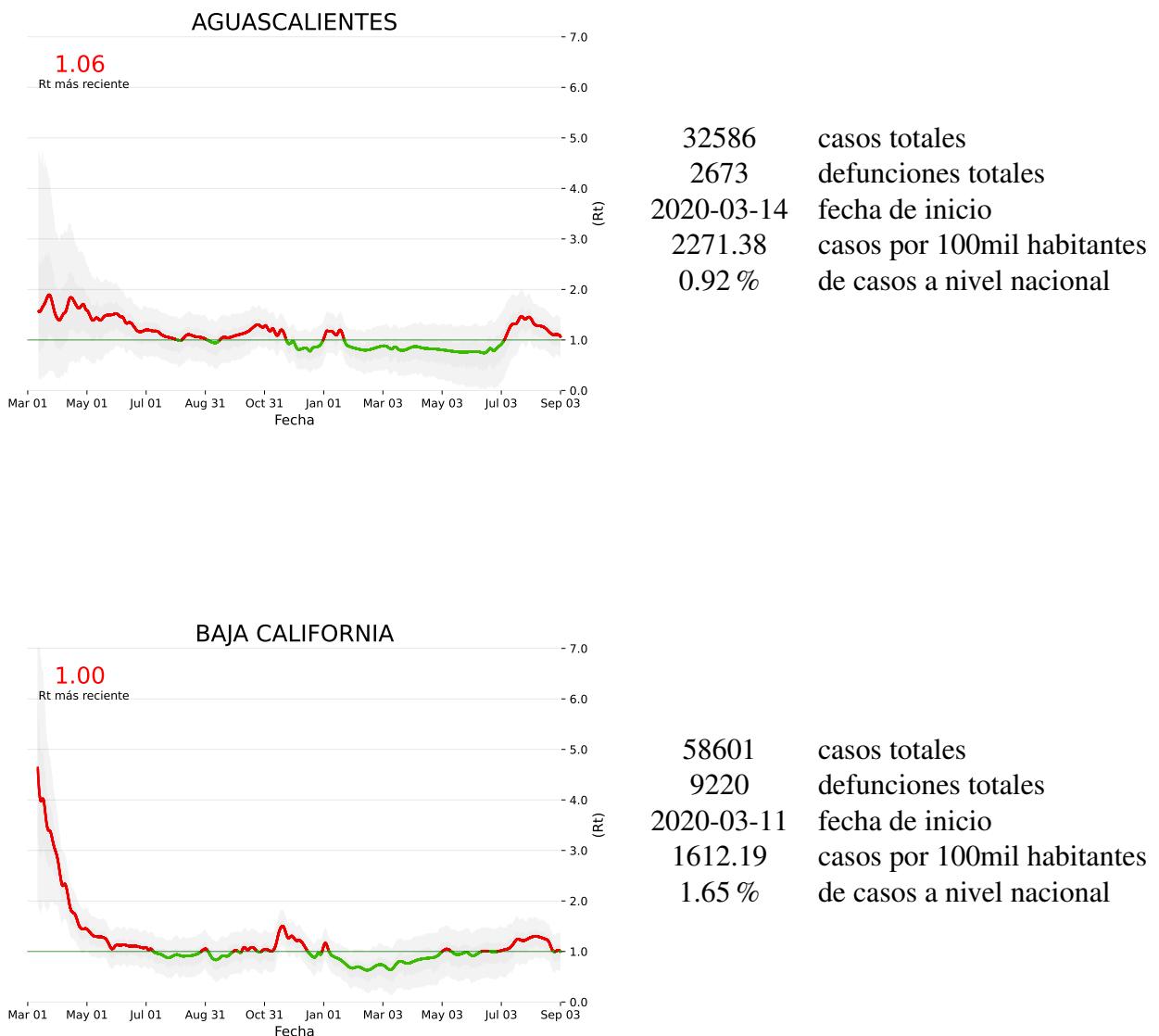


**Fig. 1.2:** Valor de  $R_t$  más reciente para las 25 Zonas Metropolitanas con mayor número de casos.

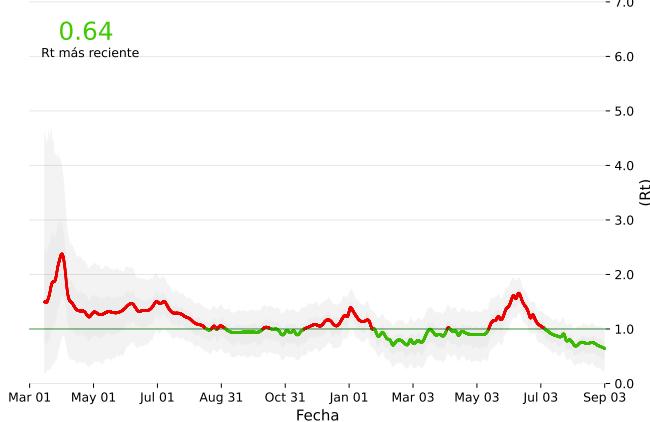
## **2. Estimaciones de $R_t$ por Estado**

**Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 15 de Septiembre de 2021**

A continuación se muestran las gráficas del comportamiento de la tasa  $R_t$  a lo largo del tiempo para los 32 estados de México. La fecha inicial se toma a partir de la cual existen datos suficientes para hacer la estimación, mientras que la fecha final corresponde al 03 de Septiembre de 2021.

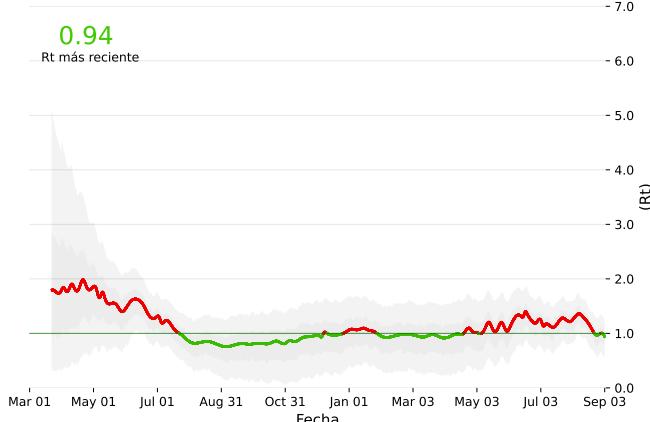


### BAJA CALIFORNIA SUR



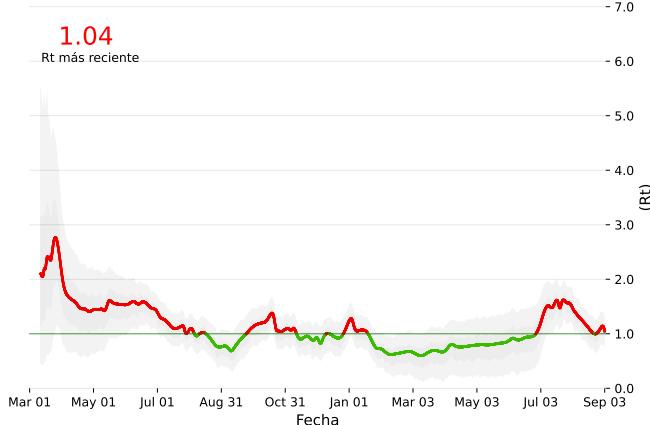
54595      casos totales  
 2259      defunciones totales  
 2020-03-18      fecha de inicio  
 6784.45      casos por 100mil habitantes  
 1.54 %      de casos a nivel nacional

### CAMPECHE

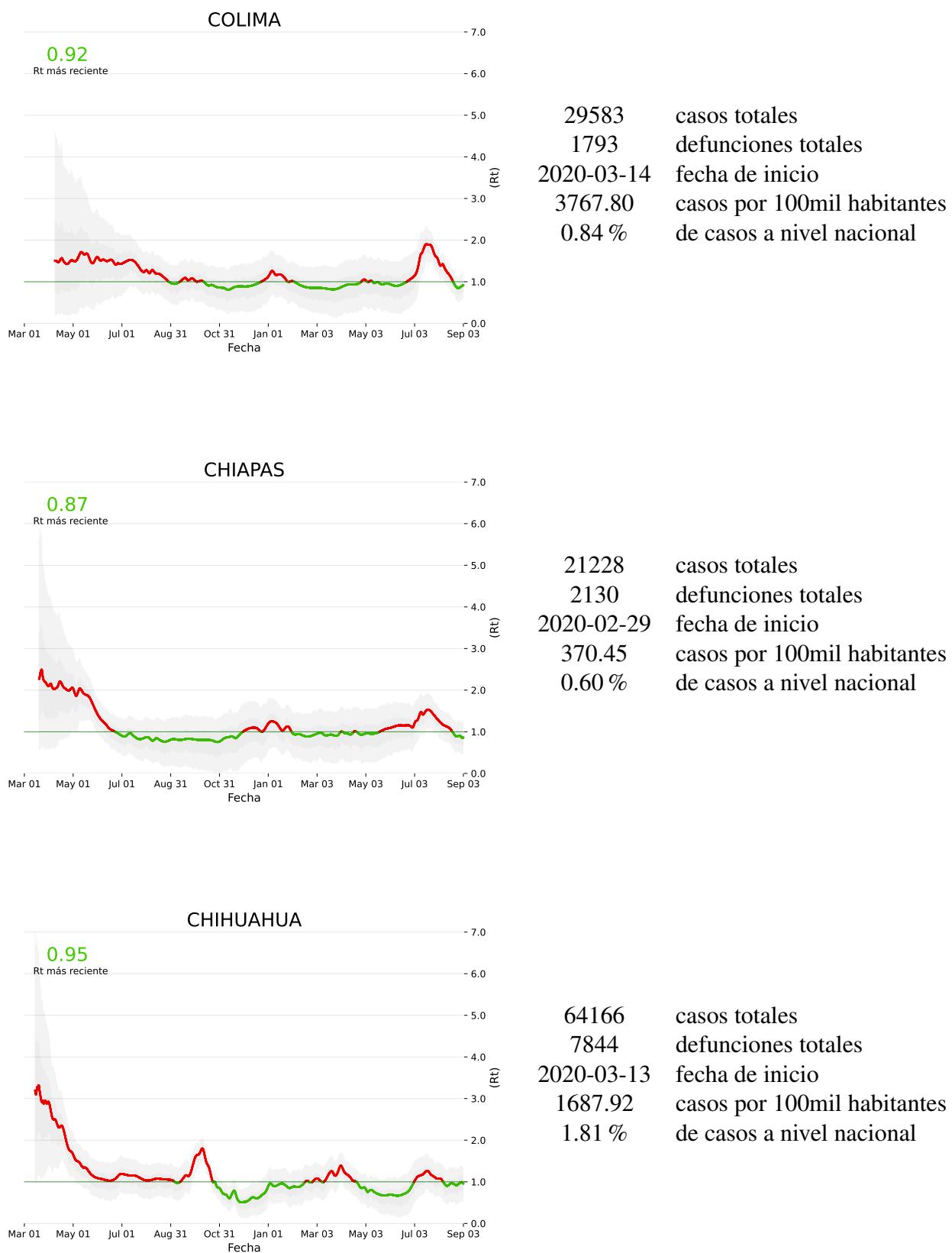


21700      casos totales  
 1832      defunciones totales  
 2020-03-08      fecha de inicio  
 2168.66      casos por 100mil habitantes  
 0.61 %      de casos a nivel nacional

### COAHUILA

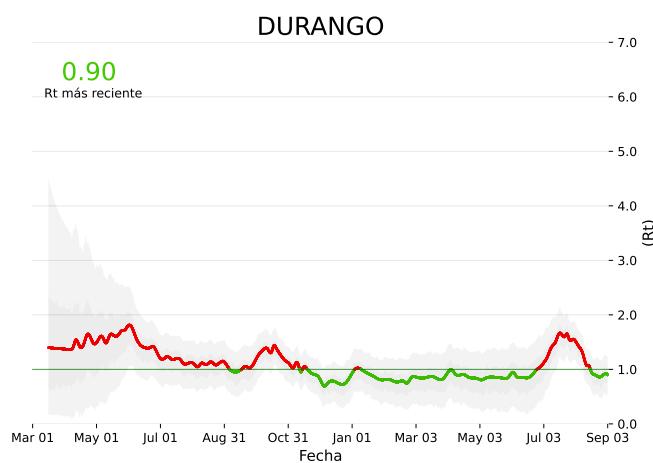


86274      casos totales  
 7003      defunciones totales  
 2020-02-28      fecha de inicio  
 2680.38      casos por 100mil habitantes  
 2.44 %      de casos a nivel nacional





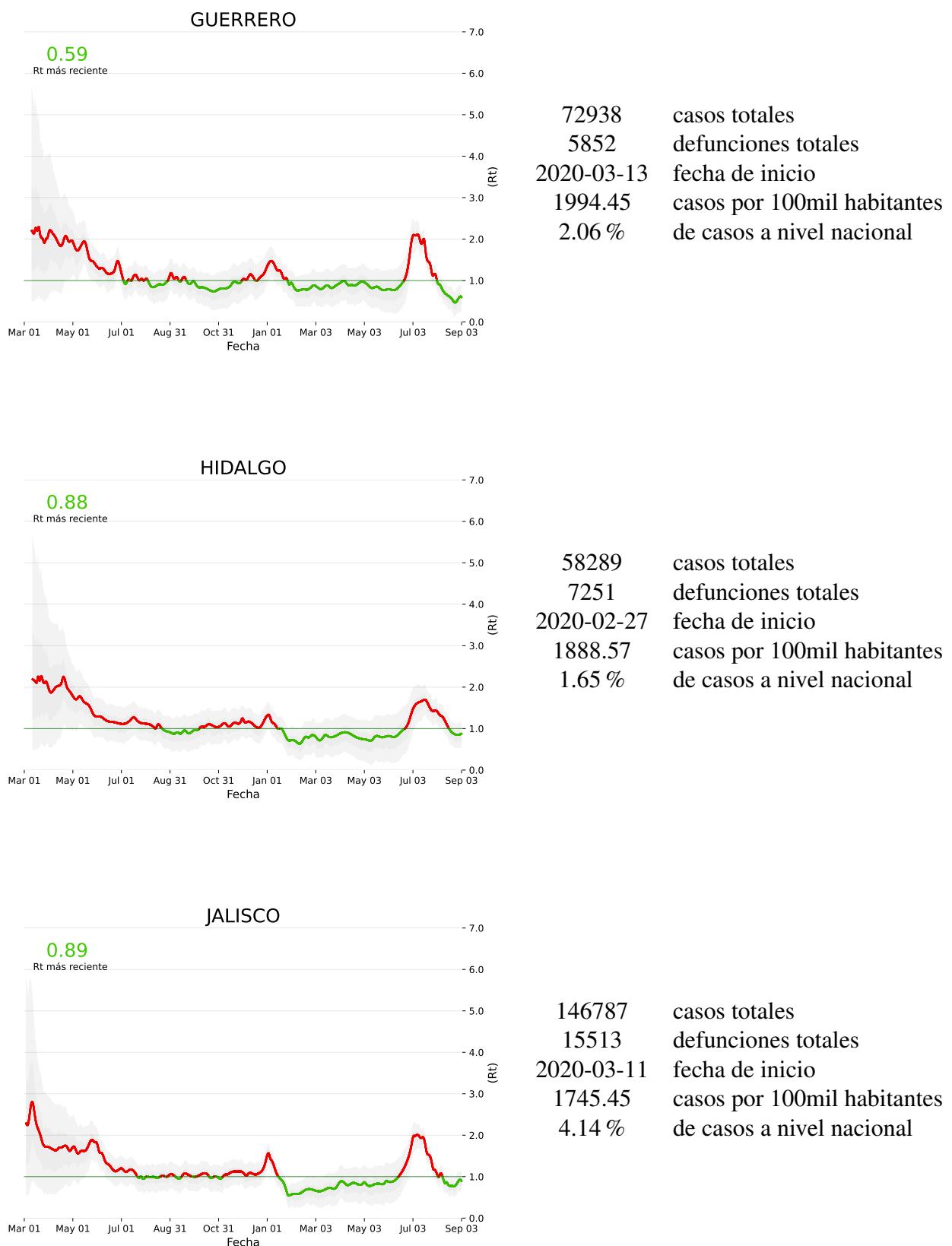
926461      casos totales  
 38418      defunciones totales  
 2020-02-27    fecha de inicio  
 10272.73     casos por 100mil habitantes  
 26.16 %      de casos a nivel nacional



46098      casos totales  
 2889      defunciones totales  
 2020-03-11    fecha de inicio  
 2466.46     casos por 100mil habitantes  
 1.30 %      de casos a nivel nacional

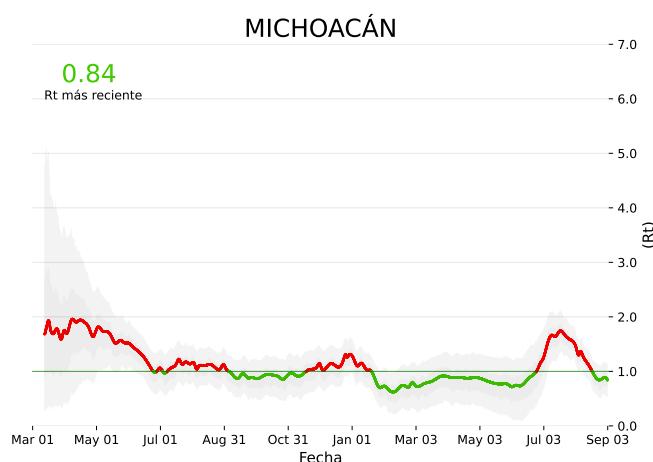


164669      casos totales  
 11756      defunciones totales  
 2020-03-01    fecha de inicio  
 2643.94     casos por 100mil habitantes  
 4.65 %      de casos a nivel nacional





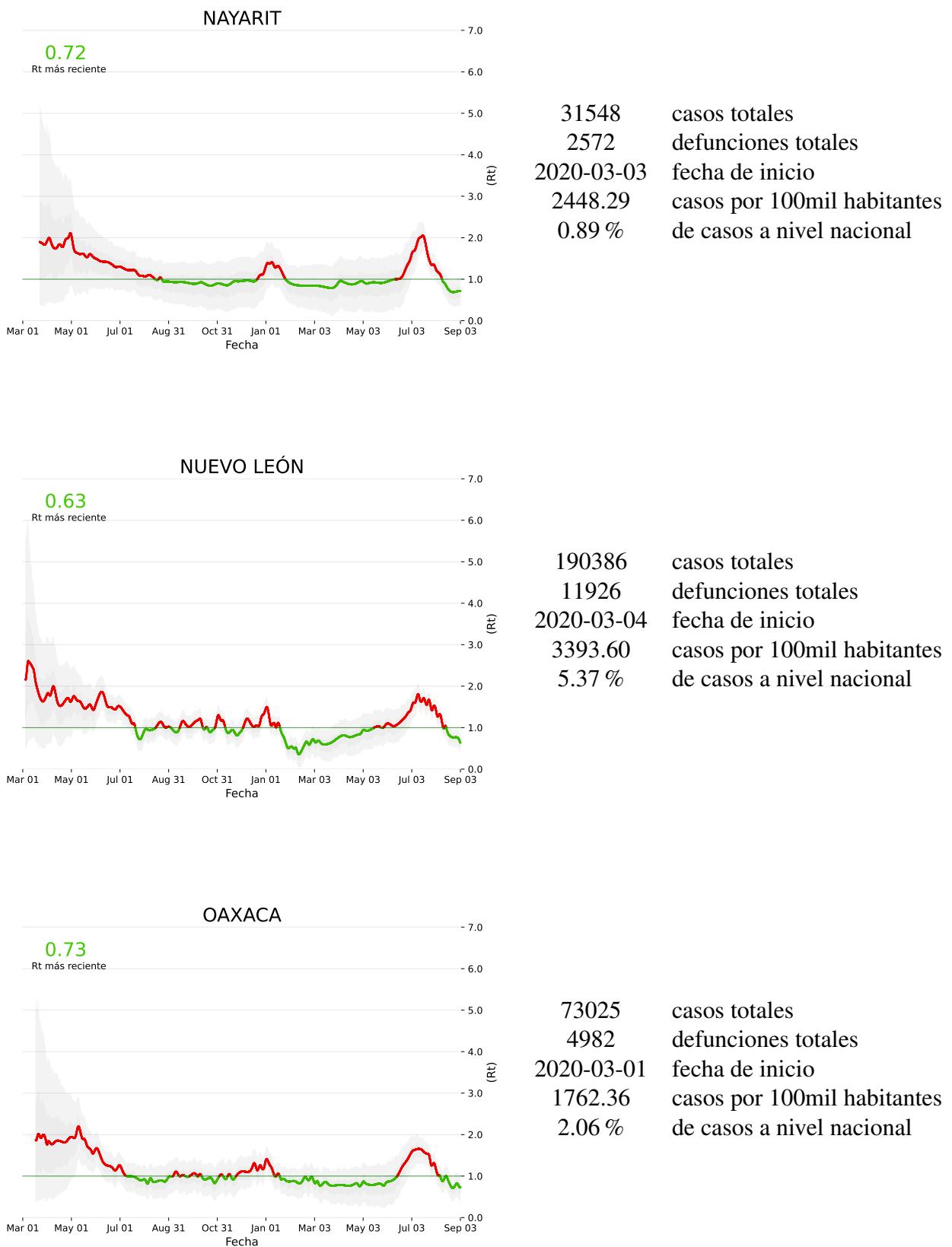
351341      casos totales  
 41868      defunciones totales  
 2020-02-27    fecha de inicio  
 2015.98      casos por 100mil habitantes  
 9.92 %      de casos a nivel nacional



68563      casos totales  
 7285      defunciones totales  
 2020-03-18    fecha de inicio  
 1420.88      casos por 100mil habitantes  
 1.94 %      de casos a nivel nacional

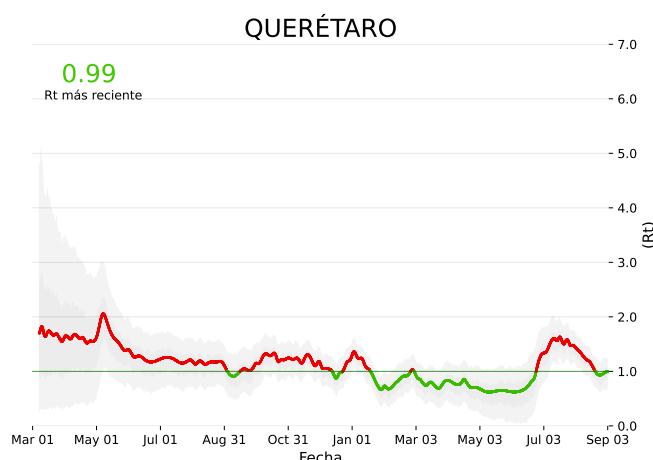


45684      casos totales  
 4319      defunciones totales  
 2020-03-09    fecha de inicio  
 2234.97      casos por 100mil habitantes  
 1.29 %      de casos a nivel nacional

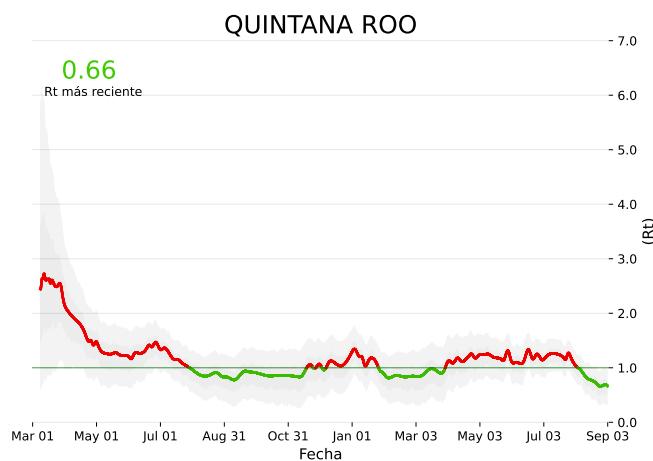




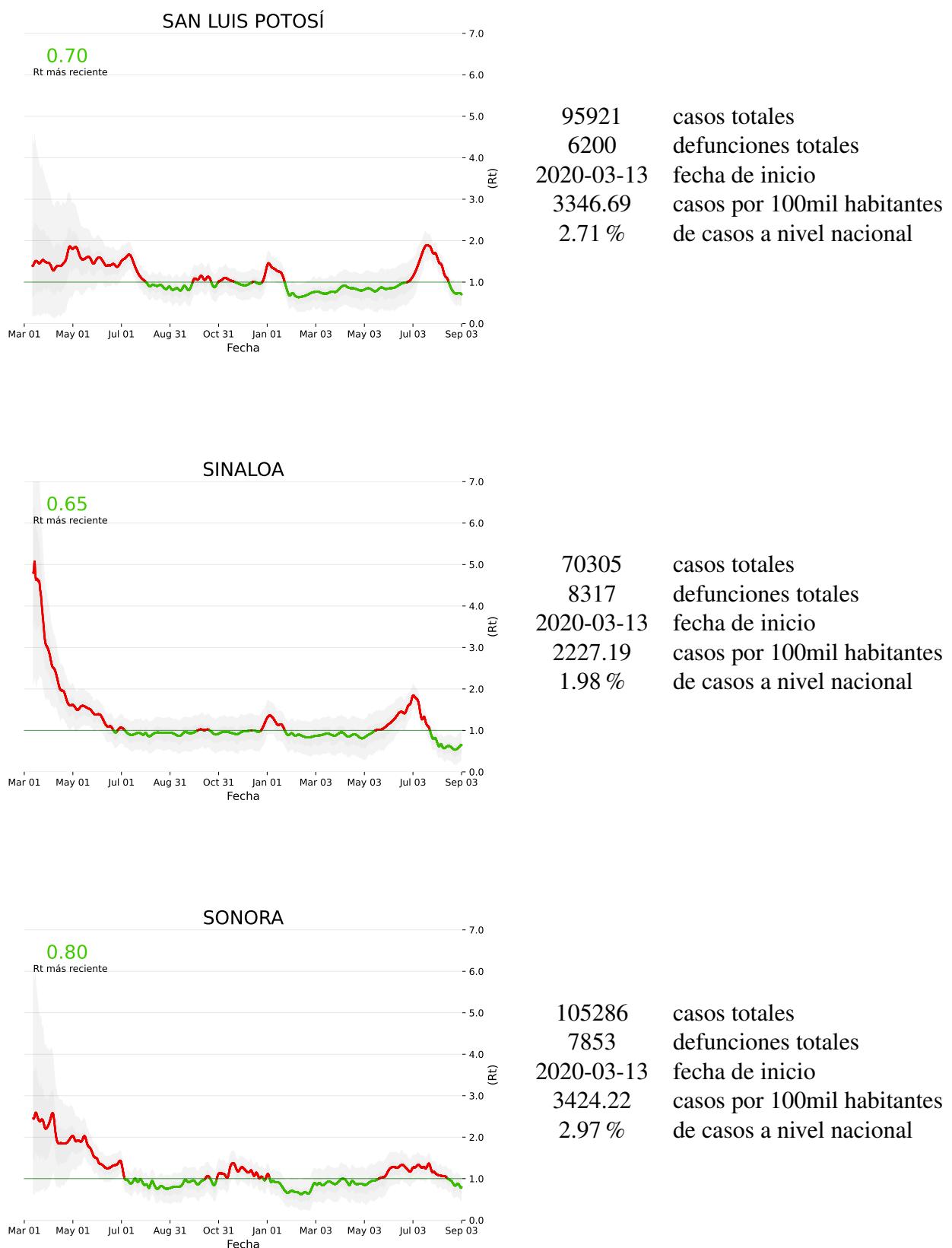
114055      casos totales  
 13966      defunciones totales  
 2020-03-11    fecha de inicio  
 1726.94     casos por 100mil habitantes  
 3.22 %      de casos a nivel nacional

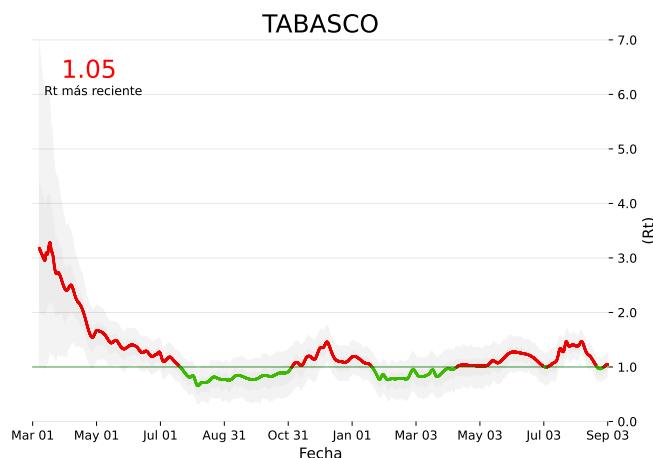


90271      casos totales  
 5109        defunciones totales  
 2020-03-10   fecha de inicio  
 3959.88     casos por 100mil habitantes  
 2.55 %      de casos a nivel nacional

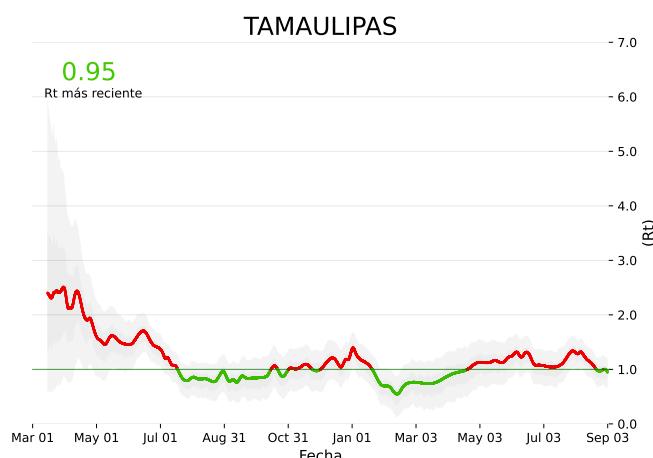


56639      casos totales  
 3885        defunciones totales  
 2020-03-11   fecha de inicio  
 3286.74     casos por 100mil habitantes  
 1.60 %      de casos a nivel nacional

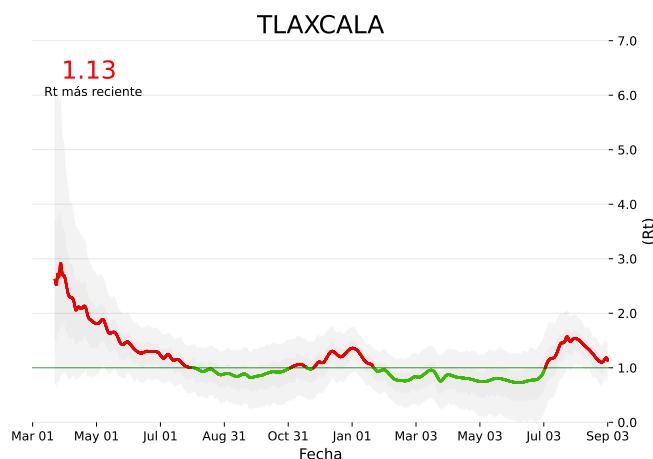




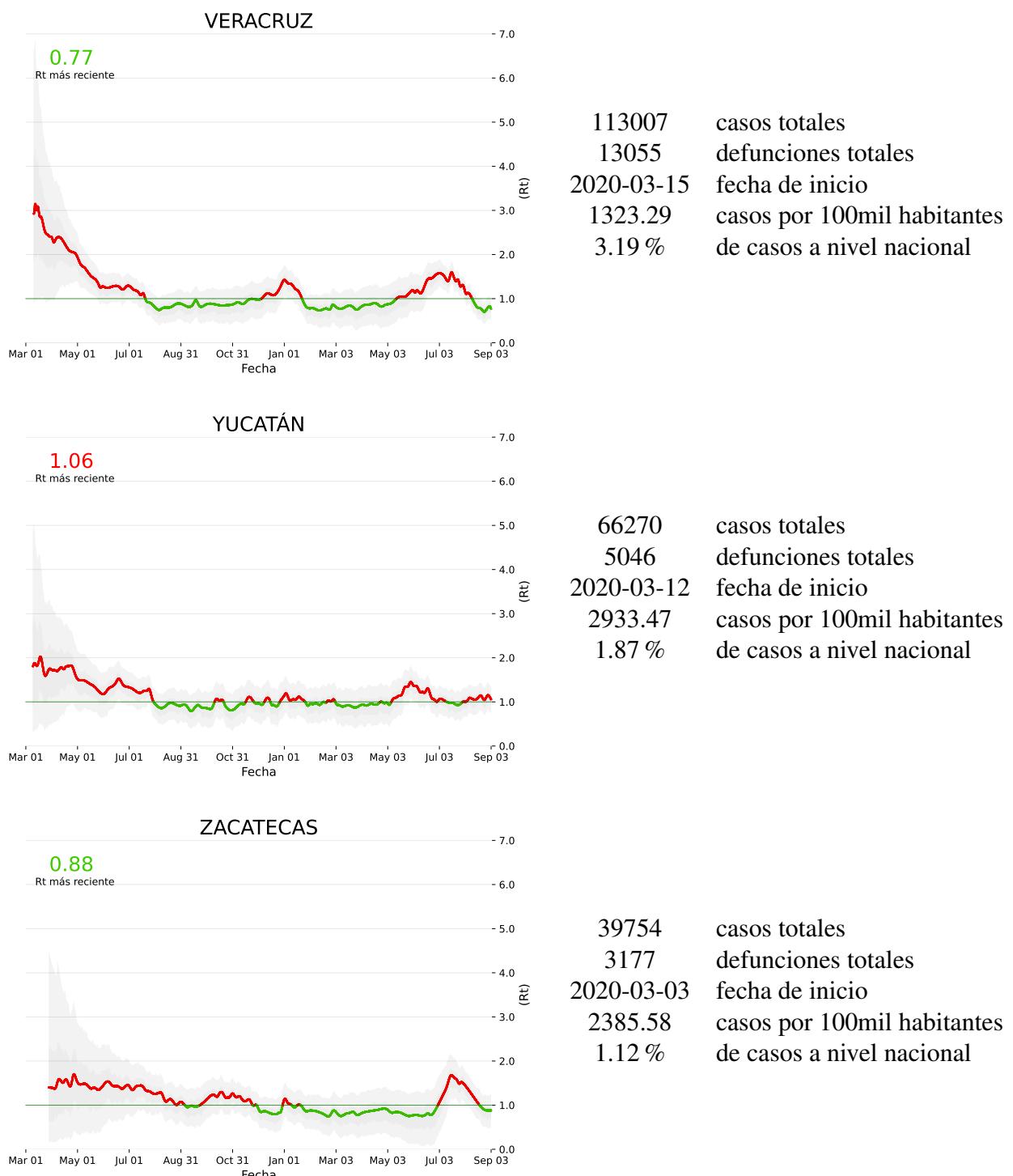
126128      casos totales  
 4995      defunciones totales  
 2020-03-04      fecha de inicio  
 4903.34      casos por 100mil habitantes  
 3.56 %      de casos a nivel nacional



92760      casos totales  
 6136      defunciones totales  
 2020-03-15      fecha de inicio  
 2540.95      casos por 100mil habitantes  
 2.62 %      de casos a nivel nacional



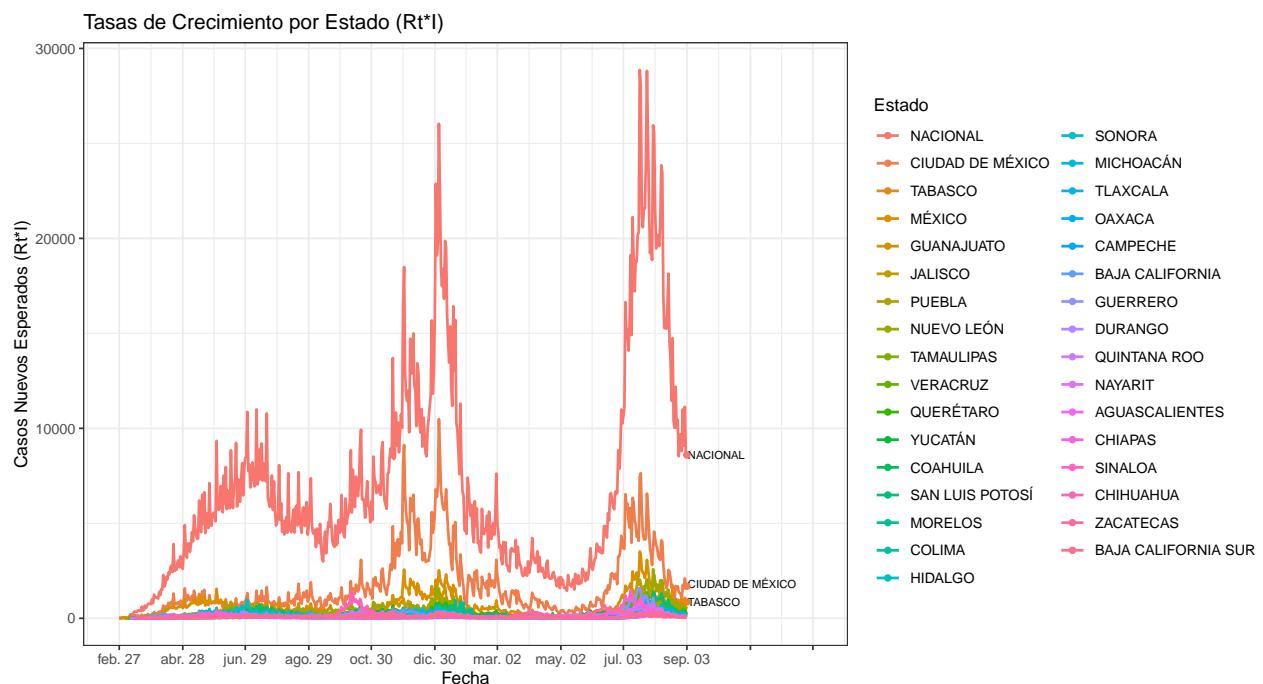
27271      casos totales  
 2789      defunciones totales  
 2020-03-06      fecha de inicio  
 1976.14      casos por 100mil habitantes  
 0.77 %      de casos a nivel nacional



## 2.1 Tasa de Crecimiento ( $R_t * I$ ) por Estado

**Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 15 de Septiembre de 2021**

La figura 2.1 muestra la tasa de crecimiento ( $R_t * I$ ) a lo largo del tiempo, es decir, los casos nuevos esperados por día para la tasa  $R_t$  estimada y el número de casos nuevos registrados ese día ( $I$ ). Se muestra la comparación con la curva nacional (obtenida a partir de los datos por Estado) para observar la contribución de cada uno de los Estados a la tasa de crecimiento nacional.



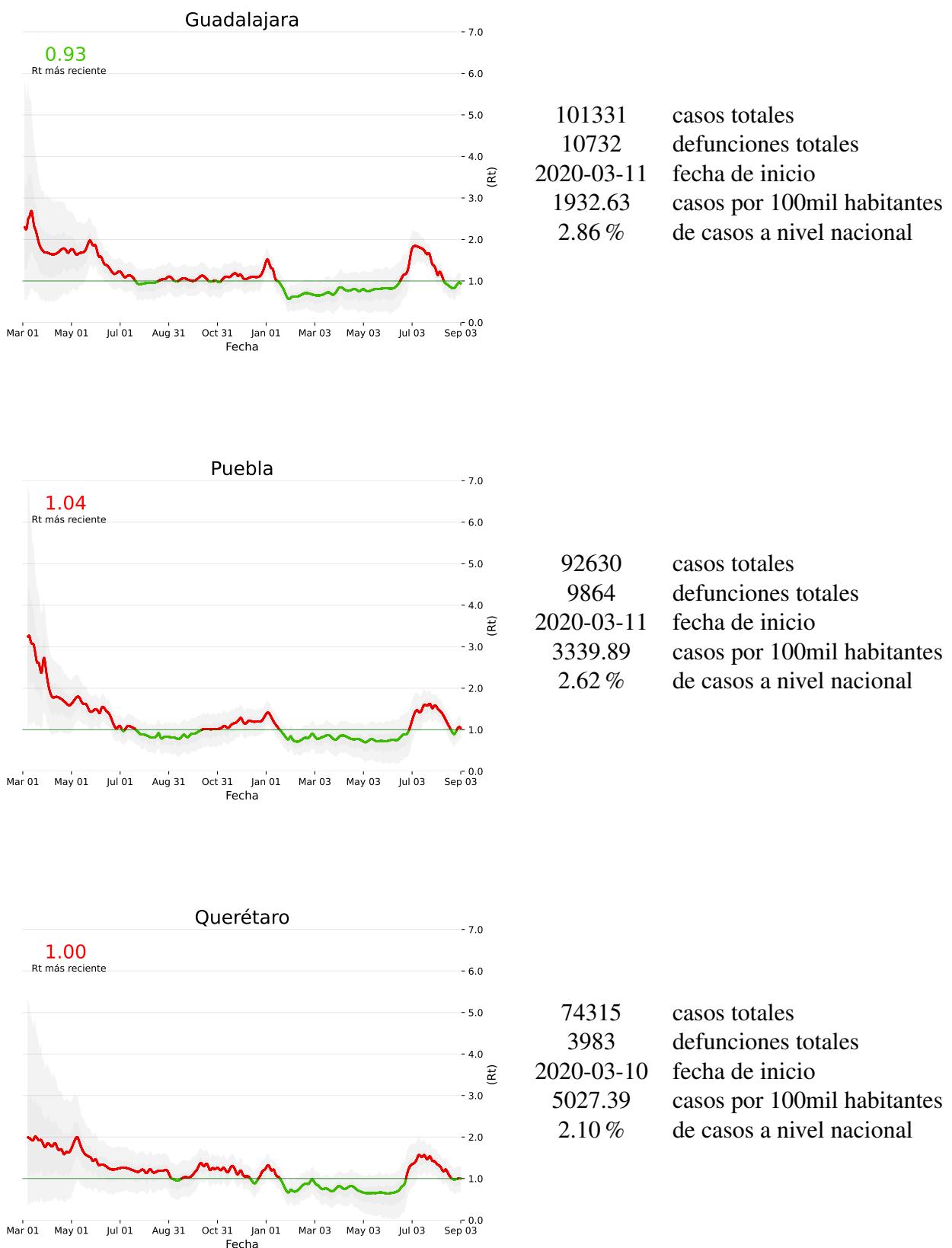
**Fig. 2.1:** Tasa de Crecimiento ( $R_t * I$ ) por Estado.

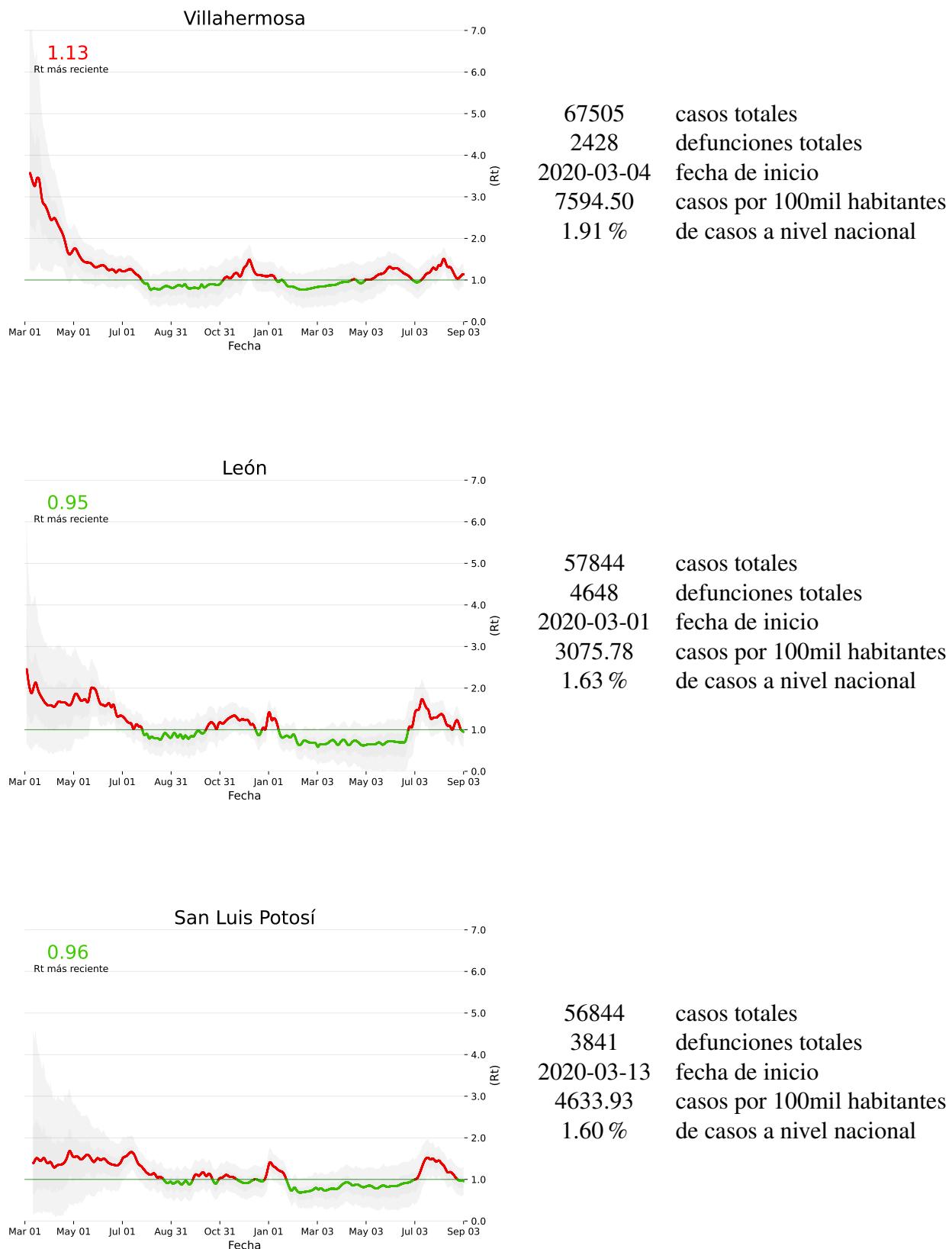
### **3. Estimaciones de $R_t$ por Zona Metropolitana**

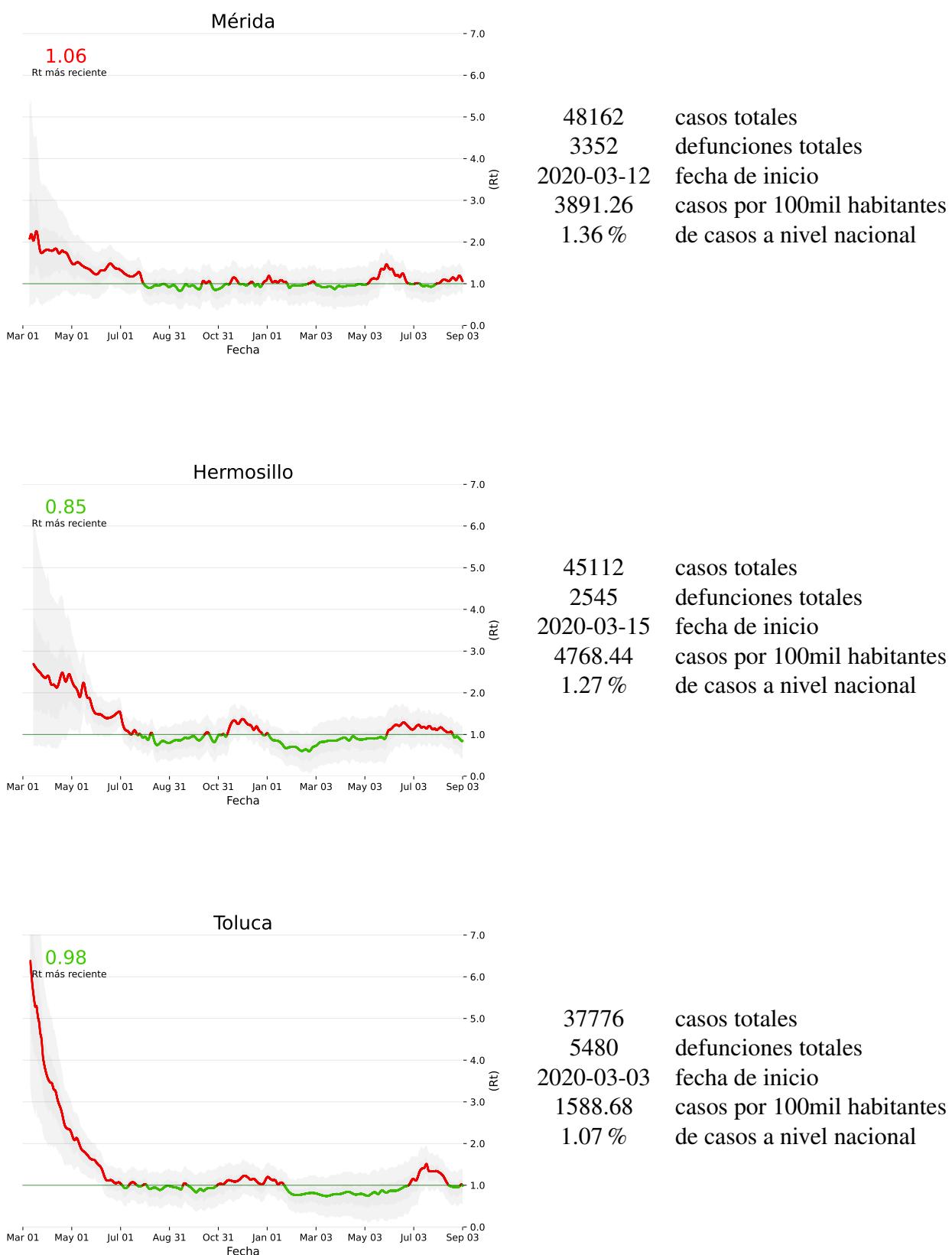
**Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 15 de Septiembre de 2021**

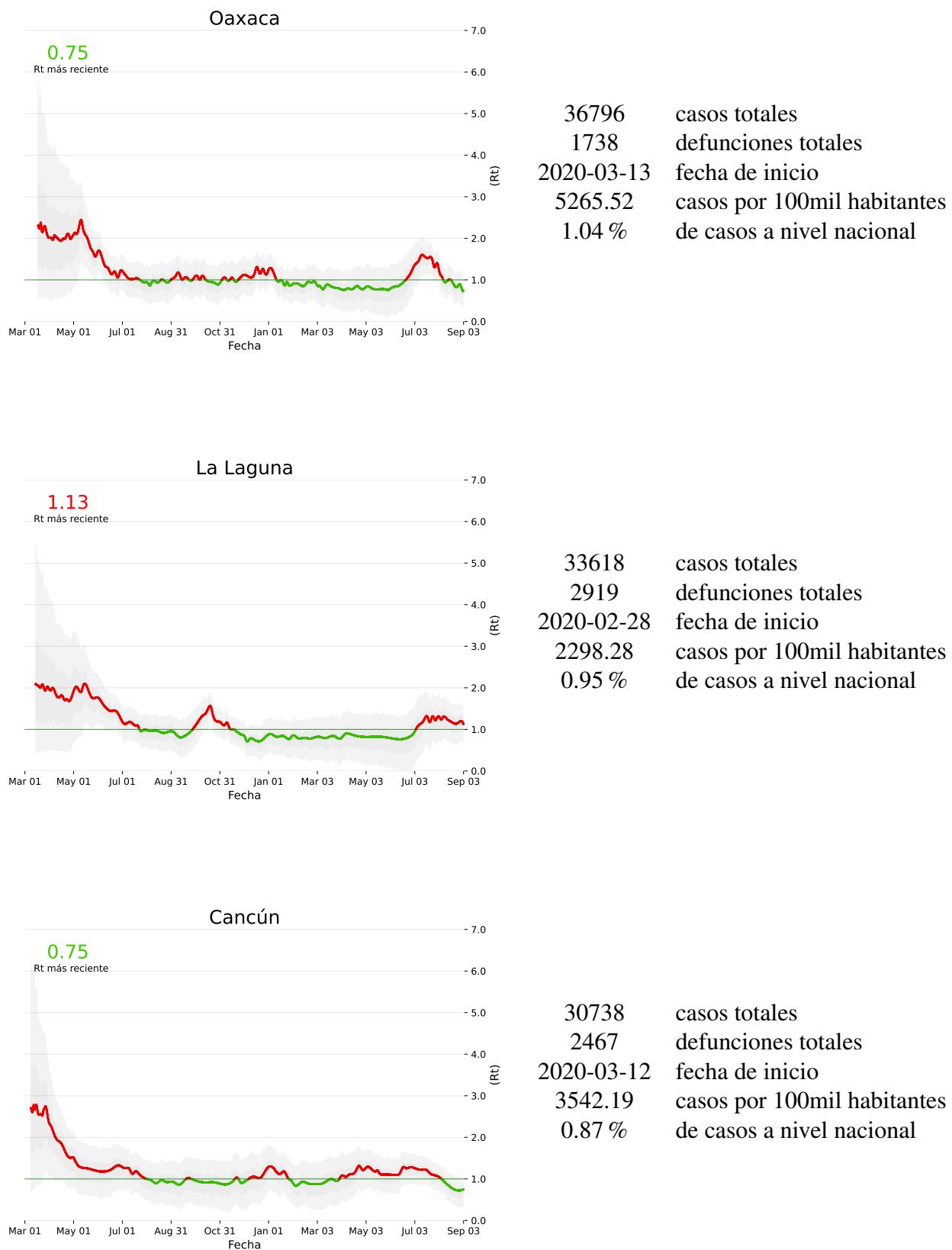
A continuación se muestran las gráficas del comportamiento de la tasa  $R_t$  a lo largo del tiempo para las 25 Zonas Metropolitanas con mayor número de casos de COVID-19. La fecha inicial se toma a partir de la cual existen datos suficientes para hacer la estimación, mientras que la fecha final corresponde al 03 de Septiembre de 2021.

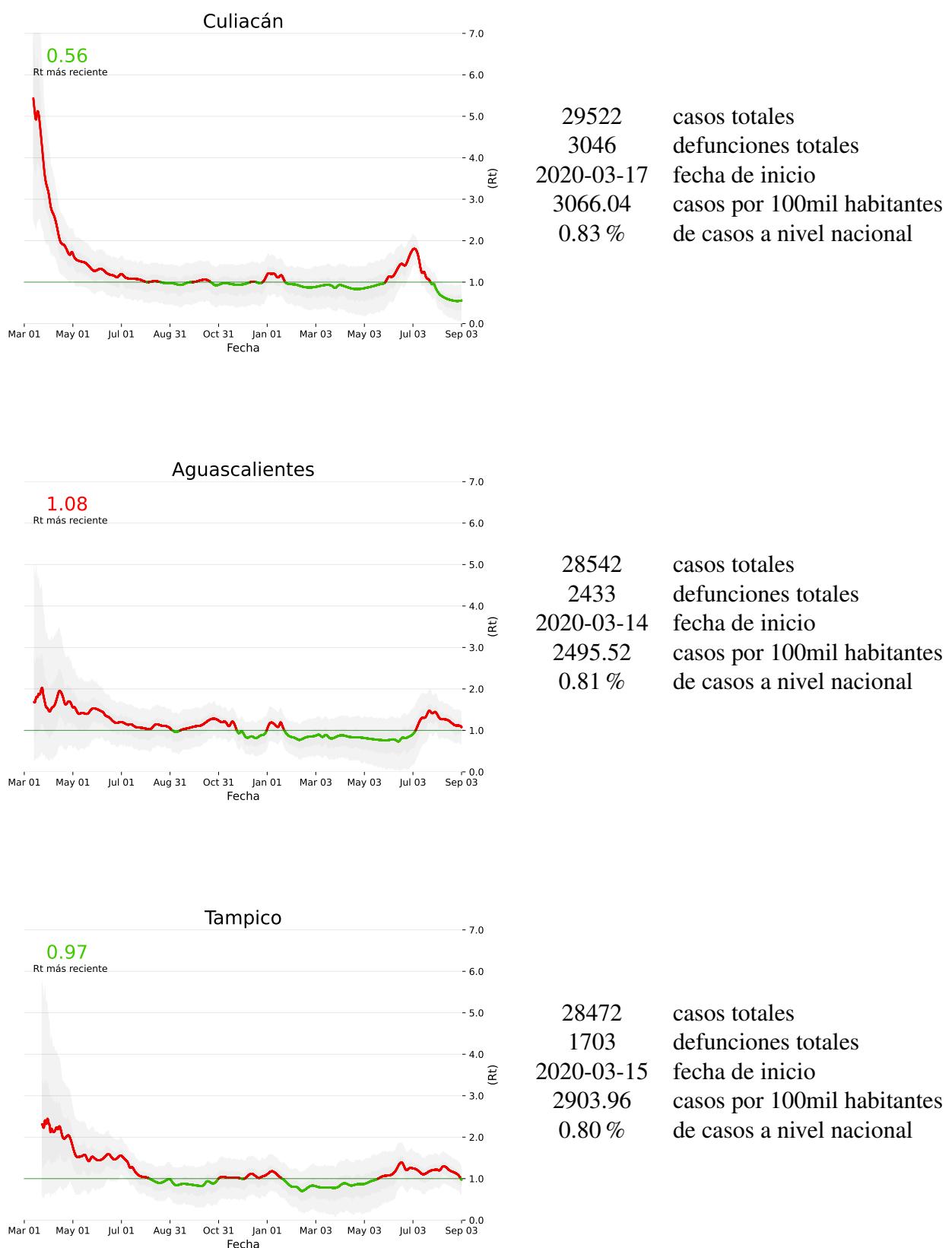


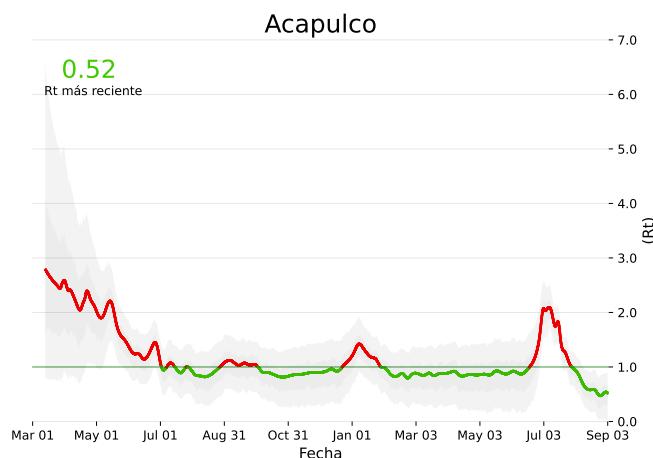




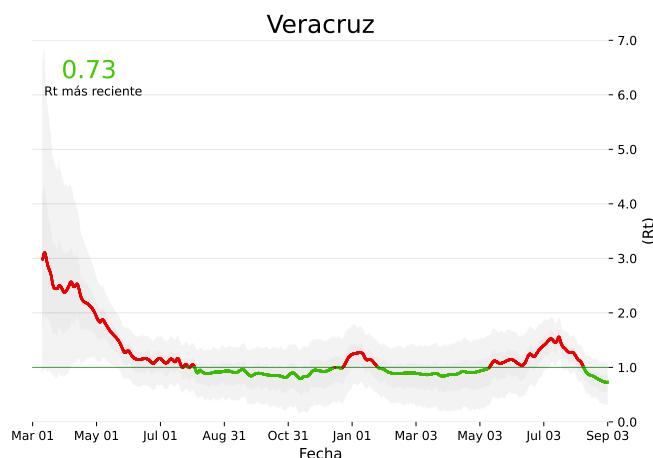




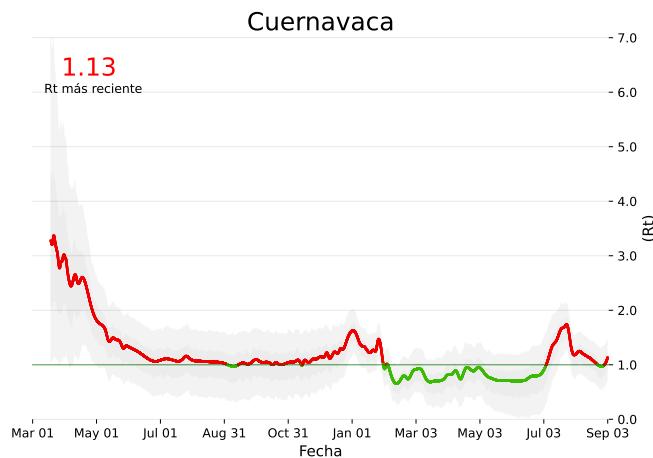




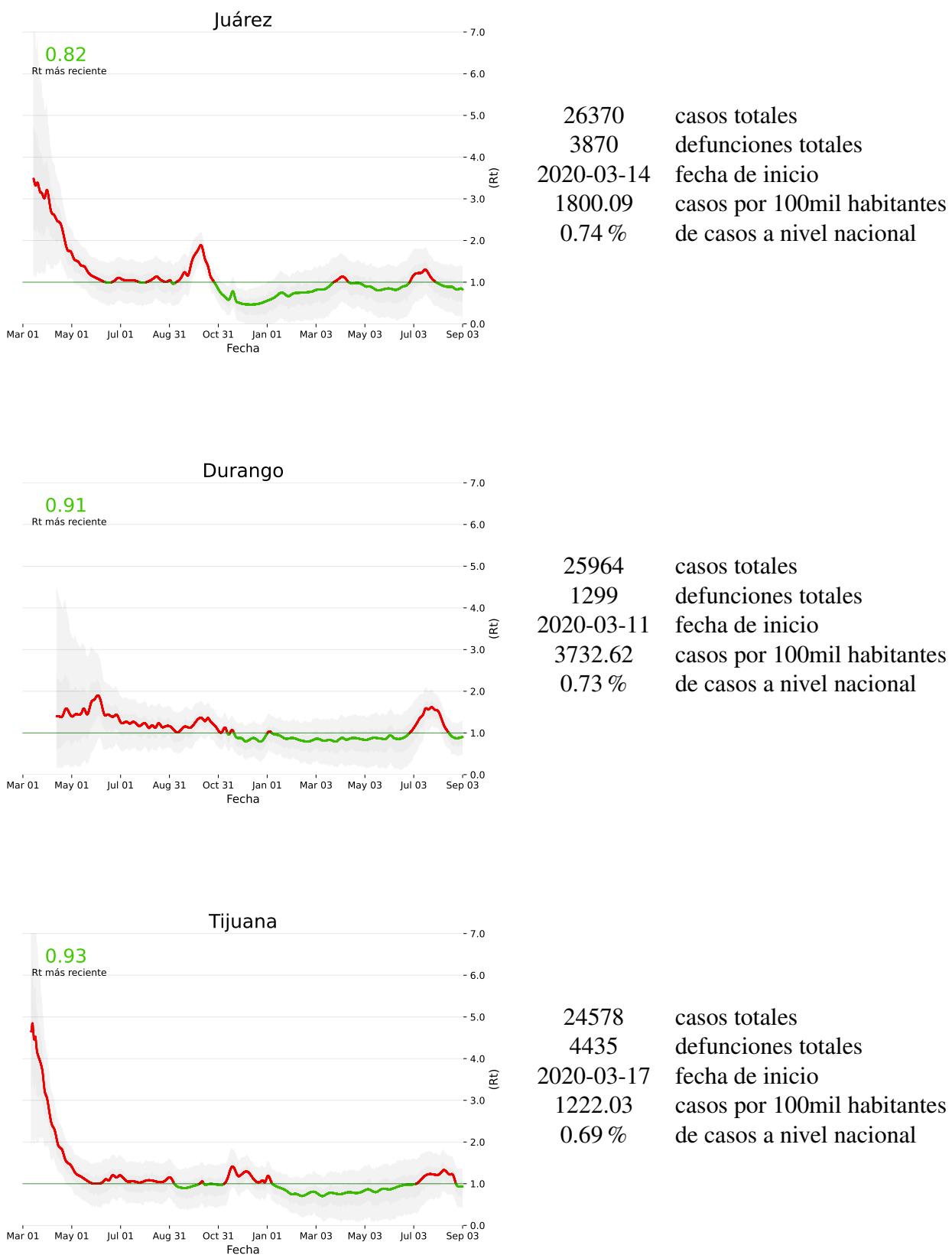
28445      casos totales  
2699      defunciones totales  
2020-03-13      fecha de inicio  
3092.77      casos por 100mil habitantes  
0.80 %      de casos a nivel nacional



27465      casos totales  
2667      defunciones totales  
2020-03-15      fecha de inicio  
2871.52      casos por 100mil habitantes  
0.78 %      de casos a nivel nacional



27403      casos totales  
2184      defunciones totales  
2020-03-14      fecha de inicio  
2586.36      casos por 100mil habitantes  
0.77 %      de casos a nivel nacional

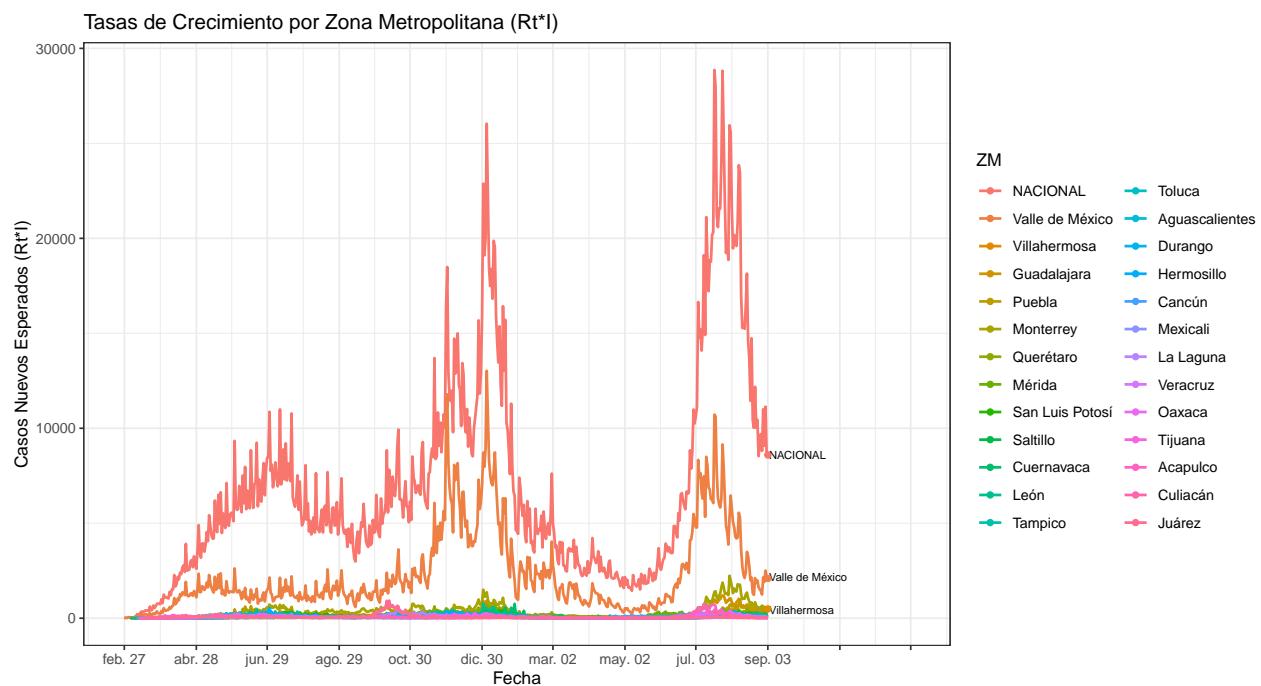




### 3.1 Tasa de Crecimiento ( $R_t * I$ ) por Zona Metropolitana

**Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 15 de Septiembre de 2021**

La figura 3.1 muestra la tasa de crecimiento ( $R_t * I$ ) a lo largo del tiempo para Zonas Metropolitanas, es decir, los casos nuevos esperados por día para la tasa  $R_t$  estimada y el número de casos nuevos registrados ese día ( $I$ ). Se muestra la comparación con la curva nacional (obtenida a partir de los datos por Estado) para observar la contribución de cada una de las Zonas Metropolitanas a la tasa de crecimiento nacional.



**Fig. 3.1:** Tasa de Crecimiento ( $R_t * I$ ) por Zona Metropolitana.

## 4. Metodología de Estimación de $R_t$

## 4.1 Metodología para la Estimación del $R_t$ .

A continuación se resume la metodología utilizada para estimar el valor de la tasa de reproducción  $R_t$  cada día por Estados y Zonas Metropolitanas de la República Mexicana. La cual está basada en la propuesta del sitio *Estimating COVID-19's Rt in Real-Time* [1], que estima los valores de  $R_t$  para los Estados Unidos de América.

Esta tasa de reproducción es una medida de la rapidez con la que se transmite la enfermedad COVID-19, pues se refiere al número promedio de personas que son infectadas por una persona infecciosa. Si el valor de  $R_t$  es superior a 1.0, la enfermedad continúa su expansión, mientras que si es menor a 1.0 la expansión se está deteniendo.

### 4.1.1 Datos de entrada para la estimación

Los datos a partir de los cuales se estiman los valores de  $R_t$  corresponden a la información oficial provista por el Gobierno de México, a través de su portal de acceso abierto, respecto a los casos confirmados de COVID-19 en el país (ver el sitio).

Mediante estos datos se determina la serie de nuevos casos confirmados por día para cada uno de los estados, tomando como fecha el día de presentación de los síntomas de cada individuo. Se descartan los datos correspondientes a los últimos 7 días y se aplica un suavizado con promedio móvil ponderado. La siguiente gráfica muestra los nuevos casos diarios para la Ciudad de México hasta el 26 de abril, a manera de ejemplo.



### 4.1.2 Estimación de la tasa de reproducción efectiva $R_t$

Se estima la probabilidad a posteriori  $P(R_t|k)$  utilizando el Teorema de Bayes, donde  $t$  es el día y  $k$  es el número de casos nuevos de COVID-19 en ese día:

$$P(R_t|k) = \frac{P(k|R_t) \cdot P(R_t)}{P(k)} \quad (4.1)$$

Para la verosimilitud  $P(k|R_t)$  se propone una distribución Poisson:

$$P(k|R_t) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \quad (4.2)$$

con parámetro  $\lambda = k_{t-1}e^{\gamma(R_{t-1})}$ , que depende del número de casos nuevos del día anterior y del parámetro  $\gamma = 1/12$ , pues el intervalo serial es de 12 días.

La probabilidad a priori  $P(R_t)$  se calcula a partir de la probabilidad a priori del día anterior  $P(R_{t-1})$ , asumiendo que  $P(R_t|R_{t-1})$  sigue una distribución normal centrada en  $R_{t-1}$ , es decir  $N(R_{t-1}, \sigma)$ . Para cada estado o zona metropolitana se selecciona el valor de  $\sigma$  que maximiza la verosimilitud de  $P(k|\sigma)$  para un rango de valores propuesto.

Para estimar la posterior  $P(R_t|k)$  del día  $t$ , se fija  $k$ , pues se conoce el número de nuevos casos en el día  $t$ , y se varía  $R_t$  en un rango propuesto entre 0 y 12. Se repite el proceso de manera iterativa para calcular la probabilidad posterior para cada día de la serie. La siguiente figura muestra las distribuciones posteriores diarias obtenidas para la Ciudad de México.



Para cada estado y zona metropolitana se seleccionó un valor de  $R_0$  inicial, a partir del cuál se inicia la estimación del  $R_t$ :

Estado	$R_0$	Zona Metropolitana	$R_0$
AGUASCALIENTES	1.6	Valle de México	7.0
BAJA CALIFORNIA	4.8	Monterrey	2.0
BAJA CALIFORNIA SUR	1.5	Guadalajara	2.3
CAMPECHE	1.8	Puebla	3.3
COAHUILA	2.1	Querétaro	2.0
COLIMA	1.5	Villahermosa	3.6
CHIAPAS	2.3	León	2.5
CHIHUAHUA	3.2	San Luis Potosí	1.4
CIUDAD DE MÉXICO	7.0	Mérida	2.1
DURANGO	1.4	Hermosillo	2.7
GUANAJUATO	2.2	Toluca	6.5
GUERRERO	2.2	Oaxaca	2.3
HIDALGO	2.2	La Laguna	2.1
JALISCO	2.3	Cancún	2.7
MÉXICO	6.0	Culiacán	5.5
MICHOACÁN	1.7	Aguascalientes	1.7
MORELOS	2.8	Tampico	2.3
NAYARIT	1.9	Acapulco	2.8
NUEVO LEÓN	2.2	Veracruz	3.0
OAXACA	1.9	Cuernavaca	3.3
PUEBLA	3.1	Juárez	3.5
QUERÉTARO	1.7	Durango	1.4
QUINTANA ROO	2.5	Tijuana	4.8
SAN LUIS POTOSÍ	1.4	Saltillo	2.1
SINALOA	5.0	Mexicali	4.8
SONORA	2.5		
TABASCO	3.2		
TAMAULIPAS	2.4		
TLAXCALA	2.6		
VERACRUZ	3.0		
YUCATÁN	1.8		
ZACATECAS	1.4		

Tabla 4.1

Finalmente para cada día se calculan los **intervalos de máxima densidad (HDI)** para el 50 % y el 90 %, así como el valor de máxima verosimilitud (ML), a partir de la posterior  $P(R_t|k)$ . La

siguiente tabla muestra los valores estimados para 5 días de la Ciudad de México, a manera de ejemplo.

	ML	Low_50	High_50	Low_90	High_90
date					
2020-04-22	0.81	0.59	0.92	0.40	1.19
2020-04-23	0.79	0.59	0.92	0.38	1.18
2020-04-24	0.80	0.57	0.91	0.38	1.19
2020-04-25	0.81	0.59	0.93	0.37	1.19
2020-04-26	0.82	0.62	0.96	0.38	1.21

## Referencias

- [1] Systrom K. (2020). Estimating COVID-19's Rt in Real-Time. Del sitio <https://github.com/k-sys/covid-19/blob/master/Realtime%20R0.ipynb>
- [2] Systrom K., Vladeck T. & Krieger M. (2020). Rt Covid-19. Del sitio <https://rt.live/>