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

11 de Noviembre de 2020

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.

11 de Noviembre de 2020

Tabla de Contenidos

1 Estimaciones de R_t en Orden Ascendente 4

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

2 Estimaciones de R_t por Estado 7

2.1 Tasa de Crecimiento ($R_t * I$) por Estado 19

3 Estimaciones de R_t por Zona Metropolitana 20

3.1 Tasa de Crecimiento ($R_t * I$) por Zona Metropolitana 30

4 Metodología de Estimación de R_t 31

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 11 de Noviembre de 2020

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 05 de Noviembre de 2020. 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 %.

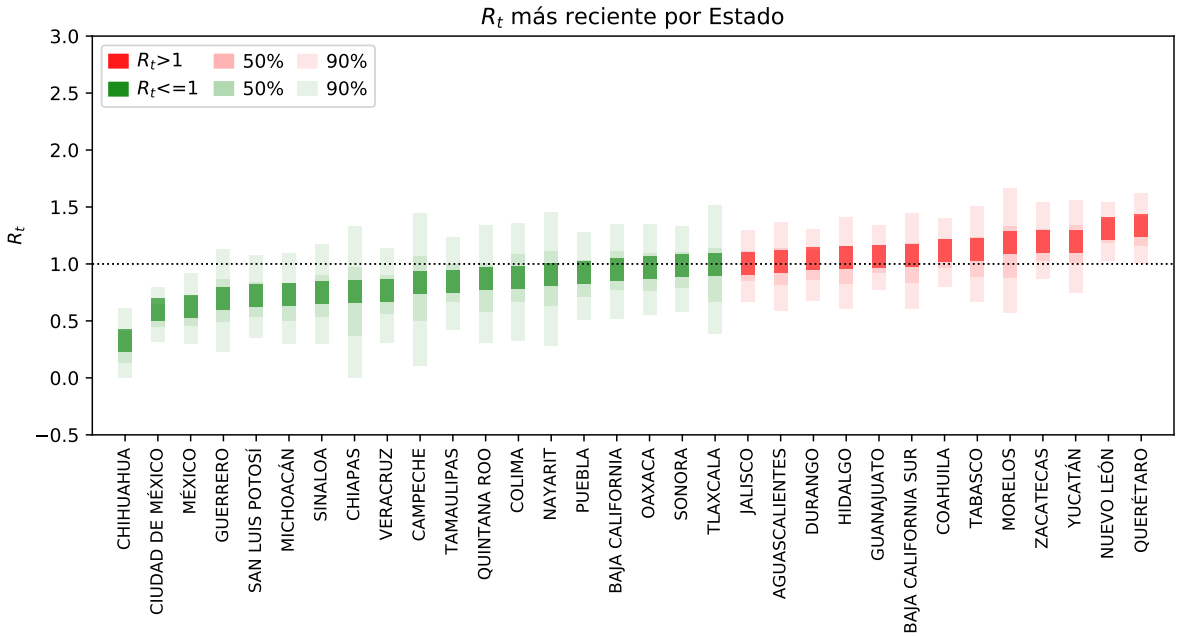


Fig. 1.1: Valor de R_t más reciente para los 32 estados de México.

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 11 de Noviembre de 2020

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 05 de Noviembre de 2020. 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 %.

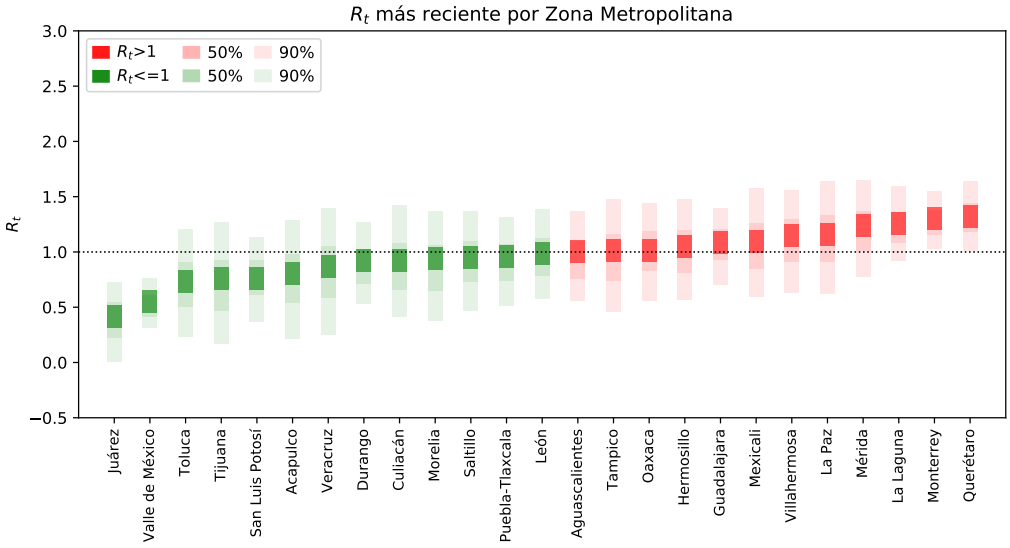


Fig. 1.2: Valor de R_t más reciente para las 25 Zonas Metropolitanas con mayor número de casos.

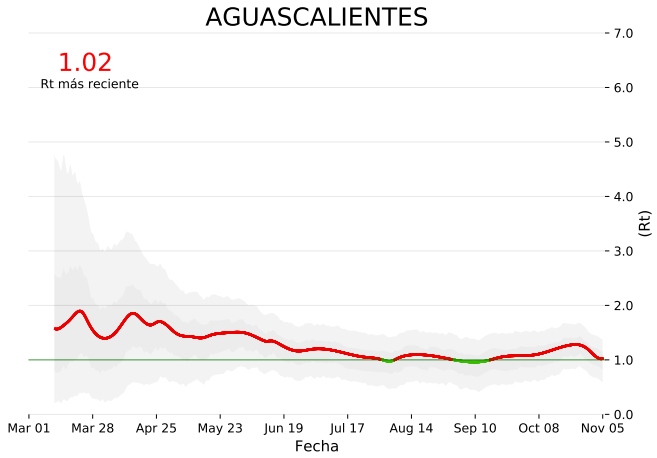
CONACYT

CIMAT

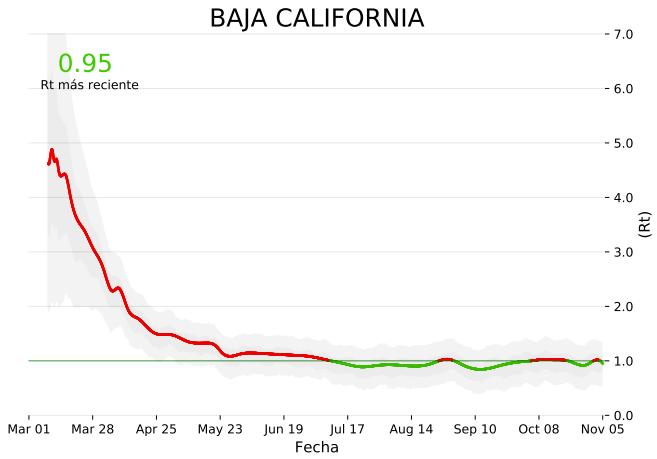
2. Estimaciones de R_t por Estado

Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 11 de Noviembre de 2020

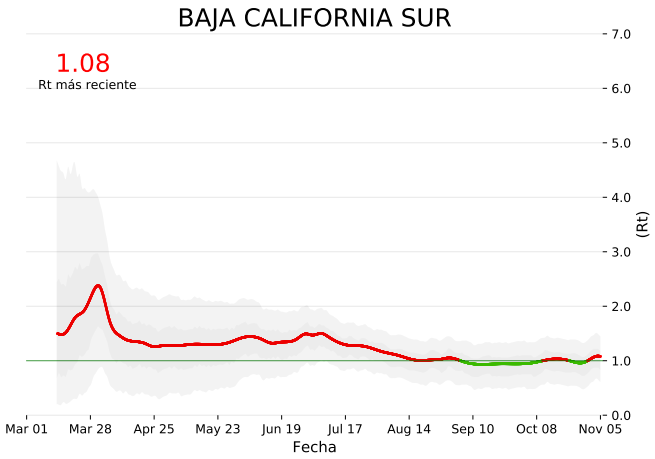
A contiuación se muestran las gráficas del comportamiento de la tasa R_t a lo largo del tiempo para los 32 estados de México. La fecha inicial se toma a partir de la cual existen datos suficientes para hacer la estimación, mientras que la fecha final corresponde al 05 de Noviembre de 2020, es decir, 7 días anteriores de la fecha de elaboración de este reporte.



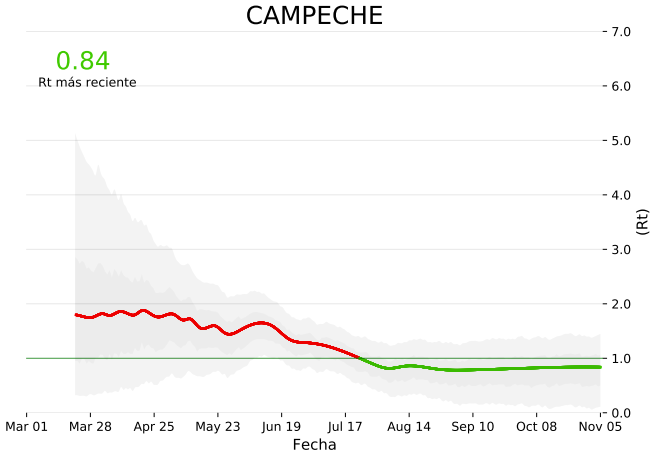
11038	casos totales
914	defunciones totales
2020-03-14	fecha de inicio
769.39	casos por 100mil habitantes
1.12 %	de casos a nivel nacional



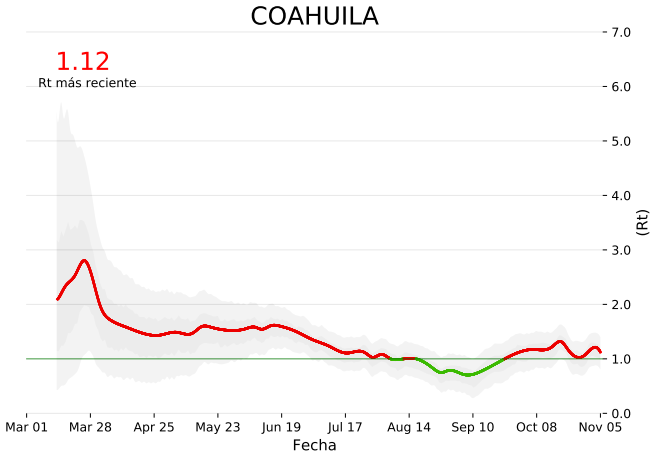
24196	casos totales
4026	defunciones totales
2020-03-03	fecha de inicio
665.66	casos por 100mil habitantes
2.45 %	de casos a nivel nacional



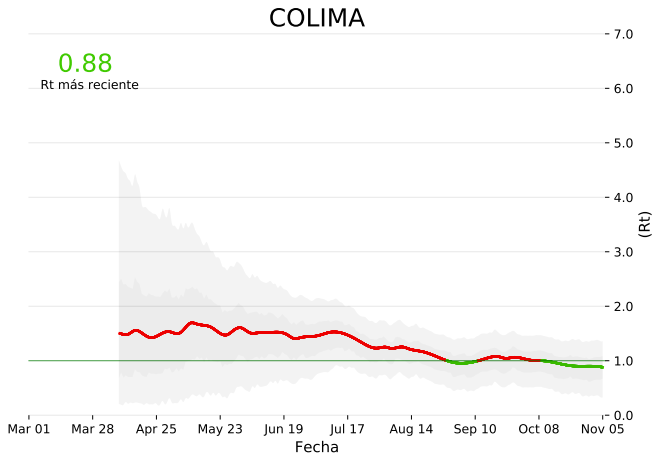
13289	casos totales
625	defunciones totales
2020-03-17	fecha de inicio
1651.41	casos por 100mil habitantes
1.35 %	de casos a nivel nacional



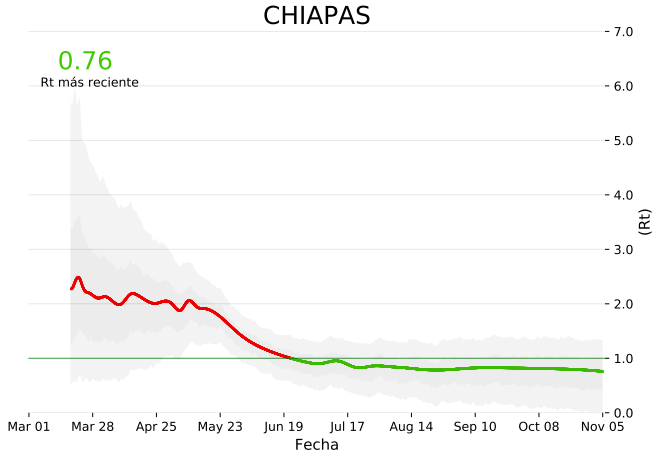
6593	casos totales
860	defunciones totales
2020-03-08	fecha de inicio
658.89	casos por 100mil habitantes
0.67 %	de casos a nivel nacional



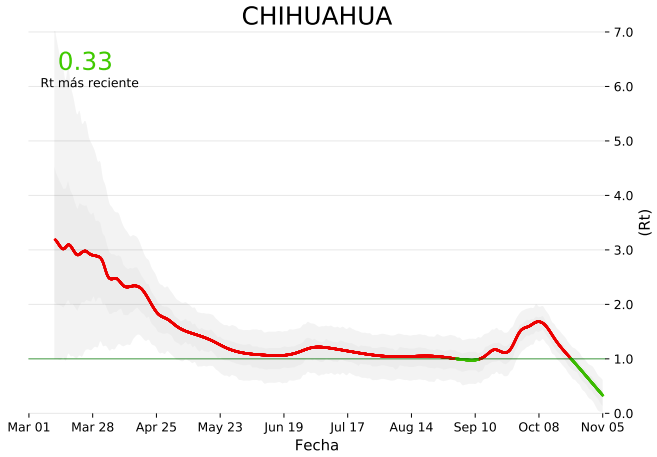
36942	casos totales
2707	defunciones totales
2020-02-28	fecha de inicio
1147.72	casos por 100mil habitantes
3.75 %	de casos a nivel nacional



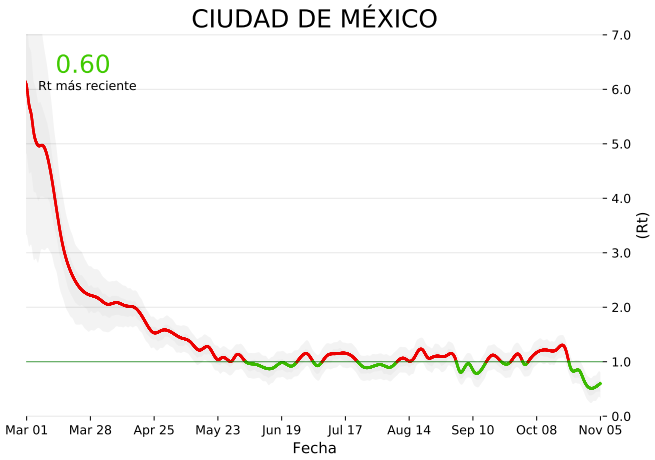
6893	casos totales
724	defunciones totales
2020-03-14	fecha de inicio
877.92	casos por 100mil habitantes
0.70 %	de casos a nivel nacional



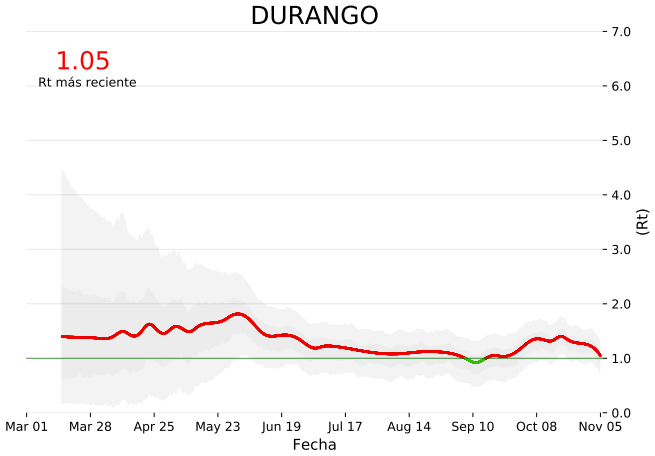
7604	casos totales
1170	defunciones totales
2020-02-29	fecha de inicio
132.70	casos por 100mil habitantes
0.77 %	de casos a nivel nacional



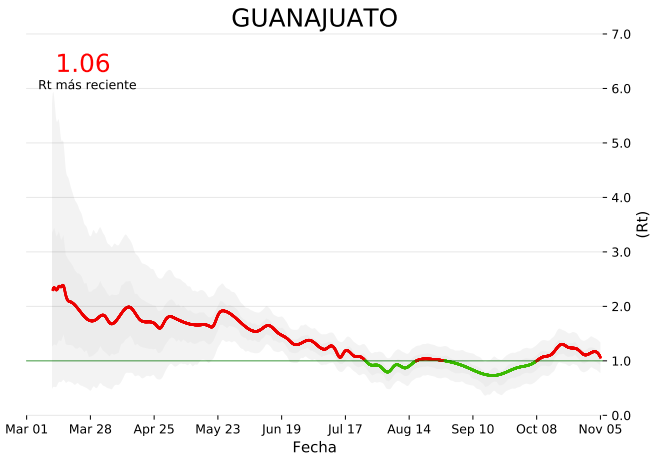
23682	casos totales
2543	defunciones totales
2020-03-10	fecha de inicio
622.97	casos por 100mil habitantes
2.40 %	de casos a nivel nacional



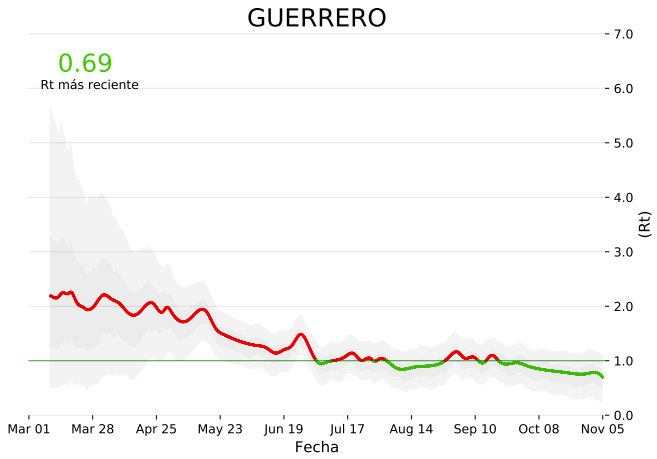
174127	casos totales
12154	defunciones totales
2020-02-27	fecha de inicio
1930.74	casos por 100mil habitantes
17.66 %	de casos a nivel nacional



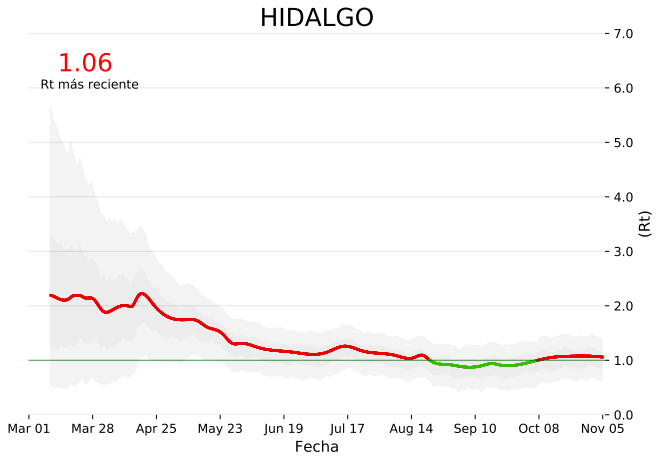
16851	casos totales
943	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
901.61	casos por 100mil habitantes
1.71 %	de casos a nivel nacional



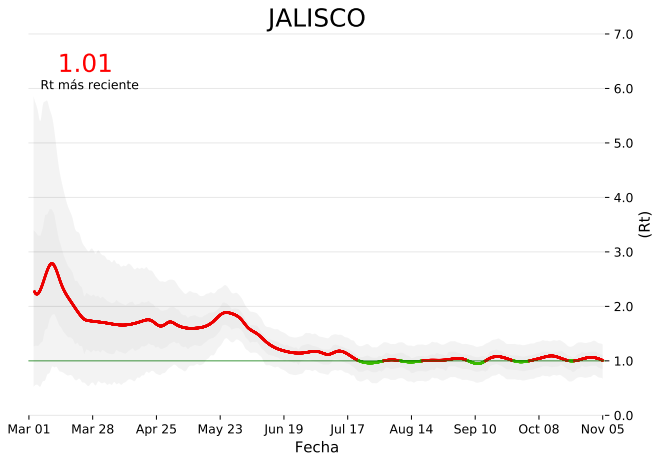
52941	casos totales
3584	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
850.02	casos por 100mil habitantes
5.37 %	de casos a nivel nacional



22756	casos totales
2345	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
622.25	casos por 100mil habitantes
2.31 %	de casos a nivel nacional

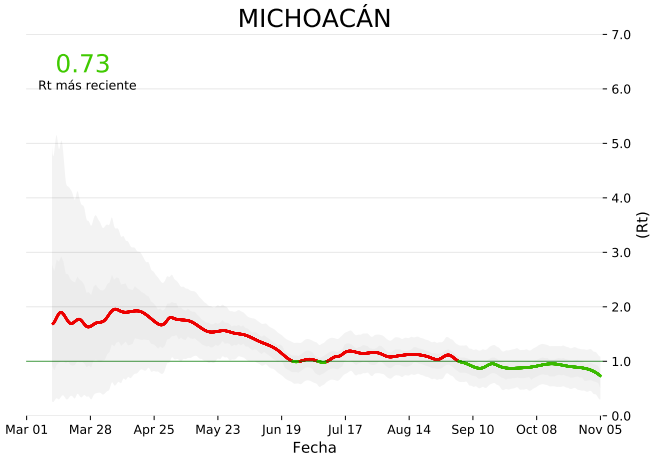


16898	casos totales
2438	defunciones totales
2020-02-27	fecha de inicio
547.50	casos por 100mil habitantes
1.71 %	de casos a nivel nacional

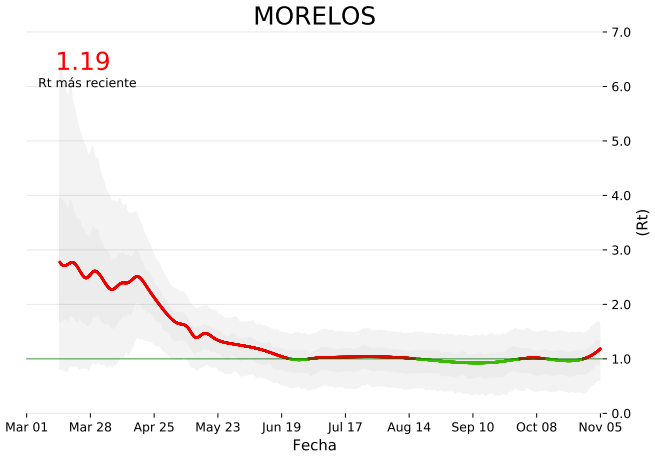


36854	casos totales
4388	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
438.23	casos por 100mil habitantes
3.74 %	de casos a nivel nacional

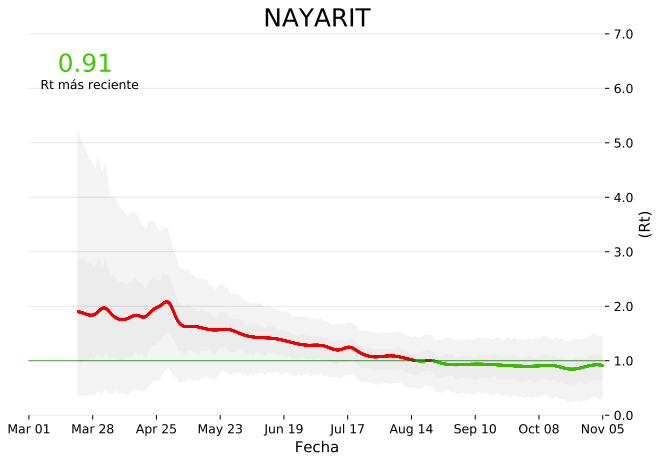
102163	casos totales
14476	defunciones totales
2020-02-28	fecha de inicio
586.21	casos por 100mil habitantes
10.36 %	de casos a nivel nacional



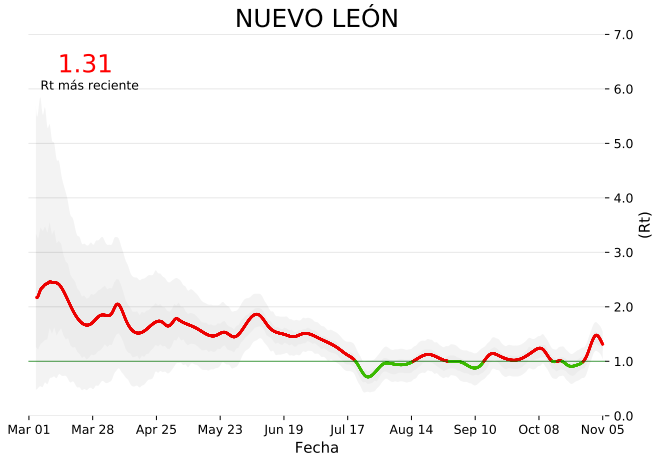
26353	casos totales
2137	defunciones totales
2020-03-18	fecha de inicio
546.13	casos por 100mil habitantes
2.67 %	de casos a nivel nacional



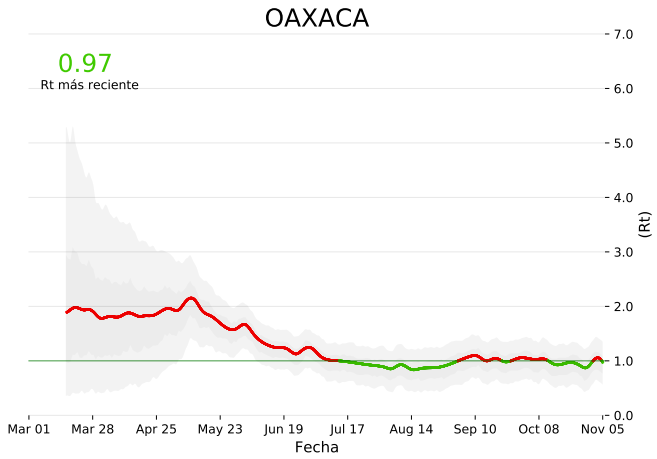
7235	casos totales
1245	defunciones totales
2020-03-09	fecha de inicio
353.95	casos por 100mil habitantes
0.73 %	de casos a nivel nacional



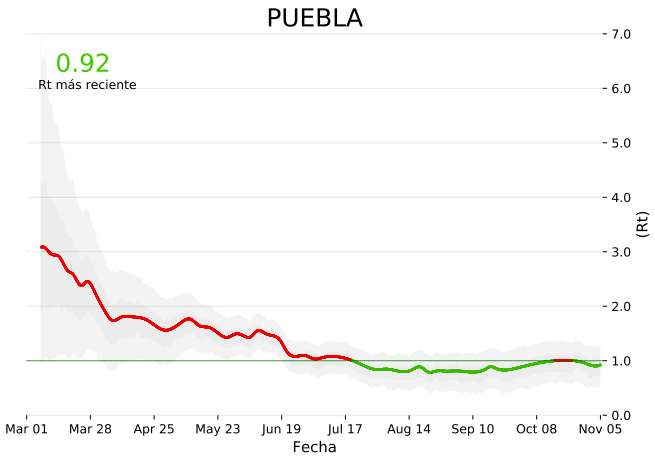
6897	casos totales
888	defunciones totales
2020-03-18	fecha de inicio
535.24	casos por 100mil habitantes
0.70 %	de casos a nivel nacional



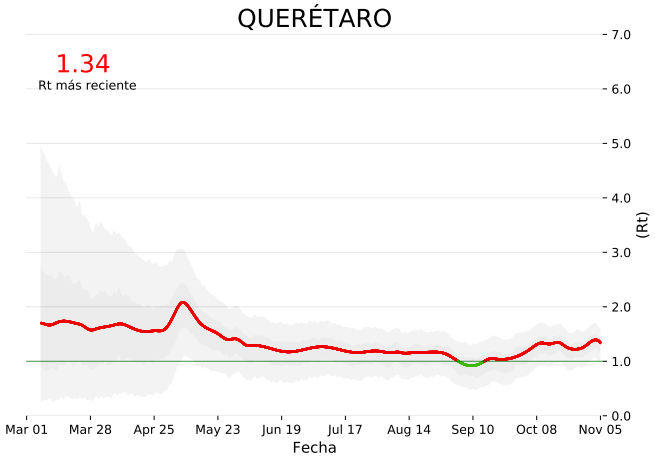
58760	casos totales
4159	defunciones totales
2020-03-10	fecha de inicio
1047.39	casos por 100mil habitantes
5.96 %	de casos a nivel nacional



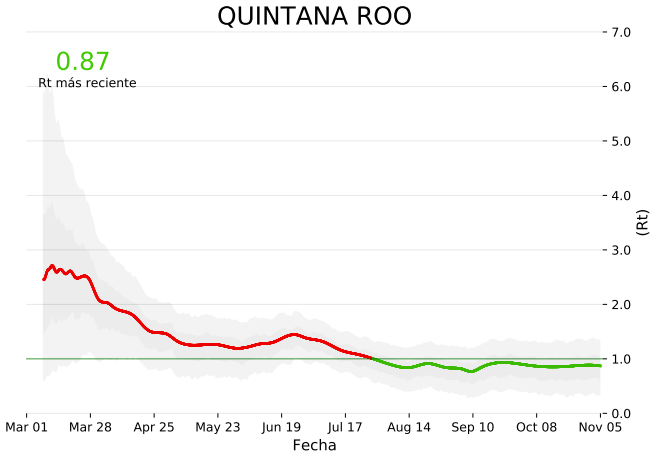
22506	casos totales
1790	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
543.15	casos por 100mil habitantes
2.28 %	de casos a nivel nacional



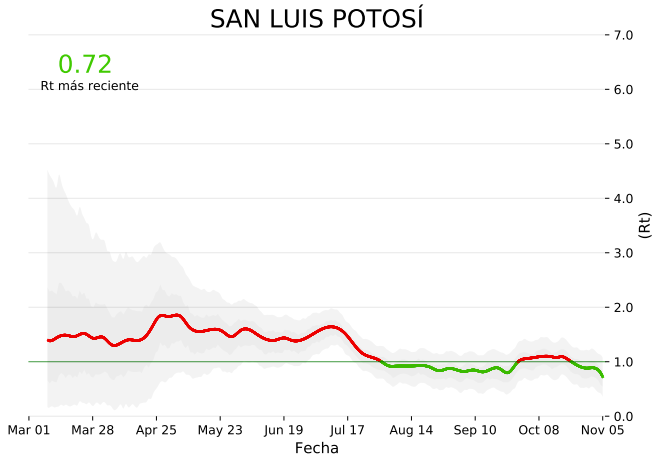
36999	casos totales
4903	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
560.21	casos por 100mil habitantes
3.75 %	de casos a nivel nacional



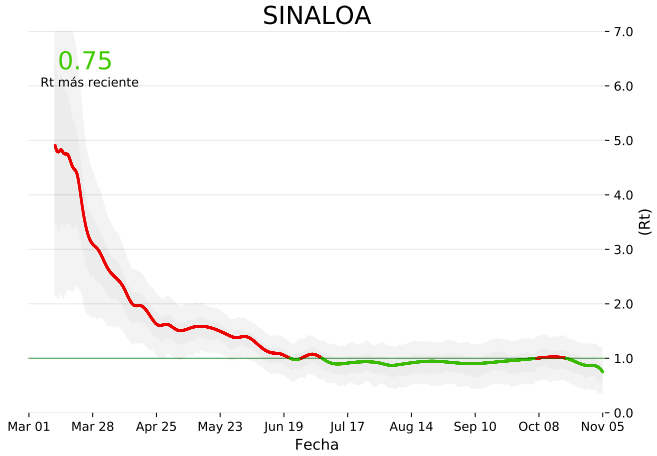
16524	casos totales
1238	defunciones totales
2020-03-10	fecha de inicio
724.85	casos por 100mil habitantes
1.68 %	de casos a nivel nacional



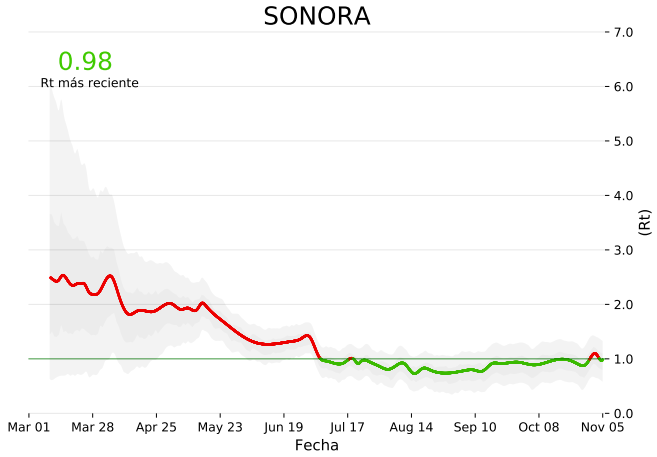
13775	casos totales
1864	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
799.36	casos por 100mil habitantes
1.40 %	de casos a nivel nacional



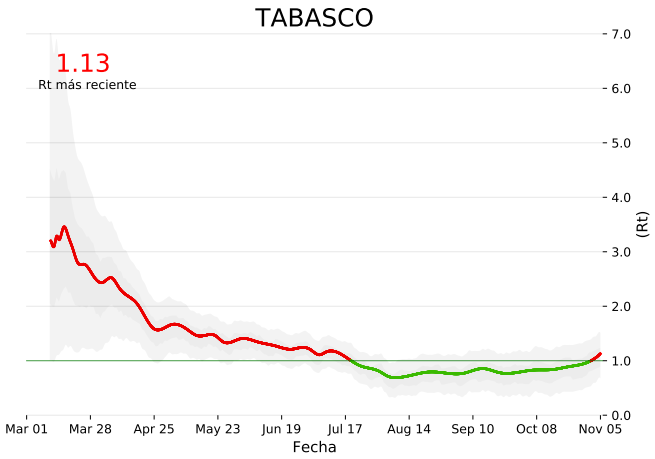
30869	casos totales
2216	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
1077.02	casos por 100mil habitantes
3.13 %	de casos a nivel nacional



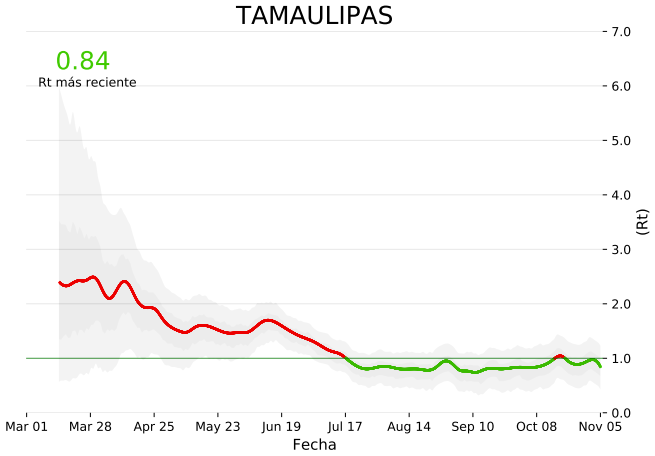
22766	casos totales
3733	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
721.20	casos por 100mil habitantes
2.31 %	de casos a nivel nacional



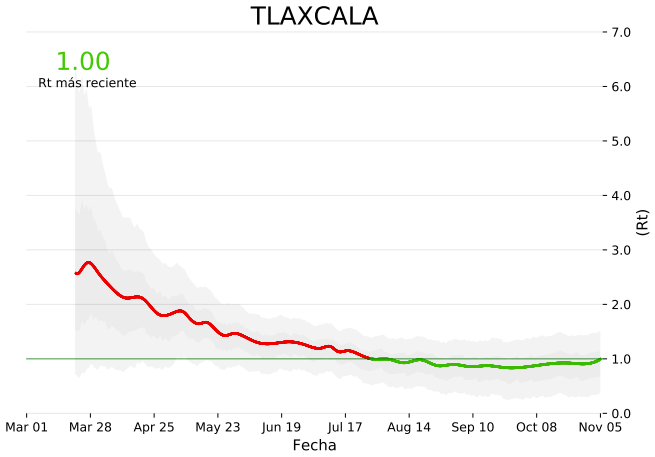
39883	casos totales
3218	defunciones totales
2020-02-27	fecha de inicio
1297.12	casos por 100mil habitantes
4.04 %	de casos a nivel nacional



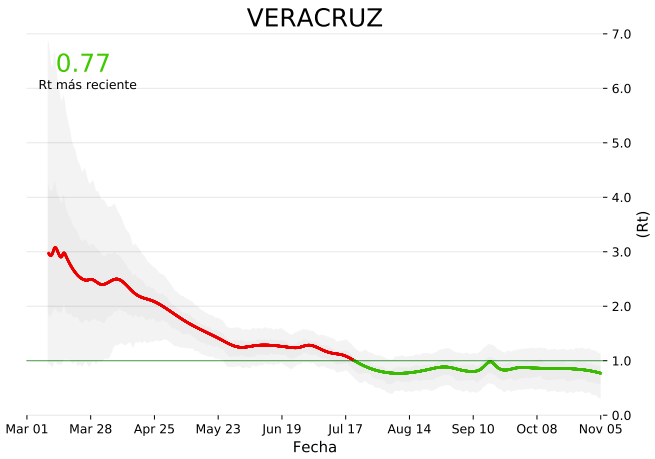
35306	casos totales
3006	defunciones totales
2020-03-17	fecha de inicio
1372.55	casos por 100mil habitantes
3.58 %	de casos a nivel nacional



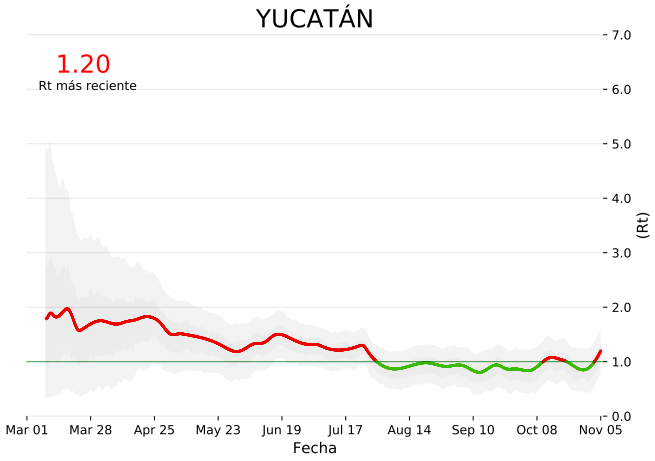
33362	casos totales
2775	defunciones totales
2020-03-15	fecha de inicio
913.88	casos por 100mil habitantes
3.38 %	de casos a nivel nacional



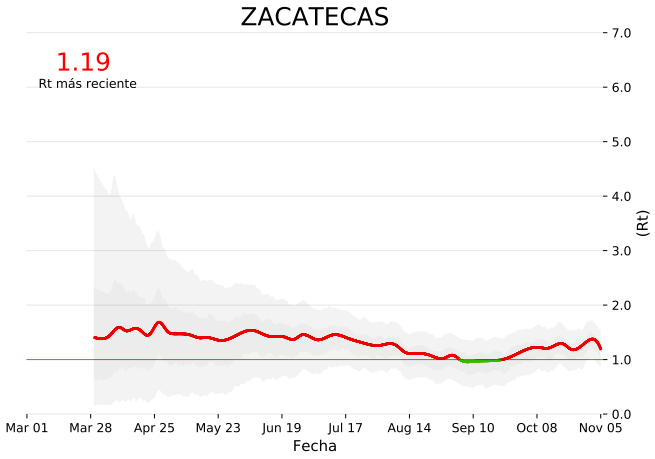
8721	casos totales
1250	defunciones totales
2020-03-23	fecha de inicio
631.95	casos por 100mil habitantes
0.88 %	de casos a nivel nacional



38093	casos totales
5138	defunciones totales
2020-03-15	fecha de inicio
446.06	casos por 100mil habitantes
3.86 %	de casos a nivel nacional



22331	casos totales
1884	defunciones totales
2020-03-12	fecha de inicio
988.49	casos por 100mil habitantes
2.26 %	de casos a nivel nacional



12970	casos totales
1089	defunciones totales
2020-03-16	fecha de inicio
778.31	casos por 100mil habitantes
1.32 %	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 11 de Noviembre de 2020

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.

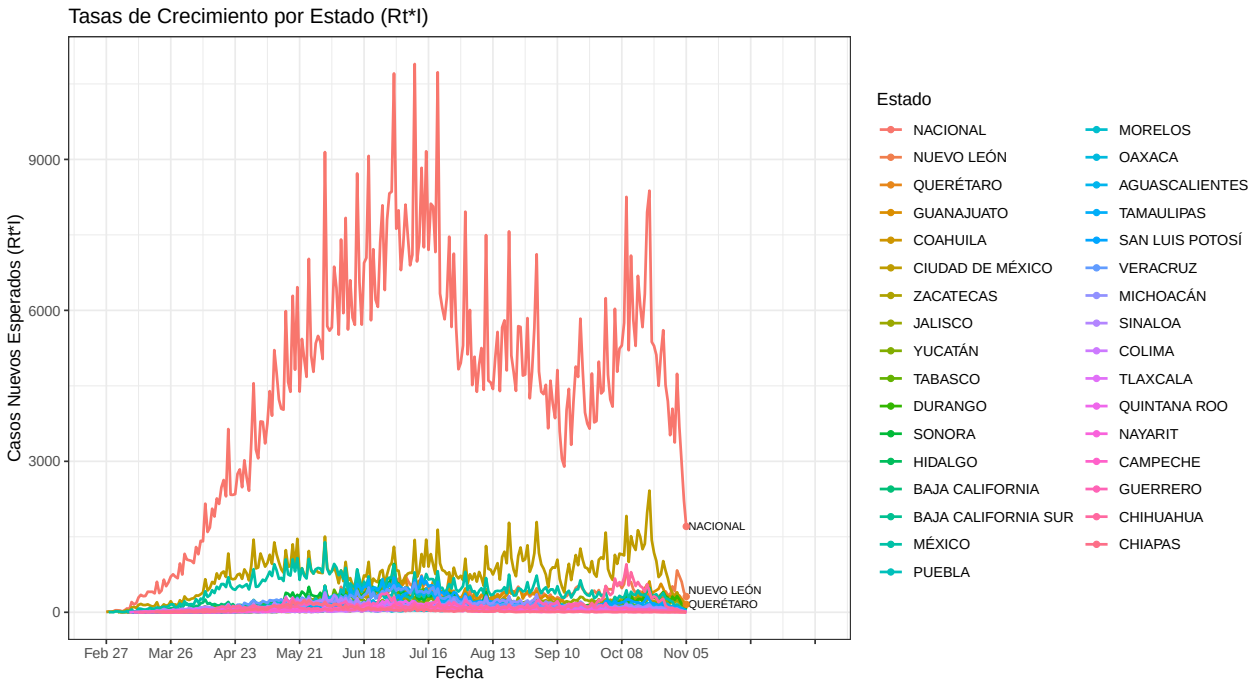
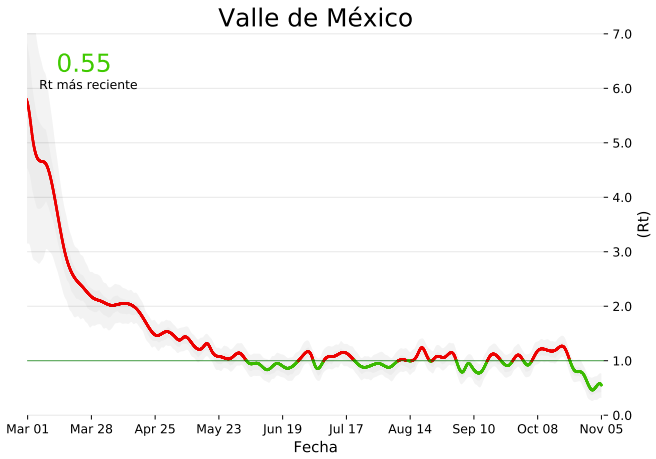


Fig. 2.1: Tasa de Crecimiento ($R_t * I$) por Estado.

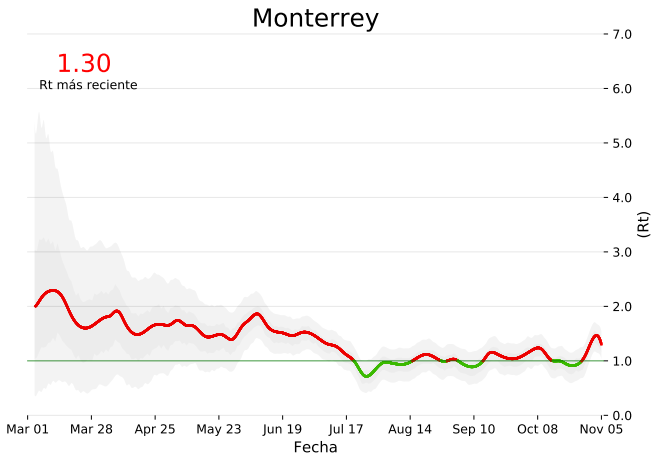
3. Estimaciones de R_t por Zona Metropolitana

Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 11 de Noviembre de 2020

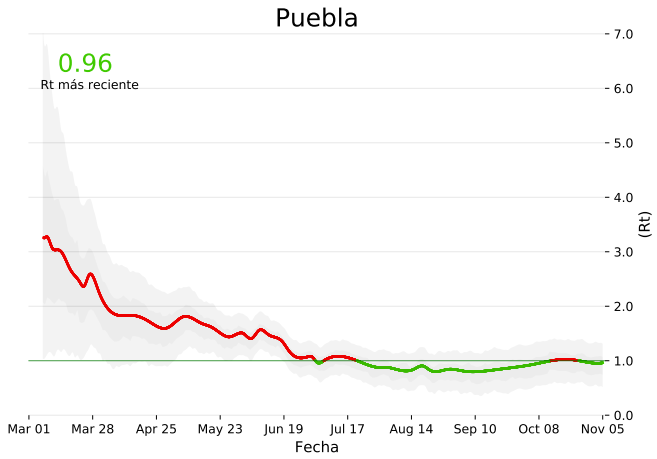
A contiuación se muestran las gráficas del comportamiento de la tasa R_t a lo largo del tiempo para las 25 Zonas Metropolitanas con mayor número de casos de COVID-19. La fecha inicial se toma a partir de la cual existen datos suficientes para hacer la estimación, mientras que la fecha final corresponde al 05 de Noviembre de 2020, es decir, 7 días anteriores de la fecha de elaboración de este reporte.



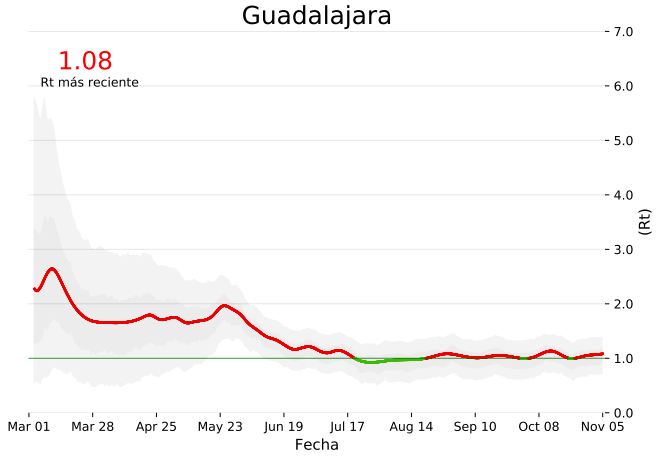
253246	casos totales
23811	defunciones totales
2020-02-27	fecha de inicio
1154.13	casos por 100mil habitantes
25.68 %	de casos a nivel nacional



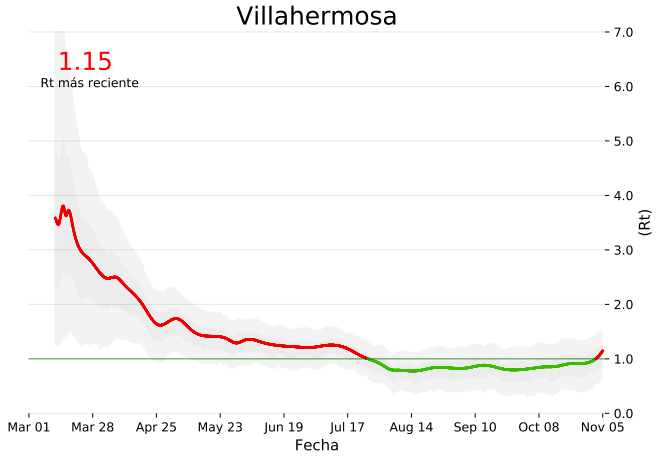
54269	casos totales
4021	defunciones totales
2020-03-10	fecha de inicio
1057.07	casos por 100mil habitantes
5.50 %	de casos a nivel nacional



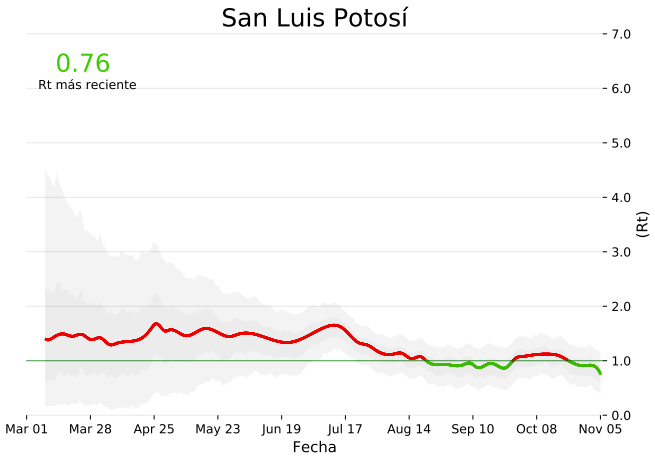
30194	casos totales
3633	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
949.75	casos por 100mil habitantes
3.06 %	de casos a nivel nacional



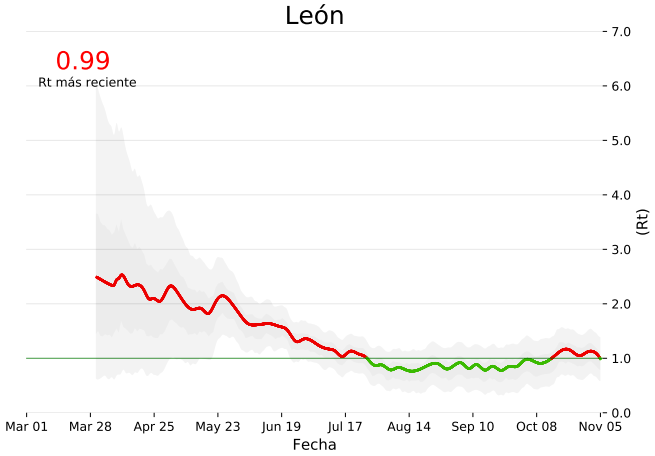
25649	casos totales
3040	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
489.19	casos por 100mil habitantes
2.60 %	de casos a nivel nacional



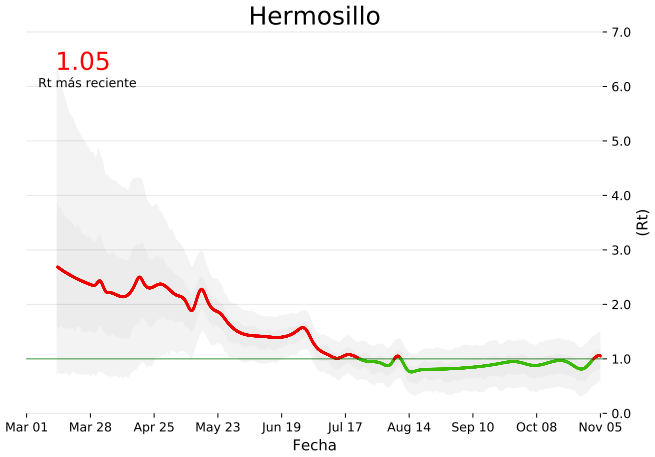
19938	casos totales
1489	defunciones totales
2020-03-18	fecha de inicio
2243.08	casos por 100mil habitantes
2.02 %	de casos a nivel nacional



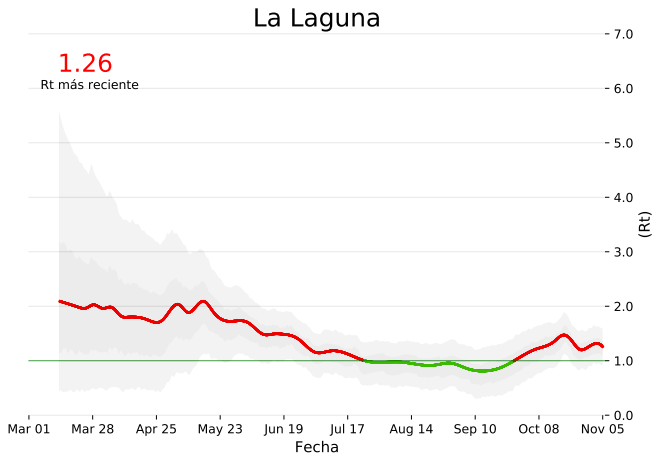
19557	casos totales
1356	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
1594.29	casos por 100mil habitantes
1.98 %	de casos a nivel nacional



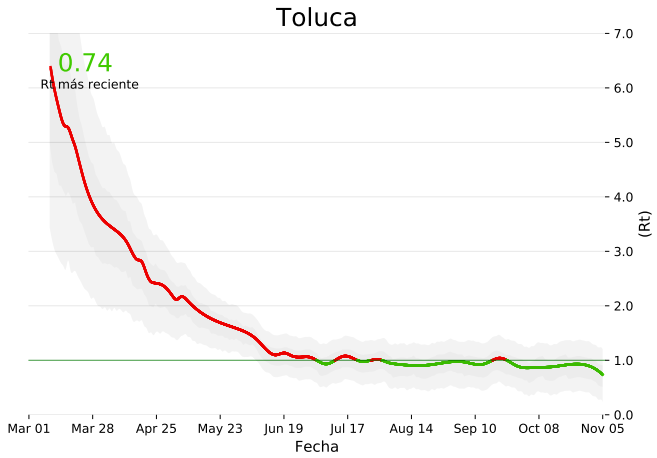
19286	casos totales
1641	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
1025.51	casos por 100mil habitantes
1.96 %	de casos a nivel nacional



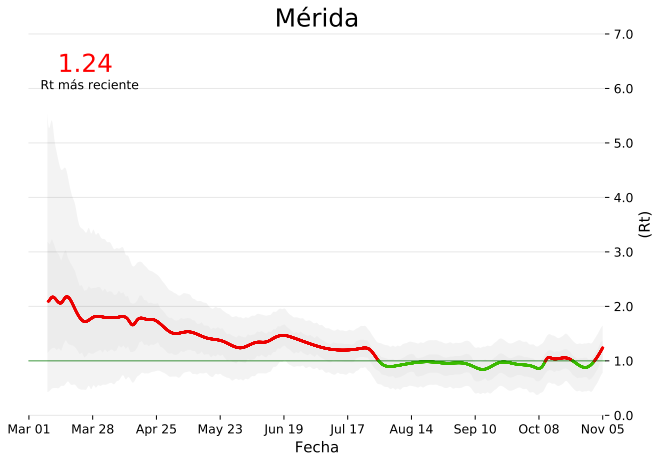
18448	casos totales
1025	defunciones totales
2020-03-15	fecha de inicio
1949.99	casos por 100mil habitantes
1.87 %	de casos a nivel nacional



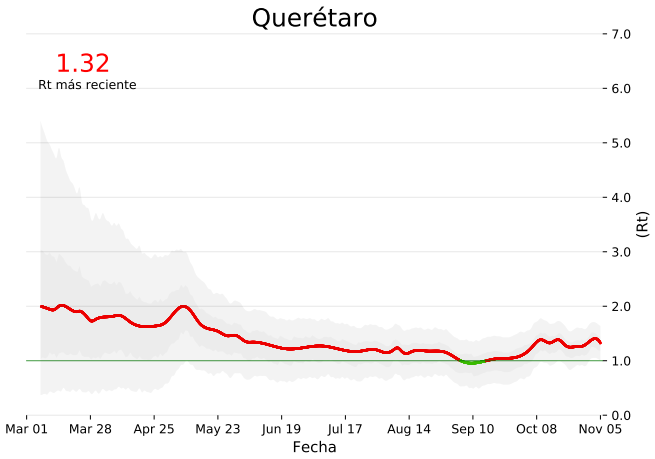
16178	casos totales
1123	defunciones totales
2020-02-28	fecha de inicio
1106.00	casos por 100mil habitantes
1.64 %	de casos a nivel nacional



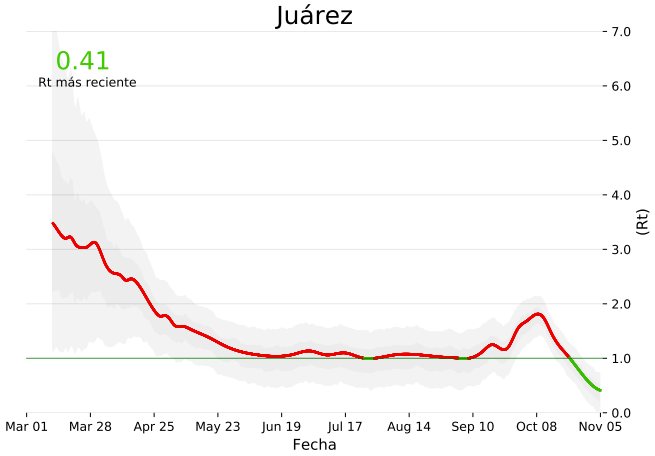
15991	casos totales
2053	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
672.50	casos por 100mil habitantes
1.62 %	de casos a nivel nacional



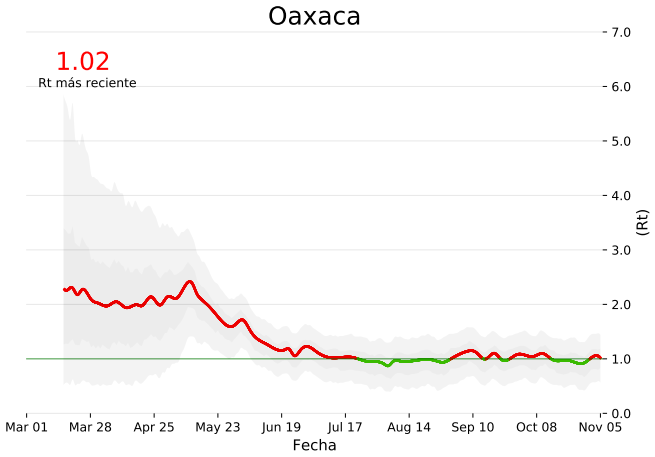
14695	casos totales
1298	defunciones totales
2020-03-12	fecha de inicio
1187.29	casos por 100mil habitantes
1.49 %	de casos a nivel nacional



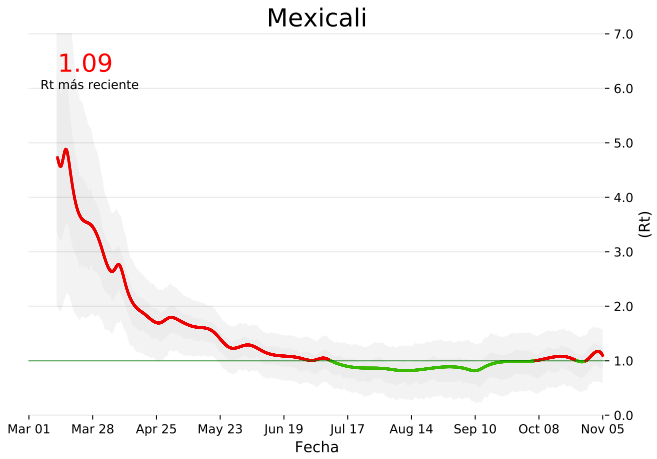
14397	casos totales
987	defunciones totales
2020-03-10	fecha de inicio
973.95	casos por 100mil habitantes
1.46 %	de casos a nivel nacional



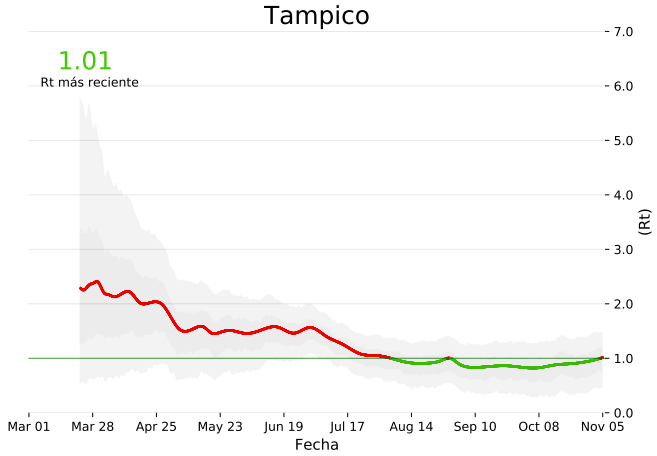
13045	casos totales
1595	defunciones totales
2020-03-10	fecha de inicio
890.49	casos por 100mil habitantes
1.32 %	de casos a nivel nacional



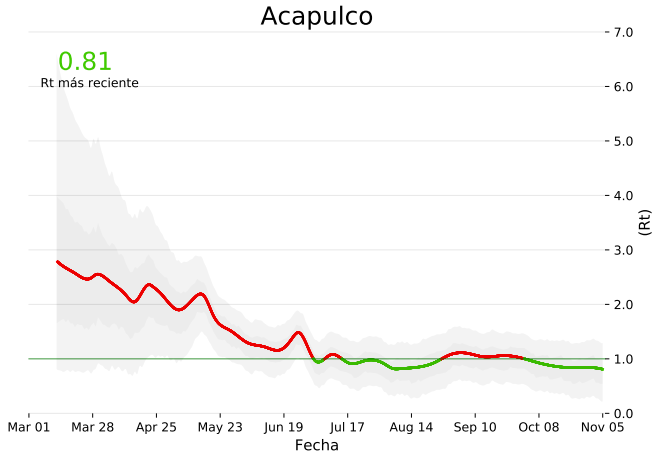
12599	casos totales
703	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
1802.92	casos por 100mil habitantes
1.28 %	de casos a nivel nacional



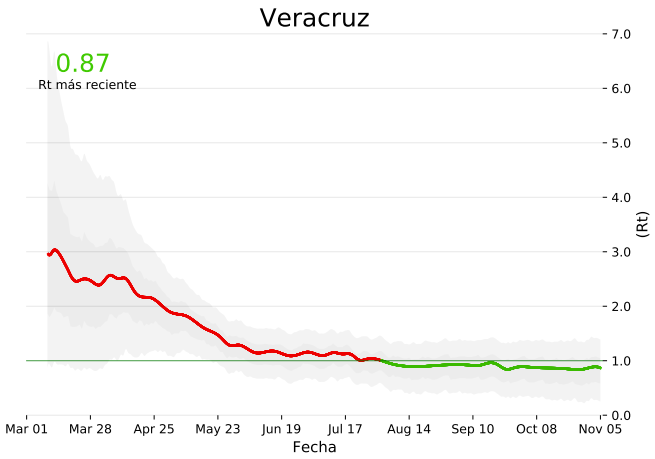
11339	casos totales
1758	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
1042.69	casos por 100mil habitantes
1.15 %	de casos a nivel nacional



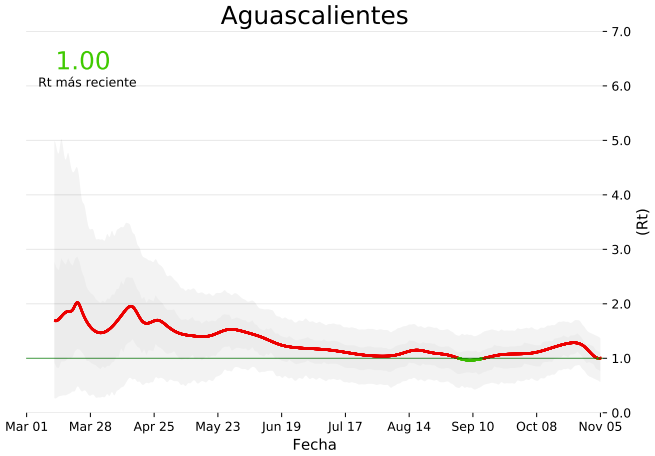
11132	casos totales
848	defunciones totales
2020-03-15	fecha de inicio
1135.39	casos por 100mil habitantes
1.13 %	de casos a nivel nacional



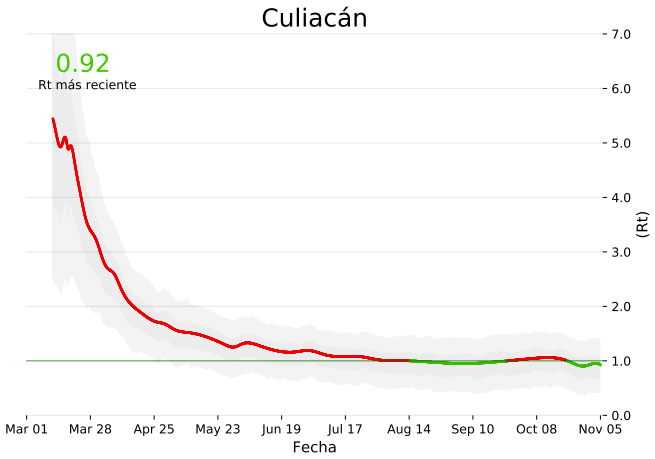
10231	casos totales
1152	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
1112.40	casos por 100mil habitantes
1.04 %	de casos a nivel nacional



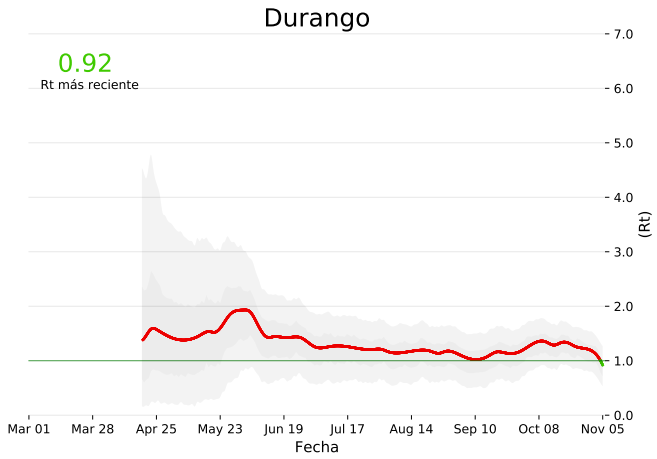
10222	casos totales
1289	defunciones totales
2020-03-15	fecha de inicio
1068.73	casos por 100mil habitantes
1.04 %	de casos a nivel nacional



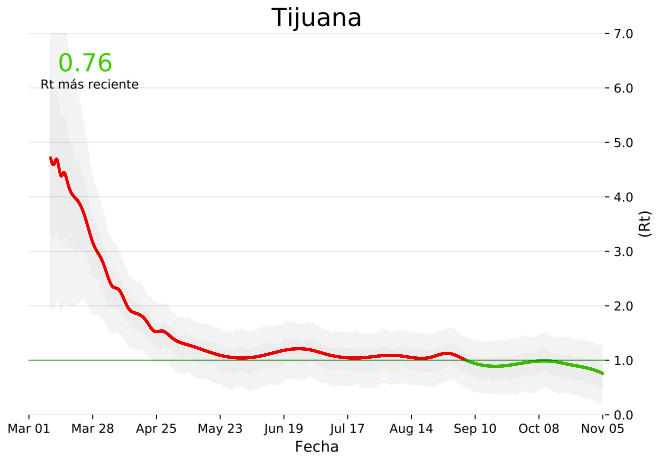
9310	casos totales
844	defunciones totales
2020-03-14	fecha de inicio
814.00	casos por 100mil habitantes
0.94 %	de casos a nivel nacional



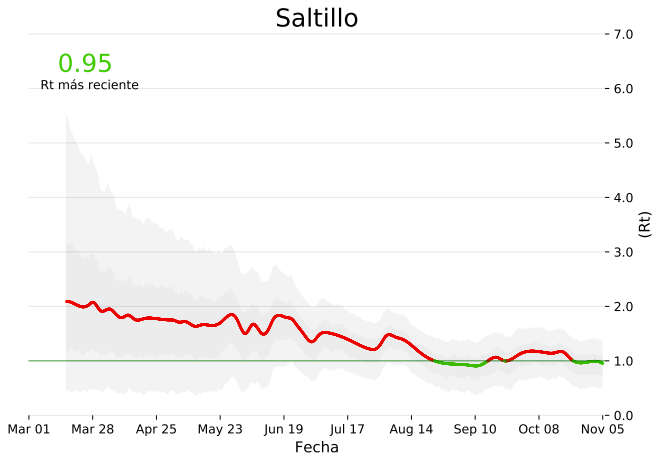
9232	casos totales
1319	defunciones totales
2020-03-17	fecha de inicio
958.80	casos por 100mil habitantes
0.94 %	de casos a nivel nacional



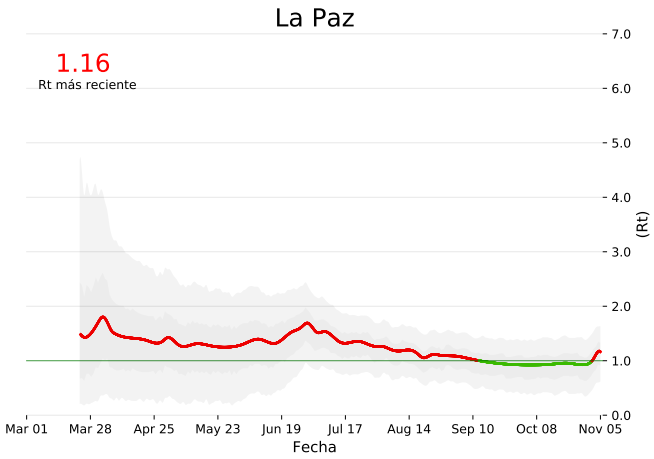
9086	casos totales
416	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
1306.22	casos por 100mil habitantes
0.92 %	de casos a nivel nacional



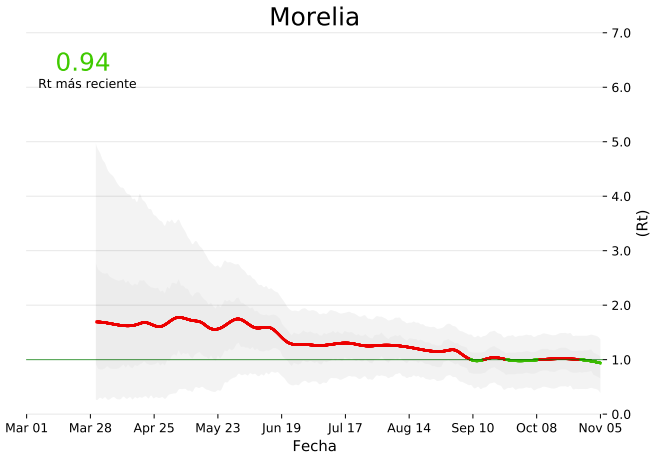
8973	casos totales
1806	defunciones totales
2020-03-03	fecha de inicio
446.14	casos por 100mil habitantes
0.91 %	de casos a nivel nacional



8099	casos totales
743	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
811.59	casos por 100mil habitantes
0.82 %	de casos a nivel nacional



6822	casos totales
303	defunciones totales
2020-03-26	fecha de inicio
2259.23	casos por 100mil habitantes
0.69 %	de casos a nivel nacional



6729	casos totales
499	defunciones totales
2020-03-18	fecha de inicio
695.22	casos por 100mil habitantes
0.68 %	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 11 de Noviembre de 2020

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.

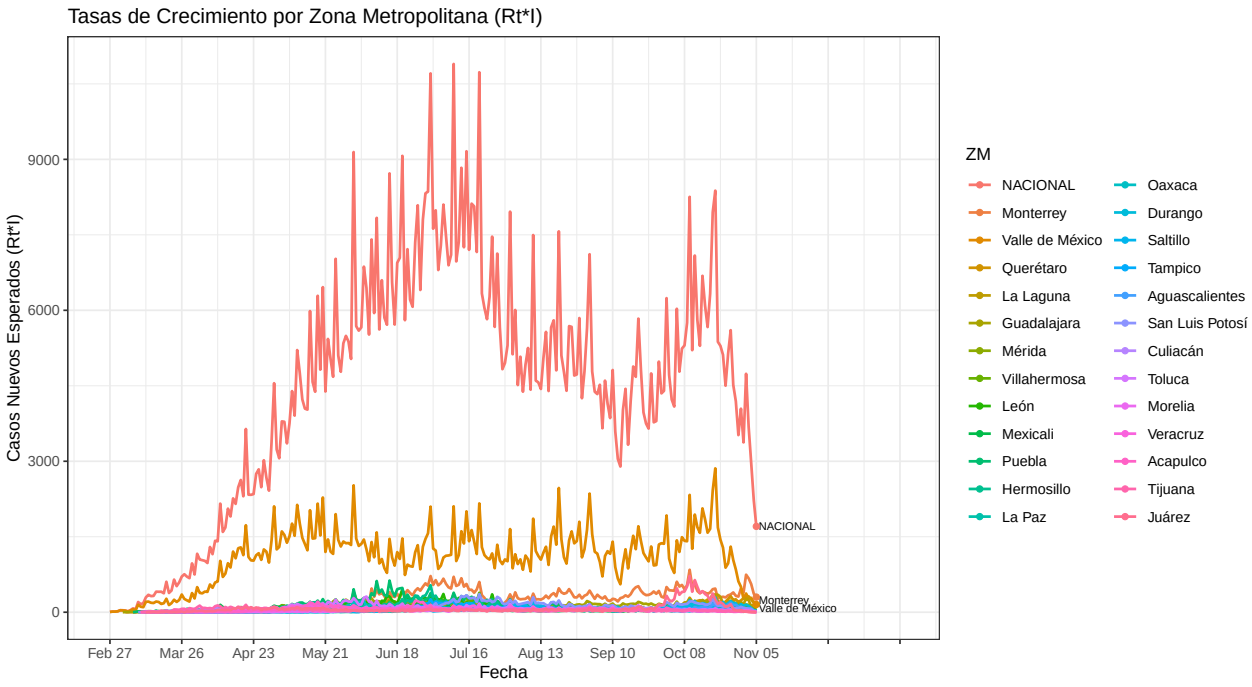


Fig. 3.1: Tasa de Crecimiento ($R_t * I$) por Zona Metropolitana.

4. Metodología de Estimación de R_t

4.1 Metodología para la Estimación del R_t.

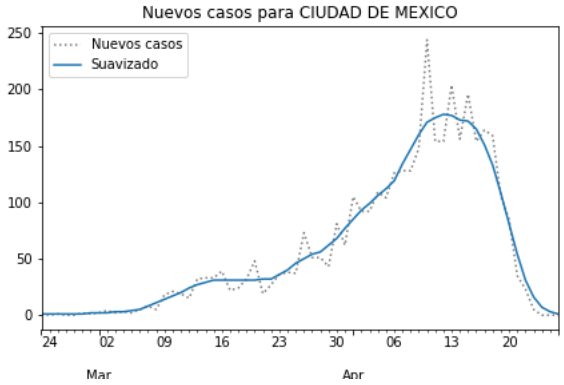
A continuación se resume la metodología utilizada para estimar el valor de la tasa de reproducción R_t cada día por Estados y Zonas Metropolitanas de la República Mexicana. La cual está basada en la propuesta del sitio *Estimating COVID-19's Rt in Real-Time* [1], que estima los valores de R_t para los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

Esta tasa de reproducción es una medida de la rapidez con la que se trasmite 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 cuáles 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:

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

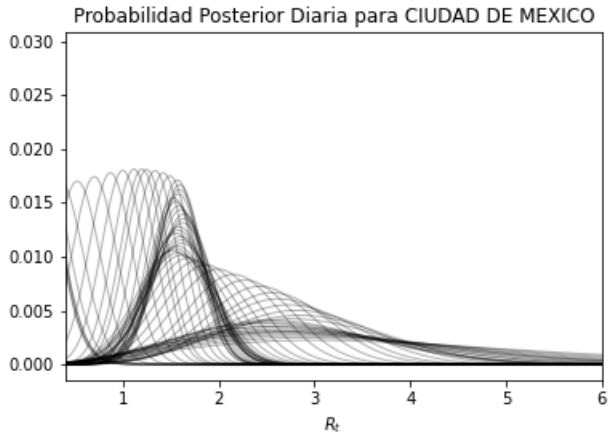
Para **la verosimilitud** $P(k|R_t)$ se propone una distribución Poisson:

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

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 invervalo 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 σ 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
AGUASCALIENTES	1.5
BAJA CALIFORNIA	4.8
BAJA CALIFORNIA SUR	1.5
CAMPECHE	1.8
CHIAPAS	2.3
CHIHUAHUA	3.2
CIUDAD DE MÉXICO	6.9
COAHUILA	2.1
COLIMA	1.5
DURANGO	1.4
GUANAJUATO	2.2
GUERRERO	2.2
HIDALGO	2.2
JALISCO	2.3
MÉXICO	6.0
MICHOACÁN	1.7
MORELOS	2.8
NAYARIT	1.9
NUEVO LEÓN	2.2
OAXACA	1.9
PUEBLA	3.1
QUERÉTARO	1.7
QUINTANA ROO	2.5
SAN LUIS POTOSÍ	1.4
SINALOA	5.0
SONORA	2.5
TABASCO	3.2
TAMAULIPAS	2.4
TLAXCALA	2.6
VERACRUZ	3.0
YUCATÁN	1.8
ZACATECAS	1.4

Zona Metropolitana	R_0
Valle de México	6.9
Puebla	3.1
Villahermosa	3.2
Monterrey	2.2
Guadalajara	2.3
León	2.2
Veracruz	3.0
La Laguna	2.1
Acapulco	2.2
Mérida	1.8
Tijuana	4.8
Oaxaca	1.9
Culiacán	5.0
Hermosillo	2.5
Cancún	2.5
Tuxtla Gutiérrez	2.3
Juárez	3.2
Aguascalientes	1.5
Reynosa	2.4
Tampico	2.4
Querétaro	1.7
Pachuca	2.2
Cuernavaca	2.8
San Luis Potosí	1.4
Tlaxcala-Apizaco	2.6

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.

date	ML	Low_50	High_50	Low_90	High_90
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-1'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/