

Dinámica espaciotemporal de la mortalidad por COVID-19 en México de 2020 a 2022

Space-time dynamics of COVID-19 mortality in Mexico from 2020 to 2022

Christian Ivan Sánchez Carrillo,* Giovanna Santana Castañeda** y Emmanuelle Quentin***

Recibido: 07/11/2024. Aceptado: 17/02/2025. Publicado: 25/03/2025.

Resumen. Este estudio analiza la dinámica espaciotemporal de la mortalidad por COVID-19 en México entre marzo de 2020 y diciembre de 2022, mediante el cálculo de la serie temporal de muertes mensuales y la estimación de las tasas crudas de mortalidad por COVID-19 de 2020, 2021 y 2022 a nivel de municipio. Además, se emplea la estadística de exploración espaciotemporal para identificar conglomerados de alta mortalidad. Se identificaron cinco olas de mortalidad por COVID-19. La segunda ola, ocurrida entre noviembre de 2020 y junio de 2021, fue la más severa, alcanzando su pico máximo en enero de 2021 con 39 151 decesos. La distribución espacial de las tasas en 2020 y 2021 resultó heterogénea, mientras que en 2022 el 87.05% de los municipios (2139) registraron las tasas más bajas (≤ 33 por cada 100 000 habitantes). La estadística de exploración detectó 19 conglomerados espaciotemporales de muertes por COVID-19, el más probable se agrupó al norte de la Ciudad de México, que registró 9400 más muertes de las esperadas y el riesgo relativo más alto ($RR=3.61$). Los hallazgos revelan la localización de poblaciones en riesgo durante el periodo crítico de la pandemia en México, y proporcionan información útil para priorizar la asignación de recursos. Además, permiten prever el desarrollo de bases de datos y

herramientas de análisis con el fin de mejorar la prevención y las intervenciones destinadas al control y la vigilancia de futuros brotes de enfermedades infecciosas y pandemias.

Palabras clave: mortalidad, COVID-19, espacio-tiempo, conglomerados, riesgo relativo.

Abstract. This study analyzes the spatiotemporal dynamics of COVID-19 mortality in Mexico between March 2020 and December 2022, by calculating the time series of monthly deaths and estimating the crude COVID-19 mortality rates of 2020, 2021 and 2022 at the municipality level. In addition, spatio-temporal scanning statistics are employed to identify clusters of high mortality. Five waves of COVID-19 mortality were identified. The second wave, occurring between November 2020 and June 2021, was the most severe, peaking in January 2021 with 39 151 deaths. The spatial distribution of rates in 2020 and 2021 proved heterogeneous, while in 2022 87.05% of municipalities (2 139) recorded the lowest rates (≤ 33 per 100 000 population). Exploratory statistics detected 19 spatiotemporal clusters of COVID-19 deaths, the most likely clustered north of Mexico City, with 9,400 more deaths than

* Profesor. Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Geografía. Toluca, México. Investigador asociado externo. Universidad UTE, Facultad de Ciencias de la Salud Eugenio Espejo, Centro de Investigación en Salud Pública y Epidemiología Clínica (CISPEC), Quito, Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0498-9269>. Email: christian_sc22@hotmail.com, csanchez014@profesor.uaemex.mx. Autor de correspondencia.

** Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4828-8325>. Email: gioscas1@hotmail.com

*** Centro de Investigación en Salud Pública y Epidemiología Clínica (CISPEC), Facultad de Ciencias de la Salud “Eugenio Espejo”, Universidad UTE, Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5600-2361>. Email: emmanuelle.quentin@gmail.com

expected and the highest relative risk (RR=3.61). The findings reveal the location of populations at risk during the critical period of the pandemic in Mexico, providing useful information for prioritizing resource allocation. In addition, they provide for the development of databases and analysis tools to improve

prevention and interventions for the control and surveillance of future infectious disease outbreaks and pandemics.

Keywords: mortality, COVID-19, space-time, clusters, relative risk.

INTRODUCCIÓN

La enfermedad por coronavirus 2019 (COVID-19) se ha convertido en una de las principales causas de muerte en todo el mundo, lo que la convierte en uno de los problemas graves de salud pública de las últimas décadas (Rehman *et al.*, 2021; Panahi *et al.*, 2023). El primer brote de la COVID-19 se informó en Wuhan, China, en diciembre de 2019, y al ser una enfermedad infecciosa causada por el virus SARS-CoV-2 tuvo una rápida propagación a nivel global (Hu *et al.*, 2021). El SARS-CoV-2 es altamente transmisible y se puede contagiar por contacto directo con una persona infectada y, de forma indirecta, por contacto con superficies que se encuentren en su entorno inmediato o con objetos que haya utilizado (OMS, 2020). La rápida transmisión provocó la preocupación de los gobiernos y funcionarios de la Organización Mundial de la Salud (OMS) que el 11 de marzo de 2020 declararon el brote como pandemia (OMS, 2020). A finales de 2022, la COVID-19 había cobrado la vida de más de 6.6 millones de personas y continuó impactando a las poblaciones en todos los continentes (Mathieu *et al.*, 2020). Sin embargo, el 5 de mayo de 2023 la OMS declaró el fin de la emergencia de salud pública de importancia internacional lo que significa que la COVID-19 es ahora un problema de salud establecido y persistente (OPS, 2023).

En México, la primera muerte por COVID-19 se registró el 18 de marzo de 2020 en la Ciudad de México (Chiquete *et al.*, 2022), y hasta diciembre de 2022 se estimaron *más de 331 mil* defunciones (SS/DGE, 2022). Durante este periodo, México ocupó el quinto lugar en número de muertes en el mundo, detrás de Estados Unidos, Brasil, India y Rusia, que registraron 1 079 976, 692 743, 530 693 y 393 383 decesos, respectivamente (Mathieu *et al.*, 2020). A nivel nacional, la COVID-19 fue la principal causa de muerte en 2020 y 2021, y en 2022 descendió a la quinta posición (Palacio-Mejía

et al., 2022; INEGI, 2023). Factores sociodemográficos (Macharia *et al.*, 2020; Gorris *et al.*, 2021), epidemiológicos (Wang *et al.*, 2020; NIEHS, 2021), conductas sociales (Sierra-Alcocer *et al.*, 2022), medidas de seguridad sanitaria (Ascencio-Montiel *et al.*, 2022) y las variantes de la COVID-19 pudieron influir en las muertes por esta enfermedad.

Ante este desafiante escenario pandémico de alta transmisibilidad y muertes por COVID-19, el análisis espacial proporciona una serie de técnicas para explorar los patrones espaciales y sus cambios a lo largo del tiempo desde el comienzo de la pandemia. Esto contribuye al desarrollo de estrategias para controlar el SARS-CoV-2 y futuras crisis de salud (Da Silva *et al.*, 2022; Feng, 2023). En particular, los estudios de exploración espacial desempeñan un papel importante en la identificación de conglomerados espaciales, temporales y espaciotemporales de eventos y problemas de salud (Feng, 2023). En el estudio de la COVID-19 se ha empleado el análisis de exploración espacial utilizando la estadística de exploración espaciotemporal de Kulldorff (1997) para la vigilancia rápida (Desjardins *et al.*, 2020; Hohl *et al.*, 2020), identificación de grupos espaciotemporales (Mas y Pérez-Vega, 2021; Ballesteros *et al.*, 2021; Cheong *et al.*, 2022) y detección de patrones espaciotemporales (Kim y Castro, 2020; Feng, 2023).

Sin embargo, gran parte de los estudios anteriores se enfocaron al análisis de casos y se han limitado a las primeras etapas de la pandemia en lugar de extenderse a las etapas posteriores, cuando el patrón espaciotemporal puede ser diferente (Feng, 2023). Solo un número limitado ha analizado la mortalidad (Leveau, 2021; Da Silva *et al.*, 2022) y por más tiempo (Feng, 2023; Sánchez, 2023). En México, Benita y Gasca-Sánchez (2021) emplearon la estadística de exploración espaciotemporal; sin embargo, los conglomerados resultaron de gran tamaño, lo que dificulta la detección de áreas locales de alto riesgo.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio es analizar la dinámica espaciotemporal de la mortalidad por COVID-19 considerando el periodo crítico de la pandemia en México, que incluye sus cinco olas más relevantes de muertes (Ascencio-Montiel *et al.*, 2022; Loza *et al.*, 2023). Los hallazgos pueden contribuir a mejorar la asignación de equipo y personal médico en las áreas particularmente afectadas y en los momentos donde la población permanece más expuesta a COVID-19. Además, brindan información valiosa para la implementación de decisiones efectivas en el control y la vigilancia de futuros brotes de enfermedades infecciosas y pandemias.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

México es el décimo cuarto país más extenso del mundo, cuenta con una superficie cercana a los dos millones de kilómetros cuadrados, en 2020 ocupó el décimo lugar entre los más poblados del planeta (UNFPA, 2022), con una población estimada de 126 014 024 personas, de las cuales el 51.2% son mujeres y el 48.8% hombres, con una edad promedio de 29 años (INEGI, 2020a). Geográficamente, está situado en América del Norte, colinda con Estados Unidos (norte), Guatemala y Belice (sureste), el océano Pacífico (oeste) y el Golfo de México (este). Administrativamente, se divide en 32 entidades federativas, cada una se integra por municipios (y la Ciudad de México por 16 alcaldías), que en 2020 sumaron 2469 (INEGI, 2020b). Sin embargo, en este estudio doce municipios, localizados uno en Baja California, uno en Campeche, seis en Chiapas, tres en Morelos y uno en Quintana Roo, no registraron datos de COVID-19, por lo que no se consideraron en los análisis (Figura 1).

Fuente de datos

Los recuentos diarios de muertes por COVID-19 del 18 de marzo de 2020 al 31 de diciembre de 2022 se obtuvieron de las bases históricas COVID-19 de la Dirección General de Epidemiología, administrada por la Secretaría de Salud (SS/DGE, 2023). En este estudio se utilizaron todos los registros de casos con-

firmados por COVID-19 filtrados por el municipio de residencia del fallecido y la fecha de defunción. Los datos de población de 2019 y 2020 se obtuvieron de las proyecciones de población del Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2019) y del censo de población del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2021b), respectivamente.

ANÁLISIS DE DATOS

Dinámica temporal

Para observar la duración de las olas de mortalidad entre marzo de 2020 y diciembre de 2022, se generó una serie temporal de muertes mensuales a nivel nacional a partir de las bases históricas COVID-19. Los límites de las olas se determinan identificando visualmente el mes en el que la mortalidad por COVID-19 estaba en su nivel más bajo antes de volver a aumentar. Además, se compila información pública oficial referente a las fechas de inicio y término de medidas de seguridad sanitaria, incluida la campaña de vacunación, conductas sociales y las distintas variantes de la COVID-19 (Tabla 1).

Dinámica espacial

Para obtener las tasas crudas de mortalidad por COVID-19 (TMC) y representarlas en mapas de distribución, se calculó el acumulado anual de muertes de la enfermedad ocurridas en 2020, 2021 y 2022. La población no censal (2021 y 2022) se estima mediante la tasa de crecimiento anual con referencia en datos de población de 2019 (CONAPO, 2019) y de 2020 (INEGI, 2021b). Las tasas reflejan el número total de muertes por COVID-19 que ocurrieron durante un año determinado por cada 100 000 habitantes (ecuación 1).

Ecuación 1. Cálculo de la tasa cruda de mortalidad por COVID-19

$$TMC_{2020} = 100\,000 * \frac{\text{Defunciones acumuladas por COVID (2020)}}{\text{Población censo(2020)}}$$

$$TMC_{2021} = 100\,000 * \frac{\text{Defunciones acumuladas por COVID (2021)}}{\text{Población proyectada (2021)}}$$

$$TMC_{2022} = 100\,000 * \frac{\text{Defunciones acumuladas por COVID (2022)}}{\text{Población proyectada (2022)}}$$

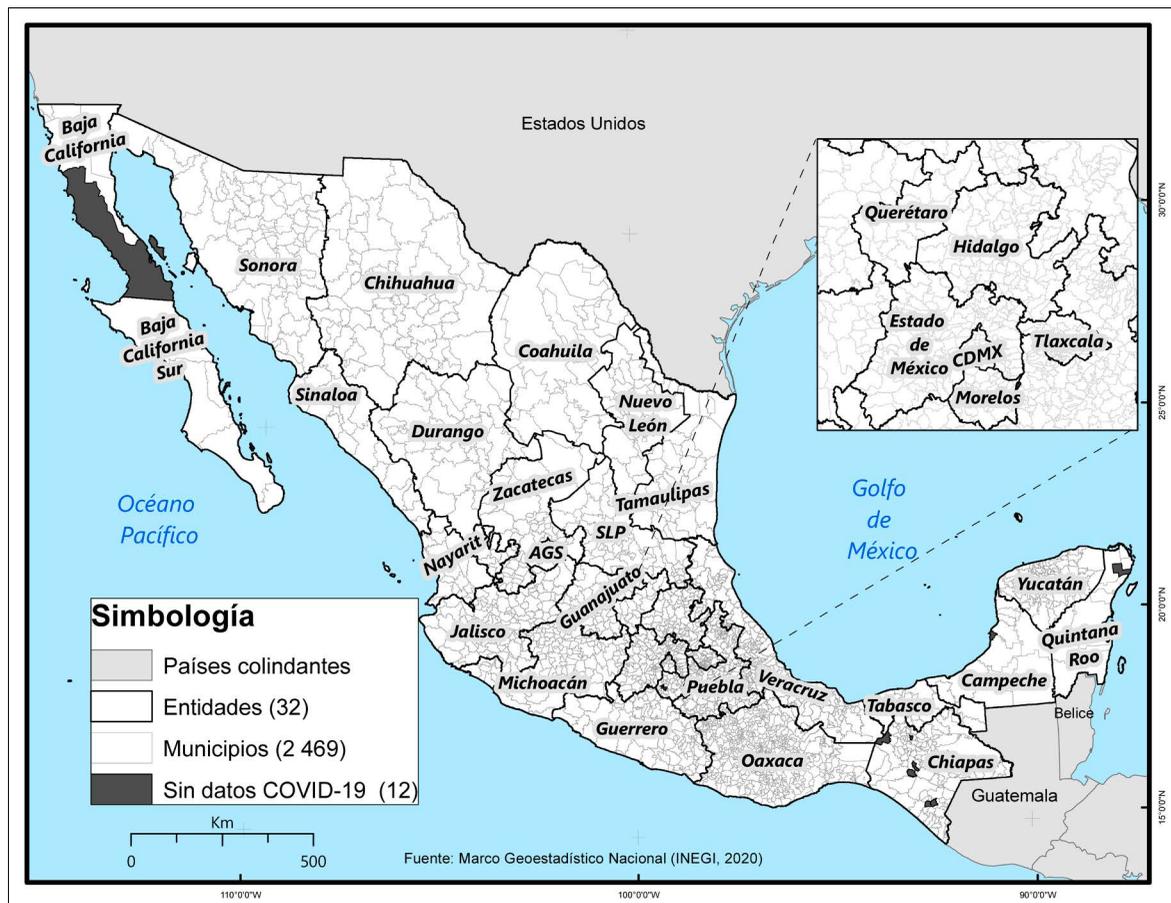


Figura 1. Entidades federativas y municipios de México. Fuente: Marco Geoestadístico Nacional (INEGI, 2020).

Tabla 1. Fuentes de información para la contención de la COVID-19 en México.

Institución	Publicación	Sitio oficial
Gobierno de México	Medidas de seguridad sanitaria	https://coronavirus.gob.mx
Secretaría de Salud	Arranca vacunación contra COVID-19	https://www.gob.mx/salud
Secretaría de Gobernación	Lineamientos técnicos específicos para la reapertura de las actividades económicas	https://www.dof.gob.mx
Instituto Nacional de Salud Pública	Fases de la epidemia por COVID-19	https://www.insp.mx

Dinámica espaciotemporal

En el software SaTScan™ se agregaron tres conjuntos de datos: acumulado mensual de defunciones por COVID-19, población de 2020 (censo) y el archivo de coordenadas geográficas de cada municipio (centroide). Se seleccionaron el tipo de aná-

lisis retrospectivo de exploración espaciotemporal y el modelo de probabilidad discreta de Poisson. El tamaño máximo del conglomerado espacial se estableció en el 5% de la población en riesgo y el tamaño máximo del conglomerado temporal en ocho meses, que representa el 25% de la duración

total del periodo (34 meses) para evitar conglomerados grandes (Kim y Castro, 2020).

Se emplea una prueba de razón de probabilidad logarítmica para identificar los conglomerados espaciotemporales de muertes por COVID-19. La prueba se calcula para cada círculo a fin de determinar si el número observado de defunciones excede el número de muertes esperadas, en función del número de muertes y el tamaño de la población observados en los municipios durante el periodo de estudio (Kulldorff, 1997; Feng, 2023). El riesgo relativo se define como un número no negativo que representa cuánto más común es la mortalidad dentro de un conglomerado que fuera de él (ecuación 2). La significancia estadística se evalúa mediante la simulación de Monte Carlo que consta de 999 repeticiones aleatorias del conjunto de datos (Xia *et al.*, 2017; Benita y Gasca-Sánchez, 2021).

Ecuación 2. Cálculo del riesgo relativo

$$RR = \frac{Obs[c]/Esp[c]}{(C - c)/(Esp[C] - Esp[c])}$$

donde *RR* es el riesgo relativo, *Obs*[c] es el número de defunciones observadas dentro de un conglomerado, *Esp*[c] es el número total de defunciones esperadas dentro de un conglomerado y *C* es el número total de defunciones en el conjunto de datos.

El procesamiento de datos se lleva a cabo en el entorno de desarrollo integrado RStudio (Posit team, 2023), el escaneo espaciotemporal se realiza en SaTScan™ versión 10.0 (Kulldorff y IMS, Inc. 2023) y los mapas se generan en ArcGIS versión 10.8 (Esri, 2023) (Figura 2).

RESULTADOS

Serie temporal de la mortalidad por COVID-19

Del 18 de marzo de 2020 al 31 de diciembre de 2022 se registraron 331 121 defunciones por COVID-19 en México, durante este periodo se identificaron cinco olas de mortalidad. La primera ola inició en marzo de 2020, tuvo un aumento

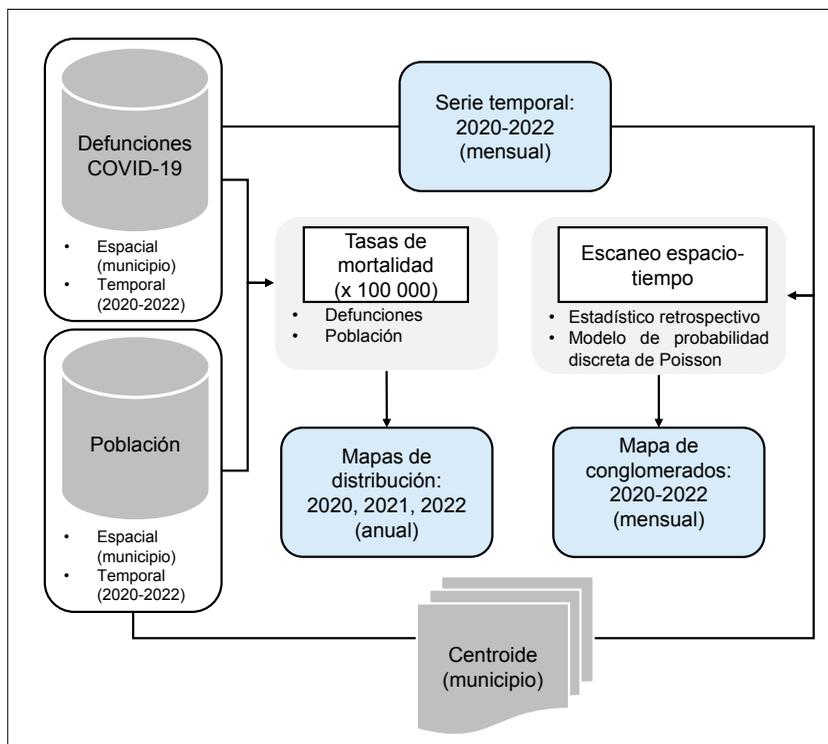


Figura 2. Esquema metodológico. Fuente: elaboración propia.

continuo y alcanzó su punto máximo en julio con 23 725 muertes. En noviembre se observó un nuevo aumento, y con ello, el inició de la segunda ola; sin embargo, el incremento fue mayor a finales de diciembre, al tiempo que iniciaban las vacaciones decembrinas y la campaña de vacunación, el punto máximo de esta ola se produjo en enero de 2021 con 39 151 muertes (valor más alto del periodo). La tercera ola inició en julio de 2021 y el mes siguiente (agosto) alcanzó su punto máximo con 22 655 muertes, al inicio de esta ola se originaron las variantes Alpha y Delta y en noviembre se reportaron los primeros casos de Ómicron. En 2022 se identificaron las dos últimas olas de mortalidad: en enero inició la cuarta ola y se produjo su punto máximo con 9935 muertes, durante esta ola se llevó a cabo la última etapa de vacunación. La quinta ola comenzó en junio y el mes siguiente (julio) y alcanzó su punto máximo con 2280 muertes (Figura 3).

Distribución espacial de la mortalidad por COVID-19

En 2020, las TMC más elevadas (≥ 326 por cada 100 000 habitantes) se concentraron en municipios localizados al noroeste, centro-sur y sureste. Atizapán en el Estado de México; Bacoachi en

Sonora; San Miguel Ixitlán y Cohetzala en Puebla, además de Santiago del Río en Oaxaca registraron las TMC más elevadas con 1286, 407, 380, 362 y 380, respectivamente. En contraste, municipios ubicados en el centro-norte, Pacífico sur y en la vertiente del Golfo (excepto en la península de Yucatán) registraron las TMC más bajas (≤ 33) (Figura 4a).

En 2021, la mortalidad por COVID-19 fue más severa en gran parte del país, las TMC más altas se concentraron en municipios localizados al noroeste, centro-sur y Pacífico (norte). Se identificaron patrones de distribución de TMC altas (158-325) en el centro-norte y en la vertiente del Golfo. Santa Magdalena Jicotlán, Santo Domingo y San Antonio Acutla en Oaxaca, Atizapán en el Estado de México y Manuel Benavides en Chihuahua registraron las TMC más elevadas con 2899, 1124, 429, 1032 y 669, respectivamente. En cambio, municipios ubicados principalmente en Chiapas y Oaxaca registraron las TMC más bajas (Figura 4b).

En 2022 se identificó una disminución en la mortalidad por COVID-19 en la mayoría de los municipios del país, el 87.05% de los municipios (2139) registraron las TMC más bajas (≤ 33). Sin embargo, la disminución no fue homogénea, de-

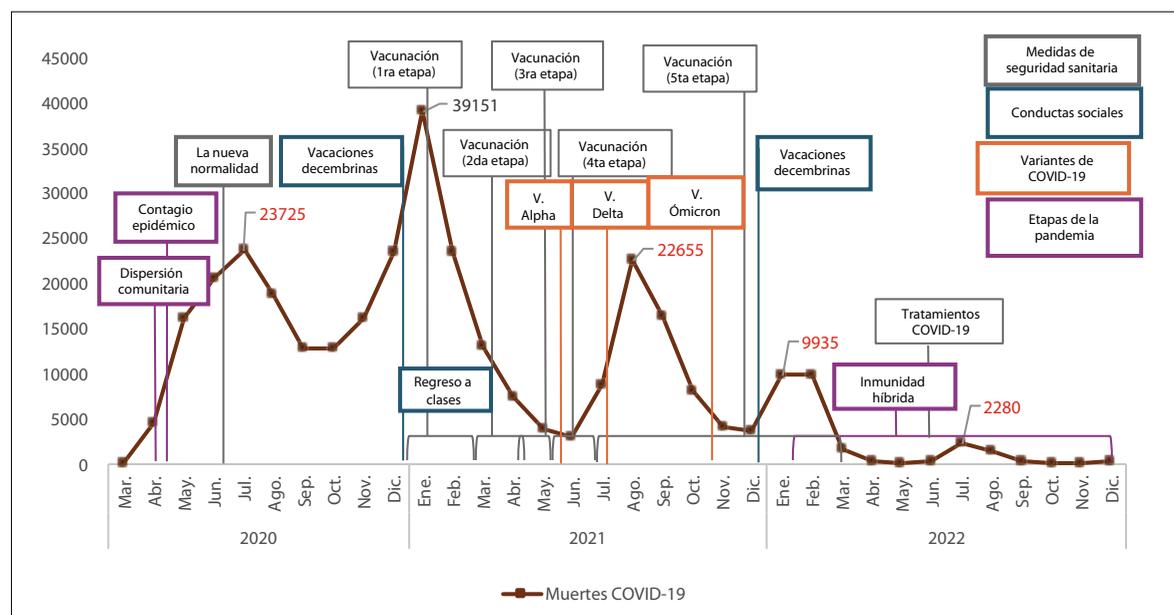


Figura 3. Serie temporal de la mortalidad por COVID-19. Fuente: elaboración propia.

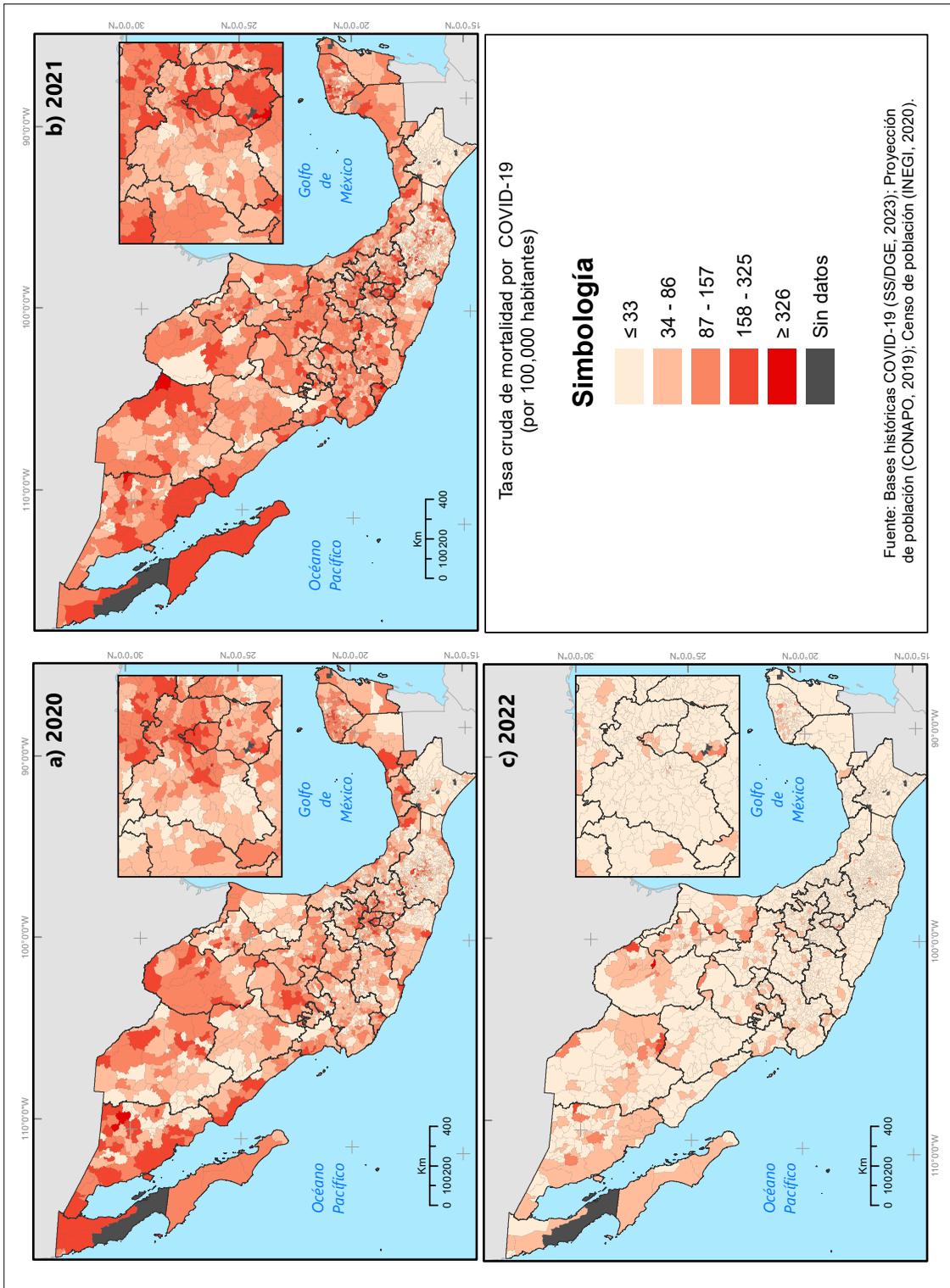


Figura 4. Distribución espacial de las tasas crudas de mortalidad por COVID-19. Fuente: elaboración propia.

bido a que Abasolo y Guerrero en Coahuila, San Pedro Yucunama y Magdalena Zahuatlán en Oaxaca, además de Coronado en Chihuahua registraron las TMC más elevadas con 466, 259, 415, 277 y 257, respectivamente (Figura 4c).

Conglomerados espaciotemporales de mortalidad por COVID-19

Durante marzo e 2020 a diciembre de 2022 se identificaron 19 conglomerados (uno más probable y 18 secundarios) estadísticamente significativos ($p < 0.001$) de muertes por COVID-19. El c11, c15 y c19 conformaron la primera agrupación temporal durante marzo-agosto de 2020, el c11 y c15 agruparon municipios del sureste, registraron 2830 y 2030 más muertes de las esperadas y un riesgo relativo de 2.05 y 1.70, respectivamente. El c19 se ubicó en Abasolo (Nuevo León), tuvo 2711 defunciones y el riesgo relativo más bajo con 1.42 (Figura 5 y Tabla 2).

El c12 tuvo la duración más larga (marzo-diciembre de 2020), se ubicó en Mexicali (Baja California), registró 7911 defunciones y un riesgo relativo de 1.79. El c6 y c13 conformaron la tercera agrupación temporal durante septiembre-diciembre de 2020, abarcaron gran parte de la región noroeste, registraron 3637 y 1661 más muertes de las esperadas y un riesgo relativo de 2.60 y 2.22, respectivamente (Figura 5 y Tabla 2).

Nueve conglomerados (c1, c3, c4, c5, c7, c8, c9, c10, y c18) tuvieron una duración de septiembre de 2020-abril de 2021, se localizaron en el centro, Bajío, Nuevo León y Oaxaca. El más probable (c1) agrupó ocho alcaldías del norte de la Ciudad de México, registró 9400 más muertes de las esperadas y el riesgo relativo más alto (3.61). El c3, c4 y c5 agruparon municipios del centro, registraron 5251, 5206 y 4697 más muertes de las esperadas y un riesgo relativo de 2.35, 2.28 y 2.17, respectivamente. El c7 se ubicó en Guadalajara (Jalisco), tuvo 3690 defunciones y un riesgo relativo de 3.20. El c8 y c10 agruparon municipios del bajío, registraron 4407 y 3384 más muertes de las esperadas y un riesgo relativo de 2.03 y 1.89, respectivamente. El C9 se ubicó en Guadalupe (Nuevo León), tuvo 4423 defunciones y un riesgo relativo de 2.42. El c18 agrupó 118 municipios de Oaxaca, registró

1273 defunciones y un riesgo relativo de 1.80 (Figura 5 y Tabla 2).

El c2, c14 y c17 conformaron la quinta agrupación temporal durante enero-abril de 2021, el c2 y c17 agruparon municipios del centro y el Golfo, registraron 4390 y 1 121 más muertes de las esperadas y un riesgo relativo de 3.01 y 1.58, respectivamente. El c14 se ubicó en Morelia (Michoacán), tuvo 4488 defunciones y un riesgo relativo de 1.89. Por último, el conglomerado c16 tuvo una duración de enero-agosto de 2021, agrupó municipios de Colima, Jalisco y Nayarit, registró 1195 más defunciones de los esperadas y un riesgo relativo de 1.54 (Figura 5 y Tabla 2).

DISCUSIÓN

Del 18 de marzo de 2020 al 31 de diciembre de 2022 se registraron 331 121 defunciones por COVID-19 en México, durante este periodo se identificaron cinco olas de mortalidad por COVID-19. La segunda ola, ocurrida entre noviembre de 2020 y junio de 2021, fue la más severa, alcanzando su pico máximo en enero de 2021 con 39 151 muertes (Figura 3). Núñez *et al.* (2024) informaron que del 10 al 16 de enero de 2021 se registró una tasa máxima de contagio de 207.3 infectados semanales por cada 100 000 habitantes. El aumento de contagios y muertes por COVID-19 durante esta ola podría estar relacionado con factores como el incremento de la movilidad de la población debido a reuniones sociales de fin de año, la relajación de medidas preventivas a favor del turismo y la baja cobertura de vacunación (Ascencio-Montiel *et al.*, 2022; Núñez *et al.*, 2024). Además, se ha documentado que en esta ola hubo saturación hospitalaria y alta ocupación de unidades de cuidados intensivos (UCI) en instituciones públicas y privadas (Loza *et al.*, 2023).

Después de la tercera ola (julio-diciembre de 2021), identificamos una importante reducción en las muertes por COVID-19 en comparación con olas anteriores. Esta disminución se atribuye principalmente a la alta cobertura de vacunación, que alcanzó aproximadamente el 75% de la población total para la quinta ola (De La Cruz *et al.*, 2023).

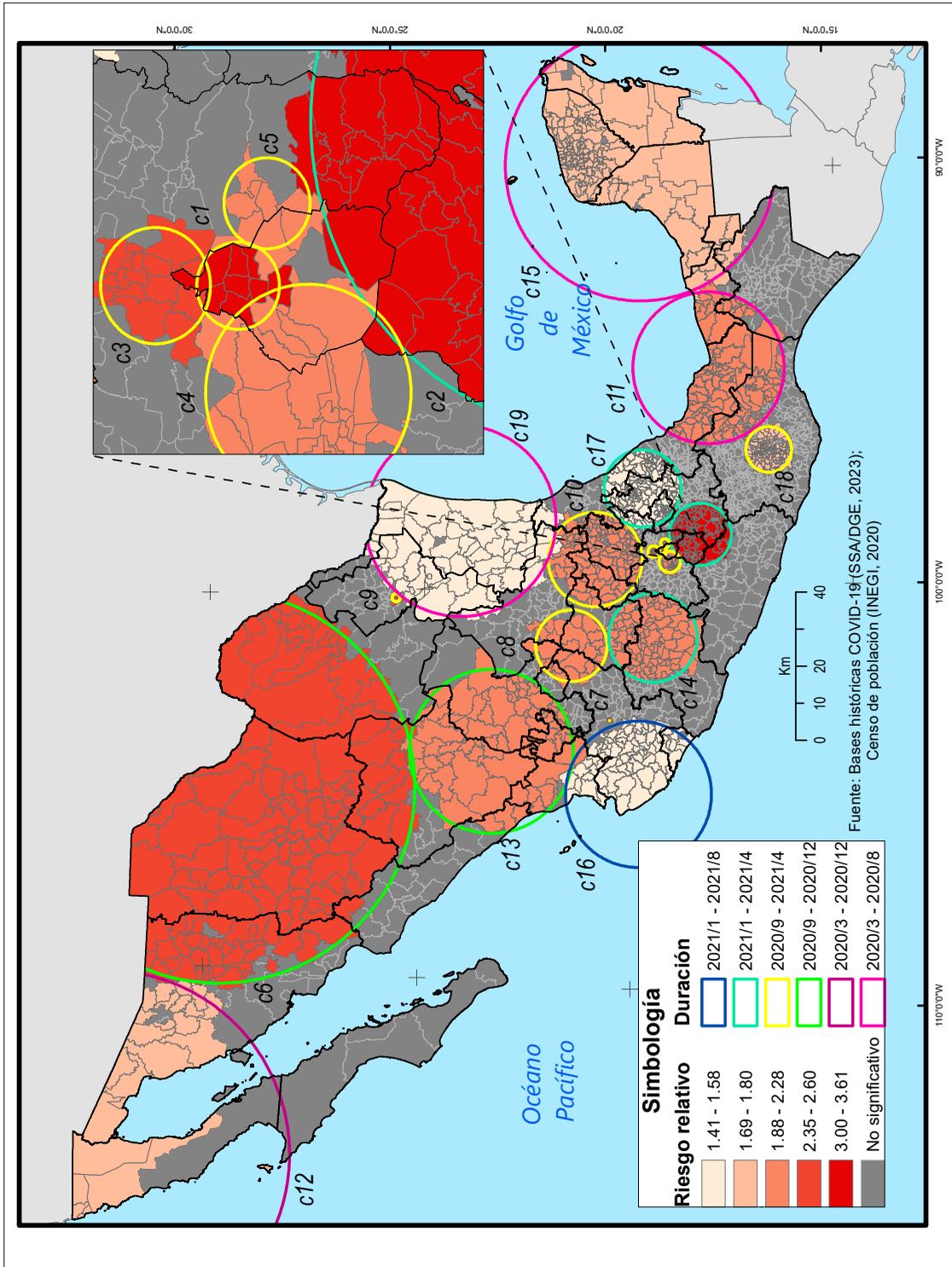


Figura 5. Conglomerados espaciotemporales de mortalidad por COVID-19. Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Cifras de los conglomerados espaciotemporales de mortalidad por COVID-19.

Conglomerado	Ubicación	Municipios	Duración	Defunciones observadas	Defunciones esperadas	Riesgo relativo	Razón de probabilidad logarítmica	p-value
c1	Cuauhtémoc	8	2020/9-2021/4	13144	3744.72	3.61	7240.81	<0.001
c2	Achochiapan	112	2021/1-2021/4	6620	2230.96	3.01	2840.71	<0.001
c3	Tultitlán	13	2020/9-2021/4	9251	4000.21	2.35	2547.48	<0.001
c4	Ocoyoacac	25	2020/9-2021/4	9387	4181.70	2.28	2426.76	<0.001
c5	La Paz	7	2020/9-2021/4	8814	4117.15	2.17	2046.08	<0.001
c6	Coyame del Solol	144	2020/9-2020/12	5943	2306.91	2.60	2007.98	<0.001
c7	Guadalajara	1	2020/9-2021/4	3690	1162.65	3.20	1744.03	<0.001
c8	Ocampo	26	2020/9-2021/4	8800	4393.72	2.03	1735.83	<0.001
c9	Guadalupe	3	2020/9-2021/4	4423	1844.57	2.42	1299.92	<0.001
c10	Pacula	122	2020/9-2021/4	7266	3882.37	1.89	1187.97	<0.001
c11	Pajapan	127	2020/3-2020/8	5574	2744.29	2.05	1132.20	<0.001
c12	Mexicali	22	2020/3-2020/12	7911	4457.06	1.79	1103.44	<0.001
c13	Súchil	75	2020/9-2020/12	3039	1378.16	2.22	746.53	<0.001
c14	Morelia	102	2021/1-2021/4	4488	2392.55	1.89	734.41	<0.001
c15	Hopelchén	135	2020/3-2020/8	4976	2946.58	1.70	584.20	<0.001
c16	Tomatlán	79	2021/1-2021/8	3410	2215.48	1.54	278.19	<0.001
c17	Zacapoaxtla	199	2021/1-2021/4	3065	1944.91	1.58	275.88	<0.001
c18	Santa Catarina Quiané	118	2020/9-2021/4	1273	706.92	1.80	183.20	<0.001
c19	Abasolo	70	2020/3-2020/8	2711	1914.30	1.42	147.60	<0.001

Fuente: elaboración propia.

La transición de variantes más agresivas, como Alpha y Delta, a variantes más transmisibles, pero menos letales, como Ómicron (Hernández-Ávila *et al.*, 2023). La inmunidad híbrida adquirida por una combinación de infecciones previas y la vacunación (Ruiz-Romero *et al.*, 2022). Además, la adquisición de conocimientos en el tratamiento de la enfermedad por parte de los profesionales de salud contribuyó al descenso de muertes durante la cuarta y quinta ola (Loza *et al.*, 2023).

La distribución espacial de las TMC evidenció diferencias regionales específicas (Figura 4). En 2020 y 2021 identificamos patrones de distribución de TMC altas en municipios localizados al noroeste, centro-sur y sureste (Campeche, Yucatán y Quintana Roo). En cambio, municipios de Chiapas, Oaxaca, Guerrero y Michoacán exhibieron TMC bajas durante el periodo de estudio. Este comportamiento podría relacionarse con la difusión de la COVID-19, ya que se estima que el 90% de los casos provienen en zonas urbanas y destinos turísticos (ONU, 2020), debido al flujo de población que favorece la propagación de la enfermedad y, en consecuencia, de las muertes, por la saturación hospitalaria y alta ocupación de UCI.

Estudios previos han asociado la alta densidad de población con el aumento en la transmisión de la COVID-19 (Macharia *et al.*, 2020; Gorrís *et al.*, 2021; Sánchez, 2023), por lo tanto, los núcleos urbanos y turísticos resultaron más afectados a diferencia de las áreas rurales. En particular, las poblaciones de Chiapas, Oaxaca, Guerrero y Michoacán están relativamente aisladas y la movilidad de personas que pueden transmitir la enfermedad es menor. Sin embargo, estos lugares carecen de infraestructura de salud, lo que pudo influir en las muertes en los municipios de Oaxaca que registraron TMC altas.

En este contexto, Sierra-Alcocer *et al.* (2022) demostraron que las entidades del Pacífico sur, incluyendo Chiapas, Oaxaca, Guerrero y Michoacán, no experimentaron aumentos considerables en la mortalidad por COVID-19 y, por lo tanto, la exposición y el riesgo son relativamente bajos. En 2022 hubo una disminución considerable en las TMC en todo el país (Figura 4c), debido a diversos factores como la disminución de la gravedad de las

variantes de COVID-19, los avances en el manejo de los pacientes, la vacunación y los tratamientos que incluyeron el uso de antivirales y esteroides, conocidos por prevenir la progresión a insuficiencia respiratoria y muerte (Ascencio-Montiel *et al.*, 2022; Loza *et al.*, 2023).

La estadística de exploración espaciotemporal identificó 19 conglomerados estadísticamente significativos de muertes por COVID-19 (Figura 5). Los primeros (c11, c15, c19, c12, c6 y c13) ocurrieron durante la primera ola y el comienzo de la segunda, respectivamente. Los grupos se ubicaron en municipios fronterizos como Tijuana (municipio con más población del país, con 1 922 523 habitantes) y destinos turísticos (Campeche, Yucatán y Quintana Roo). Este hallazgo fortalece una conclusión previa donde se explica que la movilidad de la población por reuniones sociales asociadas a las festividades de fin de año de 2020 aumentó la propagación de la COVID-19. Lima *et al.* (2021) realizaron un análisis sobre exceso de mortalidad y demostraron que Campeche, Quintana Roo, Tabasco y Sonora fueron los más afectados durante la primera ola. Además, un estudio reciente informó que la flexibilidad en las medidas establecidas por el gobierno relacionadas con la llegada de turistas a Quintana Roo aumentó la probabilidad de contagio (Martínez *et al.*, 2024).

De septiembre de 2020 a abril de 2021 se formaron nueve conglomerados (c1, c3, c4, c5, c7, c8, c9, c10, y c18) que coinciden con la segunda ola (más severa). Es interesante resaltar que los grupos se ubicaron en las zonas metropolitanas más pobladas del país (Ciudad de México, Guadalajara, Monterrey, Toluca y León), además de la metrópolis de Oaxaca. Al norte de la Ciudad de México (Azcapotzalco, Coyoacán, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Benito Juárez, Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza) se concentró el conglomerado más probable (c1) y con mayor riesgo relativo. Las características demográficas y socioeconómicas de la capital nacional podrían explicar este comportamiento, debido a que es la entidad con mayor densidad de población del país con 6163 habitantes por kilómetro cuadrado (INEGI, 2021a). Además, se considera el principal centro político, económico y social del país, por lo tanto, concentra un importante flujo de

personas. Estudios previos han asociado la movilidad de población con la propagación de la COVID-19 y, en consecuencia, en las muertes (Macharia *et al.*, 2020; Gorris *et al.*, 2021; Sánchez, 2023; Núñez *et al.*, 2024).

Los últimos conglomerados (c2, c14, c17 y c16) ocurrieron durante el término de la segunda ola y el comienzo de la tercera, se agruparon en el centro-sur, este (zona metropolitana Puebla-Tlaxcala) y el Pacífico (Colima, Jalisco y Nayarit). Este resultado también podría relacionarse con la dinámica de transmisión de la COVID-19, debido a que estos grupos son adyacentes de conglomerados previos. En particular, el c16 se formó de enero-agosto de 2021 y es contiguo con el c13 que se agrupó en septiembre-diciembre de 2020, es decir, los casos de COVID-19 iniciaron en los núcleos urbanos y después se propagaron a las zonas periurbanas, por lo tanto, el riesgo de mortalidad fue posterior. Después del término de la tercera ola (agosto de 2021), no se formaron conglomerados debido a la reducción en las muertes.

Entre las limitaciones de este estudio se encuentra la calidad de las estadísticas de mortalidad por COVID-19, la fuente de datos no permite una evaluación precisa del posible subregistro, errores o fallas en la captura de bases de datos en municipios marginados y con difícil acceso a las oficinas de registro civil (por ejemplo, en Chiapas, Oaxaca, Guerrero y Michoacán). Por lo tanto, los resultados en estos lugares deben tomarse con cautela. Otra limitación se refiere a la escala de análisis, si bien los datos espaciales a nivel municipal tienen utilidad en el ámbito político nacional, ofrecen poca eficacia para contener la pandemia a nivel local (Mas y Pérez-Vega, 2021). Contar con bases de datos a nivel de desagregación más detallados y anónimos permitirían desarrollar análisis espaciotemporales más precisos que servirían para diseñar estrategias específicas en los lugares con alta mortalidad por COVID-19.

CONCLUSIÓN

Este estudio proporciona evidencia de la dinámica espaciotemporal de muertes por COVID-19 entre marzo de 2020 y diciembre de 2022, periodo

crítico de la pandemia en México. Los hallazgos identificaron mayor riesgo relativo en ámbitos urbanos y destinos turísticos, en comparación con zonas rurales del Pacífico sur.

Esta información es de utilidad para los funcionarios de salud pública de dónde se localizan las poblaciones en riesgo y durante cuánto tiempo permanecen expuestas para asignar equipo y personal médico en las áreas particularmente afectadas por COVID-19. Además, la identificación de áreas con alto riesgo puede ayudar a guiar la política pública sanitaria destinada al control y vigilancia de futuros brotes de enfermedades infecciosas y pandemias con el fin de proteger a las poblaciones vulnerables.

En el futuro se podrían establecer acuerdos con instituciones de salud para la transferencia de datos más detallados y anonimizados, lo que permitiría dar continuidad a este tipo de análisis en contextos similares. Estos esfuerzos podrían complementarse con herramientas tecnológicas como paneles de vigilancia de enfermedades infecciosas, aplicaciones de rastreo de contactos, modelos epidemiológicos y sistemas de predicción de alta incidencia, impulsando el desarrollo de análisis más avanzados que contribuirían significativamente a la toma de decisiones en salud pública a niveles locales.

REFERENCIAS

- Ascencio-Montiel, I. J., Ovalle-Luna, O. D., Rascón-Pacheco, R. A. Borja-Aburto, V. H., & Chowell, G. (2022). Comparative epidemiology of five waves of COVID-19 in Mexico. *BMC Infectious Diseases*, (22), 813. <https://doi.org/10.1186/s12879-022-07800-w>
- ArcGIS Geographic Information System. (2023). Environmental Systems Research Institute. Disponible en <https://www.esri.com/en-us/home> Consultado el 18 de diciembre de 2023
- Ballesteros, Patricia, Salazar, Emily, Sánchez, Diana, & Bolaños, Carlos. (2021). Spatial and spatiotemporal clustering of the COVID-19 pandemic in Ecuador. *Revista de la Facultad de Medicina*, 69(1), e201. Epub May 17, 2021. <https://doi.org/10.15446/revfacmed.v69n1.86476>
- Benita, F., & Gasca-Sanchez, F. (2021). The main factors influencing COVID-19 spread and deaths in Mexico: A comparison between phases I and II. *Applied geography (Sevenoaks, England)*, 134, 102523. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2021.102523>

- Cheong, Y. L., Ghazali, S. M., Che Ibrahim, M. K. B., Kee, C. C., Md Iderus, N. H., Ruslan, Q. B., Gill, B. S., Lee, F. C. H., & Lim, K. H. (2022). Assessing the Spatiotemporal Spread Pattern of the COVID-19 Pandemic in Malaysia. *Frontiers in public health*, 10, 836358. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.836358>
- Chiquete, E., Alegre-Díaz, J., Ochoa-Guzmán, A., Toapanta-Yanchapaxi, L. N., González-Carballo, C., Garcilazo-Ávila, A., Santacruz-Benitez, R., Ramírez-Reyes, R., Wong-Chew, R. M., Guerrero, G., Schmulson, M., Berumen, J., Sandoval-Rodríguez, V., Ruiz-Ruiz, E., & Cantú-Brito, C. (2020). Ethnicity and other COVID-19 death risk factors in Mexico. *Archives of medical science*, 18(3), 711-718. <https://doi.org/10.5114/aoms.2020.101443>
- CONAPO (Consejo Nacional de Población). (2015). Proyecciones de la Población de los municipios de México, 2015-2030. Disponible en <https://datos.gob.mx/busca/organization/conapo> Consultado el 07 de diciembre de 2023
- Da Silva, W. M., Brito, P. D. S., de Sousa, G. G. D. S., Santos, L. F. S., da Silva, J. C., Costa, A. C. P. J., Pascoal, L. M., Santos, F. S., Graepp Fontoura, I., Lobato, J. S. M., Fontoura, V. M., Pereira, A. L. F., Dos Santos, L. H., & Santos Neto, M. (2022). Deaths due to COVID-19 in a state of northeastern Brazil: spatiotemporal distribution, sociodemographic and clinical and operational characteristics. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 116(2), 163-172. <https://doi.org/10.1093/trstmh/trab098>
- De La Cruz-Hernández, S. I., & Álvarez-Contreras, A. K. (2023). Omicron BA.5 subvariant provokes the fifth COVID-19 wave in Mexico: Closer to the end of this pandemic? *Disaster Med Public Health Prep*. 17(e344), 1-3. DOI: <https://doi.org/10.1017/dmp.2023.14>.
- Desjardins, M. R., Hohl, A., & Delmelle, E. M. (2020). Rapid surveillance of COVID-19 in the United States using a prospective space-time scan statistic: Detecting and evaluating emerging clusters. *Applied geography (Sevenoaks, England)*, 118, 102202. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102202>
- Feng Z. (2023). Spatiotemporal pattern of COVID-19 mortality and its relationship with socioeconomic and environmental factors in England. *Spatial and spatio-temporal epidemiology*, (45), 100579. <https://doi.org/10.1016/j.sste.2023.100579>
- Gorris, M. E., Shelley, C. D., Del Valle, S. Y., & Manore, C. A. (2021). A time-varying vulnerability index for COVID-19 in New Mexico, USA using generalized propensity scores. *Health policy OPEN*, (2), 100052. <https://doi.org/10.1016/j.hpopen.2021.100052>
- Hernández-Ávila, M., Vieyra-Romero, W. I., Gutiérrez-Díaz, H. O., Zepeda-Tello, R., Alpuche-Aranda, C., Hernández-Ávila, J. E., Barros-Sierra, D., Tamayo-Ortiz, M., Duque-Molina, C., Barrientos-Gutiérrez, T., Carnalla-Cortés, M., Dyer-Leal, D., López-Ridaura, R., & López-Gatell-Ramírez, H. (2023). The Omicron wave in Mexico: vaccine protection against progression to severe Covid-19 in SARS-CoV-2-infected workers. *Salud pública de México*, 66(1), 85-94. <https://doi.org/10.21149/15125>
- Hohl, A., Delmelle, E. M., Desjardins, M. R., & Lan, Y. (2020). Daily surveillance of COVID-19 using the prospective space-time scan statistic in the United States. *Spatial and spatio-temporal epidemiology*, (34), 100354. <https://doi.org/10.1016/j.sste.2020.100354>
- Hu, B., Guo, H., Zhou, P., & Shi, Z. L. (2021). Characteristics of SARS-CoV-2 and COVID-19. *Nature reviews. Microbiology*, 19(3), 141-154. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-00459-7>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2023). Estadísticas de defunciones registradas (EDR) 2022. Disponible en <https://www.inegi.org.mx/app/saladeprensa/noticia.html?id=8548#:~:text=Las%20cinco%20principales%20causas%20de,por%20sus%20siglas%20en%20ingl%C3%A9s> Consultado el 27 de septiembre de 2023.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2021a). Densidad de población. Disponible en <https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/densidad.aspx?tema=P> Consultado el 01 de febrero de 2024.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2021b). Censo de Población y Vivienda 2020. Disponible en <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/> Consultado el 29 de noviembre de 2023.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2020a). Población. Demografía y sociedad. Disponible en <https://www.inegi.org.mx/temas/estructura/> Consultado el 15 de noviembre de 2023.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2020b). Geografía y medio ambiente. Marco Geoestadístico. Disponible en <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/> Consultado el 29 de noviembre de 2023.
- Kim, S., & Castro, M. C. (2020). Spatiotemporal pattern of COVID-19 and government response in South Korea (as of May 31, 2020). *International journal of infectious diseases IJID*, (98), 328-333. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.07.004>
- Kulldorff and Information Management Services, Inc. (2023). SaTScan version 10.0: software for the spatial, temporal, and space-time scan statistics. Disponible en <https://www.satscan.org/>. Consultado el 18 de diciembre de 2023.
- Kulldorff, M., Athas, W. F., Feurer, E. J., Miller, B. A., y Key, C. R. (1998). Evaluating cluster alarms: a space-

- time scan statistic and brain cancer in Los Alamos, New Mexico. *American journal of public health*, 88(9), 1377-1380. <https://doi.org/10.2105/ajph.88.9.1377>
- Kulldorff, M. (1997). A spatial scan statistic. *Communications in Statistics-Theory and methods*, 26(6), 1481-1496.
- Leveau C. M. (2021). Difusión espacio-temporal de muertes por COVID-19 en Argentina. *Revista panamericana de salud pública = Pan American journal of public health*, (45), e3. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2021.3>
- Lima, E. E. C., Vilela, E. A., Peralta, A., Rocha, M., Queiroz, B. L., Gonzaga, M. R., Piscocoy-Díaz, M., Martínez-Folgar, K., García-Guerrero, V. M., & Freire, F. H. M. A. (2021). Investigating regional excess mortality during 2020 COVID-19 pandemic in selected Latin American countries. *Genus*, 77(1), 30. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41118-021-00139-1>
- Loza, A., Wong-Chew, R. M., Jiménez-Corona, M. E., Zárate, S., López, S., Ciria, R., Palomares, D., García-López, R., Iña, P., Taboada, B., Rosales, M., Boukadida, C., Herrera-Estrella, A., Mojica, N. S., Rivera-Gutierrez, X., Muñoz-Medina, J. E., Salas-Lais, A. G., Sanchez-Flores, A., Vazquez-Perez, J. A., Arias, C. F., ... Gutiérrez-Ríos, R. M. (2023). Two-year follow-up of the COVID-19 pandemic in Mexico. *Frontiers in public health*, (10), 1050673. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1050673>
- Macharia, P. M., Joseph, N. K., & Okiro, E. A. (2020). A vulnerability index for COVID-19: spatial analysis at the subnational level in Kenya. *BMJ global health*, 5(8), e003014. <https://doi.org/10.1136/bmjgh-2020-003014>
- Martínez, C., Ken, C. A., Miguel, A. E. & Ojeda, M. S. (2024). Covid-19 y vulnerabilidad municipal. Caso de estudio de Quintana Roo, México. *Secuencia*, (118), e2165. <https://doi.org/10.18234/secuencia.v0i118.2165>
- Mas, J. F., & Pérez-Vega, A. (2021). Spatiotemporal patterns of the COVID-19 epidemic in Mexico at the municipality level. *PeerJ*, (9), e12685. <https://doi.org/10.7717/peerj.12685>
- Mathieu, E., Ritchie, H., Rodés-Guirao, L., Appel, C., Giattino, C., Hasell, J., Macdonald, B., Dattani, S., Beltekian, D., Ortiz-Ospina, E., & Roser, M. (2020). Coronavirus Pandemic (COVID-19). Disponible en <https://ourworldindata.org/coronavirus> Consultado el 01 de noviembre de 2023.
- NIEHS. (National Institute of Environmental Health Sciences). (2021). COVID-19 Pandemic Vulnerability Index (PVI). Disponible en <https://covid19pvi.niehs.nih.gov/> Consultado el 01 de noviembre de 2023.
- Núñez, J., Reyes, A., Quiroz, G., & Galeana, J. (2024). Análisis espaciotemporal de la incidencia de COVID-19 en México para la identificación de oleadas de contagios. *Quivera Revista de Estudios Territoriales*, 26(1), 89-108. <https://doi.org/10.36677/qret.v26i1.18454>
- OMS (Organización Mundial de la Salud). (2020). COVID-19: cronología de la actuación de la OMS. Disponible en <https://www.who.int/es/news/item/27-04-2020-who-timeline---covid-19> Consultado el 27 de septiembre de 2023.
- OMS (Organización Mundial de la Salud). (2020). Vías de transmisión del virus de la COVID-19: repercusiones para las recomendaciones relativas a las precauciones en materia de prevención y control de las infecciones. Disponible en WHO/2019-nCoV/Sci_Brief/Transmission_modes/2020.2 Consultado el 17 de octubre de 2024.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). (2020). Las ciudades concentran el 90% de los casos de COVID-19. Disponible en <https://coronavirus.onu.org.mx/las-ciudades-concentran-el-90-de-los-casos-de-covid-19> Consultado el 27 de septiembre de 2023
- OPS (Organización Panamericana de la Salud). (2023). Se acaba la emergencia por la pandemia, pero la COVID-19 continúa. Disponible en <https://www.paho.org/es/noticias/6-5-2023-se-acaba-emergencia-por-pandemia-pero-covid-19-continua> Consultado el 07 de junio de 2024.
- Palacio-Mejía, L. S., Hernández-Ávila, J. E., Hernández-Ávila, M., Dyer-Leal, D., Barranco, A., Quezada-Sánchez, A. D., Alvarez-Aceves, M., Cortés-Alcalá, R., Fernández-Wheatley, J. L., Ordoñez-Hernández, I., Vielma-Orozco, E., Muradás-Troitiño, M. C., Muro-Orozco, O., Navarro-Luévano, E., Rodríguez-González, K., Gabastou, J. M., López-Ridaura, R., & López-Gatell, H. (2022). Leading causes of excess mortality in Mexico during the COVID-19 pandemic 2020-2021: A death certificates study in a middle-income country. *Lancet regional health. Americas*, (13), 100303. <https://doi.org/10.1016/j.lana.2022.100303>
- Panahi, Y., Gorabi, A. M., Talaei, S., Beiraghdar, F., Akbarzadeh, A., Tarhriz, V., & Mellatyar, H. (2023). An overview on the treatments and prevention against COVID-19. *Virology journal*, 20(1), 23. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12985-023-01973-9>
- Posit team. (2022). RStudio: Integrated Development Environment for R. Posit Software, PBC, Boston, MA. Disponible en <http://www.posit.co/>. Consultado el 20 de septiembre de 2023.
- Rehman, S. U., Rehman, S. U., & Yoo, H. H. (2021). COVID-19 challenges and its therapeutics. *Biomedicine & pharmacotherapy = Biomedecine & pharmacotherapie*, (142), 112015. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.112015>

- Ruiz-Romero, Alfonso, Quijano-Castro, Félix O., López-Romero, Ricardo, Chavarría-Arriaga, Xiaomei, Torres, Michelle, & Salcedo, Mauricio. (2022). Inmunidad y vacunas contra el COVID-19. Revisando las bases. *Gaceta Médica de México*, 158(5), 327-333. <https://doi.org/10.24875/gmm.22000092>
- Sánchez-Carrillo, C.I. (2023). Desarrollo de un índice espacial dinámico de vulnerabilidad ante COVID-19 en México. [Tesis de Doctorado]. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Sierra-Alcocer, R., López-Ramírez, P., & González-Farías, G. (2022). A Dynamic Social Vulnerability Index to COVID-19 in Mexico. En R. Tapia-McClung, O. Sánchez-Siordia, K. González-Zuccolotto, H. Carlos-Martínez (Eds.), *Advances in Geospatial Data Science*. iGISc 2021. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-98096-2_13
- SS/DGE (Secretaría de Salud/Dirección General de Epidemiología). (2023). Datos abiertos: Bases históricas COVID-19. Disponible en <https://www.gob.mx/salud/documentos/datos-abiertos-152127>. Consultado el 17 de abril de 2023.
- UNFPA (Fondo de la Población de las Naciones Unidas). (2022). Población mundial. Disponible en <https://www.unfpa.org/es/data/world-population-dashboard>. Consultado el 01 de noviembre de 2023.
- Wang, D., Hu, B., Hu, C., Zhu, F., Liu, X., Zhang, J., Wang, B., Xiang, H., Cheng, Z., Xiong, Y., Zhao, Y., Li, Y., Wang, X., & Peng, Z. (2020). Clinical Characteristics of 138 Hospitalized Patients With 2019 Novel Coronavirus-Infected Pneumonia in Wuhan, China. *JAMA*, 323(11), 1061–1069. DOI: <https://doi.org/10.1001/jama.2020.1585>
- Xia, C., Bergquist, R., Lynn, H., Hu, F., Lin, D., Hao, Y., Li, S., Hu, Y., & Zhang, Z. (2017). Village-based spatio-temporal cluster analysis of the schistosomiasis risk in the Poyang Lake Region, China. *Parasites & vectors*, 10(1), 136. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13071-017-2059-y>